

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE
(CONCENTRATION EN GÉNIE MÉCANIQUE)

PAR
MOHAMED REBAI

ESSAIS ET MODÉLISATION EXPÉRIMENTALE D'UNE GÉNÉRATRICE BI-
CARBURANT HYDROGÈNE-ESSENCE

Mars 2017

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

Cet essai (2^e ou 3^e cycle) ou mémoire a été dirigé par :

Soussou Kelouwani, directeur de recherche, Professeur

Département génie mécanique, UQTR

Yves Dubé, codirecteur de recherche, Professeur

Département génie mécanique, UQTR

Jury d'évaluation de l'essai ou du mémoire :

Alben Cardenas Gonzalez, Agent de recherche

Institut de recherche sur l'hydrogène, UQTR

James Agbebavi, Professeur

Département génie chimique, UQTR

Soussou Kelouwani, Professeur

Département génie mécanique, UQTR

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

Résumé

Aujourd’hui, l’utilisation des véhicules électriques est freinée par des défis relatifs au stockage de l’énergie. En effet, les batteries constituent principalement la seule source énergétique étant limitée tout autant par leur stockage que par leurs autonomies inférieures à celles des sources fossiles. Afin de prolonger l’autonomie des véhicules électriques, l’hybridation, c’est-à-dire l’ajout d’une deuxième source d’énergie dans le véhicule, se présente sous plusieurs solutions. De ce fait, ce projet de maîtrise s’intéresse à l’extension de l’autonomie des véhicules électriques à l’aide d’une génératrice bi-carburant qui peut fonctionner avec différentes fractions du mélange hydrogène-essence. L’utilisation de ces deux carburants a pour but de profiter des avantages spécifiques à chaque combustible, d’augmenter l’efficacité thermique et de minimiser le dégagement des gaz polluants, surtout le taux d’émission d’oxyde d’azote. L’objectif principal de ce travail est de modéliser le comportement de la génératrice et optimiser son efficacité. En effet, son rendement optimal en fonction de la puissance à délivrer, de la vitesse de rotation et du pourcentage volumique pour chaque combustible sont étudiés. Les objectifs secondaires sont d’intégrer cette nouvelle approche dans le système de gestion énergétique du véhicule afin de minimiser la dégradation des batteries et le coût du carburant. La méthodologie du travail consiste, tout

d'abord, à la réalisation de la cartographie du groupe électrogène qui sert à identifier et caractériser la génératrice pour la totalité des régimes et les différents mélanges hydrogène-essence puisque le fonctionnement de la génératrice est non-linéaire. Ensuite, l'élaboration d'un modèle paramétrique adaptatif du système par l'utilisation de l'approche des moindres carrés récursifs est réalisée. Par la suite, un algorithme d'optimisation connecté avec le modèle paramétrique permet d'obtenir la puissance à délivrer, la vitesse de rotation et le pourcentage volumique de chaque combustible permettant un meilleur rendement et une faible émission d'oxyde d'azote. Finalement, l'implémentation d'un cycle de conduite d'un véhicule électrique hybride, en tenant compte de l'efficacité de la génératrice, des émissions d'oxyde d'azote et de la durée de vie des batteries est effectuée afin de d'obtenir une meilleure gestion énergétique. Les résultats de la cartographie donnent un avantage pour les mélanges riches en hydrogène de 60% à 100%. Qui plus est, en plus de réduire les émissions polluantes, l'efficacité de la génératrice hybride est multipliée presque par deux par rapport à la génératrice consommant seulement l'essence pure comme carburant. D'autre part, le modèle des moindres carrés récursifs en ligne présente la plus faible erreur relative (6,93%) comparée aux autres approches telles que le modèle des moindres carrés récursifs hors-ligne et le modèle de réseau de neurones, démontrant ainsi l'intérêt de l'adoption de cette approche dans la suite de l'étude. D'autre part, en utilisant notre méthode de suivi, c'est-à-dire l'optimisation par la méthode de recherche linéaire, une augmentation du rendement de la

génératrice (7,11%) est notée comparativement à l'optimisation par une méthode industrielle à vitesse constante. Pour conclure, une gestion énergétique optimale du véhicule électrique offre un meilleur rendement de la génératrice, une réduction des émissions polluantes ainsi qu'une augmentation de la durée de vie des batteries.

Remerciements

C'est avec un grand plaisir que nous réservons ces quelques lignes en signe de gratitude et de reconnaissance à tous celles et ceux qui ont contribué de près et de loin à la réussite de mes travaux de recherche.

Je voudrais remercier tout spécialement mon directeur de recherche, **M. Soussou Kelouwani**, professeur au département de génie mécanique à l'UQTR, pour son soutien et ses conseils qui ont été nombreux et indispensables dans la réussite de mes travaux.

Un grand merci pour mon codirecteur **M. Yves Dubé**, professeur au département de génie mécanique à l'UQTR pour avoir contribué de manière significative, par sa disponibilité et ses précieux commentaires lors de nombreuses discussions.

Tous mes remerciements s'adressent à **M. Kodjo Agbossou** professeur au département de génie électrique et de génie informatique à l'UQTR. Ses suggestions et ses critiques constructives m'ont permis de réussir mes travaux dans la bonne direction.

Je désire remercier **Lamoussa Jacques Kéré** mon collègue de maîtrise et mes collègues de laboratoire IRH pour leurs supports et les multiples discussions, qui étaient toujours pertinents et incitant à la recherche.

Table des matières

Résumé.....	i
Remerciements.....	iv
Table des matières.....	v
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	xiii
Liste des abréviations.....	xiv
Liste des symboles	xv
Chapitre 1 - Introduction	1
1.1 Contexte général.....	4
1.2 Problématique	4
1.3 Objectifs	5
1.4 Méthodologie	6
1.5 Structure du mémoire.....	7
Chapitre 2 - État de l'art	8
2.1 Système hybride pour les véhicules électriques.....	8
2.2 Architectures des véhicules hybrides à base des groupes électrogènes	10

2.3	Généralités sur les groupes électrogènes.....	13
2.3.1	Utilisation du moteur à essence	16
2.3.2	Utilisation du moteur à hydrogène.....	17
2.4	Mélange hydrogène-combustible fossile.....	18
2.4.1	Rendement thermique	20
2.4.2	Taux d'émission de NO _x	21
2.4.3	Taux d'émission de HC	22
2.4.4	Taux d'émission de CO	23
2.5	Modélisation de la génératrice	24
2.6	Optimisation.....	24
2.7	Conclusions.....	25
Chapitre 3 -	Caractérisation, identification et optimisation de la génératrice bi-carburant.....	26
3.1	Présentation de la génératrice bi-carburant	26
3.2	Procédure pour la réalisation de la cartographie	29
3.2.1	Définition des différents paramètres de la génératrice	29
3.2.2	Démarche suivie dans les essais de la cartographie.....	30
3.3	Résultats de la cartographie de la génératrice bi-carburant	31
3.3.1	Rendement du groupe électrogène.....	31
3.3.2	Émission de NO _x	35

3.3.3	Émission de CO ₂	37
3.4	Modélisation de la génératrice bi-carburant.....	38
3.4.1	Élaboration du modèle	38
3.4.2	Identification des paramètres du modèle	40
3.5	Optimisation du rendement de la génératrice bi-carburant.....	42
3.6	Suivie du rendement de la génératrice	44
3.7	Conclusion	45
Chapitre 4 - Modélisation et gestion de l'énergie du VEH		46
4.1	Modèle longitudinal du véhicule.....	46
4.2	Modèle de la batterie acide-plomb.....	49
4.3	Modèle de dégradation de la batterie	53
4.4	Gestion énergétique du VEH	56
4.5	Conclusion	59
Chapitre 5 - Validation théorique et expérimentale.....		60
5.1	Banc d'essai	60
5.2	Validation de la méthode de suivi de rendement de la génératrice bi-carburant.....	62
5.2.1	Modèle en ligne de la génératrice	62
5.2.2	Recherche des conditions optimales.....	65
5.3	Validation de la méthode de gestion énergétique	69

5.3.1	Présentation du scénario	69
5.3.2	Procédure suivie dans la simulation.....	71
5.3.3	Résultats de la simulation	74
5.4	Conclusion	79
Chapitre 6 - Conclusion, discussions et perspectives		81
6.1	Conclusion et discussions	81
6.2	Perspective	83
Références.....		84
Annexe A-	Fiches techniques de la génératrice	88
Annexe B-	Spécification techniques du véhicule Némo original	90
Annexe C-	Articles de conférence et de revue.....	91

Liste des figures

Figure 1.1 : Consommation d'énergie par secteur d'activité au Québec en 2012.....	1
Figure 1.2 : Répartition des émissions de GES au Québec, en 2012, par secteur d'activité ..	2
Figure 2.1 : Diagramme de Ragone des systèmes de stockage pour applications de transport [14]	10
Figure 2.2 : Architecture d'un véhicule hybride série [16]	11
Figure 2.3 : Architecture d'un véhicule hybride parallèle [16]	12
Figure 2.4 : Architecture d'un véhicule série-parallèle [16].....	12
Figure 2.5 : Cycle à deux temps [18]	14
Figure 2.6 : Cycle à quatre temps [18]	15
Figure 2.7 : Taux d'émission de NO_x en fonction du coefficient stoechiométrique [17].....	18
Figure 2.8 : Variation de rendement thermique en fonction de la vitesse de rotation pour différents pourcentages de l'hydrogène [30]	21
Figure 2.9 : Variation de taux de NO_x en fonction de la vitesse de rotation et pour différents pourcentages de l'hydrogène [30]	22
Figure 2.10 : Variation de l'émission des HCs en fonction de la vitesse de rotation pour différents pourcentages de l'hydrogène [30]	22

Figure 2.11 : Variation de l'émission de CO en fonction de la vitesse de rotation pour différents pourcentages de l'hydrogène [30]	23
Figure 3.1 : Principale modification de la génératrice bi-carburant : 1- Capteur arbre à cames; 2- Injecteur H_2 ; 3-Injecteur essence; 4- Contrôleur moteur	27
Figure 3.2 : Banc d'essai de la génératrice bi-carburant	28
Figure 3.3 : Diagramme d'Ishikawa lié à la génératrice	29
Figure 3.4 : Courbe iso rendement pour l'essence pure	33
Figure 3.5 : Courbe iso rendement pour un mélange 60% hydrogène et 40% essence	33
Figure 3.6 : Courbe iso rendement pour un mélange 80% hydrogène et 20% essence	34
Figure 3.7 : Courbe iso rendement pour l'hydrogène pur	35
Figure 3.8 : L'évolution des émissions de NO_x et la température en fonction RPM pour une puissance $P_G=1000W$	36
Figure 3.9 : L'évolution des émissions de NO_x et la température en fonction RPM pour une puissance $P_G=2050W$	36
Figure 3.10 : L'évolution de l'émission de CO_2 en fonction RPM pour une puissance $P_G=1000W$	37
Figure 3.11 : L'évolution de l'émission de CO_2 en fonction RPM pour une puissance $P_G=2050W$	37
Figure 3.12 : Représentation 3D du rendement du générateur pour le mélange hydrogène pur [33]	39
Figure 3.13 : Algorithme de recherche linéaire modifiée [40].....	44

Figure 3.14 : Structure générale de l'algorithme proposé.....	45
Figure 4.1 : Architecture du VEH	46
Figure 4.2 : Diagramme de force appliqué au véhicule	47
Figure 4.3 : Circuit électrique équivalent de batterie acide-plomb [41]	49
Figure 4.4 : Capacité en fonction du courant de décharge [43]	52
Figure 4.5 : Nombre de cycle versus la profondeur de décharge [43]	54
Figure 5.1 : Véhicule électrique hybride d'essai Némo	60
Figure 5.2 : Interface de commande LabVIEW	61
Figure 5.3 : Cycle de chargement de la génératrice. (a) Profil de vitesse ; (b) Puissance à délivrer ; (c) Variation du pourcentage des deux combustibles.....	62
Figure 5.4 : Validation expérimentale du modèle de la génératrice. (a) Comparaison du rendement entre les valeurs mesurées, $MCR_{hors\ ligne}$ et $MCR_{en\ ligne}$; (b) Erreur relative	63
Figure 5.5 : Comparaison entre le modèle de $MCR_{En\ ligne}$ et le modèle de réseau de neurones. (a) Rendement de la génératrice ; (b) Erreur relative.....	65
Figure 5.6 : Scénario pour un VEH basé sur un générateur bi-carburant. (a) : Cycle de conduite US06 ; (b) : Puissance de traction électrique ; (c) : Distribution de l'énergie électrique	66
Figure 5.7 : Condition optimale pour le générateur : (a) Puissance du générateur imposée ; (b) : Vitesse de rotation optimale ; (c) Pourcentage optimal de chaque carburant	67
Figure 5.8 : Comparaison de l'évolution du rendement entre les deux approches pour un scénario de conduite d'un VEH basé sur un générateur bi-combustible	68

Figure 5.9 : Trajectoire quotidienne d'un véhicule de livraison.....	69
Figure 5.10 : Cycle de vitesse Némo	70
Figure 5.11 : L'algorithme de gestion énergétique du VEH à base d'une génératrice bi-carburant.....	73
Figure 5.12 : L'ordre des itérations dans le parcours	74
Figure 5.13 : Évolution de l'énergie restante pour une batterie 10 kWh & $\xi=0.01$	77
Figure 5.14 : Évolution de l'énergie restante pour une batterie 10 kWh & $\xi=0.5$	78

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Propriétés de l'essence, du diesel et de l'hydrogène [17]	14
Tableau 3.1 : Caractéristique du groupe électrogène	26
Tableau 3.2 : Paramètres d'entrée avec leurs différents niveaux	31
Tableau 4.1 : Capacité de la batterie totale suivant la profondeur de décharge	55
Tableau 5.1 : Paramètres du Némo	61
Tableau 5.2 : Variation de la profondeur de décharge suivant les scénarios	74
Tableau 5.3 : Résultat de la simulation pour une batterie de 10 kWh	75

Liste des abréviations

CA	Courant alternatif
CC	Courant continu
CO	Monoxyde de carbone
CO ₂	Dioxyde de carbone
Ess	Essence
GES	Gaz à effet de serre
H ₂	Hydrogène
HC	Hydrocarbure
IRH	Institut de recherche sur l'hydrogène
MCI	Moteur à combustion interne
MCR _{en ligne}	Moindres carrés récursifs en ligne
MCR _{hors ligne}	Moindres carrés récursifs hors-ligne
NO _x	Oxyde d'azote
RNA	Réseau de neurones artificiels
RPM	Vitesse de rotation du moteur à combustion interne
SGE	Système de gestion énergétique
SIG	Système d'information géographique
VE	Véhicule électrique
VEH	Véhicule électrique hybride
VEHPC	Véhicule électrique hybride à pile à combustible
VER	Véhicule électrique rechargeable

Liste des symboles

Symboles alphabétiques

A_v	Surface frontale du véhicule
C_B	Capacité des batteries
C_d	Coefficient de résistance de l'air
$C_{dépensée}$	Capacité de la batterie dépensée
C_e	Coût de l'énergie sous forme de combustible
C_{H_2-Ess}	Coefficient qui représente la nature de mélange hydrogène et essence
C_{nom}	Capacité nominale de la batterie
C_{totale}	Capacité totale de la batterie durant sa durée de vie
C_u	Coût de l'usure des batteries
C_l	Condensateur de la branche principale de la batterie
DOD	Profondeur de décharge des batteries
DOC	Profondeur de charge des batteries
E_B	Énergie des batteries
E_e	Énergie électrique estimée pour atteindre le point final
E_m	Tension de la branche principale
$F_{Motrice}$	Force motrice d'entrainement
F_g	Force de gravité
$F_{aéro}$	Force aérodynamique

F_I	Force de l'inertie du véhicule
F_f	Force de frottement
g	Accélération de pesanteur
I_p	Courant dans la branche parasite
$J(k)$	Fonction de coût
M	Masse du véhicule
\dot{m}_{ESS}	Débit massique de l'essence
\dot{m}_{H_2}	Débit massique de l'hydrogène
N_{cycle}	Nombre de cycle de charge et décharge des batteries
P_B	Puissance des batteries
PCI_{ESS}	Pouvoir calorifique de l'essence
PCI_{H_2}	Pouvoir calorifique inférieur de l'hydrogène
P_e	Puissance électrique totale consommée par le véhicule
P_G	Puissance électrique de la génératrice
p_k	Direction de descente
P_{Mec}	Puissance mécanique de traction du véhicule
P_{1Ref}	Puissance de référence pour la première interface de puissance
P_{2Ref}	Puissance de référence pour la deuxième interface de puissance
RPM	Vitesse de rotation du moteur à combustion interne
R_0	Résistance interne de la batterie
R_I	Résistance de la batterie qui représente le phénomène de décharge
R_2	Résistance de la batterie dans la branche principale
SOC	État de charge des batteries
T	Température interne de la batterie

T_f	Température de congélation de l'électrolyte
v	Vitesse linéaire du véhicule
\dot{v}	Accélération du véhicule

Symboles grecs

η	Rendement de la génératrice
η_{conv}	Rendement convertisseur entre les batteries et le moteur de traction
η_{diff}	Rendement du différentiel
η_g	Rendement global
η_{mot}	Rendement du moteur de traction
η_{tran}	Rendement de la transmission
Ω	Vitesse de rotation du moteur à combustion interne
Φ	Coefficient stœchiométrique
θ_i	Paramètre du modèle de la génératrice bi-carburant
ρ	Masse volumique de l'hydrogène
ρ_a	Densité de l'air
μ	Coefficient de résistance au roulement
α	Pente de la route
α_{DOD}	Facteur de pénalité
ξ	Coefficient de dégradation des batteries
φ	Vecteur de régression
θ	Vecteur de paramètres
ΔT	Période d'échantillonnage

Chapitre 1 - Introduction

Les activités humaines sont à l'origine du rejet de nombreuses substances dans l'atmosphère. Elles constituent des pollutions néfastes nuisant à la santé humaine. Ce problème majeur n'a pas pu être résolu malgré l'existence des techniques avancées à travers l'installation des systèmes de filtrations dans les différents secteurs. En effet, la majorité des émissions de gaz toxique provient des moteurs thermiques, ceci est dû essentiellement à l'utilisation des combustibles fossiles. Au Canada, précisément dans la province Québec, 32 % de consommation de l'énergie provient du secteur du transport [1]. La figure 1.1 illustre la classification de la consommation énergétique au Québec pour l'année 2012.

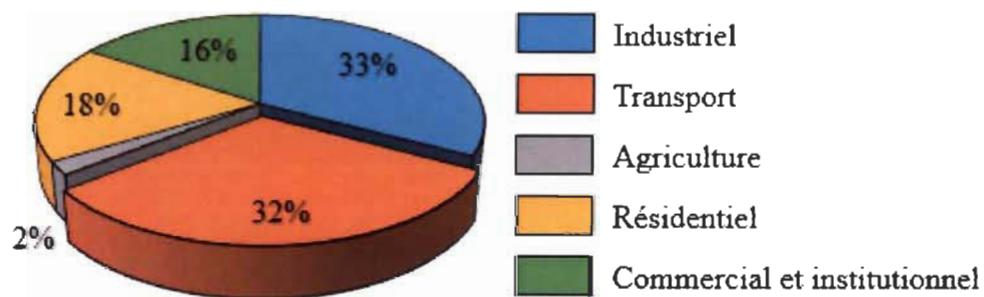


Figure 1.1 : Consommation d'énergie par secteur d'activité au Québec en 2012

D'après la répartition de la consommation énergétique, on constate que le secteur du transport vient en deuxième position. Un inventaire québécois permet de visualiser le niveau des émissions des gaz à effets de serre (GES) par secteur, sur la figure 1.2 [2], montre que même si le secteur industriel consomme plus d'énergie, il émet moins des émissions des

GES. Ce phénomène révèle l'utilisation de méthodes efficaces d'exploitation de l'énergie dans le secteur industriel qui génère moins des émissions polluantes. Par contre, le secteur du transport utilise les moteurs à combustion interne qui produisent énormément des émissions polluantes. Dans ce contexte, la recherche est orientée vers de nouvelles techniques dans le domaine du transport dans le but de minimiser les émissions toxiques. Plusieurs solutions en cours d'exploitation traitent l'efficacité énergétique plus précisément des énergies renouvelables afin de minimiser l'utilisation des hydrocarbures fossiles.

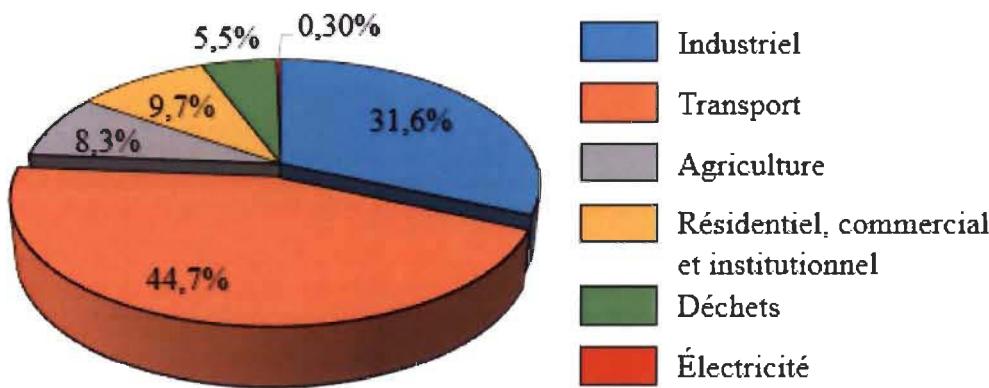


Figure 1.2 : Répartition des émissions de GES au Québec, en 2012, par secteur d'activité

Les réserves de pétrole sont largement épuisées et la criticité de ce problème augmente de plus en plus à cause de l'augmentation du nombre de véhicules, ce qui incite à réfléchir et à exploiter d'autres sources d'énergies renouvelables [3]. Le gouvernement du Canada a pris la décision d'encourager l'utilisation des transports écologiques qui vise à protéger l'environnement sur le plan recherche et développement ainsi que sur le plan pratique par l'électrification des transports et la mise en place de plusieurs bornes de recharge des véhicules électriques (VEs). De ce fait, le VE apparaît comme une solution importante pour remplacer les véhicules traditionnels utilisant les moteurs à combustion interne à base des combustibles fossiles. En effet, ces véhicules utilisent des batteries pour stocker de l'énergie

électrique qui est chargée à travers une source d'énergie extérieure provenant de la part des éoliennes, panneaux solaires, des turbines hydrauliques ou du réseau électrique [4].

Au début, la commercialisation des véhicules électriques a vécu plusieurs difficultés économiques qui sont principalement reliées au coût élevé de fabrication ainsi qu'à la longue durée de recharge des batteries, l'absence de l'infrastructure des stations de recharge et leurs performances par rapport aux véhicules quotidiens [5]. Les exigences demandées par les fabricants des batteries sur le mode de fonctionnement sont trop sévères et la mauvaise utilisation décroît la durée de vie [6]. Cependant, les avantages des VEs envers le problème de pollution dans le monde et l'épuisement du pétrole permettent à cette solution de se défendre et de résister. L'importance de l'utilisation de ces véhicules se manifeste principalement dans leur avantage environnemental par un zéro émission de GES, mais il reste des points à améliorer concernant l'autonomie. Pour ce faire, deux solutions qui sont envisagées : La première était l'augmentation de l'autonomie de ces véhicules à travers l'ajout d'une quantité d'énergie dans les batteries, mais ceci n'a pas pu résoudre le problème puisqu'elles sont dispendieuses. Quant à la deuxième était l'orientation vers l'hybridation des véhicules électriques à batteries par l'ajout d'une deuxième source d'énergie, néanmoins cette source doit répondre à plusieurs critères tels que le rendement, le niveau d'émissions polluantes et le coût. Dans le cas des VEHs à base d'une génératrice, leurs fonctionnement dépend de plusieurs paramètres liés à la voiture tels que la conduite, l'état de vieillissement des différentes composantes de la voiture (les roulements, état des pneus, les éléments de transmission, etc.), le trajet parcouru (le coefficient de frottement de la route, la pente de la route, etc.) [7].

1.1 Contexte général

Plusieurs solutions d’hybridation des VEs sont en cours d’exploitation dans le secteur automobile. La présence de l’énergie renouvelable dans la solution d’hybridation offre un taux élevé de réussite pour qu’elle soit classée parmi les meilleures solutions et d’être exploitée dans l’avenir. L’institut de recherche sur l’hydrogène (IRH) travaille sur plusieurs axes de recherche liés à la production, le stockage et de l’utilisation d’hydrogène (H_2). Dans ce cadre, une génératrice bi-combustible hydrogène-essence, a été installée sur un véhicule électrique (VE) d’essai pour assurer l’hybridation. Ce projet étudie le comportement de la génératrice avec les deux combustibles hydrogène-essence face à l’efficacité et les émissions polluantes.

1.2 Problématique

La non-linéarité d’un système dynamique, comme la génératrice, rend la modélisation de ce système compliqué par la présence de la MCI. Les modèles thermodynamiques de la MCI sont difficiles à intégrer dans les algorithmes d’optimisation à cause de la résolution des équations différentielles qui nécessitent un temps de calcul assez élevé.

L’approche traditionnelle d’optimisation du rendement de la génératrice se base essentiellement sur la cartographie statique de la machine, n’incluant pas le changement dynamique du comportement du système. De cette façon, elle n’est clairement pas efficace dans la détermination du point optimal du rendement. Malheureusement, le vieillissement des composantes influençant le comportement de la génératrice implique une variation du point optimal. L’algorithme d’optimisation doit répondre à plusieurs contraintes telles que le faible temps de simulation et la recherche du point optimal de la génératrice en fonction des

trois paramètres d'entrée (puissance, vitesse de rotation, pourcentage de chaque carburant). Qui plus est, le fonctionnement de la génératrice dépend de plusieurs facteurs reliés à l'état de charge des batteries, la puissance demandée par le conducteur et la distance à parcourir. Dans cet aspect, une bonne gestion énergétique devrait être approvisionnée dans le VEH pour protéger ces différentes parties. Pour ce faire, l'incorporation du modèle et l'algorithme d'optimisation de la génératrice dans le système de gestion énergétique du VEH permet de bénéficier du rendement optimal du groupe électrogène.

D'après cette problématique, plusieurs questions de recherche se posent légitimement telles que :

- Peut-on bénéficier des avantages des deux combustibles dans le MCI ?
- Comment peut-on chercher en temps-réel les conditions optimales de la génératrice bi-carburant avec une méthode simple ?
- Comment peut-on introduire cette approche dans le système de gestion énergétique (SGE) dans un VEH ?

1.3 Objectifs

Le but de ce projet est d'étudier la génératrice bi-carburant hydrogène-essence comme une solution prometteuse pour les VEHs. La problématique posée précédemment permet d'élaborer les objectifs de notre étude. Les principaux objectifs sont les suivants :

- Modélisation empirique en ligne de la génératrice bi-carburant en fonction des différents paramètres.
- Recherche du rendement optimal de la génératrice.
- Déterminer les conditions optimales de faible émission de NO_x .

Les sous-objectifs de ce travail peuvent être définis comme suit en se référant à la problématique et le corps du travail :

- Implantation de l'algorithme de suivi dans un scénario réel pour un VE.
- Augmentation de l'autonomie du VEH ainsi que la protection de mode d'emploi des batteries dans les VEHs.

Pour conclure, le but est de modéliser et optimiser la génératrice bi-carburant pour pouvoir l'utiliser dans le cadre de gestion énergétique.

1.4 Méthodologie

Afin de parvenir à ces objectifs, il est nécessaire d'adopter une chronologique tout au long de ce projet. La méthodologie à suivre dans cette étude se répartie principalement en cinq points :

1. Caractérisation de la génératrice : Cette étape permet d'avoir une idée sur le comportement de la génératrice envers du rendement et le niveau d'émissions pour un fonctionnement bi-combustible, de réaliser des essais à plusieurs pourcentages de mélanges hydrogène-essence avec un balayage de tous les régimes et puissances à délivrer. Ces expériences servent à construire la cartographie de la génératrice.

2. Réalisation d'un modèle empirique : Une analyse experte des résultats enregistrés à travers la cartographie va servir à identifier les différentes zones de meilleur rendement et de faible émission de NO_x pour les faibles, moyens et grands régimes.

3. Développement d'un algorithme d'optimisation : Cet algorithme a pour but d'optimiser le fonctionnement de la génératrice par la recherche de meilleures conditions opératoires (puissance à délivrer, vitesse de rotation de la machine thermique (*RPM*) et les

pourcentages d'hydrogène et d'essence nécessaire) pour charger les batteries et aussi pour alimenter le moteur électrique d'entraînement. Cela nécessite de tenir en compte les différents paramètres du véhicule et du circuit parcouru qui influencent la consommation de l'énergie.

4. Gestion énergétique d'un VEH à base d'une génératrice : Optimisation du fonctionnement des deux sources d'énergie à travers un cycle de conduite en fonction de la consommation des deux carburants et la dégradation des batteries.

5. Validation expérimentale et théorique : Les tests expérimentaux ainsi que les simulations permettent d'éprouver notre démarche suivie.

1.5 Structure du mémoire

Ce mémoire se base sur six chapitres comme suit : Le deuxième chapitre détaille les travaux effectués précédemment et les méthodologies employées. La caractéristique, la modélisation et l'optimisation de la génératrice bi-carburant sont présentées dans le troisième chapitre. Puis, le quatrième chapitre présente les différents modèles du VE ainsi que la gestion énergétique. Les résultats trouvés sont présentés dans le cinquième chapitre. Le mémoire se termine par une conclusion générale, discussions et les perspectives dans le sixième chapitre.

Chapitre 2 - État de l'art

Afin de pouvoir résoudre la problématique posée dans le premier chapitre, il est important de passer par une recherche bibliographique. Cette recherche va servir à découvrir où les chercheurs sont arrivés dans le domaine d'hybridation des véhicules à l'aide des groupes électrogènes qui utilisent l'essence, l'hydrogène ou bien le mélange des deux combustibles. Par la suite, il faut connaître les avantages et les désavantages de chaque combustible sur le rendement du MCI et les taux des émissions afin de définir la méthodologie à suivre dans notre étude.

2.1 Système hybride pour les véhicules électriques

Les véhicules électriques (VEs) se présentent comme des véhicules écologiques pour l'environnement (zéro émission). Cependant, cette solution a divers défis à surmonter afin de se rapprocher des véhicules conventionnels du point de vue autonomie. Concernant l'autonomie, les batteries actuelles possèdent un temps de recharge qui est très long, une dégradation qui dépend de plusieurs facteurs (froid, nombre de cycles de charge/décharge, profondeur de décharge, etc.) et une durée de vie réduite [8]. Afin de s'approcher des véhicules classiques, l'hybridation apparaît comme solution pour produire de l'énergie électrique, rechargeant ainsi les batteries lorsqu'elles sont en train de se décharger. L'hybridation est alors l'ajout d'une deuxième source d'énergie avec les batteries dans le véhicule. Les critères de choix de cette deuxième source d'énergie sont le coût d'achat, la

résistance dans les conditions climatiques (hivernales, estivales) et les émissions polluantes. Le système de piles à combustibles se présente donc comme une solution intéressante. Elles ne produisent pas des émissions polluantes (zéro émission) et le rendement de ce système peut atteindre 60% comparé à d'autres systèmes. Néanmoins, plusieurs recherches sont en cours [9-12], pour remédier à des difficultés techniques tels que le démarrage à froid de la pile à combustible lorsque la température est inférieure à 0°C. À ce jour, la pile à combustible ne supporte pas les variations rapides de charge qui entraînent une dégradation forte dans le système. Une étude comparative [5] des véhicules électriques hybrides à piles à combustible (VEHPC) et avec un véhicule conventionnel montre une augmentation de 30% du prix total du VEHPC par rapport au véhicule traditionnel malgré les avantages et les rabais offerts pour ce type de véhicules. En outre, le prix de la pile à combustible représente 24% du prix du véhicule traditionnel qui reste un inconvénient dans la commercialisation de ces véhicules. D'autre part, les groupes électrogènes figurent comme une solution d'hybridation qui utilise l'essence, le Diesel ou l'hydrogène comme carburant moins polluant. Ces groupes présentent un rendement inférieur à celui obtenu par les piles à combustible, en plus de générer des taux d'émissions polluantes, mais les avantages sont au niveau du coût réduit comparé à la pile à combustible et de ne pas présenter de problèmes dans des conditions hivernales ou estivales.

Aussi, les termes de puissance massique et la quantité d'énergie massique qui diffèrent d'un système à un autre sont à considérer. La figure 2.1 permet de différencier chaque solution par ses caractéristiques. Les piles à combustible et les groupes électrogènes possèdent une grande quantité d'énergie massique, ce qui permet de charger les batteries pendant une longue période, mais, ne peuvent pas délivrer de grandes puissances. Les super condensateurs, quant à eux, possèdent une grande puissance massique qui peut servir à

supporter les pics de puissances demandés par le moteur électrique du véhicule pour une période de temps très limité. Des recherches sont en cours pour exploiter les piles à combustible et les super condensateurs ensemble d'un VEH pour bénéficier des deux avantages de système [13]. Cependant, cette solution reste toujours dispendieuse pour la commercialisation de cette architecture.

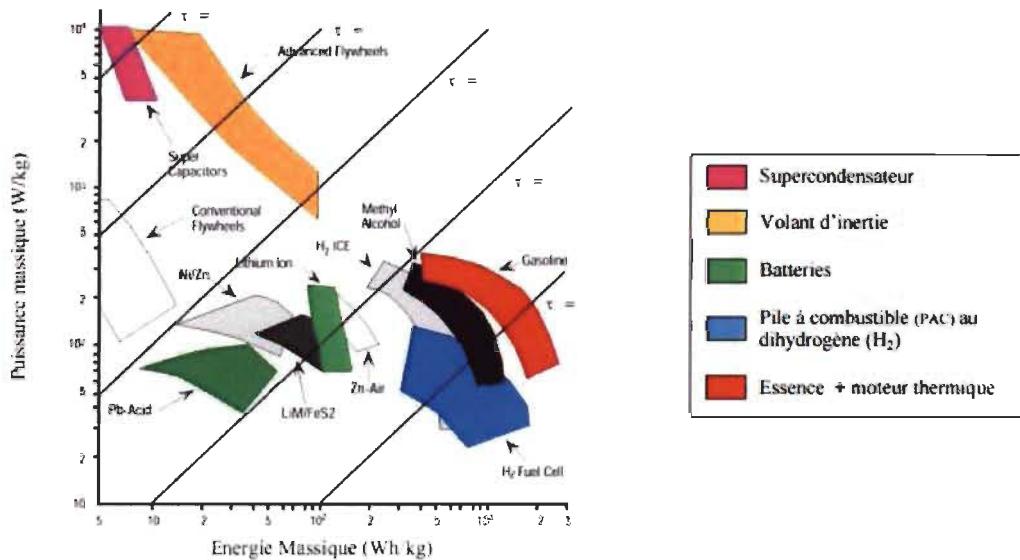


Figure 2.1 : Diagramme de Ragone des systèmes de stockage pour applications de transport [14]

2.2 Architectures des véhicules hybrides à base des groupes électrogènes

Les VEHs sont différenciés par la source d'énergie ajoutée (générateur, pile à combustible, MCI, etc.) et la méthode de branchement de cette source avec les batteries. Emadi et al, ont travaillé sur la topologie des véhicules et ont défini trois solutions qui figurent comme suit [15, 16] :

- Véhicules hybrides séries : le moteur thermique joue un seul rôle qui est la production du mouvement mécanique pour alimenter la génératrice. La puissance délivrée par la génératrice sert à recharger les batteries. Lorsque la batterie atteint un niveau minimal, le

moteur à combustion s'allume pour entraîner la génératrice afin de recharger les batteries. La puissance stockée dans les batteries alimente directement le moteur électrique de propulsion après avoir converti le courant continu (CC) en courant alternatif (CA). La flèche représentée dans la figure 2.2 montre le transfert de puissance. Dans cette topologie, la génératrice est seulement responsable pour la recharge de la batterie afin de la faire fonctionner à son rendement maximal. Par contre, la batterie est le seul organe qui supporte la puissance demandée par le moteur de propulsion.

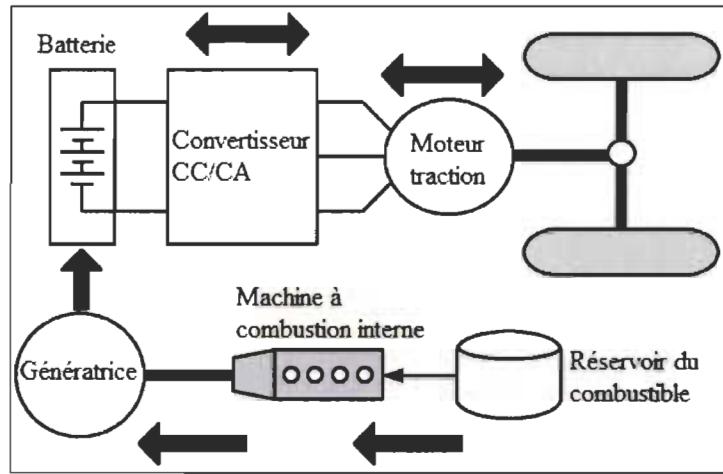


Figure 2.2 : Architecture d'un véhicule hybride série [16]

- Véhicules hybrides parallèles : à travers cette configuration, la puissance mécanique donnée à l'entrée du système de transmission mécanique peut être parvenue par le moteur à combustion interne ou bien le moteur électrique alimenté par la batterie telle qu'elle est représentée dans la figure 2.3. Le système de couplage permet de transmettre le mouvement mécanique des deux sources vers le système de transmission. La stratégie la plus utilisée dans cette configuration en parallèle est la suivante : pendant une demande de faible puissance, la consigne est donnée au moteur électrique, alors que, pour la forte puissance, elle est donnée au moteur thermique. Lorsque le moteur thermique est en cours d'utilisation, le moteur de

traction peut fonctionner comme une génératrice et recharger la batterie qui est un avantage important.

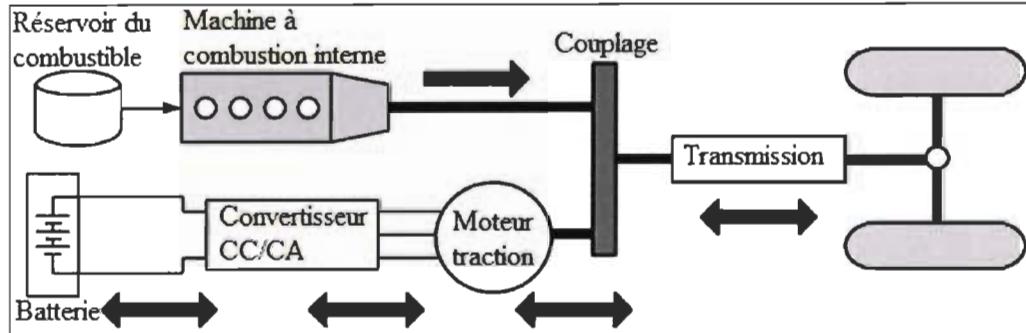


Figure 2.3 : Architecture d'un véhicule hybride parallèle [16]

- Véhicules hybrides séries-parallèles : c'est la combinaison des deux méthodes précédentes pour bénéficier des avantages de chaque topologie. Le véhicule peut donc travailler avec la configuration en série ou en parallèle suivant les scénarios prédéfinis.

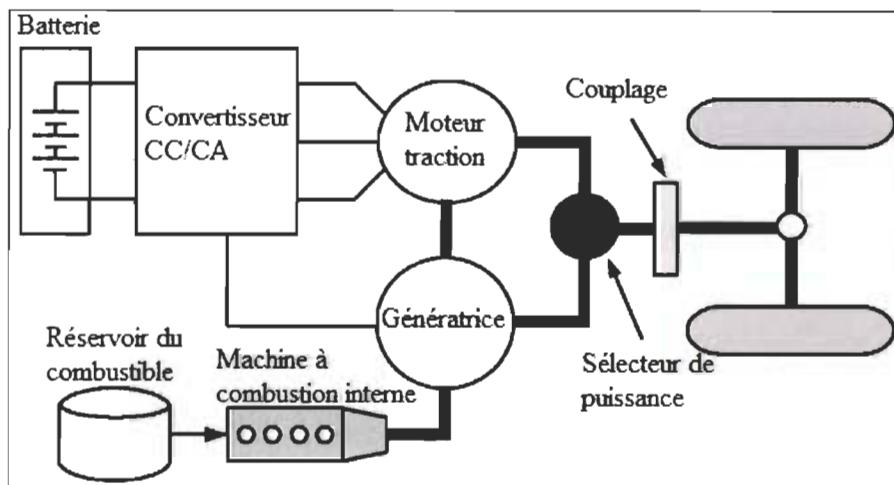


Figure 2.4 : Architecture d'un véhicule série-parallèle [16]

La figure 2.4 montre cette architecture qui présente des composantes électriques et mécaniques qui ne sont pas utilisées dans les topologies série ou parallèle. En effet, le

sélecteur de puissance permet de répartir la puissance mécanique générée par le moteur thermique et le moteur électrique de traction. La génératrice alimente directement le moteur électrique et aussi peut servir à recharger les batteries par la liaison du convertisseur. Cette configuration permet d'augmenter l'autonomie des véhicules électriques, mais le problème est que l'ajout des éléments mécaniques et électriques rend cette solution plus coûteuse.

2.3 Généralités sur les groupes électrogènes

Plusieurs types de groupes sont différenciés par la puissance maximale à délivrer et le combustible utilisé. En effet, les combustibles les plus fréquents sont l'essence, le diesel et le gaz naturel. Cependant, l'inconvénient de ces combustibles est qu'ils génèrent plusieurs émissions polluantes telles que les hydrocarbures (*HC*) imbrûlés, le dioxyde de carbone (CO_2) et le monoxyde de carbone (CO). Pour cela, l'utilisation de l'hydrogène en tant que combustible permet de dégager moins d'émissions polluantes. La partie la plus importante dans les groupes électrogènes est le MCI. Cette partie possède un rendement faible qui influe directement sur le rendement du groupe électrogène, d'où l'importance de faire fonctionner le MCI à son rendement maximal pour augmenter l'efficacité du groupe. Le tableau 2.1 montre les propriétés de chaque combustible. Le pouvoir calorifique de l'hydrogène est presque trois fois supérieur à celui de l'essence et du diesel, ce qui permet d'augmenter le rendement de la machine. D'autre part, la vitesse de la flamme de l'hydrogène est plus élevée que celles de la plupart des autres combustibles qui permettent une combustion complète [17]. Ainsi, la température d'inflammation de l'hydrogène est supérieure à celle du diesel. L'hydrogène ne peut donc pas être utilisé directement dans un moteur à allumage par compression. Pour cela, l'orientation vers les moteurs à allumage commandé afin de faciliter

l'inflammation de l'hydrogène et éviter la haute pression dans la chambre de combustion est recommandée.

Tableau 2.1 : Propriétés de l'essence, du diesel et de l'hydrogène [17]

Paramètres	Unités	Essence	diesel	Hydrogène
Formule chimique	-	C ₇ -H ₁₆	C _{7,25} -H ₁₃	H ₂
Composition (C, H, O)	Masse-%	84, 16, 0	87, 13, 0	0, 100, 0
Pouvoir calorifique inférieur	MJ/kg	42,7	42,78	120
Densité	kg/m ³	720-780	848	0.089
Ratio stœchiométrique Air/carburant	kg/kg	14,7	14.5	34,3
Vitesse laminaire de la flamme	cm/s	35-50	n/a ¹	210
Température d'auto-allumage	°C	~350	~265	~585

Concernant les MCIs, ils existent deux modes de fonctionnement :

- Cycle à deux temps : toutes les phases sont réalisées dans un seul tour de vilebrequin.

Chaque image de la figure 2.5 correspond à un demi-tour de vilebrequin.

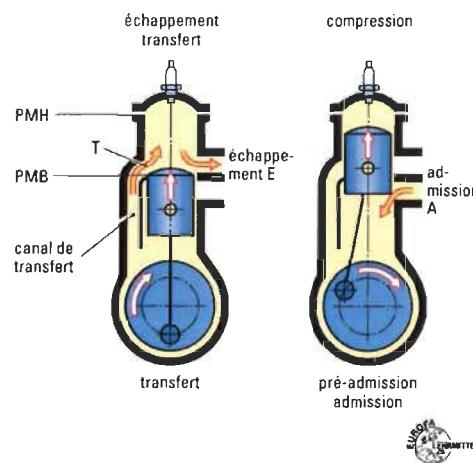


Figure 2.5 : Cycle à deux temps [18]

¹ n/a : non applicable.

En effet, la détente et la compression du carburant s'effectuent dans un demi-tour de vilebrequin. Après avoir eu l'étincelle, le déclenchement de la phase motrice se fait dans le cycle par la descente du piston vers le point mort bas et en même temps la compression du mélange dans la partie inférieure. À l'arrivée au point mort bas, la phase de l'admission aura lieu à travers la lumière par la rentrée du mélange dans le cylindre et dégage en même temps les gaz brûlés. Le piston commence à monter jusqu'il débouche les lumières de l'admission et de l'échappement pour réaliser la phase de compression et le cycle commence de nouveau.

- Cycle à quatre temps : ce cycle s'effectue dans deux tours de vilebrequin. La figure 2.6 représente chaque phase pour un demi-tour de vilebrequin. Lorsque le piston commence à descendre du point mort haut, la phase de l'admission débute par l'ouverture de la soupape d'admission jusqu'à atteindre le point mort bas. La soupape d'admission se referme et le piston remonte pour comprimer le mélange. Avant que le piston atteigne le point mort haut, l'étincelle est produite, augmentant ainsi la pression du gaz enflammé qui force le piston à descendre pour réaliser la détente. Finalement, à l'aide de l'inertie du volant moteur, le piston remonte de nouveau pour dégager les gaz brûlés par l'ouverture de la soupape d'échappement.

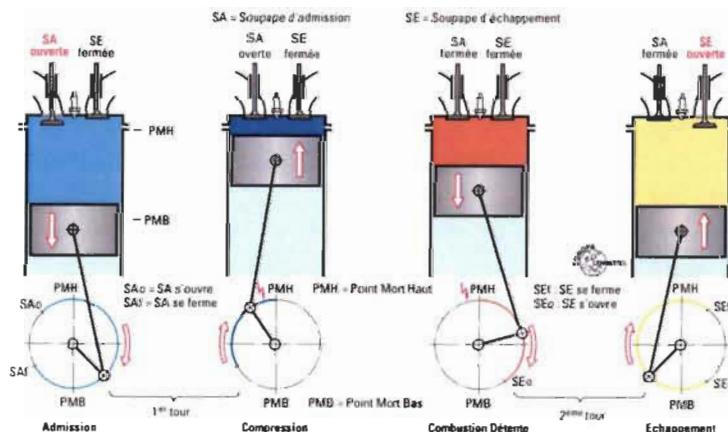


Figure 2.6 : Cycle à quatre temps [18]

Dans ce travail, le groupe électrogène étudié possède une puissance électrique maximale de 5 kW à la sortie et une puissance maximale de 8,1 kW pour le MCI. Le moteur thermique fonctionne avec un cycle à quatre temps.

2.3.1 *Utilisation du moteur à essence*

Comme mentionné dans le tableau 2.1, la température d'auto-allumage de l'essence est environ 350 °C. Comme il est difficile d'atteindre cette température et aussi la limitation au point de vue de la pression dans le cylindre, la méthode d'allumage commandé par l'utilisation des bougies est recommandé afin d'amorcer l'inflammation du mélange air-essence. Le rapport idéal air-essence est 14,7 qui désigne le rapport stœchiométrique [19]. Cependant, 14,7 g d'air pour 1 g d'essence grâce à la densité très élevée (720-780 kg/m³). Pour effectuer le mélange air-essence, les moteurs traditionnels utilisent le carburateur pour assurer ce rapport et après le carburant est introduit dans un collecteur d'admission. Aujourd'hui, les moteurs à essence travaillent avec des injecteurs électroniques qui permettent de bien contrôler le pourcentage d'essence introduit directement dans la chambre de combustion. Omary et al [20] ont réalisé une étude sur la performance de la machine pour la méthode du carburateur et de l'injecteur. Ces études ont indiqué que les caractéristiques de performance et d'émission d'un moteur à allumage commandé fonctionnant en mode d'injection sont relativement meilleures que le mode du carburateur. Malgré cette amélioration, la combustion de l'essence engendre plusieurs émissions polluantes, ce qui constitue un inconvénient majeur dans le contexte actuel de réduction des émissions afin de protéger l'environnement.

2.3.2 Utilisation du moteur à hydrogène

L'utilisation d'un cycle Diesel avec l'hydrogène est plus intéressante, puisqu'il permet d'avoir une puissance plus élevée en incluant une meilleure efficacité. Cependant, la température d'auto-inflammation est très grande et devient difficile à atteindre avec les limitations au niveau de la pression dans la chambre de combustion, d'où, la direction vers les moteurs à allumage commandé pour éviter ces problèmes et aussi les défauts de préallumage qui conduisent à l'apparition de cliquetis et le retour de flamme. L'un des avantages de l'utilisation de l'hydrogène est la non-production des gaz polluants tels que le HC , le CO et le CO_2 . De plus, l'échelle de donnée du coefficient stœchiométrique (ϕ) de l'hydrogène permet au moteur de fonctionner avec des mélanges pauvres et riches en hydrogène par rapport à l'air ce qui n'est pas le cas d'autre combustible. Le coefficient est calculé à partir du dosage réel et le dosage théorique qui représente la quantité nécessaire pour brûler la molécule d'hydrogène avec l'oxygène comme il montre l'équation (2.1).

$$\phi = \frac{\text{Dosage}_{réel}}{\text{Dosage}_{théorique}} \quad (2.1)$$

- $\phi = 1 \rightarrow$ Mélange idéal
- $\phi > 1 \rightarrow$ Mélange riche
- $\phi < 1 \rightarrow$ Mélange pauvre

Par contre, Verhelst et al [17] ont travaillé sur l'effet de production des émissions d'oxyde d'azote (NO_x) dans le MCI fonctionnant avec l'hydrogène. Parmi les résultats obtenus, le coefficient stœchiométrique « ϕ » est le facteur prédominant pour les émissions de NO_x . En effet, pour des coefficients stœchiométriques faibles $\phi = [0,2, 0,5]$, les émissions de NO_x sont négligeables. Si ϕ dépasse 0,5, une augmentation exponentielle des émissions de NO_x est

produite et atteint son maximum pour $\phi=0,8$. Ce résultat s'explique par l'augmentation de la température de la chambre de combustion, ce qui facilite la production de NO_x . Au-delà de 0,8, les émissions de NO_x commencent à diminuer en raison du manque de quantité d'oxygène dans le cylindre comme indiqué à la figure 2.7.

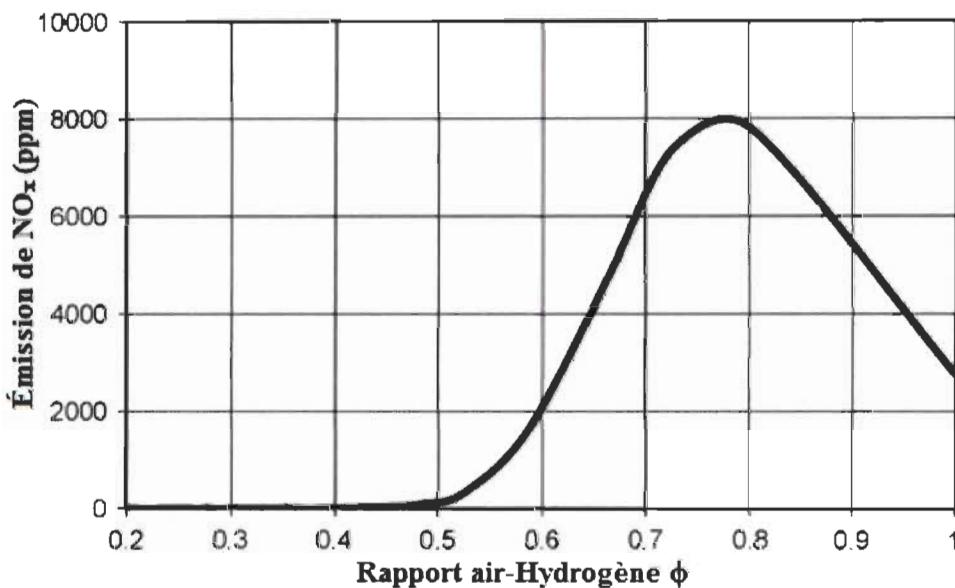


Figure 2.7 : Taux d'émission de NO_x en fonction du coefficient stœchiométrique [17]

Le NO_x est un gaz à effet de serre, il est émis en plus grande quantité par le moteur à hydrogène que par l'essence. En conséquence, le mieux est de travailler avec des mélanges pauvres en hydrogène pour éviter d'aggraver le problème d'effet de serre. Cette contrainte a ouvert des axes de recherche telle que l'utilisation de l'hydrogène avec d'autres combustibles fossiles dans le MCI.

2.4 Mélange hydrogène-combustible fossile

De nombreuses études ont discuté l'apport de mélanger l'hydrogène avec les combustibles fossiles dans le MCI sur l'efficacité thermique et la réduction du taux

d'émission qui nécessitent des modifications au niveau du système d'injection afin de rendre le MCI fonctionnel en mode bi-combustible [21]. L'hydrogène pur réduit le niveau de *HC* et de *CO* d'environ 94,7% et 99,5% simultanément dans des conditions de démarrage à froid par rapport à l'essence pure [22]. Le mélange hydrogène-essence est utilisé pour fournir des charges faibles et moyennes pour bénéficier d'un meilleur rendement thermique et réduire les émissions, tandis que les charges élevées sont données par l'essence pure. Park et al [23] ont mené une étude expérimentale pour observer l'impact de l'ajout d'hydrogène avec le gaz naturel sur un moteur de 6 cylindres pour un bus urbain. L'augmentation du taux d'hydrogène améliore l'efficacité du MCI ainsi qu'une stabilité de la combustion a été remarquée. L'ajout de 30% et 40% d'hydrogène diminue les émissions de *NO_x* respectivement d'environ 67% et de 84% en comparaison des opérations de gaz naturel pur dans les conditions de la meilleure efficacité. Baris et al [24] présentent une étude expérimentale sur l'ajout de l'hydrogène avec le méthane (*CH₄*) pour plusieurs mélanges. Cette combinaison des deux carburants permet de bénéficier des avantages de chacun des carburants ainsi que d'éliminer les inconvénients et les faiblesses en même temps. Les moteurs diesel sont testés afin de visualiser l'impact de l'ajout de l'hydrogène. Les résultats expérimentaux ont démontré que le rendement thermique du frein moteur, calculé à partir de la puissance de freinage du moteur, a été amélioré de 15% après addition d'hydrogène à 75% de charge. Les émissions de fumée, de *CO* et *CO₂* ont été considérablement réduites pour le moteur diesel enrichi en hydrogène. Les émissions de *NO_x* du moteur diesel à hydrogène mixte étaient pratiquement les mêmes que celles du moteur diesel pur [25] [26]. C. Ji et S. Wang [27] [28] ont étudié la combustion d'un moteur thermique travaillant avec l'essence qui a une tendance à souffrir d'une mauvaise combustion dans les conditions de ralenti et les faibles charges. Dans ces conditions, l'hydrogène présente de bonnes combustions et permet aussi une augmentation

de l’efficacité [29]. À haut régime, cependant, l’hydrogène ne peut pas supporter ces charges. L’essence intervient donc grâce à sa densité énergétique volumétrique la plus forte parmi tous les combustibles. Ces études se basent essentiellement sur des expériences réalisées sur des bancs expérimentaux qui permettent de contrôler et de mesurer toutes les variables du système. Shivaprasad,k.V s’intéresse [30] à l’addition d’hydrogène avec l’essence dans un moteur à un seul cylindre telle que sa puissance maximale qui est de l’ordre de 9 kW pour une vitesse de rotation de 4400 *RPM*, et un couple maximale de 20,2 Nm à 2800 *RPM*. Plusieurs essais sont effectués sur l’influence de l’ajout de l’hydrogène avec l’essence. Les prochains paragraphes présentent les résultats trouvés pour mieux comprendre l’effet de l’hydrogène sur chaque paramètre de sortie tel que le rendement du MCI, du NO_x , des *HCs* et du *CO*.

2.4.1 Rendement thermique

Le rendement thermique d’un MCI est un paramètre qui reflète la puissance à la sortie de la machine et la puissance absorbée à l’entrée. La figure 2.8 montre l’évolution du rendement pour six mélanges hydrogène et essence pour 0-25 % H_2 . Le rendement maximal atteint dans les essais est aux alentours d’une vitesse 3000 *RPM*. Le mélange à 15/20/25% d’hydrogène nous donne un rendement toujours plus efficace que le rendement maximal de l’essence pur pour la plage 2000-4000 *RPM*. L’hydrogène, grâce à sa vitesse de propagation de la flamme qui est presque cinq fois plus grande que celle de l’essence, permet de minimiser les *HCs* imbrûlés et améliorer la combustion à l’intérieur du cylindre. De plus, une vitesse de flamme du mélange hydrogène-air-essence plus rapide conduit à une température plus élevée de la combustion, ce qui permet de s’approcher vers le cycle idéal. Une diminution du rendement remarqué pour un pourcentage de 25 % H_2 . En effet, la faible densité de l’hydrogène

$\rho=0,089 \text{ kg/m}^3$, pose un problème qui se traduit par le manque de la quantité de l'air dans le cylindre pour effectuer une combustion complète.

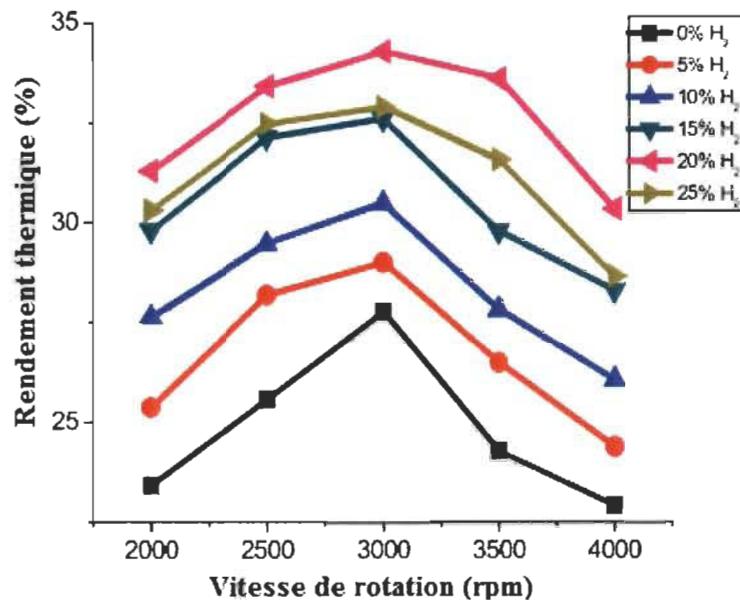


Figure 2.8 : Variation de rendement thermique en fonction de la vitesse de rotation pour différents pourcentages de l'hydrogène [30]

2.4.2 Taux d'émission de NO_x

À des températures très élevées à l'intérieur de la chambre de combustion, l'air absorbé dans le cylindre contient un grand pourcentage de molécule d'azote (N_2) qui se décompose à en atome (N). Par conséquent, la formation de NO_x ce fait avec l'oxygène existant dans l'air. Comme l'hydrogène brûle à des températures plus élevées que l'essence, plus la concentration de l'hydrogène est élevée avec l'essence, plus la température dans la chambre de combustion augmente, favorisant ainsi la production de NO_x . La figure 2.9 montre ce phénomène. La grande quantité de NO_x , se produit aux alentours de la vitesse de 4000 *RPM* ou le moteur fonctionne avec des mélanges riches en carburant. À ces régimes, la température du combustible est la plus élevée par rapport aux autres régimes.

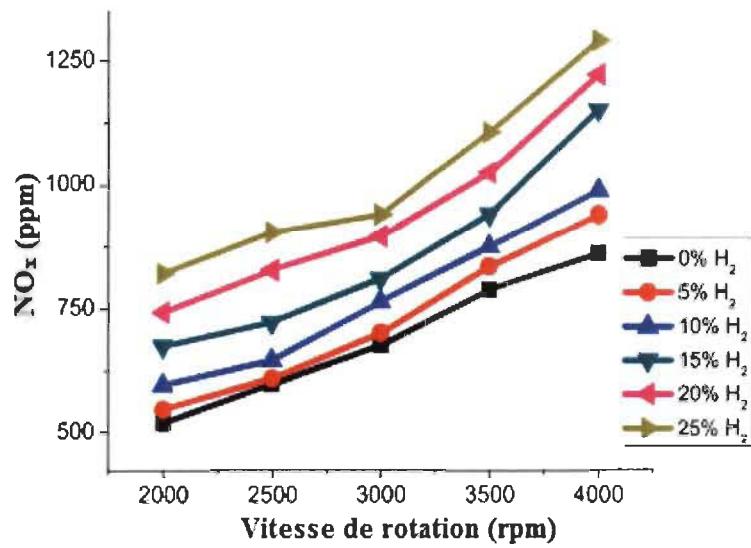


Figure 2.9 : Variation de taux de NO_x en fonction de la vitesse de rotation et pour différents pourcentages de l'hydrogène [30]

2.4.3 Taux d'émission de HC

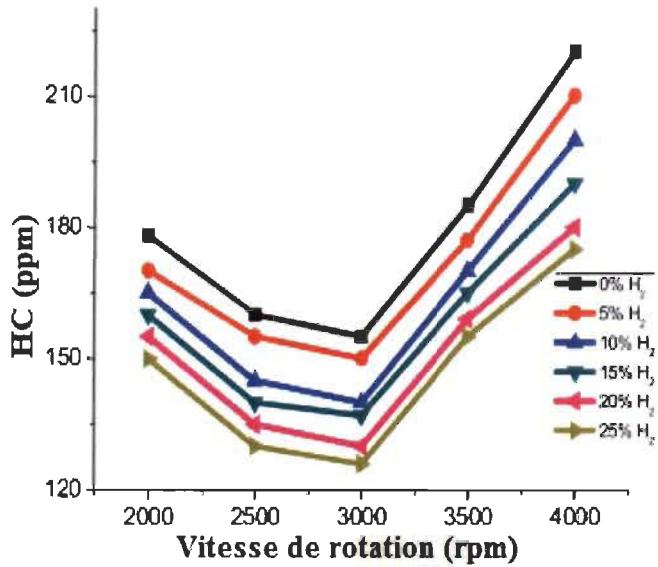


Figure 2.10 : Variation de l'émission des HCs en fonction de la vitesse de rotation pour différents pourcentages de l'hydrogène [30]

La figure 2.10 montre le taux d'émission de HC pour plusieurs vitesses de rotation à différents niveaux de mélange d'hydrogène. Clairement, le taux d'émission des HCs diminue

avec l’addition d’une quantité d’hydrogène. Grâce à la large inflammabilité de l’hydrogène, la combustion s’effectue complètement et le taux de rejet des *HCs* imbrûlés diminue. De plus, l’augmentation du pourcentage de l’hydrogène diminue la quantité du combustible fossile qui contient beaucoup de carbone. La vitesse nominale de la machine thermique se situe entre 2500 RPM et 3000 RPM. Dans ces régimes la combustion s’effectue correctement avec une température maximale.

2.4.4 Taux d’émission de *CO*

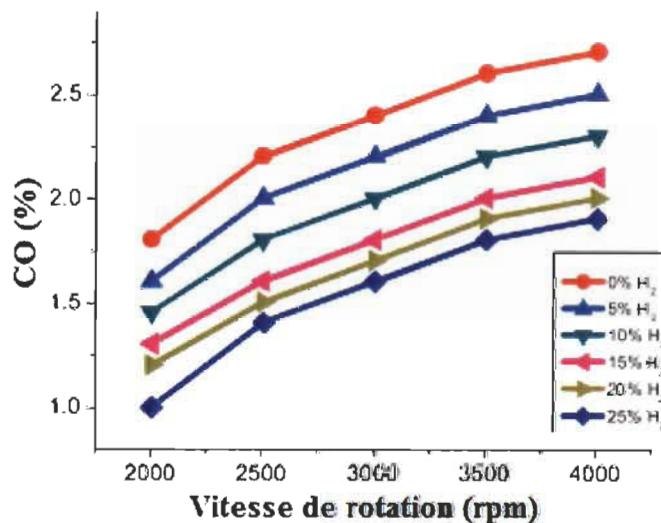


Figure 2.11 : Variation de l’émission de *CO* en fonction de la vitesse de rotation pour différents pourcentages de l’hydrogène [30]

Les effets de l’addition de l’hydrogène sur les émissions de *CO* pour différents régimes sont montrés dans la figure 2.11. L’essence est un combustible fossile qui génère beaucoup d’émissions polluantes. Le taux de *CO* diminue avec l’ajout de l’hydrogène à travers sa haute diffusivité facilite la formation d’un mélange air-combustible plus uniforme et homogène.

2.5 Modélisation de la génératrice

La génératrice se décompose essentiellement en deux systèmes. Un moteur à combustion interne et un alternateur lié entre eux par un système d'accouplement. La non-linéarité du MCI rend la modélisation de la génératrice difficile [31-34]. Parmi les approches adoptées pour les problèmes non linéaires, il y a les réseaux de neurones [35, 36], la logique floue [37] et les algorithmes génétiques pour l'identification des paramètres [38]. Les modèles de réseaux de neurones sont assez précis, mais l'inconvénient majeur de cette approche est la demande d'un nombre important de données expérimentales afin de faire l'entraînement du bloc. De plus, le MCI change son comportement en fonction de plusieurs paramètres, ce qui nécessite une mise à jour des données à chaque fois pour prendre en considération cette modification. Par contre, l'objectif de cette étude est d'élaborer un modèle adaptatif qui permet de suivre le comportement pour n'importe quel changement.

2.6 Optimisation

Les méthodes d'optimisation simples permettent de trouver les conditions optimales du système via un balayage total de l'espace de fonctionnement de la machine. Cela constitue un problème dans le cas de la génératrice puisque la surface d'observation change rapidement. Il existe plusieurs méthodes d'optimisation qui utilisent les modèles paramétriques telle que la descente de gradient. En effet, cette méthode utilise la dérivée de la fonction à minimiser ou maximiser pour le choix de la direction de la descente. Cependant, elle nécessite une fonction dérivable en tout point, ce qui n'est pas le cas de la génératrice. Ainsi, la dérivée dans la frontière de la fonction égale à zéro ce qui engendre un problème au niveau de l'algorithme et la convergence vers le point maximal n'est pas assurée. La recherche linéaire (Line search) se base essentiellement sur la recherche de la direction afin

de trouver le point optimum. La direction est choisie de façon aléatoire dans le domaine de définition, ou bien par l’approche de la descente de gradient. Cette méthode est la plus simple à intégrer, mais présente un piège dans la convergence dans les extrema locaux.

2.7 Conclusions

Cette revue de littérature permet d’approfondir les connaissances générales sur l’architecture des véhicules électriques hybrides et leur gestion énergétique, tout en analysant les défis importants liés à leur autonomie et, plus précisément, à la dégradation des batteries. De plus, le mélange bi-combustible hydrogène-essence, dans la machine à combustion interne, permet d’augmenter le rendement thermique de cette dernière tout en réduisant ses émissions polluantes. Finalement, cet état de l’art justifie le choix du modèle des moindres carrés et l’algorithme d’optimisation par recherche linéaire par leur simplicité et leur rapidité de temps de calcul.

Chapitre 3 - Caractérisation, identification et optimisation de la génératrice bi-carburant

Ce chapitre comprend trois parties. Premièrement, une présentation de la génératrice bi-carburant utilisée dans le cadre de ce projet de recherche. Puis, le fonctionnement de cette génératrice est présenté avec les résultats expérimentaux du rendement et des émissions polluantes. Finalement, le modèle ainsi que l'algorithme d'optimisation seront ensuite détaillés.

3.1 Présentation de la génératrice bi-carburant

La génératrice bi-carburant hydrogène-essence utilisée dans ce projet est le résultat d'une conversion d'un groupe électrogène commercial à essence de marque Honda, modèle EM5000is. Le tableau 3.1 montre les caractéristiques de la génératrice avant les modifications effectuées.

Tableau 3.1 : Caractéristique du groupe électrogène

<i>Machine à combustion interne (monocylindre, quatre temps)</i>	
Paramètre	Valeur
Modèle	<i>GX340K1</i>
Puissance maximale	<i>8.1kW at 3600RPM</i>
Taux de compression	<i>8.0 :1</i>
<i>Alternateur</i>	
Paramètre	Valeur
Type	<i>Multi-pole fielded rotation Type (p=4)</i>
Excitation	<i>Auto-Excitation (Aimant permanent)</i>
Puissance max	<i>5 kVA</i>
Puissance nominale	<i>4.5 kVA</i>

Le groupe électrogène est constitué principalement d'un MCI qui fournit de l'énergie mécanique pour alimenter deux alternateurs à aimants permanents ayant chacun une puissance maximale de 2,5 kW. Le contrôleur de la machine permet le contrôle de ces deux alternateurs pour un fonctionnement à différents régimes en puissance électrique ainsi la vitesse de rotation du MCI. Ce mode de fonctionnement aide à exploiter la génératrice en fonction de la demande de puissance du moteur électrique de traction du véhicule et le niveau de charge des batteries. Le moteur thermique est un moteur monocylindre qui fonctionne avec un cycle à quatre temps d'une puissance de 8,1 kW. Les principales modifications apportées à la génératrice sont représentées dans la figure 3.1. Un capteur d'arbre à came permet au contrôleur moteur de savoir le temps d'injection du carburant dans la chambre de combustion. L'injection du carburant est assurée par deux injecteurs l'un pour l'essence et l'autre pour l'hydrogène montés sur le port-injecteur. Le mode d'injection utilisé pour ce banc d'essai est indirect. En effet, la pulvérisation du carburant se produit dans le collecteur d'admission après le papillon du gaz à l'aide des deux injecteurs.

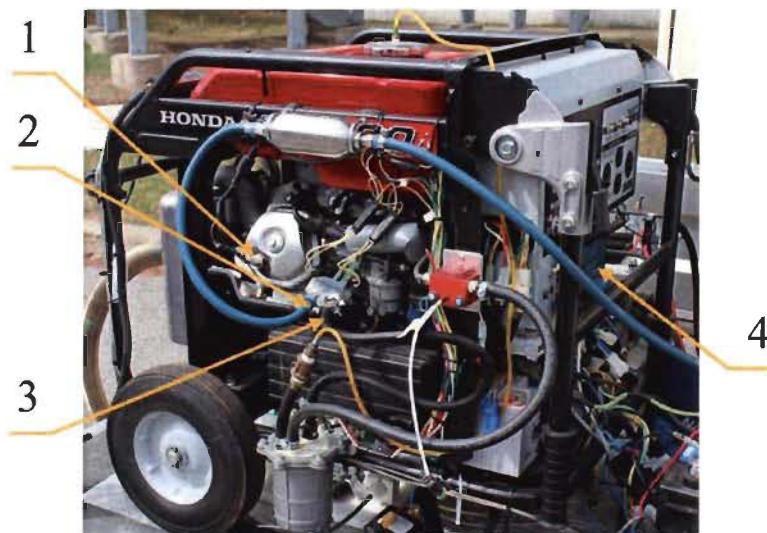


Figure 3.1 : Principale modification de la génératrice bi-carburant : 1- Capteur arbre à cames; 2- Injecteur H₂; 3-Injecteur essence; 4- Contrôleur moteur

Afin de visualiser le comportement de la génératrice envers l'efficacité énergétique et les émissions polluantes, plusieurs capteurs sont installés. Deux débitmètres pour mesurer la consommation des deux combustibles. De plus, deux capteurs pour mesurer les émissions de HC , CO , CO_2 , NO_x et O_2 sont placés sur la conduite du gaz d'échappement.

Ce groupe électrogène est placé sur la plateforme d'une camionnette électrique pour assurer l'hybridation. L'architecture adoptée pour ce banc d'essai est l'architecture série. Par conséquent, la génératrice produit de l'énergie électrique pour charger les batteries. Deux interfaces de puissance permettent la conversion du CA produit par le groupe électrogène en CC pour charger les batteries. La figure 3.2 illustre l'interaction entre les différents systèmes et la génératrice bi-carburant. Un compact-Rio est installé entre la génératrice et l'ordinateur de bord du véhicule pour assurer le contrôle et l'acquisition des données envoyées par les différents capteurs.

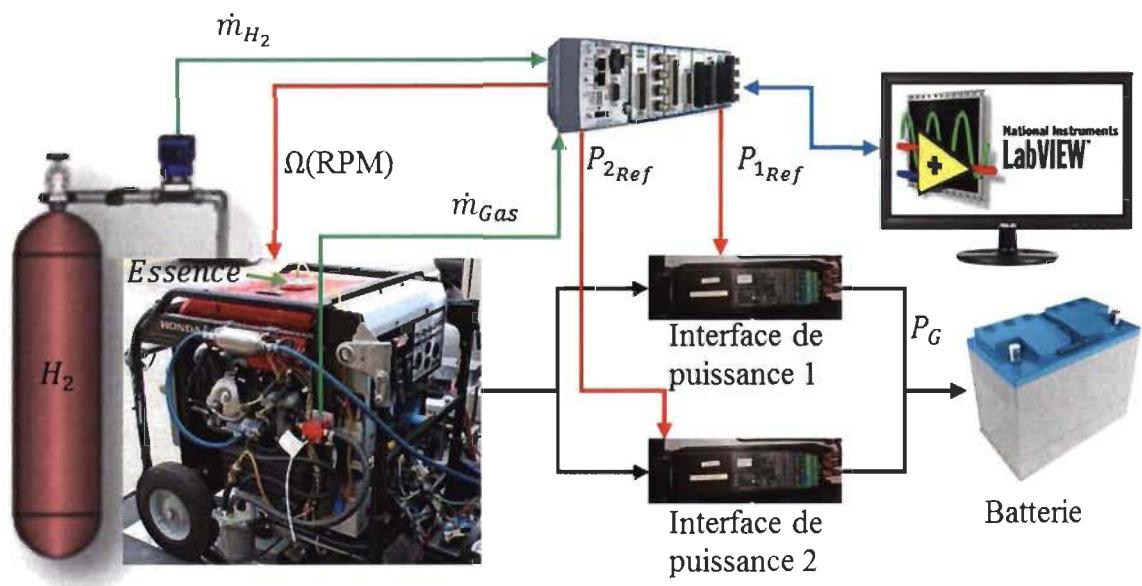


Figure 3.2 : Banc d'essai de la génératrice bi-carburant

3.2 Procédure pour la réalisation de la cartographie

3.2.1 Définition des différents paramètres de la génératrice

Avant de commencer la cartographie de la génératrice, il est nécessaire en premier lieu de définir les paramètres d'entrée et les paramètres de sortie. En deuxième lieu, il y aura variation des paramètres d'entrée afin de savoir l'influence et l'interaction de chaque paramètre sur les variables de sortie de notre système.

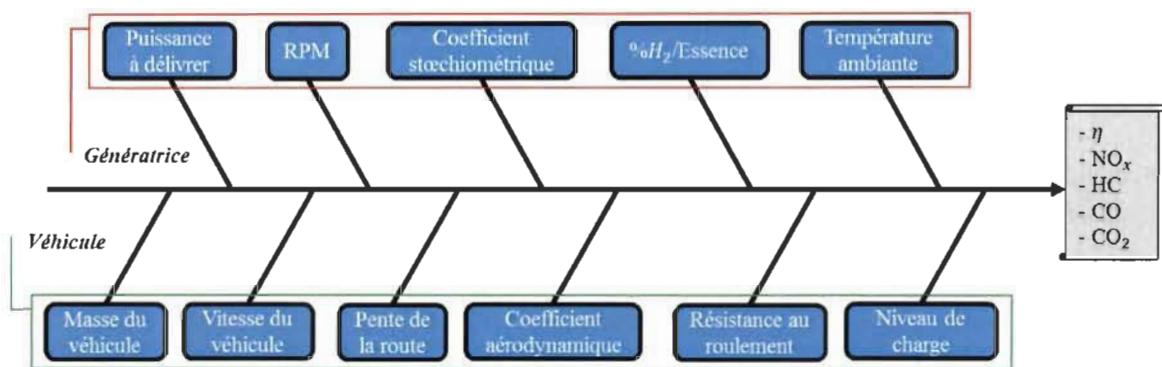


Figure 3.3 : Diagramme d'Ishikawa lié à la génératrice

La figure 3.3 montre toutes les variables influencées par le groupe électrogène pouvant se diviser en deux ensembles distincts :

- Variables liées directement à la génératrice : L'influence de ces variables sur le fonctionnement de la génératrice et ces variables de sortie est importante. Chaque variation de l'une de ces variables agit directement sur les variables de sortie d'une façon positive ou bien négative.
- Variables liées au véhicule hybride : Ces paramètres entrent en jeux sur le régime de fonctionnement à travers les indicateurs du véhicule.

3.2.2 Démarche suivie dans les essais de la cartographie

Après avoir eu une idée sur les différents paramètres de la génératrice, l'étape suivante consiste à définir pour chaque variable d'entrée son domaine de définition et les différents niveaux à fixer pour effectuer les tests :

- La vitesse de rotation du MCI (*RPM*) : Vitesse faible de 1700 *RPM*, vitesse moyenne de 2500 *RPM* et forte vitesse de 3300 *RPM*.
- Coefficient stœchiométrique (ϕ) : L'hydrogène est un carburant qui permet de fonctionner avec des mélanges pauvres et riches. Dans ce projet, on s'intéresse seulement aux mélanges pauvres pour H₂ pour $\phi=0,5$. Alors que pour l'essence, le coefficient idéal est $\phi=1$ correspondant à 14,7 g d'air pour brûler 1g d'essence [19].
- C_{H_2-Ess} : Paramètre qui représente la nature du mélange injecté dans la chambre de combustion ($C_{H_2-Ess} = 0\%$ qui correspond à un mélange essence pure et plus qu'il augmente il y a une soustraction d'une quantité d'essence qui est remplacé par une quantité d'hydrogène jusqu'à ce qu'il atteint 100% pour un mélange hydrogène pur).
- Puissance à délivrer : Il existe quatre niveaux pour ce paramètre. Premier niveau, pour un fonctionnement au repos du véhicule correspond à une puissance 0 W car le moteur électrique d'entrainement ne consomme pas de la puissance électrique. Deuxième et troisième niveau, correspond à une vitesse de 10 km/h et 20 km/h du véhicule électrique d'essai disposé à l'IRH (Némo), dans ce cas la puissance est égale 1000 W et 2050 W respectivement. Quatrième niveau, correspond à la

puissance maximale qui est de 3500 W délivrée à l'entrée de l'interface de puissance du Némo.

Le tableau 3.2 résume tous les paramètres d'entrée avec leurs niveaux. Les essais sont effectués dans le but de dégager toutes les combinaisons pour visualiser l'influence de chaque variable sur les sorties du système.

Tableau 3.2 : Paramètres d'entrée avec leurs différents niveaux

<i>Puissance (W)</i>	<i>RPM</i>	<i>%H₂/Essence</i>	<i>Coefficient stœchiométrique (ϕ)</i>	
			<i>Essence</i>	<i>Hydrogène</i>
0	1700	0	1	0.5
1000	2500	20	n/a	n/a
2050	3300	40	n/a	n/a
3500	n/a	60	n/a	n/a
n/a ²	n/a	80	n/a	n/a
n/a	n/a	100	n/a	n/a

D'autres essais sont effectués pour améliorer la cartographie. En effet, pour chaque RPM on détermine la puissance maximale qui peut délivrer la génératrice pour tous les mélanges C_{H_2-ESS} .

3.3 Résultats de la cartographie de la génératrice bi-carburant

3.3.1 Rendement du groupe électrogène

Le rendement thermique du groupe électrogène est une variable très importante et le but de ce travail est de le maintenir toujours à son optimum. Le rendement est calculé à partir de

² n/a : non applicable.

l'équation (3.1) qui englobe le rendement des différents systèmes du groupe électrogène jusqu'à la conversion du AC en CC.

$$\eta = \frac{P_G}{PCI_{H_2} \dot{m}_{H_2} + PCI_{Ess} \dot{m}_{Ess}} \times 100 \quad (3.1)$$

Où :

- PCI : Pouvoir calorifique inférieur de chaque carburant (MJ/kg).
- \dot{m} : Débit massique de chaque carburant (kg/s)

Une représentation avec les courbes d'iso rendement permet de visualiser l'évolution du rendement de la génératrice en fonction des paramètres d'entrée. En effet, après une organisation des résultats expérimentaux pour chaque mélange (C_{H_2-Ess}) on trace les courbes de rendement en variant la RPM et la puissance délivrée varie P_G . Pour illustrer la variation de la génératrice en fonction de la teneur en essence et en hydrogène, des expériences ont été faites avec plusieurs mélanges riches en essence et elle prouve que la variation est très légère par rapport à l'essence pure, c'est pourquoi une seule expérience avec un mélange a été représentée dans la figure 3.4.

La figure 3.4 montre les lignes iso rendement et les zones de meilleur rendement. Les moteurs à essence possèdent un rendement faible qui peut atteindre 24% pour le fonctionnement maximal. Dans le cas de la génératrice, le rendement atteint est moins de 17% pour la totalité des régimes de RPM et P_G comme indiqué la barre de couleur dans la courbe, ceci est expliqué par le rendement du MCI et son influence, ainsi que les pertes dissipées par la partie électronique de puissance. D'autre part, l'essence permet d'atteindre des puissances maximales de la génératrice jusqu'à 3500W et même plus s'il n'y a pas des

contraintes au niveau du banc d'essai pour des régimes moyens en *RPM* avec un coefficient stœchiométrique $\phi=1$.

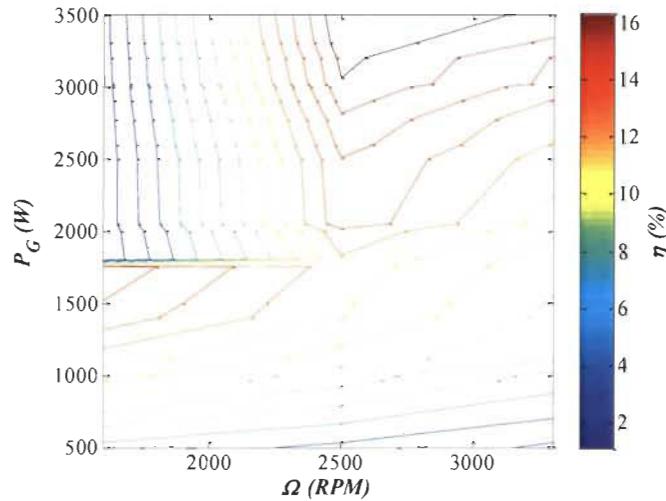


Figure 3.4 : Courbe iso rendement pour l'essence pure

Quant aux expériences avec des mélanges riches en hydrogène, trois ont été choisis d'une manière représentative et qui sont représentés dans les figures 3.5, 3.6, 3.7 pour la variation de ce rendement.

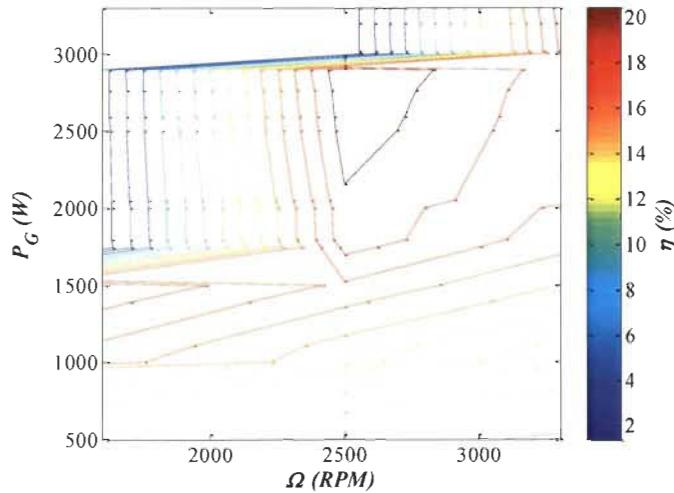


Figure 3.5 : Courbe iso rendement pour un mélange 60% hydrogène et 40% essence

Dès l'ajout d'une quantité d'hydrogène avec l'essence dans la combustion, le rendement de la génératrice commence à augmenter. Cette augmentation est dûe principalement au pouvoir calorifique inférieur (PCI) de l'hydrogène élevé par rapport à celui de l'essence. Pour le mélange avec 60%H₂ une élévation de 25,43% par rapport à l'essence pure présenté à la figure 3.5. La puissance maximale de la génératrice pour ce mélange est de l'ordre de 3300W qui est inférieure à celle obtenue par l'essence pure. Ce phénomène est expliqué par la faiblesse de la densité d'énergie volumique de l'hydrogène qui est très faible par rapport à l'essence.

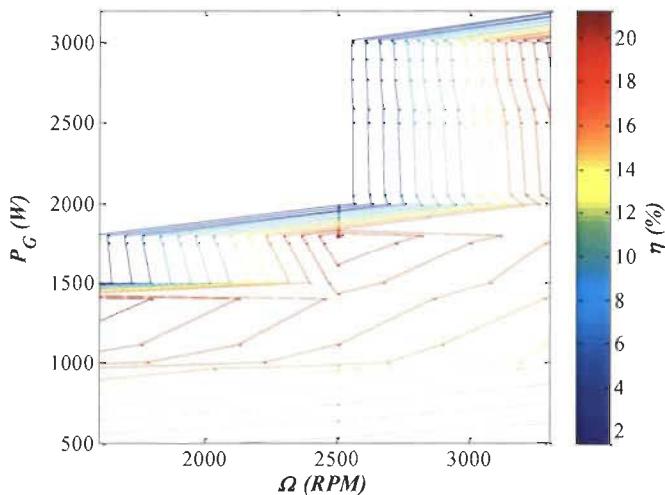


Figure 3.6 : Courbe iso rendement pour un mélange 80% hydrogène et 20% essence

Dans le cas d'un mélange 80% H₂ représenté dans la figure 3.6, le rendement de la génératrice peut atteindre 22% pour des régimes faibles et moyens en puissance ce qui n'est pas le cas avec l'essence. Plus le mélange devient riche, plus que la puissance maximale de la génératrice diminue. La figure 3.7 montre le cas de fonctionnement avec l'hydrogène pur. Le rendement maximal dans ce cas est 32%, obtenu pour une $P_G=2600\text{W}$ et $RPM=2500\text{tr/min}$. Une augmentation de 84,1% du rendement par rapport à l'essence pure.

Ces résultats permettent en premier lieu de donner priorité dans cette étude à l'utilisation de l'hydrogène dans le contexte des véhicules électriques utilisant comme source d'hybridation une génératrice bi-carburant du point de vue efficacité thermique. La présence de l'essence dans la génératrice bi-carburant permet de progresser dans les régimes élevés en puissance au cas où la demande de puissance est forte et le niveau de charge des batteries est faible.

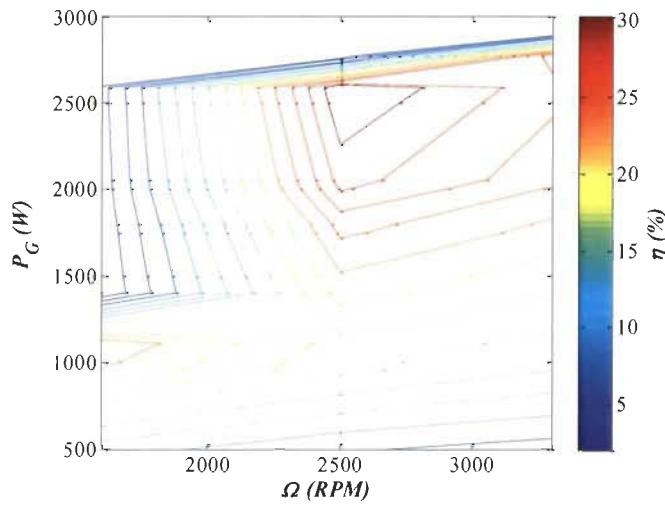


Figure 3.7 : Courbe iso rendement pour l'hydrogène pur

3.3.2 Émission de NO_x

La production des émissions de NO_x est liée directement à la quantité d'azote admise dans la chambre de combustion à partir de l'air. Sous haute température, la molécule d'azote (N_2) se décompose en deux atomes d'azote (N) et réagit avec l'oxygène pour produire le NO_x . La figure 3.8 (a) montre dans un premier temps l'émission de NO_x en fonction RPM pour une puissance électrique de 1000 W pour les trois mélanges suivis par la deuxième figure 3.8 (b) qui représente la température du gaz dégagé par la chambre de combustion. La plus faible émission est obtenue pour 100% H_2 qui s'explique par deux facteurs. La première est l'utilisation d'un mélange pauvre pour l'hydrogène ($\phi = 0,5$) qui résulte les émissions plus

faibles. Le second est l'obtention d'une température plus faible pour ce mélange qui ne permet pas de générer des émissions de NO_x .

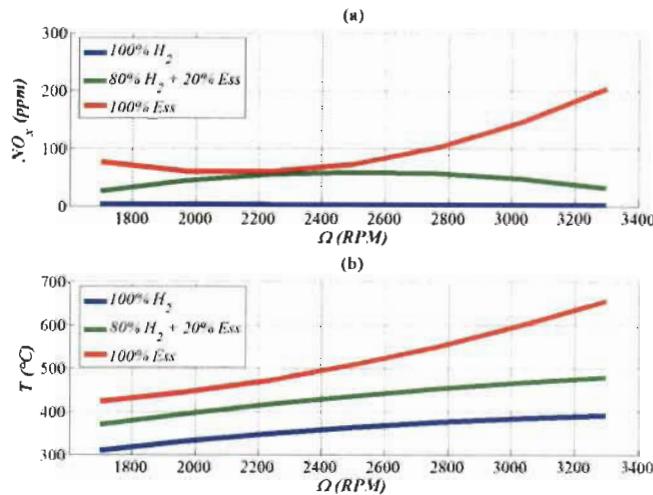


Figure 3.8 : L'évolution des émissions de NO_x et la température en fonction RPM pour une puissance $P_G=1000\text{W}$

Le même phénomène est observé pour la totalité des régimes comme le montre dans la figure 3.9 pour une puissance de 2050 W.

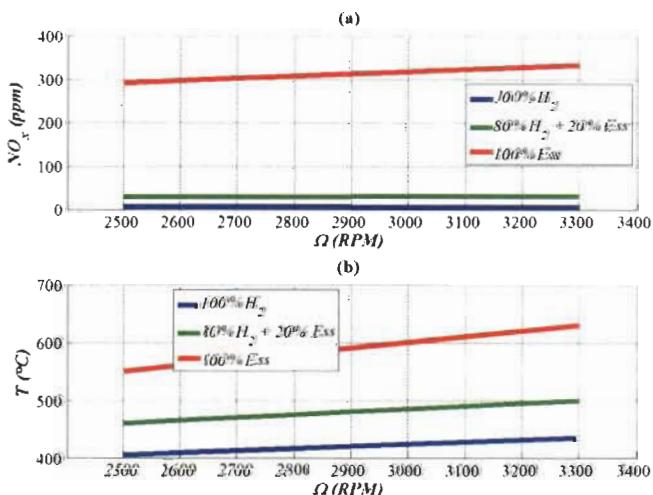


Figure 3.9 : L'évolution des émissions de NO_x et la température en fonction RPM pour une puissance $P_G=2050\text{W}$

3.3.3 Émission de CO_2

Les effets de l'addition de l'hydrogène sur l'émission de CO_2 sont montrés dans les deux figures ci-dessous pour les mêmes puissances à délivrer présentées précédemment. Pour ces émissions, il est clair que 100% H_2 produit de faible émission puisque le carbone n'existe pas dans la chambre de combustion. Malgré ça, lors de cet essai de faibles particules de CO_2 sont mesurées et qui proviennent principalement de la combustion du film d'huile de lubrification sur la paroi du cylindre. L'essence est un combustible fossile qui émet beaucoup d'émissions polluantes. Le taux de CO_2 diminue avec l'ajout de l'hydrogène à travers sa haute diffusivité qui facilite la formation d'un mélange air-combustible plus uniforme et homogène.

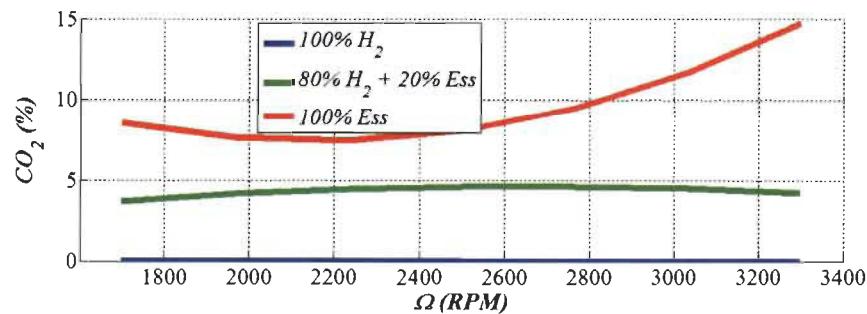


Figure 3.10 : L'évolution de l'émission de CO_2 en fonction RPM pour une puissance $P_G=1000W$

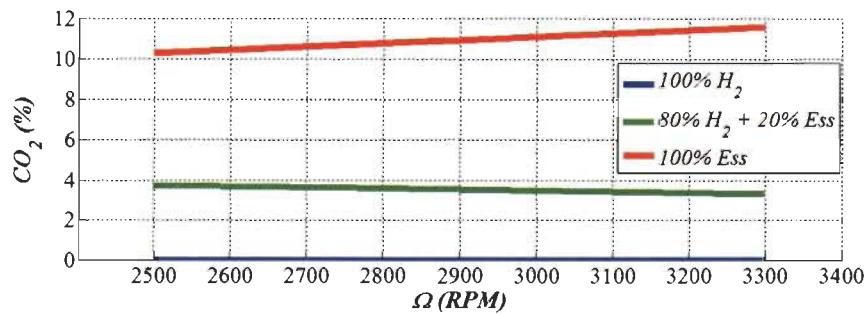


Figure 3.11 : L'évolution de l'émission de CO_2 en fonction RPM pour une puissance $P_G=2050W$

3.4 Modélisation de la génératrice bi-carburant

3.4.1 Élaboration du modèle

Les résultats trouvés précédemment permettent de mieux interpréter le comportement de la génératrice envers les paramètres d’entrées. Dès le départ, il est clair que le comportement du groupe électrogène est non-linéaire à cause de l’existence du MCI. En effet, l’intégration des modèles du MCI dans des algorithmes est compliquée à faire parce qu’elle dépend des caractéristiques de chaque moteur. Le but de travail est de trouver une fonction qui joint les paramètres d’entrée tels que la puissance à délivrer, la vitesse *RPM* et le pourcentage de chaque combustible comme suit :

$$\eta = f(P_G, \Omega, C_{H_2-Ess}) \quad (3.2)$$

Avec :

- P_G : Puissance délivrée par le groupe électrogène.
- Ω : Vitesse de rotation du MCI en tr/min.
- C_{H_2-Ess} : Paramètre qui représente la nature du mélange injecté dans la chambre de combustion.

À partir de la cartographie, le rendement de la génératrice produit des surfaces qui sont lisses et convexes localement pour tous les mélanges comme illustre la figure 3.12 par une représentation 3D pour un mélange pure de l’hydrogène.

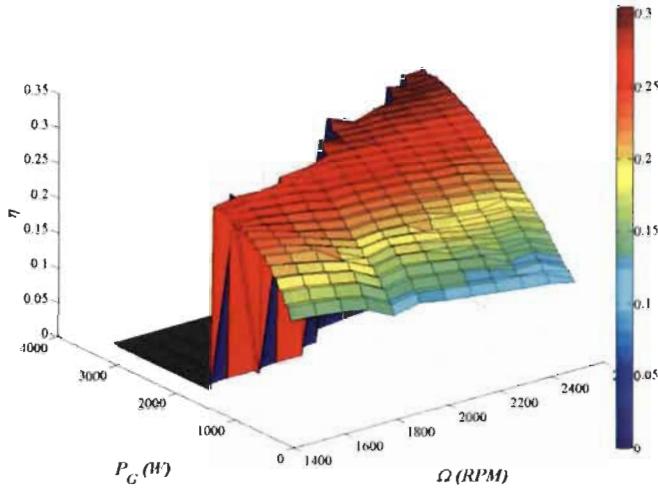


Figure 3.12 : Représentation 3D du rendement du générateur pour le mélange hydrogène pur [33]

Cette forme convexe permet d'établir l'approximation de série de Taylor du rendement de la génératrice en un polynôme de troisième ordre en fonction de ces paramètres. Par la suite, le rendement peut-être exprimé au voisinage des conditions optimale $(P_G^*, \Omega^*, C_{H_2/ESS}^*)$ comme suit :

$$\begin{aligned} \eta = & \theta_0 + \theta_1 P_G + \theta_2 \Omega + \theta_3 C_{H_2/ESS} + \theta_4 P_G \Omega + \theta_5 P_G C_{H_2/ESS} \\ & + \theta_6 \Omega C_{H_2/ESS} + \theta_7 P_G^2 + \theta_8 \Omega^2 + \theta_9 C_{H_2-ESS}^2 \end{aligned} \quad (3.3)$$

Où :

$$\theta_0 = \eta(P_G^*, \Omega^*, C_{H_2-ESS}^*) \quad (3.4)$$

$$\theta_1 = \frac{\partial \eta(P_G^*, \Omega^*, C_{H_2-ESS}^*)}{\partial P_G} \quad (3.5)$$

$$\theta_2 = \frac{\partial \eta(P_G^*, \Omega^*, C_{H_2-ESS}^*)}{\partial \Omega} \quad (3.6)$$

$$\theta_3 = \frac{\partial \eta(P_G^*, \Omega^*, C_{H_2-Ess}^*)}{\partial C_{H_2-Ess}} \quad (3.7)$$

$$\theta_4 = \frac{\partial \eta(P_G^*, \Omega^*, C_{H_2-Ess}^*)}{\partial P_G \partial \Omega} \quad (3.8)$$

$$\theta_5 = \frac{\partial \eta(P_G^*, \Omega^*, C_{H_2-Ess}^*)}{\partial P_G \partial C_{H_2-Ess}} \quad (3.9)$$

$$\theta_6 = \frac{\partial \eta(P_G^*, \Omega^*, C_{H_2-Ess}^*)}{\partial \Omega \partial C_{H_2-Ess}} \quad (3.10)$$

$$\theta_7 = \frac{\partial^2 \eta(P_G^*, \Omega^*, C_{H_2-Ess}^*)}{\partial P_G^2} \quad (3.11)$$

$$\theta_8 = \frac{\partial^2 \eta(P_G^*, \Omega^*, C_{H_2-Ess}^*)}{\partial \Omega^2} \quad (3.12)$$

$$\theta_9 = \frac{\partial^2 \eta(P_G^*, \Omega^*, C_{H_2-Ess}^*)}{\partial C_{H_2-Ess}^2} \quad (3.13)$$

L'équation (3.3) est linéaire par rapport aux paramètres $\theta_i, i = 0, \dots, 9$. L'identification de ces paramètres permet d'élaborer le modèle de la génératrice bi-carburant.

3.4.2 Identification des paramètres du modèle

Réécrivons l'équation (3.3) sous une forme matricielle à l'instant (t) :

$$\eta(t) = \varphi(t) \theta(t) \quad (3.14)$$

Où :

$$\begin{aligned} \varphi(t) = & [1, P_G(t), \Omega(t), C_{H_2-Ess}(t), P_G(t) \Omega(t), P_G(t) C_{H_2-Ess}(t), \\ & \Omega(t) C_{H_2-Ess}(t), P_G^2(t), \Omega^2(t), C_{H_2-Ess}^2(t)]^T \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$\theta(t) = [\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6, \theta_7, \theta_8, \theta_9] \quad (3.16)$$

$\varphi(t)$ et $\theta(t)$ sont respectivement le vecteur de régression et le vecteur de paramètre. À chaque instant (t) le vecteur de paramètre doit-être identifié de manière qu'il minimise une fonction de coût J qui est généralement quadratique. Cette fonction de coût représente l'erreur quadratique entre le modèle et les valeurs expérimentaux.

$$J(\hat{\theta}) = \frac{1}{2} \sum_{t=1}^N (\eta(t) - \varphi(t) \theta(t))^2 \quad (3.17)$$

N représente le nombre de valeurs discrètes et $\hat{\theta}$ est l'estimation du vecteur θ . Comme l'équation (3.14) est linéaire par rapport au vecteur de paramètre θ et J est quadratique, cela permet d'utiliser la méthode des moindres carrés récursifs (MCR) afin de minimiser l'erreur quadratique. Passant maintenant à un système discret, pour chaque incrémentation de k si $J(\hat{\theta})$ est minimale, le rendement de la génératrice peut-être calculé à partir du vecteur de paramètre estimé comme suit :

$$\eta(k) = \varphi(k) \hat{\theta}(k) \quad (3.18)$$

Pour N pas d'échantillonnage, la condition suivante doit être respectée :

$$\gamma = \Phi \hat{\theta} \quad (3.19)$$

Avec :

$$\Phi = [\varphi^T(1), \varphi^T(2), \dots, \varphi^T(N-1), \varphi^T(N)]^T \quad (3.20)$$

$$\gamma = [\eta(1), \eta(2), \dots, \eta(N-1), \eta(N)]^T \quad (3.21)$$

Par la suite, le vecteur de paramètres peut être déduit à partir de l'équation (3.19) :

$$\hat{\theta} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T Y \quad (3.22)$$

À partir de l'équation (3.22) les paramètres du modèle sont identifiés et par la suite l'obtention de l'équation mathématique (3.3) qui relie la vitesse de rotation du MCI, la puissance et le pourcentage de chaque combustible. Cette relation permet de chercher les conditions optimales pour avoir un meilleur rendement à travers l'algorithme d'optimisation présenté dans la prochaine section.

3.5 Optimisation du rendement de la génératrice bi-carburant

L'objectif de cette partie est de chercher les conditions optimales du groupe électrogène. Ce dernier est installé sur le véhicule Némo pour assurer l'hybridation. La puissance à délivrer P_G^* est donné par le SGE du Némo en fonction de l'état de charge des batteries et aussi la distance restante jusqu'à la destination. Suivant P_G^* , l'algorithme doit chercher les autres paramètres d'entrée $(\Omega^*, C_{H_2/Ess}^*)$ à laquelle la machine devrait fonctionner afin d'obtenir un rendement maximal. Parmi les approches d'optimisation existantes dans la littérature, la recherche linéaire «Line search» qui se caractérise par sa simplicité de calcul et qui permet d'optimiser une fonction dépendant de plusieurs variables. C'est une approche itérative qui permet de trouver un minimum ou un maximum local d'une fonction $f: R^n \rightarrow R$ [39]. L'algorithme est décrit comme suit :

- i. Départ du compteur $k = 0$ et fixer un minimum de départ x_0 .
- ii. Calcule de la direction de descente p_k .
- iii. Sélectionner un pas α_k de façon à minimiser $f(x_k + \alpha_k p_k)$.
- iv. Mettre à jour $x_{k+1} = x_k + \alpha_k p_k$ et $k = k + 1$
- v. Si $\|\nabla f(x_k)\| < \text{tolérance}$ alors STOP, Sinon retour à ii.

Afin de minimiser la fonction $f(x_k + \alpha_k p_k)$ dans l'étape iii, le passage par la dérivée pose un problème. En effet dans les valeurs limite, la dérivée de cette fonction est nulle. L'algorithme converge aux extrema de façon directe ce qui est une lacune. Une autre façon de traiter ce problème est l'utilisation de l'algorithme recherche linéaire modifiée [40]. Cette modification au niveau de l'algorithme permet de surmonter la difficulté de la dérivable. Au lieu du calcul de la direction de descente, p_k est obtenue de façon aléatoire avec un changement de signe pour balayer toute la surface de recherche à chaque itération jusqu'à ce que le nouveau $f(x_k + \alpha_k p_k)$ soit plus petit que $f(x_k)$ comme indique l'équation (3.23).

$$p_k = (-1)^{k+1} p_k \quad (3.23)$$

De plus le point de départ x_k est généré de façon aléatoire pour s'assurer que le programme converge vers le rendement maximal surtout que la surface de recherche se compose de plusieurs zones convexes. L'algorithme d'optimisation de la génératrice bi-carburant s'écrit comme le montre dans la figure 3.13.

Une étape primordiale au début de l'algorithme est de définir le domaine de définition de chaque variable d'entrée ainsi que les contraintes qui représentent l'interaction entre les variables d'entrée et la variable de sortie du groupe électrogène. En effet, d'après les essais réalisés dans la partie de la cartographie, pour une puissance de 3000 W la génératrice ne peut pas vaincre ce couple avec un mélange purement avec l'hydrogène pour les différentes vitesses de rotation. Cela explique l'utilité d'imposer des contraintes dans l'algorithme.

```

Départ
n :entier;
 $\eta(t)$  : rendement à l'instant  $t$ 
Générer des points de départ  $x_i, i = 1, \dots, N$ 
Répéter
   $k \leftarrow 1;$ 
  Pour ( $i = 1; i \leq N; i + +$ ) faire
    Répéter
       $p_k \leftarrow rand$ 
      Si ( $i$  modulo (2) Alors  $p_k = (-1) p_k$ 
      Fin Si
       $s_k \leftarrow rand$ 
       $k \leftarrow k + 1$ 
      jusqu'à ce que  $\eta(x_i + p_k s_k, y_i + p_k s_k) < \eta(x_i, y_i)$ 
       $x_i \leftarrow x_i + p_k s_k;$ 
       $y_i \leftarrow y_i + p_k s_k;$ 
      Fin Pour
       $\hat{\eta} \leftarrow \max(\eta(x_1, y_1), \dots, \eta(x_N, y_N))$ 
      jusqu'à ce que ( $\hat{\eta} < \eta(t)$ )
       $\Omega^* \leftarrow \hat{x}$  (correspond à  $\hat{\eta}$ );
       $C_{H_2/Ess}^* \leftarrow \hat{y}$  (correspond à  $\hat{\eta}$ );
    Fin

```

Figure 3.13 : Algorithme de recherche linéaire modifiée [40]

3.6 Suivie du rendement de la génératrice

Après avoir présenté le modèle de la génératrice et la méthodologie utilisée pour la recherche des conditions optimales de la génératrice dans les deux sections précédentes, la combinaison des deux algorithmes permet de suivre le rendement de la génératrice bi-carburant.

La figure 3.14 montre le processus complet en temps-réel. Au départ, la génératrice commence par une base de données pour générer le modèle par l'identification des paramètres. La deuxième étape consiste à la recherche des conditions optimales suivant la consigne donnée par le SGE. Ensuite, ces conditions sont données au groupe électrogène. Si le rendement est amélioré par rapport à l'état précédent, alors, ces conditions sont

enregistrées dans la base de données. Sinon, les conditions opératoires de la génératrice sont fixées à celle de l'état précédent.

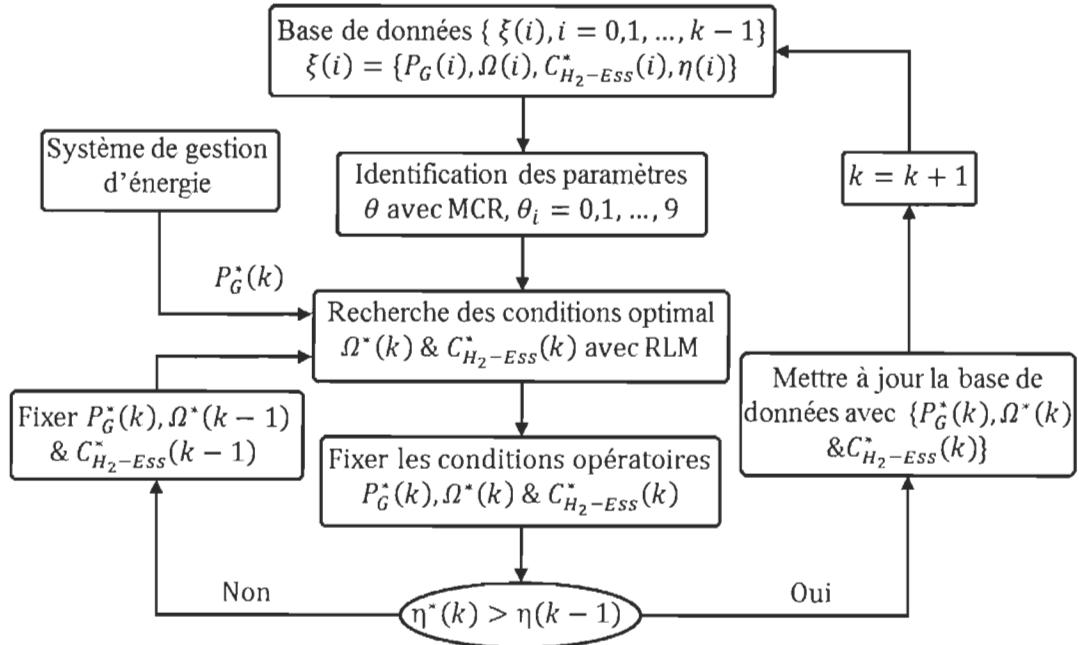


Figure 3.14 : Structure générale de l’algorithme proposé

3.7 Conclusion

L’objectif de ce chapitre était la modélisation et l’optimisation de la génératrice bi-carburant hydrogène-essence. D’abord, un modèle mathématique polynomial a été élaboré suite à la réalisation de la cartographie. Ensuite, ce modèle est utilisé dans la recherche des conditions optimales du groupe électrogène. Cette génératrice est installée sur un VE pour assurer l’hybridation. Cela implique que le fonctionnement de la génératrice dépend aussi des différents systèmes du véhicule tels que les batteries, de leurs dégradations et du modèle dynamique du véhicule. Le chapitre suivant traite les différentes parties du véhicule afin d’appliquer un scénario réel pour un véhicule électrique hybride (VEH) à base d’une génératrice bi-carburant.

Chapitre 4 - Modélisation et gestion de l'énergie du VEH

Bien que la durée de vie des batteries des VEs soit réduite, le coût de ces dernières est élevé. Cela implique l'importance de faire fonctionner ce système dans la plage admissible afin d'augmenter leur durée de vie donnée par les constructeurs. L'objectif de ce chapitre est de tenir en compte du fonctionnement de la génératrice en fonction des autres systèmes du VE.

4.1 Modèle longitudinal du véhicule

La répartition de puissance de chaque source d'énergie est donnée sur la figure 4.1. Le SGE joue un rôle très important dans le traitement d'informations provenant des différents systèmes ainsi que l'envoi des consignes pour les deux sources d'énergie.

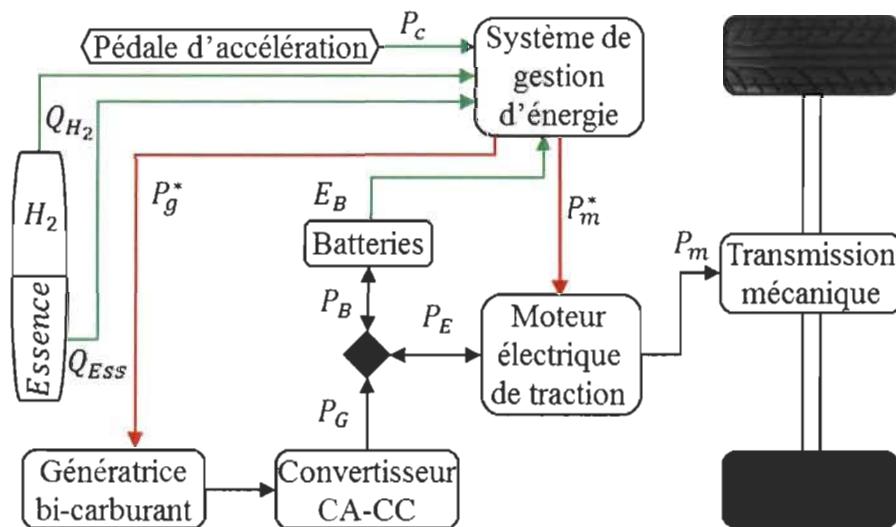


Figure 4.1 : Architecture du VEH

L'entrainement du VEH à base d'une génératrice est assuré par le moteur électrique alimenté par les batteries. Ce dernier est sollicitée à plusieurs forces résistantes telles que l'air, la pente de la route et la résistante de frottement entre les roues et la route. La force motrice doit être strictement supérieure aux forces résistives pour assurer le déplacement du véhicule. La figure 4.2 détaille toutes les forces appliquées au véhicule. Le modèle longitudinal du véhicule est défini par l'équation (4.1) à travers l'application du principe fondamental de la dynamique (*PFD*) :

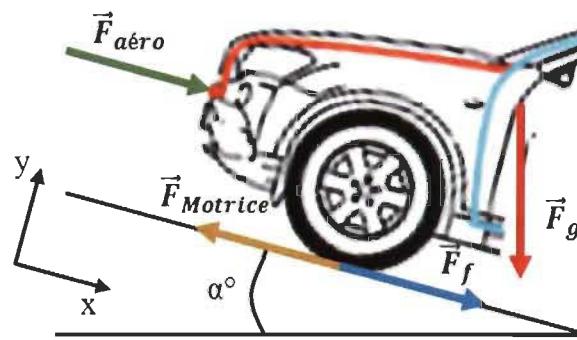


Figure 4.2 : Diagramme de force appliquée au véhicule

$$F_{Motrice} = F_I + F_{aéro} + F_g + F_f \quad (4.1)$$

Où :

- $F_{Motrice}$: Force motrice d'entrainement
- F_I : Force de l'inertie du véhicule
- $F_{aéro}$: Force aérodynamique
- F_g : Forces de gravité
- F_f : Forces de frottement pneus-route

D'autre manière, le modèle longitudinal du véhicule s'écrit comme suit :

$$F_{Motrice} = M\dot{v} + \frac{1}{2}\rho_a C_d A_v v^2 + Mg \sin(\alpha) + Mg\mu \cos(\alpha) \quad (4.2)$$

Où :

- M : La masse du véhicule (kg)
- \dot{v} : L'accélération du véhicule (m/s^2)
- v : La vitesse du véhicule (m/s)
- ρ_a : La densité de l'air (kg/m^3)
- C_d : Coefficient de résistance de l'air (n/a)
- A_v : Surface frontale du véhicule (m^2)
- μ : Coefficient de frottement des roulements (n/a)
- α : La pente de la route (deg)

La puissance mécanique consommée au niveau des roues par le véhicule est obtenue par la multiplication de l'équation (4.2) par « v ».

$$P_{Mec} = F_{Motrice} \times v \quad (4.3)$$

À partir de la P_{Mec} , la puissance électrique P_e consommée par les batteries peut être calculée en considération des rendements des systèmes entre les batteries et les roues comme le montre l'équation (4.4). Cela permet d'effectuer une prévision de l'énergie nécessaire pour arriver à la destination en tenant compte de la quantité d'énergie emmagasinée des batteries et surtout de tenir en compte de sa dégradation.

$$P_e = \frac{P_{Mec}}{\eta_g} \quad (4.4)$$

$$\eta_g = \eta_{conv} \eta_{mot} \eta_{tran} \eta_{diff} \quad (4.5)$$

Avec :

- η_{conv} : Rendement du convertisseur DC-AC
- η_{mot} : Rendement du moteur électrique de traction
- η_{tran} : Rendement de la transmission
- η_{diff} : Rendement du différentiel

4.2 Modèle de la batterie acide-plomb

Le véhicule Némo disposé au centre de recherche IRH est équipé par des batteries acide-plomb. Les méthodes de modélisation des batteries qui sont basées sur les réactions chimiques et des principes physiques sont non seulement généralement complexes pour les comprendre mais aussi elles sont lourdes dans les calculs et dans la simulation. Une structure de modèle de circuit équivalent simple qui représente la dynamique des batteries acide-plomb en fonction des différents paramètres de façon rapide et efficace comme le montre dans la figure 4.3 [41, 42].

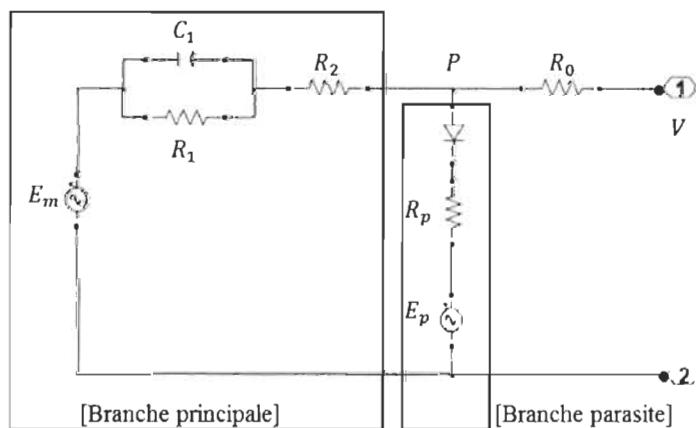


Figure 4.3 : Circuit électrique équivalent de batterie acide-plomb [41]

Le circuit est composé de deux parties principales : une branche principale qui décrit la dynamique de la batterie dans la plupart des conditions et une branche parasite qui représente la batterie à la fin de la charge. La force électromotrice (E_m) donnée par l'équation (4.6) est la tension développée par la batterie qui prend une valeur constante lorsque la batterie est totalement chargée et commence à varier lors d'utilisation suivant la température et son état de charge «state of charge (SOC)».

$$E_m = E_{m0} - K_E(273 + T)(1 - SOC) \quad (4.6)$$

Où :

- E_m : Tension de la branche principale (V)
- E_{m0} : Tension circuit ouvert à charge pleine (V)
- K_E : Constante (V/ $^{\circ}\text{C}$)
- T : Température interne de la batterie ($^{\circ}\text{C}$)
- SOC : État de charge (0-1)

La résistance de la batterie R_0 , dépend essentiellement de l'état de charge et ne tient pas compte de l'effet du changement de la température.

$$R_0 = R_{00}(1 + A_0(1 - SOC)) \quad (4.7)$$

- R_{00} : représente la même valeur de R_0 pour un SOC=1 (Ω)
- A_0 : Constante (Ω)

La résistance R_1 qui représente la procédure chimique dans la branche principale augmente de façon exponentielle lorsque la batterie commence à se décharger.

$$R_1 = -R_{10} \ln(DOC) \quad (4.8)$$

- R_{10} : Constante (Ω)
- DOC : Profondeur de charge (0-1)

R_2 et C_1 sont calculés à partir des deux équations (4.9) et (4.10) :

$$R_2 = R_{20} \frac{\exp(A_{21}(1 - SOC))}{1 + \exp\left(\frac{A_{22}I_m}{I^*}\right)} \quad (4.9)$$

- R_{20} : Constante (Ω)
- A_{21}, A_{22} : Constante (n/a)
- I_m : Courant dans la branche principale (A)
- I^* : Courant nominal (A)

$$C_1 = \frac{\tau_1}{R_1} \quad (4.10)$$

- C_1 : Capacité (F)
- τ_1 : Temps pour remonté la tension (sec)

La branche parasite est fonctionnelle seulement lors de la phase de recharge pour décrire les pertes par effet de joules ainsi que la dynamique lente de la procédure chimique. Le courant qui circule dans cette branche est donné par l'équation suivante :

$$I_p = V_{PN} G_{p0} \exp\left(\frac{V_{PN}}{V_{p0}} + A_p \left(1 - \frac{T}{T_f}\right)\right) \quad (4.11)$$

- V_{PN} : Tension aux bornes de la branche parasite (V)
- G_{p0} : Constante liée à la batterie (n/a)

- V_{p0} : Tension constante (V)
- T_f : Température de congélation de l'électrolyte ($^{\circ}\text{C}$)

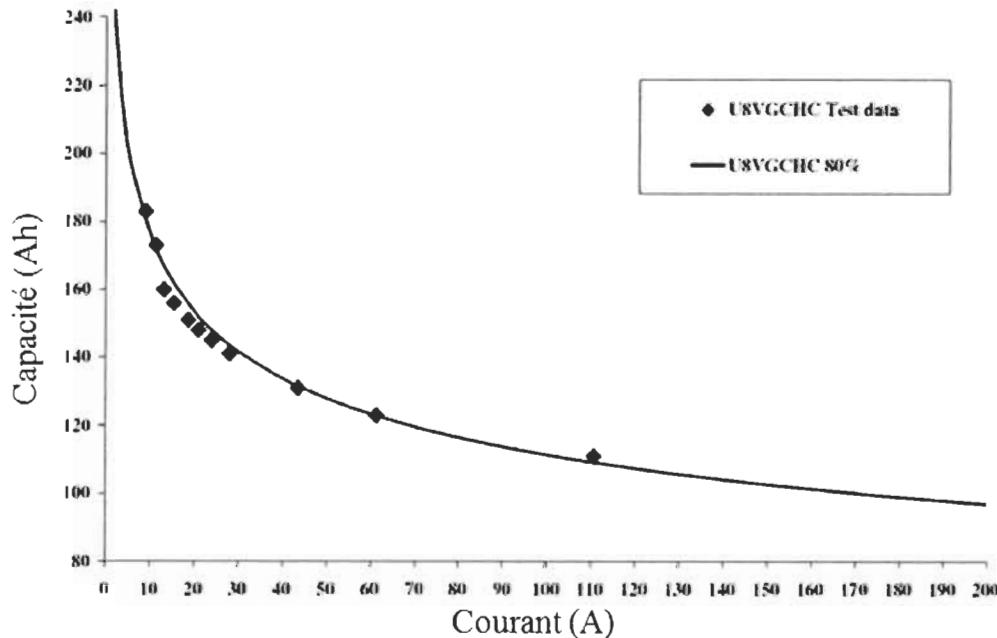


Figure 4.4 : Capacité en fonction du courant de décharge [43]

Il existe deux paramètres importants dans la batterie : l'état de charge (*SOC*) et la profondeur de charge (*DOC*). Ces deux paramètres sont calculés à partir de l'énergie dépensée lors de l'utilisation et sa capacité. Dans le calcul du *SOC*, la capacité dépend essentiellement de la température. Par contre dans le calcul du *DOC*, la capacité varie en fonction du courant nominal de décharge tel qu'il est représenté dans la figure 4.4 et selon le fabricant de la batterie [43].

Par la suite, les équations (4.12)-(4.13) permettent d'identifier l'état de charge, la profondeur de charge et la capacité de la batterie [42].

$$SOC = 1 - \frac{Q_e}{C(0, T)} \quad (4.12)$$

$$DOC = 1 - \frac{Q_e}{C(I, T)} \quad (4.13)$$

$$C(I, \theta) = \frac{K_c C_0 \left(1 + \frac{T}{T_f}\right)^\varepsilon}{1 + (K_c - 1) \left(\frac{I}{I^*}\right)^\varepsilon} \quad (4.14)$$

Avec :

- Q_e : Charge extraire de la batterie (A×h)
- $C(I, T)$: Capacité de la batterie (A×h)
- K_c : Constante (n/a)
- C_0 : Capacité nominale à 0°C (A×h)
- I^* : Courant nominal de décharge (A)

4.3 Modèle de dégradation de la batterie

La durée de vie restreinte des batteries ouvre plusieurs axes de recherche qui étudient le phénomène de la dégradation de la batterie. Le modèle d'usure utilisé dans cette partie est tiré des travaux de Martel et al. [6] et Maalej et al. [44]. La profondeur de décharge (DOD) et le nombre de cycles de charge-décharge sont les deux paramètres qui influent sur la dégradation. L'équation (4.15) montre le principe du calcul de la profondeur de décharge à chaque instant.

$$DOD(i) = \frac{E_B^{max} - E_B(i)}{E_B^{max}} \quad (4.15)$$

Où :

- E_B^{max} : Énergie maximale emmagasinée de la batterie lorsqu'elle est neuve (A×h)

- $E_B(i)$: Énergie restante à l'instant «*i*» ($A \times h$)

Le nombre de cycles de charge-décharge de la batterie est donné par le fabricant. Afin de minimiser la dégradation de la batterie, le constructeur impose une plage de fonctionnement tel que la profondeur de décharge ne dépasse pas 80% [43]. C'est une fonction exponentielle décroissante qui dépend de la profondeur de décharge. Plus la batterie subit des décharges profondes, plus que le nombre de cycles décroît. La figure 4.5 illustre le nombre de cycles pour une batterie acide-plomb.

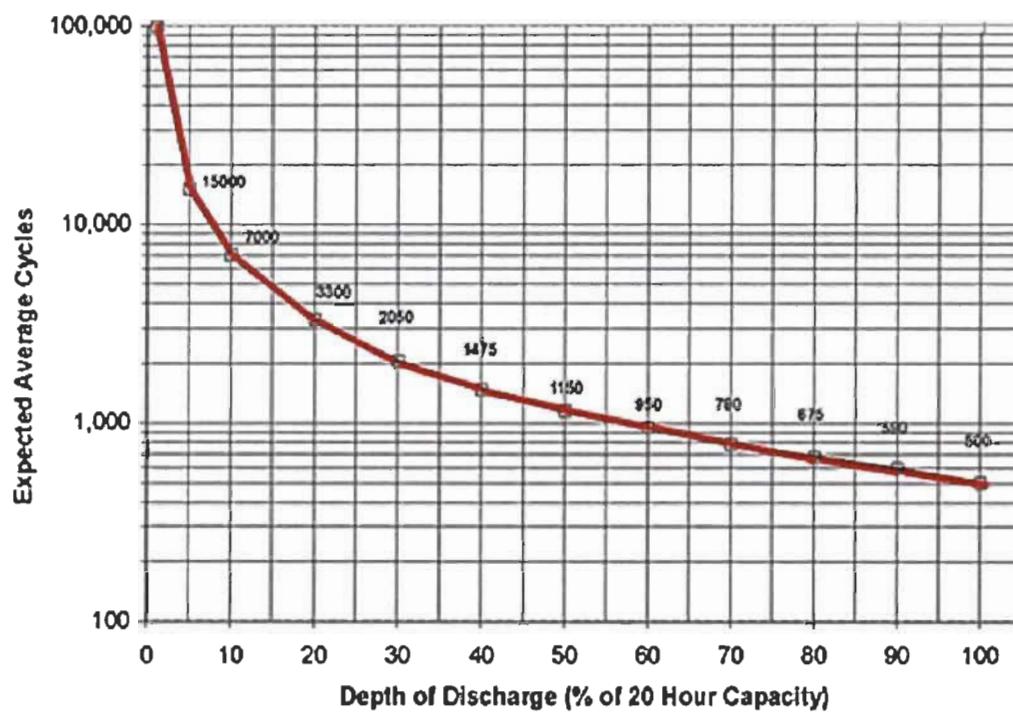


Figure 4.5 : Nombre de cycle versus la profondeur de décharge [43]

Cette courbe facilite l'intégration de la variation du nombre de cycles dans l'algorithme de l'usure et permet de calculer la capacité totale de la batterie pour sa durée de vie suivant le mode d'emploi comme le montre le tableau 4.1.

L'usure de la batterie est une valeur qui varie entre «0» et «1». Pour une batterie neuve, ce facteur prend «0», et il prend «1» lorsque la batterie atteint la fin de sa durée de vie. L'équation (4.16) permet de calculer l'usure (ξ) en fonction du débit d'énergie dépensé jusqu'à l'instant « i » d'usage.

Tableau 4.1 : Capacité de la batterie totale suivant la profondeur de décharge

DOD (%)	Nombre de cycle	Capacité (A×h)
5	15000	137250
10	7000	128100
20	3300	120780
30	2050	112545
40	1475	107970
50	1150	105225
60	950	104310
70	780	99918
80	675	98820
90	590	97173
100	500	91500

$$\xi = \frac{C_{\text{dépensée}}}{C_{\text{totale}}} \quad (4.16)$$

Avec :

- $C_{\text{dépensée}}$: Capacité dépensée dès le départ jusqu'à l'état « i » (A×h)
- C_{total} : Capacité totale durant la vie suivant le mode d'emploi (A×h)

La capacité dépensée est calculée dans le système discret par la formule suivante :

$$C_{\text{dépensée}} = \sum_{k=0}^N (I(k) \alpha_{DOD}(k)) \Delta T \quad (4.17)$$

α_{DOD} est un facteur de pénalité qui dépend essentiellement de la profondeur de décharge et appartient dans l'intervalle [1,2].

$$\alpha_{DOD} = 1 + DOD(k) \quad (4.18)$$

La capacité totale est obtenue par l'équation suivante :

$$C_{total} = C_{nom} \times DOD \times N_{cycle}(DOD) \quad (4.19)$$

Avec :

- C_{nom} : Capacité nominale suivant la profondeur de décharge (A×h)
- N_{cycle} : Nombre de cycle suivant la profondeur de décharge

4.4 Gestion énergétique du VEH

Le VEH dispose de deux sources d'énergie, les batteries et la génératrice. Les batteries qui agissent comme source principale pour alimenter le moteur électrique de traction. La génératrice se classe comme une source secondaire pour charger les batteries et pour supporter une quantité d'énergie lors des accélérations. Les batteries sont initialement chargées, pour un long trajet l'énergie emmagasinée dans les batteries est insuffisante pour atteindre la destination finale. Cependant, l'intervention de la génératrice est primordiale pour compléter l'énergie manquante. Le coût de l'énergie délivrée par la génératrice est élevé par rapport à celui des bornes de recharge. Cela implique de calculer l'énergie nécessaire à délivrer par la génératrice pour compléter la trajectoire sans décharger les batteries en dessous du seuil donné par le constructeur.

Le SGE doit déterminer le moment approprié pendant la trajectoire pour démarrer la génératrice. En effet, un retard dans le démarrage de la génératrice pendant le voyage provoque une dégradation très importante de la batterie surtout lorsque le seuil minimal est dépassé.

Le conducteur indique sa destination finale dès le départ. Le système de gestion d'information (SIG) fournit les informations liées au parcours (Distance, profil de la pente, vitesse maximale pour chaque zone, circulation). Par conséquent, le SGE peut estimer l'énergie nécessaire pour atteindre le point final. L'équation (4.20) montre le calcul de l'énergie des batteries (E_B) dans le système discret à chaque pas d'échantillonnage.

$$E_B(k) = E_B(k - 1) + (\eta_g)^{-1} P_{Mec}(k - 1) \Delta T \quad (4.20)$$

Avec :

- η_B : Rendement des batteries (n/a)

Par la suite, l'énergie à consommer tout au long de la trajectoire peut être déduite comme suit :

$$E_B(N) = E_B(k) + \sum_{k=k+1}^N (\eta_g)^{-1} P_{Mec}(k) \Delta T \quad (4.21)$$

Où N est le nombre total d'échantillons.

Dans l'équation (4.20), le premier terme représente l'énergie consommée par les batteries en temps réel et le deuxième terme indique la prévision de l'énergie à consommer jusqu'à la fin du voyage.

Deux critères sont pris en considération dans l'étude : Le coût de l'usure des batteries qui est un facteur important puisque les batteries sont la partie la plus chère dans les VEs et, le coût de l'énergie des deux carburants. Le but est de trouver un compromis entre ces deux

critères antagonistes. En effet, si la dégradation des batteries est le critère le plus favorisé, le coût de l'énergie consommé par la génératrice sera très élevé.

La décision du SGE revient toujours à minimiser la fonction du coût qui présente les critères comme le montre l'équation (4.22) :

$$J(k) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \left[C_u (\xi(i) - \xi(i-1))^2 \right] + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \left[C_e (E_B(i) - E_B(i-1))^2 \right] \quad (4.22)$$

Avec :

- C_u : Coût dû à la dégradation des batteries
- C_e : Coût dû au coût de recharge des batteries par la génératrice

La fonction du coût est insuffisante pour trouver la bonne planification énergétique qui contient seulement les critères à minimiser. Les contraintes de chaque système d'énergie et sa plage admissible de fonctionnement devrait être prise en considération aussi :

- $DOD(i) < DOD_{max}$: La profondeur de décharge des batteries doit être toujours inférieure 80% tout au long de la trajectoire.
- $P_G(i) \leq P_G^{max}$: La puissance à délivrer par la génératrice à chaque instant ne dépasse pas la limite maximale.

La procédure d'optimisation se base sur la programmation dynamique qui est une technique efficace et largement utilisée dans la gestion énergétique du véhicule [45, 46]. En effet, l'algorithme effectue un balayage complet des solutions possibles suivant les contraintes imposées pour minimiser la fonction de coût.

4.5 Conclusion

Les modèles présentés dans ce chapitre permettent de prendre des décisions, de traiter le mode opératoire de la génératrice bi-carburant selon les informations collectées. Le modèle longitudinal du véhicule permet de calculer et de prédire l'énergie consommée par le VE. Ainsi, le modèle de la batterie et de dégradation donne une information sur l'état réel de la batterie pour permettre à la génératrice d'augmenter la durée de vie. Tous ces modèles permettent au système la gestion énergétique de prendre la bonne décision tout au long du trajet suivant les critères à minimiser et les différentes contraintes.

Chapitre 5 - Validation théorique et expérimentale

Après avoir présenté dans les chapitres précédents, la méthodologie suivie dans ce projet, le travail présenté dans ce chapitre se réfère à l'objectif principal, soit de valider le modèle en ligne de la génératrice bi-carburant hydrogène-essence, rechercher des conditions optimales et, par la suite, élaborer un scénario réel pour un VEH à base d'une génératrice pour avoir une idée sur l'apport de cette deuxième source d'énergie.

5.1 Banc d'essai



Figure 5.1 : Véhicule électrique hybride d'essai Némo

L'IRH dispose d'un VE pour les essais routiers (figure 5.1). La génératrice est installée sur la plateforme de ce petit camion avec son interface de puissance. L'architecture adoptée pour l'hybridation est l'architecture série qui offre l'opportunité au groupe électrogène de

travailler à son régime optimal sans prendre en considération le moteur électrique de traction.

Les caractéristiques de ce véhicule sont données dans le tableau 5.1.

Tableau 5.1 : Paramètres du Némo

Dimension (m)		Poids (kg)		Pneus	
Longueur	3.51	Masse	1470	Identification	175/70R13
Largeur	1.46			Diamètre (m)	0.58
Hauteur	1.91				

Ce véhicule est équipé d'un ordinateur de bord et un Compact-Rio qui facilite le traitement des données en temps-réel des VEHs.

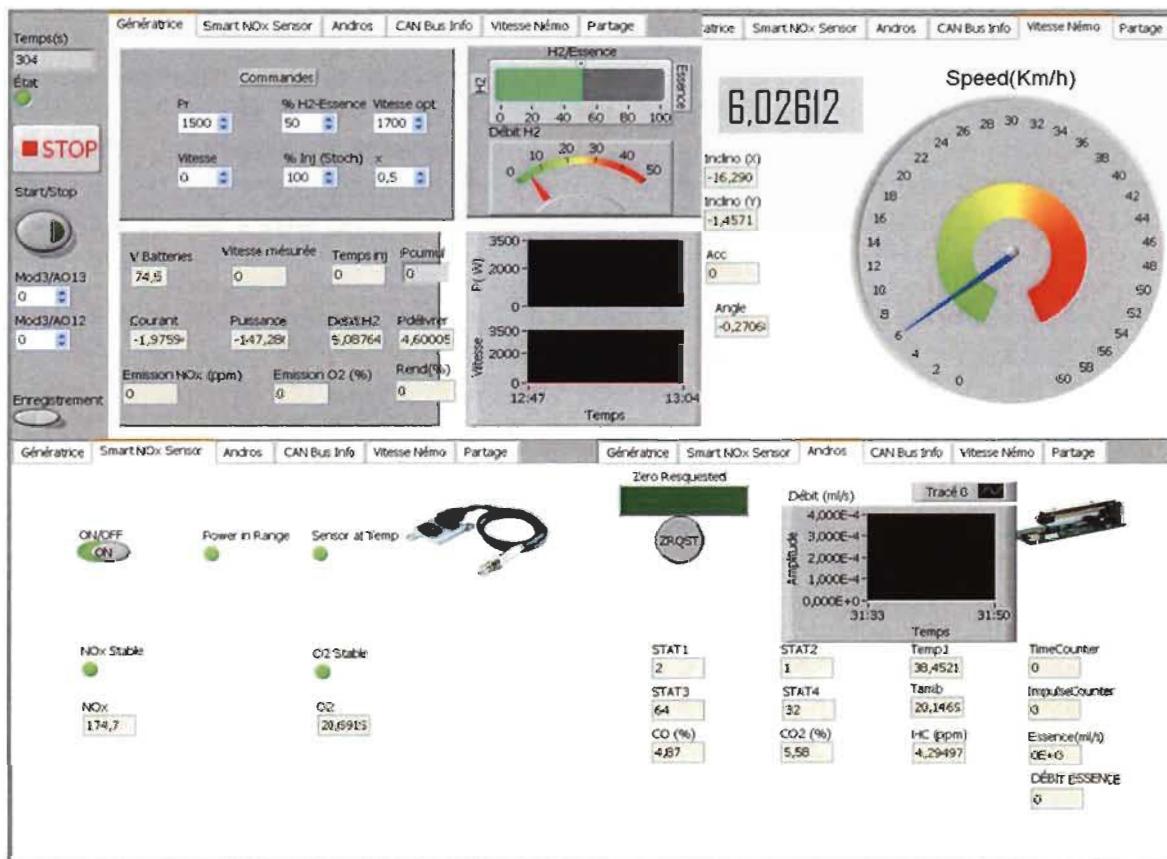


Figure 5.2 : Interface de commande LabVIEW

La figure 5.2 montre les différents onglets de l'interface de commande LabVIEW. Les capteurs installés sur le Némo permettent d'envoyer les informations pour contrôler le fonctionnement de la génératrice ainsi que l'état de charge des batteries.

5.2 Validation de la méthode de suivi de rendement de la génératrice bi-carburant

Cette validation vise à montrer que la méthode proposée possède des avantages par rapport aux méthodes utilisées précédemment.

5.2.1 Modèle en ligne de la génératrice

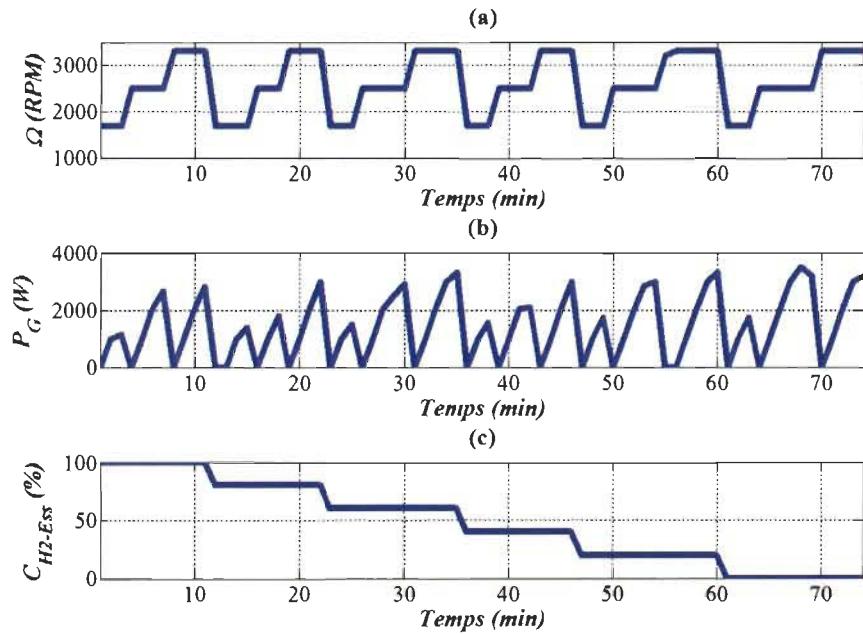


Figure 5.3 : Cycle de chargement de la génératrice. (a) Profil de vitesse ; (b) Puissance à délivrer ; (c) Variation du pourcentage des deux combustibles

Afin de valider le modèle en ligne, plusieurs essais ont été effectués sur le banc d'essai présenté dans la figure 3.2. Ces expériences sont réalisées par la variation des paramètres d'entrée du groupe électrogène (Ω, P_G, C_{H_2-Ess}) et par la suite, visualisées en termes de

différence entre les valeurs du rendement données par le modèle $MCR_{en\ ligne}$ et les valeurs mesurées. La figure 5.3 montre le profil de chargement de chaque paramètre d'entrée. Trois paliers de vitesse de rotation RPM sont sélectionnés et à chaque fois, la puissance à délivrer ainsi que le pourcentage de chaque combustible est varié afin de visualiser le comportement de la génératrice pour différents régimes.

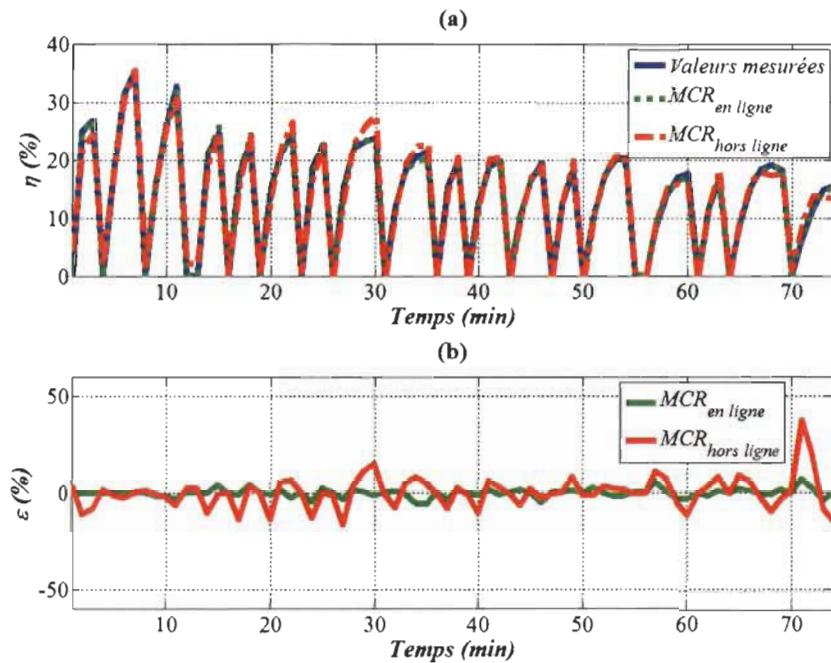


Figure 5.4 : Validation expérimentale du modèle de la génératrice. (a) Comparaison du rendement entre les valeurs mesurées, $MCR_{hors\ ligne}$ et $MCR_{en\ ligne}$; (b) Erreur relative

À travers le cycle de chargement précédemment illustré, la figure 5.4 (a) montre une comparaison entre les valeurs de l'efficacité mesurées, les valeurs calculées à partir du modèle $MCR_{en\ ligne}$ et les valeurs trouvées par la méthode de $MCR_{hors\ ligne}$. En effet, la différence entre les deux approches est au niveau des paramètres du modèle. La méthode hors-ligne se base sur une base de données collectée à partir des essais antérieurs du système qui ne change pas en fonction du temps lors du fonctionnement de la génératrice. Par contre,

la méthode en ligne utilise sur une base de données initiale au démarrage de la génératrice, cette base donnée sera mise à jour lorsqu'il aura un rendement supérieur à celui existant dans la base de données. La figure 5.4 (b) indique l'erreur relative entre les deux modèles paramétriques. Une erreur maximale de 37,56% est donnée par le modèle hors-ligne qui démontre que la génératrice change rapidement son comportement même si la base de données initiale rassemble tous les régimes de fonctionnement. Par contre, une erreur relative maximale de 6,93% par la méthode en ligne démontre sa capacité à mieux suivre le comportement de la génératrice et permet l'adoption de ce modèle.

Pour assurer l'adoption du modèle, une comparaison a été effectuée par l'utilisation de l'approche du réseau de neurones artificiel (RNA). Le RNA est une approche applicable dans différents domaines qui permet de modéliser un système par une collection des données des entrées et des sorties. Dans cette étude, les essais effectués dans la partie de la cartographie ont servi à l'entraînement, la validation et le test du bloc de RNA. Sept couches cachées qui prennent comme entrées Ω , P_G et $C_{H_2-E_{SS}}$ avec une couche de sortie qui représente l'efficacité de la génératrice. La figure 5.5 (a) représente la différence entre les deux modèles (RLS en ligne et RNA) et les valeurs mesurées. Les deux modèles suivent correctement l'efficacité de la génératrice pour le même cycle de chargement (figure 5.3). Une comparaison au niveau de l'erreur relative est représentée dans la figure 5.5 (b). L'erreur relative maximale du modèle RNA est de 8,76% qui est proche à celle-ci obtenue par le modèle MCR_{en ligne}. Cependant, la cause principale pour le choix de modèle MCR_{en ligne} dans cette étude est l'aspect en ligne. En effet, le changement du comportement de la génératrice rendait la méthode du RNA moins avantageuse, puisque la base de données utilisée pour l'entraînement du modèle est prise dans d'autres conditions, alors que le système travaille sous différentes

conditions opératoires, ce qui influe sur la base de données. Ainsi, le vieillissement des composantes de la génératrice est un facteur très important qui influence le comportement et par la suite la base de données collectée précédemment pour l'entraînement est devenue non représentative.

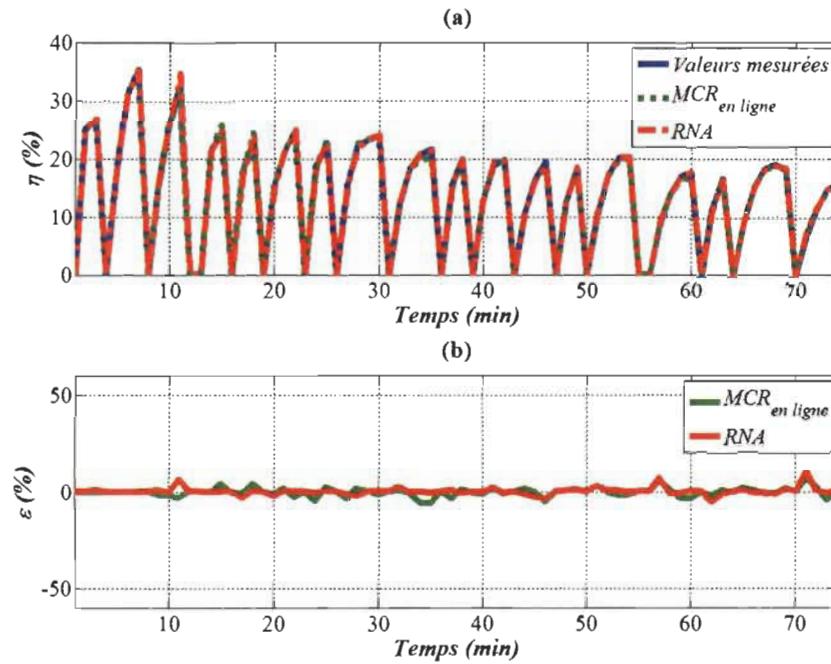


Figure 5.5 : Comparaison entre le modèle de $MCR_{En \ ligne}$ et le modèle de réseau de neurones. (a) Rendement de la génératrice ; (b) Erreur relative

5.2.2 Recherche des conditions optimales

Cette section montre une comparaison entre l'approche présentée dans cette étude et la méthode industrielle à vitesse constante pour surveiller l'efficacité du générateur. Un scénario pour un VEH a été adopté pour visualiser le comportement du générateur en fonction de la puissance électrique nécessaire à fournir par les batteries pour alimenter le moteur électrique de traction. Le cycle de conduite standard de l'US Environmental Protection Agency US06 a été utilisé dans cette étude (figure 5.6 (a)). Ce cycle de conduite est ajusté de manière à

pouvoir être appliqué avec les paramètres physiques du VEH expérimental (figure 5.1) afin de déterminer la puissance électrique totale consommée par le véhicule P_e à chaque instant (figure 5.6 (b)). Cette P_e est calculée à partir du modèle longitudinal du véhicule présenté dans le chapitre précédent par l'équation (4.4).

La P_e est décomposée en deux puissances pour identifier la puissance fournie par les batteries P_B et la puissance délivrée par le générateur P_G illustré à la figure 5.6 (c). En effet, en utilisant la moyenne mobile cumulative de la P_e , on obtient la P_G à délivrer à chaque instant (k) en utilisant l'équation (5.1). Par la suite, la P_B est calculée par l'équation (5.2).

$$P_G(k) = P_G(k-1) + \frac{P_e(k) - P_G(k-1)}{k} \quad (5.1)$$

$$P_B(k) = P_e(k) - P_G(k) \quad (5.2)$$

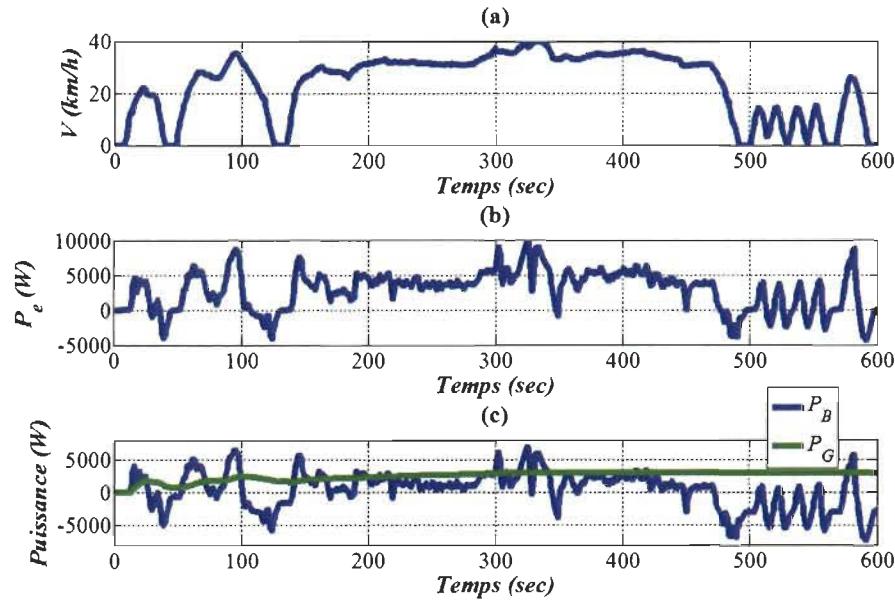


Figure 5.6 : Scénario pour un VEH basé sur un générateur bi-carburant. (a) : Cycle de conduite US06 ; (b) : Puissance de traction électrique ; (c) : Distribution de l'énergie électrique

L'algorithme commence par la base de données fournie par la cartographie du générateur. À chaque incrémentation, le programme de surveillance de l'efficacité recherche des conditions optimales (RPM , C_{H_2-Ess}) en fonction de la puissance requise pour maximiser l'efficacité.

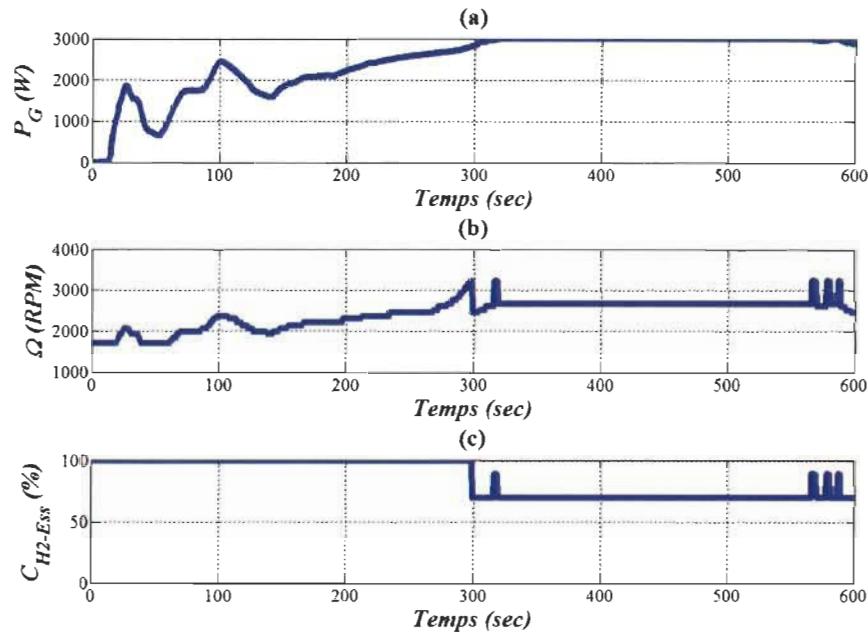


Figure 5.7 : Condition optimale pour le générateur : (a) Puissance du générateur imposée ; (b) : Vitesse de rotation optimale ; (c) Pourcentage optimal de chaque carburant

La figure 5.7 (a) représente la puissance délivrée par le générateur le long de la trajectoire. La figure 5.7 (b) et 5.7 (c) montrent respectivement la variation de la vitesse de rotation du MCI et le pourcentage de chaque combustible qui sont directement liés à la puissance du générateur. En effet, la puissance est un paramètre similaire au couple résistant. Cela implique la variation de Ω et C_{H_2-Ess} pour supporter ce couple résistif à chaque instant. On observe également dans ce scénario que le générateur fonctionne le long de la trajectoire avec

des mélanges riches en pourcentage d'hydrogène par rapport à l'essence. Ceci permet d'obtenir deux avantages à la fois, une efficacité maximale du générateur et de faibles émissions. En effet, des mélanges avec un pourcentage dominant de H_2 par rapport à l'essence permettent de générer de faibles émissions de CO , de CO_2 et de HC . Les émissions de NO_x sont également faibles en raison de l'utilisation de mélanges pauvres en H_2 .

L'objectif principal de cette étude est d'assurer le fonctionnement avec le maximum d'efficacité du générateur. L'utilisation des deux combustibles dans le générateur vise essentiellement à une efficacité optimale et à des émissions polluantes faibles.

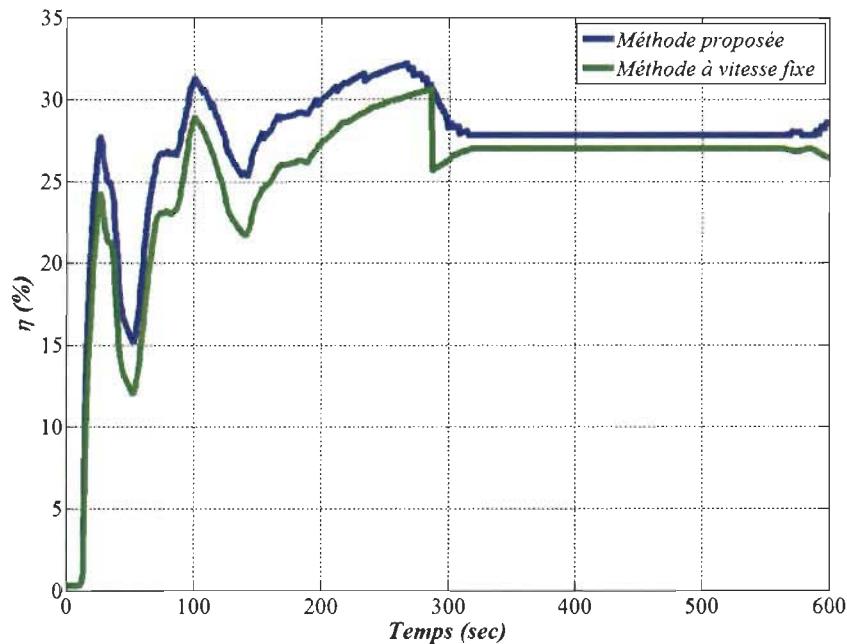


Figure 5.8 : Comparaison de l'évolution du rendement entre les deux approches pour un scénario de conduite d'un VEH basé sur un générateur bi-combustible

La figure 5.8 montre l'évolution de l'efficacité du générateur pour l'approche à vitesse constante et l'approche présentée dans cette étude. En conséquence, la plupart des constructeurs industriels qui fabriquent les groupes électrogènes ont un mode de

fonctionnement basé sur une vitesse constante du MCI. Dans le cas de cette étude, la vitesse de rotation du MCI est fixée à 2800 tr/min pour supporter toutes les puissances données par le même scénario. Les résultats montrent que la méthode de contrôle de l'efficacité du groupe est plus avantageuse. Une augmentation de 7,11% a été observée avec la méthode proposée par rapport à la méthode à vitesse constante. En effet, la procédure de la méthode de surveillance de l'efficacité permet de trouver les meilleurs paramètres d'entrée nécessaire telle que Ω et C_{H_2-ESS} qui supporte le couple résistant. Cependant, dans la méthode à vitesse constante, la génératrice est opérée avec une vitesse constante pour tous les régimes, ce qui engendre plus de perte énergétique surtout dans le cas où la puissance électrique est faible, faisant travailler dans ce cas la génératrice à des vitesses plus élevées que nécessaire.

5.3 Validation de la méthode de gestion énergétique

5.3.1 Présentation du scénario

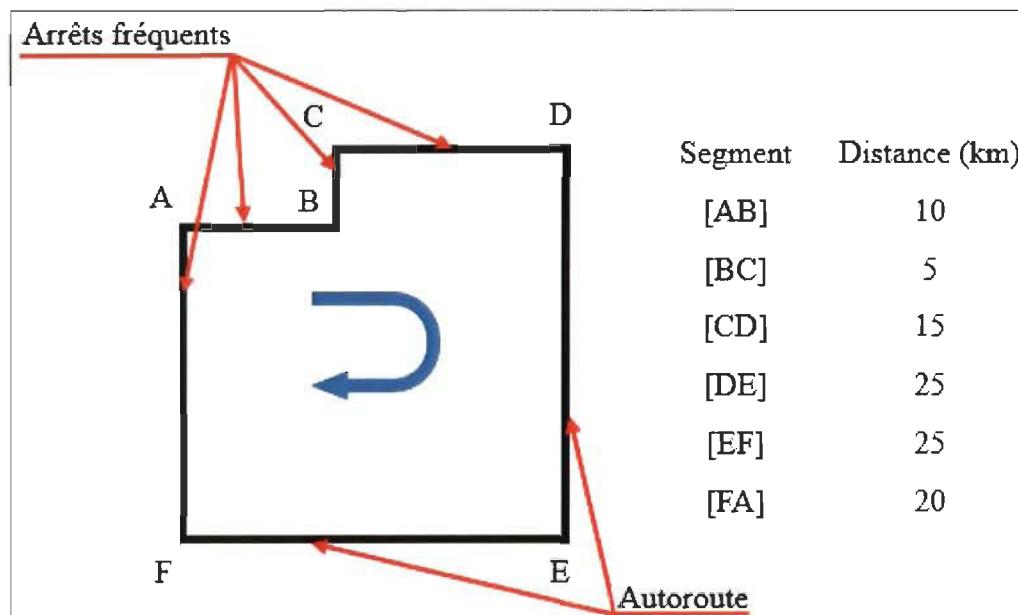


Figure 5.9 : Trajectoire quotidienne d'un véhicule de livraison

Cette partie présente la planification énergétique d'un VEH à base d'un groupe électrogène bi-carburant qui prend en compte le *SOC*, la dégradation des batteries et la consommation des deux carburants. Cette section permet aussi de déterminer l'instant «*t*» pour démarrer la génératrice ainsi que son régime. D'abord, la planification s'effectue au départ hors-ligne grâce aux données fournies par le SIG. Ensuite, l'algorithme fait des corrections en temps-réel pour l'énergie consommée par les batteries. Un scénario a été sélectionné pour traiter le problème de planification (figure 5.9). En effet, un camion de livraison électrique hybride à base d'un groupe électrogène effectue un trajet quotidien. Le camion commence du point «A» avec un *SOC* égal à 100%. Les trois premiers segments (A-B-C-D) présentent des arrêts fréquents puisque les points de livraison sont près de la ville. Chaque fois, le conducteur s'arrête dans les points de livraison pendant une période de 10 min. Les deux points de livraison E et F sont atteints par une autoroute. Enfin, le camion revient au point de départ «A».

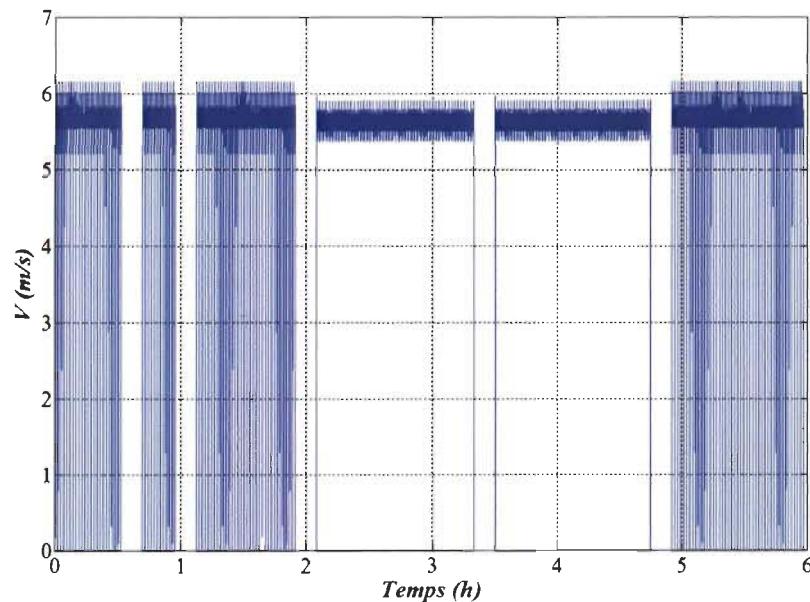


Figure 5.10 : Cycle de vitesse Némo

Le cycle de vitesse utilisé dans cette partie est obtenu par les essais routiers de Némo sur le campus universitaire. En effet, le véhicule se déplace pendant l'expérience avec une vitesse qui ne dépasse pas 20 km/h (5,56 m/s). Toutes les données obtenues lors des tests sont enregistrées par l'ordinateur à bord du Némo. La figure 5.10 représente le cycle de vitesse du véhicule en élargissant ces tests à une distance de 100km au lieu de 10km.

5.3.2 *Procédure suivie dans la simulation*

L'approche adoptée dans cette partie est la programmation dynamique qui permet de trouver la meilleure solution en balayant toutes les solutions possibles. La solution optimale qui est le coût minimum d'utilisation est mesurée par la fonction de coût donnée par la fonction de coût $J(k)$ (équation (4.21)). Cinq scénarios sont traités dans cette étude comme suit :

➤ *1^{er} Scénario*

Le programme s'exécute avec une *DOD* minimum à 10%. Cette condition est imposée pour permettre à la génératrice de fonctionner en régime élevé où moyen (dans le cas contraire d'une *DOD* près de 0% la génératrice fonctionnera à bas régime et donc à faible rendement). Si *DOD* plus petite que 10% et en fonction de l'énergie stockée dans les batteries, (sachant que les batteries doivent fonctionner avec une profondeur de décharge minimum à 10%) l'algorithme estime l'énergie nécessaire pour atteindre le point final. La différence de ces deux énergies va permettre de faire démarrer la génératrice (ou non) dépendamment des résultats estimés par l'algorithme.

Si l'énergie estimée pour compléter la tâche est supérieure à l'énergie stockée, le programme calcule l'énergie à délivrer par la génératrice en respectant ces contraintes :

- La puissance maximale de la génératrice ne peut pas dépasser 3kW.
- Le fonctionnement dans les conditions optimales de la génératrice (RPM, C_{H_2-ESS}) qui offre un rendement maximal. Ce résultat est obtenu à travers l'utilisation de l'algorithme de suivi de la génératrice présenté dans le troisième chapitre.

Dans ce cas, la génératrice commence à fonctionner. À chaque instant, l'algorithme refait le calcul en temps-réel pour l'énergie restante dans les batteries et effectue l'anticipation pour atteindre le point final ce qui permet de corriger la puissance à délivrer par le groupe électrogène. Lorsque le véhicule est arrêté dans un point de livraison, la génératrice continue à fonctionner pour recharger les batteries. Si les batteries sont rechargées à $SOC=99\%$ lors de la trajectoire et il reste encore une quantité d'énergie à délivrer par la génératrice, alors, la génératrice s'arrête et recommence dès que la DOD atteint de nouveau à 10%.

Compte tenu des données récupérées par le SGI et la destination finale l'algorithme s'exécute comme le montre la figure 5.11. La recherche des conditions optimales de la génératrice est effectuée par le modèle en ligne de la génératrice bi-carburant (figure 3.14).

➤ *i^{ème} Scénario i=2, 3, 4, 5*

L'algorithme réalise les mêmes étapes décrites dans le 1^{er} scénario avec un changement au niveau du DOD imposée pour chaque scénario. En effet, dans la figure 5.11, les deux losanges en rouge représentent les paramètres de décision, changent en fonction du scénario. Le tableau 5.2 décrit la DOD fixée pour chaque scénario.

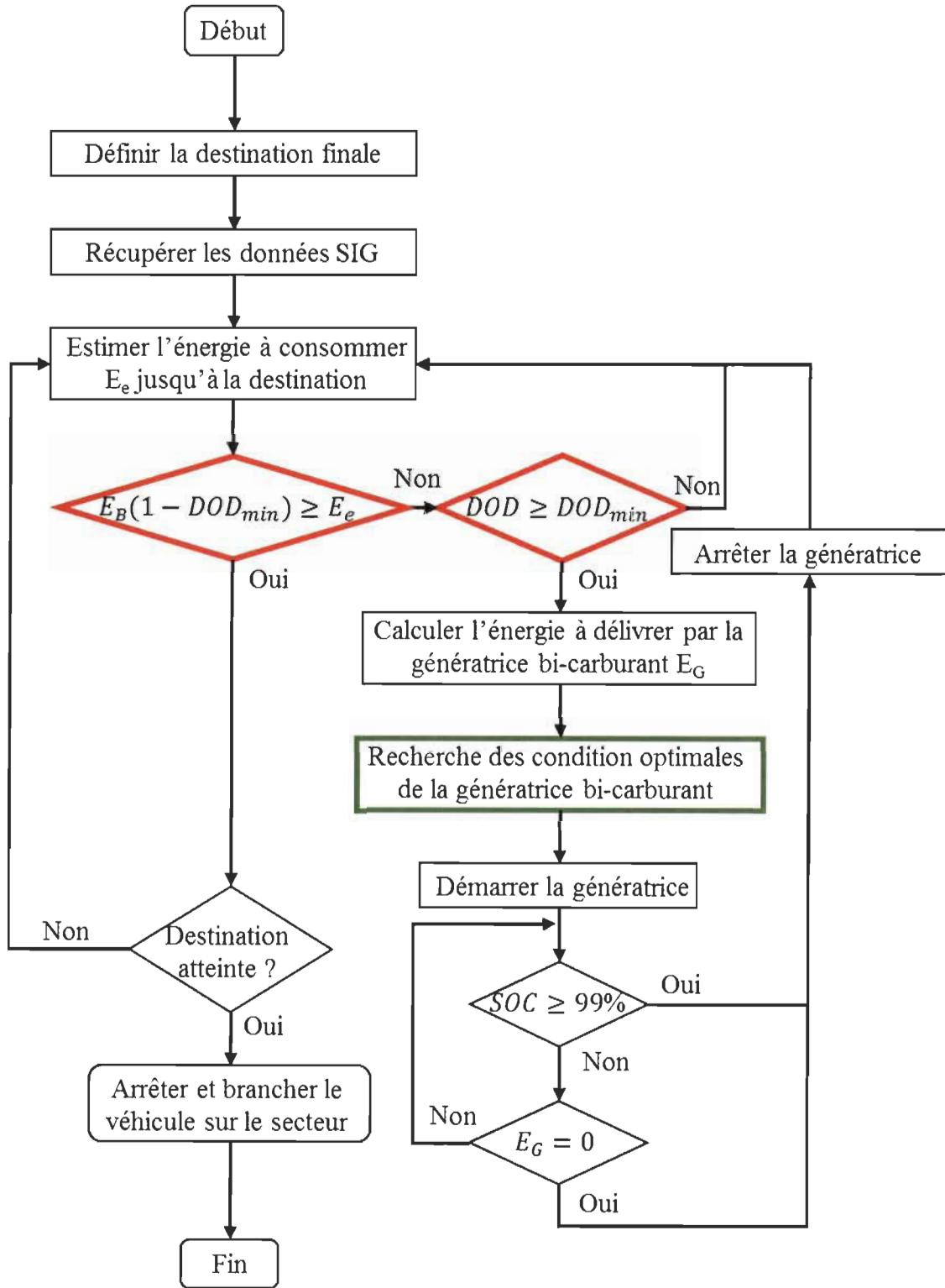


Figure 5.11 : L'algorithme de gestion énergétique du VEH à base d'une génératrice bi-carburant

Tableau 5.2 : Variation de la profondeur de décharge suivant les scénarios

1^{er} scénario	$DOD_{min} = 10\%$	$E_B(1 - 0,9) \geq E_e$
2^{ème} scénario	$DOD_{min} = 20\%$	$E_B(1 - 0,8) \geq E_e$
3^{ème} scénario	$DOD_{min} = 30\%$	$E_B(1 - 0,7) \geq E_e$
4^{ème} scénario	$DOD_{min} = 40\%$	$E_B(1 - 0,6) \geq E_e$
5^{ème} scénario	$DOD_{min} = 50\%$	$E_B(1 - 0,5) \geq E_e$

La figure 5.12 illustre un exemple d'emplacement de démarrage de la génératrice pour chaque scénario durant le parcours du véhicule.

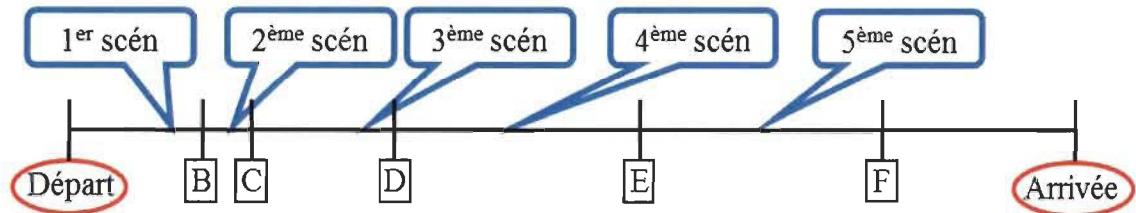


Figure 5.12 : L'ordre des itérations dans le parcours

5.3.3 Résultats de la simulation

Dans cette étude, deux résultats sont présentés, le premier s'agit d'une batterie neuve avec un coefficient d'usure $\xi=0,01$. Et le deuxième représente une batterie très dégradée tel que le coefficient d'usure atteint une valeur de 0,5. Le tableau 5.3 montre les différents paramètres trouvés pour chaque scénario. Pour une batterie neuve de capacité égale à 10kWh, le 1^{er} scénario est effectué à une $DOD_{min}=10\%$. La répartition de l'énergie à délivrer par la génératrice est donnée suivant la capacité qui peut être fournie et le niveau de charge des batteries. Pour cet exemple, l'énergie manquante pour atteindre le point final est de l'ordre 10,66 kWh. Un cycle de puissance à consommer par le moteur électrique de traction (P_e), a

été générée à travers les données SIG pour calculer la puissance à délivrer par le groupe électrogène (P_G) (équation (5.1)). L'algorithme de suivi de rendement impose les conditions de fonctionnement pour la génératrice tel que le montre le tableau 5.3. La plupart du temps, la génératrice fonctionne avec ces régimes dans la trajectoire prévue. Ainsi, si le véhicule effectue sa trajectoire avec ce scénario, la batterie subit alors un pourcentage d'usure de l'ordre de $\Delta\xi=0,0168$.

Tableau 5.3 : Résultat de la simulation pour une batterie de 10 kWh

Scénario	Générateur bi-carburant					Batterie
	E_G (kWh)	η_{moy} (%)	C_{H_2-ESS} (%)	Ω (RPM)	NO_x (ppm)	$\Delta\xi$ (%)
Batterie neuve $\xi=0,01$	1 ^{er}	10,66	27,88	89	3250	0,0168
	2 ^{ème}	9,66				
	3 ^{ème}	8,67				
	4 ^{ème}	7,68				
	5 ^{ème}	6,68				
Batterie usagée $\xi=0,5$	1 ^{er}	10,87	27,88	89	3250	0,0351
	2 ^{ème}	10,09				
	3 ^{ème}	9,32				
	4 ^{ème}	8,54				
	5 ^{ème}	7,76				

Pour les scénarios traités, la batterie fonctionne toujours dans les conditions imposées par le constructeur. En effet, les exigences imposées par le fabricant des batteries sont respectées pendant la trajectoire. Les cinq scénarios étudiés fonctionnent avec une *DOD* de 50% maximum. Cela est assuré par la génératrice qui sert à charger les batteries dès qu'elles atteignent une *DOD* correspondante pour chaque scénario.

Les courbes de l'énergie emmagasinée par les batteries pendant la trajectoire permet de mieux comprendre le phénomène de dégradation ainsi que de dégager la cause potentielle du faible pourcentage d'usure obtenu toujours dans le cas où le véhicule suit le premier scénario.

5.3.3.1 *Effet de la dégradation de la batterie et solution optimale*

La figure 5.13 montre l'évolution de l'énergie des batteries ($E_B=10 \text{ kWh}$ & $\xi=0,01$) en fonction du temps. En effet, la génératrice commence à fonctionner à partir d'une *DOD* de 10% (la courbe en bleue, pour le premier scénario). Puis, elle s'arrête à cause de *SOC* élevée atteint dans les batteries bien qu'il reste encore une quantité d'énergie à délivrer par la génératrice pour atteindre le point final. Le groupe électrogène redémarre plusieurs fois pour compléter l'énergie nécessaire et atteindre le point final avec une $DOD \leq 10\%$.

Le même phénomène est observé pour le 2^{ème}, 3^{ème}, 4^{ème} et 5^{ème} scénario. La génératrice délivre l'énergie nécessaire pour atteindre le point final tout en maintenant une profondeur de décharge inférieure à la valeur correspondante pour chaque scénario. Dans ces cas, la génératrice démarre au maximum deux fois (une fois pour les scénarios 4 et 5) puisque les batteries ont subi une profondeur de décharge très importante comparée au 1^{er} scénario.

En se référant au tableau 5.3, la valeur la plus faible de la dégradation des batteries est donnée toujours par le 1^{er} scénario dans les différents cas traités. Cette dégradation est aussi

perceptible dans les courbes de l'énergie des batteries. En effet, la batterie fonctionne avec une faible DOD qui ne dépasse pas 10% pendant la totalité de la trajectoire. Or, le modèle de dégradation présenté dans le chapitre précédent, à travers l'équation (4.16), prouve que la DOD et le facteur de pénalité α_{DOD} varie proportionnellement. Plus la DOD est élevée, plus que le coefficient α_{DOD} est grand, ce qui engendre une valeur d'usure élevée pour les autres scénarios.

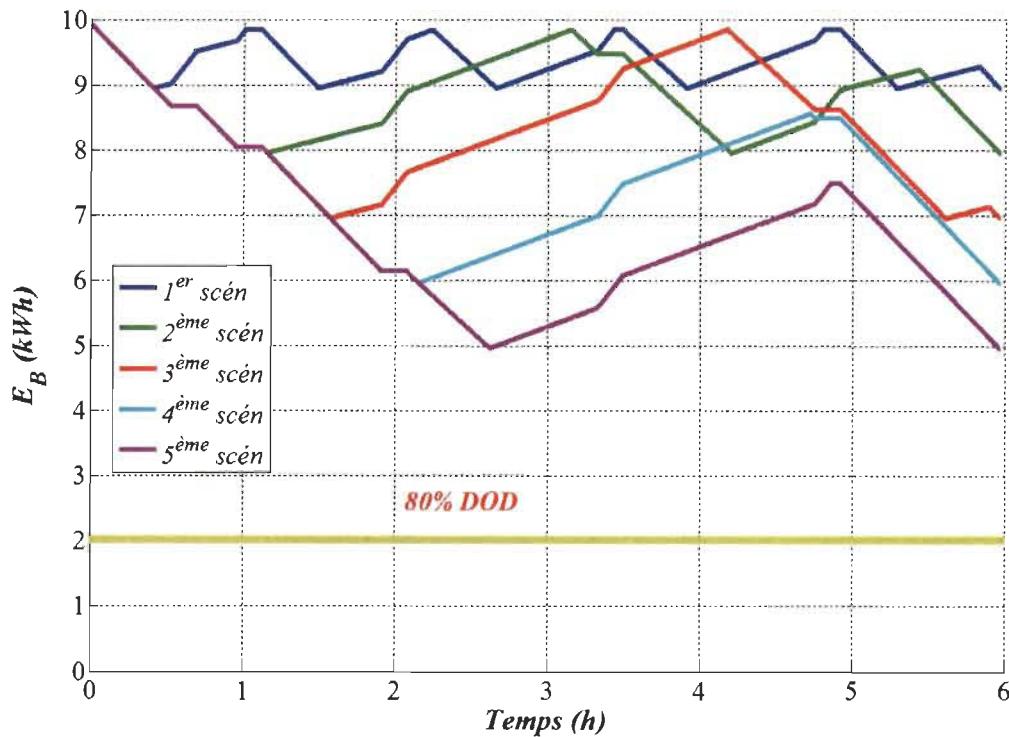


Figure 5.13 : Évolution de l'énergie restante pour une batterie 10 kWh & $\xi=0.01$

Pour le même cas, mais au lieu d'une batterie neuve, l'étude est effectuée sur une batterie dégradée dont le $\xi=0,5$. Suite à cette dégradation, la batterie perd sa capacité. Dans le premier cas, la batterie est neuve avec une capacité de 10 kWh. Mais, lorsqu'elle atteint la moitié de

sa durée de vie, la capacité totale devient de l'ordre de 7,77 kWh. La figure 5.14 représente l'état de charge de la batterie pour 10 kWh et une dégradation de 0,5.

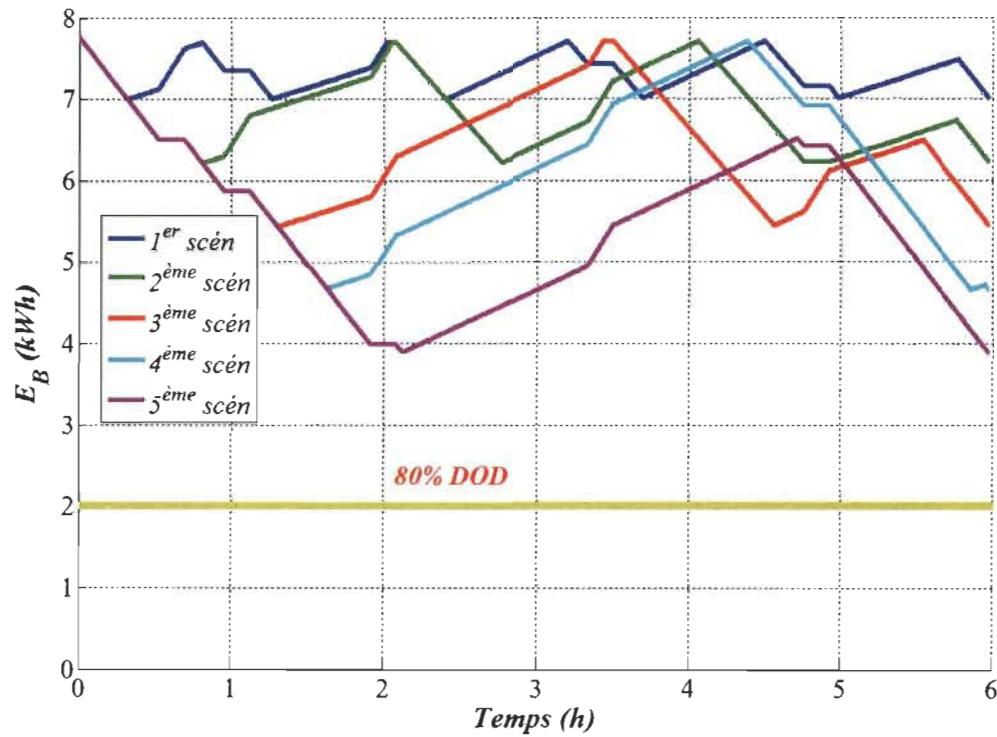


Figure 5.14 : Évolution de l'énergie restante pour une batterie 10 kWh & $\xi=0.5$

Le vieillissement des batteries engendre une dégradation plus élevée. Si on prend un exemple, pour une batterie neuve ($\xi=0,01$) qui suit le 1^{er} scénario. À la fin de la trajectoire, la batterie subit une dégradation de l'ordre de 0,0168, mais dans le deuxième cas (batterie usagée), la dégradation de la batterie passe de 0,5 et à 0,0351. Même si le véhicule effectue la même trajectoire, il y a une augmentation rapide du pourcentage d'usure. Cela explique la courbe décroissante exponentielle de la durée de vie des batteries en fonction de la profondeur de décharge.

La solution optimale est obtenue en minimisant le critère $J(k)$ qui inclut l'usure et l'énergie. En effet, le prix de des carburants change (essence & hydrogène) chaque jour, cela implique que la solution optimale varie. Dans les périodes où le prix de pétrole est élevé, la solution optimale est donnée pour les deux derniers scénarios qui engendrent une dégradation plus élevée des batteries. En outre, le coût d'usure est moins élevé que le coût de l'énergie délivré par le groupe électrogène. Dans le cas inverse, la solution optimale est donnée pour les deux premiers scénarios pour bénéficier d'une dégradation faible.

5.3.3.2 Efficacité de la génératrice et émission polluante

Dans le tableau 5.3 précédemment présenté, la valeur de dégradation la plus faible est donnée lorsque la génératrice fonctionne avec une profondeur de décharge $DOD=10\%$. En outre, l'algorithme de suivi de l'efficacité assure un meilleur rendement de la génératrice tout au long du fonctionnement. Ainsi, le niveau d'émission de NO_x est faible puisque les mélanges utilisés lors de la trajectoire sont riches en hydrogène (cela est expliqué auparavant dans la partie de la cartographie). Le fonctionnement de la génératrice n'est pas influencé par les scénarios, ce qui résulte que la décision de chercher la meilleure gestion qui est fonction du critère $J(k)$. Des critères d'émission plus sévère donneront des régimes de fonctionnement différents.

5.4 Conclusion

La validation du modèle de la génératrice bi-carburant hydrogène-essence a été établie à l'aide du banc d'essai. Une comparaison entre deux autres approches de modélisation a été effectuée et les résultats trouvés permettent d'adopter le modèle de MCR_{en ligne} puisque le modèle dispose de la valeur de l'erreur relative la plus faible. La partie d'optimisation de la

génératrice permet de bénéficier d'un rendement plus élevé que celui obtenu avec la méthode à vitesse constante. Finalement, un scénario de gestion énergétique a été présenté pour visualiser le problème de la génératrice bi-carburant hydrogène-essence dans le contexte réel comme une solution d'hybridation pour les véhicules électriques. Cette étude prend en considération les critères et satisfait les contraintes de chaque système. Ainsi une bonne planification permet de gagner en termes de rendement de la génératrice et les émissions de NO_x .

Chapitre 6 - Conclusion, discussions et perspectives

6.1 Conclusion et discussions

Pour conclure ce mémoire, il est important de revoir les objectifs originaux et la problématique introduits dans ce projet afin d'élaborer les bonnes conclusions. L'objectif principal est de modéliser et optimiser le fonctionnement de la génératrice bi-carburant hydrogène-essence et de le présenter comme une solution prometteuse pour les véhicules électriques hybrides.

Tout d'abord, plusieurs essais réalisés sur le banc d'essai de la génératrice bi-carburant permettant de visualiser le comportement ainsi que l'interaction entre les différents paramètres d'entrée et de sortie. À travers la base de données enregistrée pendant les expériences, la cartographie de l'efficacité a été élaborée et a permis d'interpréter son évolution. De plus, une projection sur les émissions polluantes a permis de voir l'influence du mélange de l'hydrogène avec l'essence sur le groupe électrogène a été réalisée. L'utilisation des mélanges pauvres en hydrogène durant les essais permet d'obtenir de faibles émissions en oxyde d'azote même si ceux-ci sont comparés à l'essence pure.

Ensuite, un modèle adaptatif représentant l'efficacité de la génératrice bi-carburant hydrogène-essence a été élaboré suite aux tests réalisés dans la première partie. La convexité des courbes de rendement permet d'utiliser la décomposition en série de Taylor. L'identification des paramètres du modèle est réalisée à partir de l'approche des moindres carrés récursifs. Au départ, l'algorithme d'identification prend la base de données de la

cartographie pour calculer les paramètres initiaux et par la suite la correction de ces paramètres s'effectue en ligne pour minimiser l'erreur entre le modèle ainsi que les valeurs réelles. La validation expérimentale justifie l'adaptation de ce modèle, en tenant compte de la comparaison des deux autres approches. L'erreur relative maximale est de l'ordre de 6,93% qui est la plus faible par rapport à la méthode des moindres carrés récursifs hors-ligne et le réseau de neurones. Cette dernière, peut s'améliorer en augmentant la base de données durant le fonctionnement de la génératrice.

Puis, la détermination des conditions opératoires est calculée à partir de la méthode de recherche linéaire modifiée. Un cycle de vitesse normalisé US06 a été pris pour faire une simulation et comparer l'apport de cette approche par rapport à la méthode à vitesse constante. Une augmentation moyenne de 7,11% du rendement de la génératrice est présentée en utilisant la recherche linéaire modifiée par rapport à la méthode à vitesse fixe.

Finalement, l'intégration du modèle de la génératrice dans les modèles de véhicules électriques permettrait la création d'une application pratique d'une gestion optimale d'un véhicule. Le fonctionnement de la génératrice dépend de plusieurs paramètres qui interviennent directement dans le fonctionnement du véhicule tel que le niveau de charge des batteries, la masse et la distance à parcourir. Les résultats de planification montrent une grande importance au niveau de l'instant de fonctionnement de la génératrice tout au long de la trajectoire. Ainsi, une meilleure planification énergétique permet de minimiser l'usure des batteries, minimiser le carburant suivant le coût relatif des batteries et du carburant et optimiser le fonctionnement de la génératrice tout en réduisant les émissions polluantes.

6.2 Perspective

Pour les prochaines études, de nouvelles évaluations peuvent être ajoutées tel que l'ajout des modèles pour représenter les émissions polluantes afin de chercher le meilleur point de fonctionnement envers le rendement et les émissions tel que le dioxyde de carbone, l'oxyde de carbone et l'hydrocarbure. Le coefficient stœchiométrique de l'hydrogène a été fixé à 0,5 afin de minimiser la production d'oxyde d'azote et qui correspond à un mélange pauvre pour ce travail, mais dans les futurs travaux, celui-ci peut être étudié dans le but de fonctionner avec des mélanges pauvres et des mélanges riches en hydrogène.

Références

- [1] J. Whitmore and P.-O. Pineau. (2015). État de l'énergie au Québec. Available: http://www.ledevoir.com/documents/pdf/energie_quebec.pdf
- [2] F. Delisle. (2015). Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2012 et leur évolution depuis 1990. Available: <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/changements/ges/2012/inventaire-1990-2012.pdf>
- [3] A. Khaligh and Z. Li, "Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 59, pp. 2806-2814, 2010.
- [4] G. Benysek and M. Jarnut, "Electric vehicle charging infrastructure in Poland," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 16, pp. 320-328, 1// 2012.
- [5] S. Mekhilef, R. Saidur, and A. Safari, "Comparative study of different fuel cell technologies," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 16, pp. 981-989, 1// 2012.
- [6] F. Martel, Y. Dubé, L. Boulon, and K. Agbossou, "Hybrid electric vehicle power management strategy including battery lifecycle and degradation model," in 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2011, pp. 1-8.
- [7] O. Trigui, Y. Dubé, S. Kelouwani, and K. Agbossou, "Comparative Estimation of Electric Vehicle Rolling Resistance Coefficient in Winter Conditions," in 2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2016, pp. 1-6.
- [8] S. G. Wirasingha and A. Emadi, "Classification and Review of Control Strategies for Plug-In Hybrid Electric Vehicles," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 60, pp. 111-122, 2011.
- [9] A. Delorme, A. Rousseau, P. Sharer, S. Pagerit, and T. Wallner, "Evolution of hydrogen fueled vehicles compared to conventional vehicles from 2010 to 2045," Evolution, vol. 1, p. 1008, 2009.
- [10] J. Ko and H. Ju, "Comparison of numerical simulation results and experimental data during cold-start of polymer electrolyte fuel cells," Applied Energy, vol. 94, pp. 364-374, 2012.

- [11] P. Chippar and H. Ju, "Evaluating cold-start behaviors of end and intermediate cells in a polymer electrolyte fuel cell (PEFC) stack," *Solid State Ionics*, vol. 225, pp. 85-91, 2012.
- [12] N. Henao, S. Kelouwani, K. Agbossou, and Y. Dubé, "PEMFC low temperature startup for electric vehicle," in *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2012, pp. 2977-2982.
- [13] P. Thounthong, S. Raël, and B. Davat, "Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power source for vehicle applications," *Journal of Power Sources*, vol. 193, pp. 376-385, 8/1/ 2009.
- [14] A. Nantes. (2010). Stoskage de l'énergie. Available: <http://www.pedagogie.ac-nantes.fr/-682359.kjsp>
- [15] A. Emadi, S. S. Williamson, and A. Khaligh, "Power electronics intensive solutions for advanced electric, hybrid electric, and fuel cell vehicular power systems," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 21, pp. 567-577, 2006.
- [16] A. Emadi, K. Rajashekara, S. S. Williamson, and S. M. Lukic, "Topological overview of hybrid electric and fuel cell vehicular power system architectures and configurations," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 54, pp. 763-770, 2005.
- [17] S. Verhelst, T. Wallner, H. Eichlseder, K. Naganuma, F. Gerbig, B. Boyer, et al., "Electricity powering combustion: hydrogen engines," *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, pp. 427-439, 2012.
- [18] Motorisation, Cycle de fonctionnement, Moteur à combustion interne. Available: <http://www.eduauto.org/ressources-mediatheque/cycle-2-temps>
- [19] Y. Kilagiz, A. Baran, Z. Yildiz, and M. Çetin, "A fuzzy diagnosis and advice system for optimization of emissions and fuel consumption," *Expert Systems with Applications*, vol. 28, pp. 305-311, 2// 2005.
- [20] N. K. Omary, T. Bhatti, J. Subrahmanyam, and M. G. Babu, "Comparative Assessment of the Performance and Emission Characteristics of Port and Manifold Gasoline Fuel Injection Systems of a Single Cylinder Four Stroke Spark Ignition Engine," *SAE Technical Paper 0148-7191*, 1998.
- [21] D. Sáinz, P. M. Diéguez, J. C. Urroz, C. Sopena, E. Guelbenzu, A. Pérez-Ezcurdia, et al., "Conversion of a gasoline engine-generator set to a bi-fuel (hydrogen/gasoline) electronic fuel-injected power unit," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, pp. 13781-13792, 10// 2011.
- [22] C. Ji, S. Wang, and B. Zhang, "Performance of a hybrid hydrogen–gasoline engine under various operating conditions," *Applied Energy*, vol. 97, pp. 584-589, 9// 2012.

- [23] C. Park, C. Kim, Y. Choi, S. Won, and Y. Moriyoshi, "The influences of hydrogen on the performance and emission characteristics of a heavy duty natural gas engine," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 36, pp. 3739-3745, 3// 2011.
- [24] B. Açıkgöz, C. Çelik, H. S. Soyhan, B. Gökalp, and B. Karabağ, "Emission characteristics of an hydrogen–CH₄ fuelled spark ignition engine," Fuel, vol. 159, pp. 298-307, 11/1/ 2015.
- [25] N. Saravanan and G. Nagarajan, "Performance and emission studies on port injection of hydrogen with varied flow rates with Diesel as an ignition source," Applied Energy, vol. 87, pp. 2218-2229, 7// 2010.
- [26] M. Deb, G. R. K. Sastry, P. K. Bose, and R. Banerjee, "An experimental study on combustion, performance and emission analysis of a single cylinder, 4-stroke DI-diesel engine using hydrogen in dual fuel mode of operation," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 40, pp. 8586-8598, 7/20/ 2015.
- [27] C. Ji and S. Wang, "Combustion and emissions performance of a hybrid hydrogen–gasoline engine at idle and lean conditions," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 35, pp. 346-355, 1// 2010.
- [28] C. Ji, S. Wang, and B. Zhang, "Effect of spark timing on the performance of a hybrid hydrogen–gasoline engine at lean conditions," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 35, pp. 2203-2212, 3// 2010.
- [29] S. Verhelst, P. Maesschalck, N. Rombaut, and R. Sierens, "Efficiency comparison between hydrogen and gasoline, on a bi-fuel hydrogen/gasoline engine," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 34, pp. 2504-2510, 3// 2009.
- [30] K. V. Shivaprasad, S. Raviteja, P. Chitragar, and G. N. Kumar, "Experimental Investigation of the Effect of Hydrogen Addition on Combustion Performance and Emissions Characteristics of a Spark Ignition High Speed Gasoline Engine," Procedia Technology, vol. 14, pp. 141-148, // 2014.
- [31] S. Verhelst and T. Wallner, "Hydrogen-fueled internal combustion engines," Progress in Energy and Combustion Science, vol. 35, pp. 490-527, 12// 2009.
- [32] M. A. Rizvi, A. I. Bhatti, and Q. R. Butt, "Hybrid Model of the Gasoline Engine for Misfire Detection," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, pp. 3680-3692, 2011.
- [33] L. J. Kere, S. Kelouwani, K. Agbossou, Y. Dubé, N. Henao, and R. Courteau, "Tracking maximum efficiency of hydrogen genset used as electric vehicle range extender," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 39, pp. 3433-3443, 2/25/ 2014.

- [34] Q. R. Butt and A. I. Bhatti, "Estimation of Gasoline-Engine Parameters Using Higher Order Sliding Mode," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, pp. 3891-3898, 2008.
- [35] J. Joberg, Q. Zhang, and L. Ljung, "Nonlinear black-box modeling in system identification: a unified overview," *Automatica*, vol. 31, pp. 1691-1724, 1995.
- [36] T. Ho, V. Karri, D. Lim, and D. Barret, "An investigation of engine performance parameters and artificial intelligent emission prediction of hydrogen powered car," *International journal of hydrogen energy*, vol. 33, pp. 3837-3846, 2008.
- [37] E. Lughofer, V. Macián, C. Guardiola, and E. P. Klement, "Identifying static and dynamic prediction models for NO_x emissions with evolving fuzzy systems," *Applied Soft Computing*, vol. 11, pp. 2487-2500, 2011.
- [38] L. Yao and W. A. Sethares, "Nonlinear parameter estimation via the genetic algorithm," *IEEE Transactions on signal processing*, vol. 42, pp. 927-935, 1994.
- [39] N. I. Gould and S. Leyffer, "An introduction to algorithms for nonlinear optimization," in *Frontiers in numerical analysis*, ed: Springer, 2003, pp. 109-197.
- [40] C. Grosan and A. Abraham, "Modified Line Search Method for Global Optimization," in *First Asia International Conference on Modelling & Simulation (AMS'07)*, 2007, pp. 415-420.
- [41] R. A. Jackey, "A Simple, Effective Lead-Acid Battery Modeling Process for Electrical System Component Selection," 2007.
- [42] M. Ceraolo, "New dynamical models of lead-acid batteries," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, pp. 1184-1190, 2000.
- [43] US batteries website. Available: <http://usbattery.com/>
- [44] K. Maalej, S. Kelouwani, K. Agbossou, Y. Dubé, and N. Henao, "Long-Trip Optimal Energy Planning With Online Mass Estimation for Battery Electric Vehicles," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, pp. 4929-4941, 2015.
- [45] R. Wang and S. M. Lukic, "Dynamic programming technique in hybrid electric vehicle optimization," in *2012 IEEE International Electric Vehicle Conference*, 2012, pp. 1-8.
- [46] F. Martel, Y. Dubé, S. Kelouwani, and K. Agbossou, "Economy-Focused PHEV Battery Lifetime Management through Optimal Fuel Cell Load Sharing," in *2015 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2015, pp. 1-9.

Annexe A- Fiches techniques de la génératrice

TECHNICAL & CONSUMER INFORMATION

Specifications

EM5000is

Dimensions

Model (Type)	EM5000is
Power product description code	EAJJ
Length [Handle in up position]	31.9 in (810 mm) [45.5 in (1,155 mm)]
Width	26.4 in (670 mm)
Height [Handle in up position]	27.2 in (690 mm) [28.0 in (710 mm)]
Dry weight*	209 lbs (95 kg)

* Without battery

Engine

Model	GX340K1
Engine Type	4-stroke, overhead valve, single cylinder
Displacement	20.6 cu-in (337 cm ³)
Bore x Stroke	3.2 × 2.5 in (82 × 64 mm)
Compression Ratio	8.0:1
Engine Speed	2,400 – 3,600 rpm (EcoThrottle™ ON)
Cooling System	Forced air
Ignition System	Full transistor
Oil Capacity	1.16 US qt (1.10 l)
Fuel Tank Capacity	4.49 US gal (17.0 l)
Spark Plug	BPR5ES (NGK) W16EPR-U (DENSO)

Generator

Type	A
AC output	Rated voltage
	60 Hz
	37.5/18.8 A
	4.5 kVA
	5.0 kVA

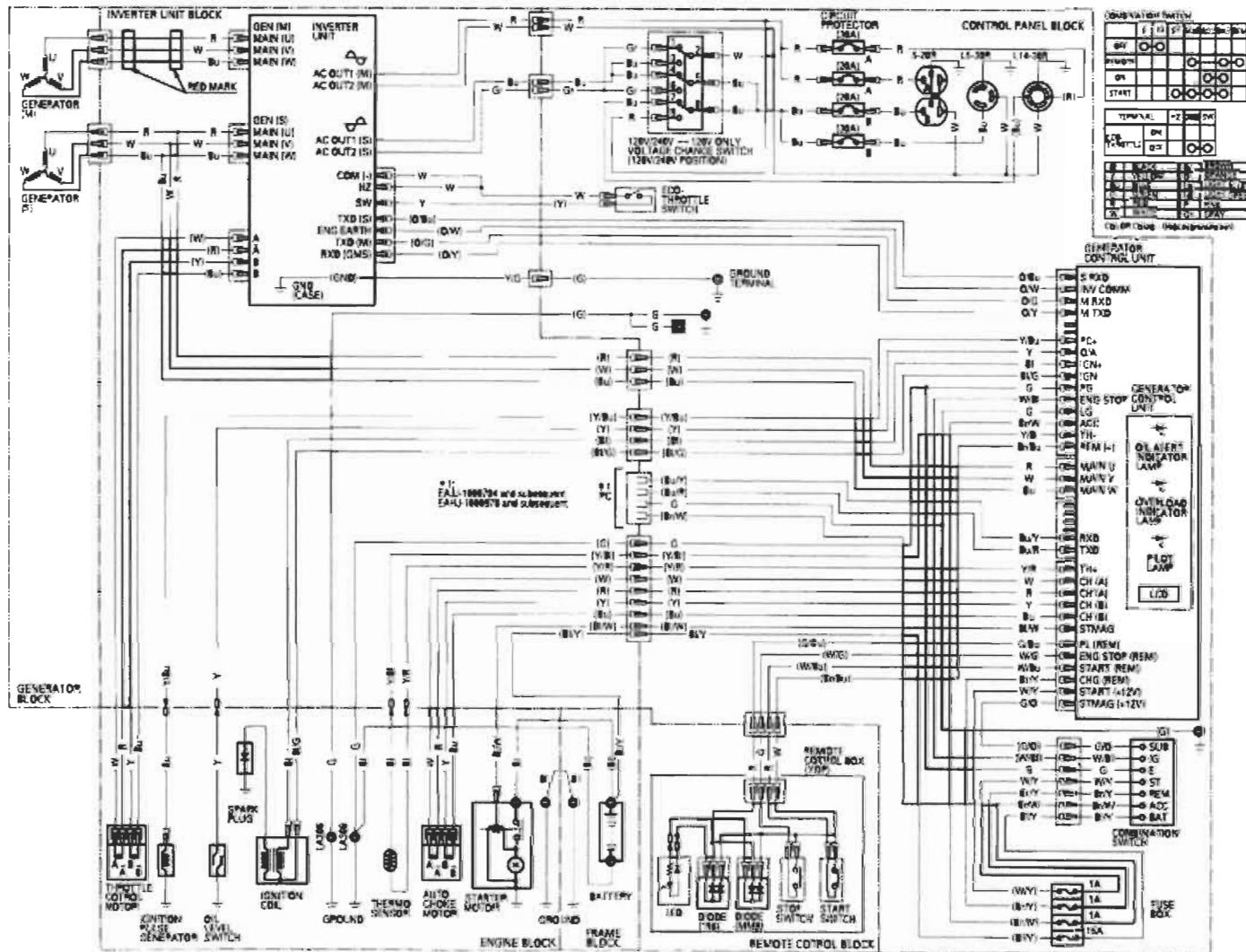
Tuneup Specifications

ITEM	SPECIFICATION	MAINTENANCE
Spark plug gap	0.028 – 0.031 in (0.70 – 0.80 mm)	Refer to page: 51
Valve clearance(cold)	IN: 0.15 ± 0.02 mm EX: 0.20 ± 0.02 mm	See your authorized Honda dealer
Other specifications	No other adjustments needed.	

Specifications may vary according to the types, and are subject to change without notice.

TECHNICAL & CONSUMER INFORMATION

Wiring Diagram



Annexe B- Spécification techniques du véhicule Némo original

ELECTRIQUE		
Batteries	Batteries de propulsion	12 batteries de 6 volts acide plomb, 240 AH Tension nominale de 72 volts (standard)
	Batterie auxiliaire	1 batterie de 12 volts acide plomb sans entretien
Chargeur		Intégré de 110 volts, 15 ampères
Moteur		Moteur 8 HP-AC, ACX-3023 (ou YDQ 5-4FYM) Advanced motor&Drives
TRANSMISSION		
Modèle	Propulsion	
		Marche arrière ou avant obtenue par inversion du courant du moteur
VOLANT		
Modèle	Pignon et crémaillère	
Rayon de braquage	4,5 m (15 pieds)	
SUSPENSION		
Modèle	Avant et arrière : Essieu rigide à 3 bras Amortisseurs hydrauliques combinés avec ressorts sur l'amortisseur	
FREINS		
Avant	Freins à disque	
Arrière	Freins à disque avec régénération du courant	
PNEUS		
Modèle	Régulier : 175/70R13	
Pression	Avant : 32 PSI (220 kPa)	Arrière : 32 PSI (220 kPa)
CARROSSERIE		
Modèle	Plastique ABS	
Nombre de sièges	2	
Longueur/largeur	3,51m (11,52 pieds) 1,46 m (55 pouces)	
Hauteur	1,91m (61,4 pouces)	
Poids du véhicule à vide	604 kg (1300 lbs)	
Charge	450 kg (1000 lbs excluant le conducteur et le passager)	
PERFORMANCE		
Accélération 0-40 Km/h (25 milles à l'heure)	6,5 s	
Vitesse maximale	40 km/h (25 milles à l'heure)	
Autonomie nominale	90 km (60 milles)	

Annexe C- Articles de conférence et de revue

Intelligent blended hydrogen-gasoline generator emission/efficiency characterization in context of EV range extension

Mohamed Rebai^{1,2}, Soussou Kelouwani^{1,2}, Yves Dubé^{1,2}, Kodjo Agbossou^{1,3}

¹Institut de Recherche sur l'Hydrogène

²Department of Mechanical Engineering of Université du Québec à Trois-Rivières

³Department of Electrical and Computer Engineering of Université du Québec à Trois-Rivières

Email: Mohamed.Rebai@uqtr.ca, Soussou.Kelouwani@uqtr.ca, Yves.Dube@uqtr.ca, Kodjo.Agbossou@uqtr.ca

Abstract— The autonomy is one of the problems that limited the integration of electric vehicle. Among different solution is the use of hybridization with hydrogen-fuel to supply the vehicle. This study presents an experimental study on a bi-fuel generator (hydrogen-gasoline), the influence of mixture richness (for hydrogen) have been investigated. Experimental results show that for a hydrogen-rich mixture, the performance of the whole system is increased meanwhile the nitrogen oxide production rate has been decreased. In addition, a model has been developed using a neural network algorithm to reproduce the performance and nitrogen oxide emission for a given operating regime.

Keywords— Hydrogen; gasoline; bi-fuel; generator; efficiency; emission; electric vehicle

1. INTRODUCTION

The transport sector is considered as one of the main emitters of greenhouse gases. Nitrogen oxide (NO_x) is among hazardous gases on the environment. For this, it is important to operate the internal combustion engine (ICE) in the ideal conditions to produce the minimum NO_x . Electric vehicle (EV) represents a solution for this environmental problem. However, this solution has several drawbacks such as autonomy, long charging time, limited lifespan, etc [1]. And that gives the conventional solutions (ICE) an advantage. A hybridization of the both technologies gives the opportunity to benefit from a clean aspect of electric vehicle and efficiency of conventional solutions, that why the idea of moving towards the hybridization of these vehicles comes in several forms [2]. Generators appear as a source of energy in an electric vehicle to charge the batteries and power the electric drive motor. This solution has a low efficiency and high greenhouse gases emissions generated by the internal combustion engine (ICE) using fossil fuels. Kere et al [3] propose a method for monitoring the efficiency, and he provides desirable performance and allows an increase of the efficiency by 7.15% compared to the industrial method at a constant speed. Moreover, generators remain cheaper compared to fuel cells, meanwhile the fuel cells have a high efficiency and zero emissions to enable it benefits as a hybridization solution for electric vehicles. However, many technical difficulties, such as starting in winter conditions, when the temperature is below 0 °C [4-7].

Generally, an ICE running on a lean mixture has greater fuel economy and the combustion reaction is complete [8]. Numerous studies discussed the ICE with the dual-fuel operation to minimize the emission rate and increase thermal efficiency. For that, Hydrogen has attracted the attention to be used as a fuel in ICE. Furthermore, it has a vast flammability range compared to other fuels. In fact, hydrogen can be combusted in an ICE over fuel-air mixtures with a wide range. Thus, pure hydrogen reduces the level of hydrocarbon (HC) and carbon monoxide (CO) of approximately 94.7% and 99.5% simultaneously in cold start conditions compared with pure gasoline. The hydrogen-gasoline mixture is used to supply low and medium loads to increase the thermal efficiency and reduce emissions, while high loads are given by pure gasoline [9]. This particular gas has a very low ignition energy which presents a performant advantage that allows hydrogen to run on a lean mixture and guarantee prompt ignition. Park et al. [10], has carried an experimental study to observe the impact of the addition of hydrogen with natural gas on a 6-cylinders engine for a city bus. The increase in hydrogen rate improves thermal efficiency of the ICE. In addition, hydrogen can stabilize combustion under leaner operating conditions. The addition of 30% of hydrogen decreases the NO_x emission by approximately 67%, and 84% for 40% of hydrogen in comparison of pure natural gas operations. Saravanan and Nagarajan [11] tested a diesel engine fueling with the diesel-hydrogen blends. The experimental results demonstrated that the engine brake thermal efficiency, calculated from the brake power output of the engine, was improved by 15% after hydrogen addition at 75% load. Smoke, carbon monoxide (CO) and carbon dioxide (CO_2) emissions were decreased dramatically for the hydrogen-enriched diesel engine. NO_x emissions from the hydrogen-blended diesel engine were nearly the same with those from the pure diesel engine. Shivaprasad et al. [12] look into the operation of a high-speed single cylinder SI engine with distinct blends of hydrogen and gasoline by observing the emission characteristics. In fact, this investigation, bring up the higher brake thermal efficiency comparing with the one pure gasoline operation. In addition, after hydrogen fertilization HC and CO emissions were all reduced.

The impact of maximal power is widely investigated in the literature; otherwise, the impact of medium and low powers on NO_x emission and efficiency of the ICE for different rate hydrogen-gasoline mixture has not been studied. This paper describes an experimental investigation of a hybrid (bi-fuel hydrogen-gasoline). Section II presents the importance of using hydrogen mixed with gasoline in ICE. Section III covers the description of the test bench and the experimental design. Section IV discusses the results of our experiences. Section V deal with the development of an empirical model of the generator bi-fuel gasoline-hydrogen.

II. BLENDED HYDROGEN-GASOLINE AS FUEL IN ICE RELATED WORK

Hydrogen is a renewable energy based, practically carbon free. Table 1 present a summary of the gas elements, the use of hydrogen as an alternative engine fuel brought up by its availability, high specific energy and minimum polluting emissions. The combustion of this gas does not create carbon-containing emissions such as CO₂, CO or HC [13, 14].

Changwei Ji et al. [9], set a distinct combustion strategy for the hybrid hydrogen-gasoline engines (HHGE). With the pure hydrogen, the HHGE is started; when warming up and feeding the engine at idle with partial load conditions they used the hydrogen-gasoline blends. To ensure the output of the HHGE power, the engine is fueled by only gasoline at high speeds and loads. As a consequence of the hydrogen noncarbonic nature, at cold starts, HC and CO emissions are reduced by 94.7% and 99.5%. In addition, at cold start and idle conditions, the engine presents fewer amounts of NO_x emissions than the original gasoline engine only.

An experiment performed on a four-cylinder spark ignition gasoline engine equipped with a hydrogen port-injection system to discover and generate the performance of an HHGE at idle. The indicated thermal efficiency was higher for the HHGE compared to the original gasoline engine at idle and lean conditions. The thermal efficiency at an excess air ratio of 1.37 was increased from 13.81% for the original gasoline engine to 20.20% for the HHGE with a 3% hydrogen blending level [15].

Table 1: Properties of Gasoline and Hydrogen [16]

Parameter	Unit	Gasoline	Hydrogen
Chemical formula	--	C ₄ -H ₁₆	H ₂
Composition (C, H, O)	Mass-%	84, 16, 0	0, 100, 0
Lower heating value	MJ/kg	42.7	120
Density	kg/m ³	720-780	0.089
Stoichiometric ratio	kg/kg	14.7	34.3
Flammability limits	Vol-% ϕ	1.0-7.6 0.7-2.5	4-75 0.1-5
Laminar flame speed	cm/s	35-50	210
Auto-ignition temperature	°C	~ 350	585

The emission of NO_x under the circumstances of a low fuel to air conformity is imperceptible. The increase of the stoichiometric ratio " ϕ " rise up the combustion temperatures which heighten the NO_x formation. At a range toward $\phi \sim 0.5$ the NO_x emissions expand exponentially and reach its peak toward $\phi \sim 0.8$. Further expanding " ϕ " present the decrease of

the NO_x emissions due to reduced availability of excess oxygen. This approach is pertinent with engines using homogeneous mixture formation, using qualitative charge control. With increasing charge the fuel-to-air compatibility ratio grow and NO_x emissions follow the pattern as shown Fig. 1 [16].

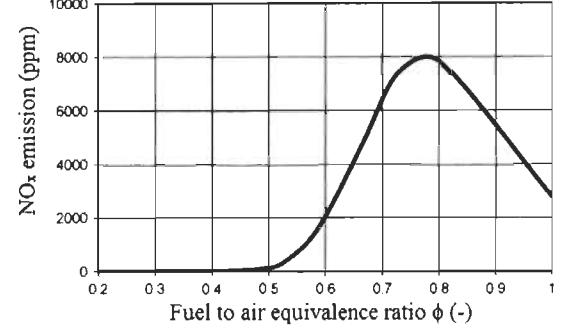


Fig. 1: Evolution of NO_x emission as a function of the stoichiometric ratio of hydrogen coefficient [16]

III. EXPIMENTAL SETUP

A. Generator description

Our experiment will be performed on a commercial generator Honda brand gasoline model EM5000 which Table 2 present its characteristics. This machine has been installed on an electric test vehicle in the hydrogen research institute to carry out the hybridization as shown in Fig. 2. Many architectures are performed to generate the hybrids electric vehicles such as serial, parallel or series-parallel combination is each of these advantages and disadvantages. The architecture adopted for this test bench is Series to run the generator always in the best conditions regardless of the power demand of the driving motor [17].



Fig. 2: Test bench of a generator bi-fuel

Table 2: Characteristics of the generator

Parameter	Value
Engine type	4-stroke, single cylinder
Maximum horsepower	8.1 kW at 3600 rpm
Compression ratio	8.0:1
Generator type	Multiple field rotation type
Maximum output	5 kVA
Rated output	4.5 kVA

B. Experimental setup

The tests have been done on a generator, installed after some necessary changes to ensure the pureness of the gasoline and hydrogen operations in addition of the different fractions in the

two fuels. The adjustments are essentially in the intake manifold of the internal combustion machine to place: two injectors and engine parameters control system (injection time, gas throttle opening and the duration of injection). The series topology has been opted in this test bench since it is afford to run the generator in any regime, regardless of the vehicle constraints. Moreover, the test bench is fully equipped to measure variables related to the generator. To attend the main object of this experiment, an exhaust analyzer is placed on the exhaust to measure the emission amount of carbon dioxide "CO₂" carbon monoxide "CO", hydrocarbon "HC" and nitrogen oxide "NO_x". Two flow meters to determine the level of hydrogen and gasoline. In addition, sensors for measuring current and voltage of the converter. The software and hardware for the test bench are based on a Labview/cRIO system for communication and data collection.

To increase the autonomy of the vehicle, the generator must be operating with optimum efficiency to take into account emissions. The efficiency of the generator is presented by the ratio between the incoming power to the internal combustion engine and the output power after the power interference. This rebound is the proliferation of different following yields: internal combustion engine, two generators and a converter. The efficiency is calculated as follows:

$$\eta_{genset} = \frac{\text{Power output}}{\dot{m}_{H_2} LHV_{H_2} + \dot{m}_{\text{Gasoline}} LHV_{\text{Gasoline}}} \times 100 \quad (1)$$

- \dot{m}_{H_2} and $\dot{m}_{\text{Gasoline}}$ are respectively the flow rates of hydrogen and gasoline (kg/sec)
- LHV_{H_2} and LHV_{Gasoline} are lower heating value of the hydrogen and gasoline.

The tests were generated with a rotational speed between 1700 and 3300 RPM for the internal combustion engine and that to deliver the chosen power which is between 0W and 3000W. In addition, mixtures adopted in the tests are as follows: 0% H₂, 60% H₂, 80% H₂ and 100% H₂. With the stoichiometric coefficient, for hydrogen is set at 0.5 while for gasoline remained at one since this is the ideal mixture.

Finally it is to mention that, in one hand, several parameters are directly related to the generator in the hybrid electric vehicle such as the fuel mixture which corresponds to the stoichiometric ratio and the speed "RPM", the percentage of each fuel. In the other hand, several other parameters are indirectly related to the operation of the generator such as: the level of battery charge, vehicle speed, weight, surface and laying of the road

IV. RESULTS AND DISCUSSIONS

A. Efficiency of generator

Efficiency is one of the criteria to take into account to choose the second power source, to carry out the hybridization of hybrid vehicles. Through the longitudinal equation of a vehicle, for speeds of 10 km/h and 20 km/h and according to the different parameters of the vehicle used in these tests, the power consumed by the electric driving motor are respectively 1000W and 2050W.

Fig. 3 and Fig. 4 shows the variation of the generator efficiency for these two powers for different rotation speed (RPM) of the machine and for different fractions of mixtures of hydrogen and gasoline. The high calorific value of the hydrogen increases the efficiency of the ICE and thereafter an increase in performance of the overall system. It is to mention that the mixture with hydrogen pure allows an increase of more than 40% compared to gasoline pure. Thereafter, lower power to charge the battery and powered electric drive motor is provided for the mixtures that are rich hydrogen.

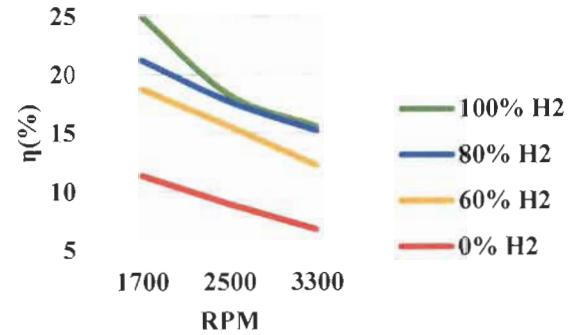


Fig. 3: Variation of efficiency with speed for different hydrogen-gasoline mixture of fractions for P = 1000W

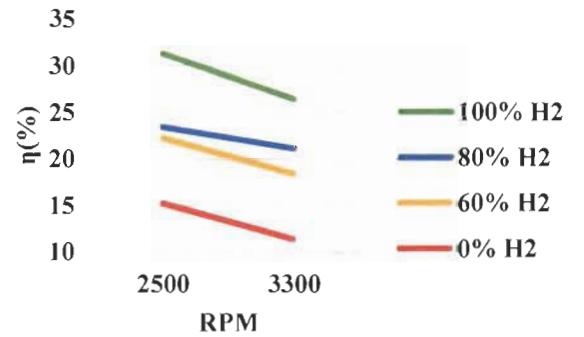


Fig. 4: Variation of efficiency with speed for different hydrogen-gasoline mixture of fractions for P = 2050W

The rotational speed of the internal combustion engine is a variable that depends on throttle opening of the gas and the amount of fuel to be injected, to select the adequate power one can choose a maximum torque to ensure a maximum efficiency, because as shown in Fig. 3 and Fig. 4 a higher speed decreases the efficiency.

B. Emission NO_x

Through "Smart NO_x" sensor installed on the exhaust pipe of the generator, measure the amount of NO_x generated at every moment and for different regimes. Fig. 5 and Fig. 6 show the rate of emission of NO_x for different mixtures of fuel and speed for both 1000W and 2050W. The minimum emission rate is obtained for operation with pure hydrogen. Indeed, the use of a stoichiometric ratio near 0.5 generated low emissions Fig. 1. In addition, the temperature of the combustion chamber increase the speed of the chemical reaction between the excess oxygen "O₂" admitted into the combustion chamber and nitrogen N₂ of

the air resulting in an addition production of NO_x. For the 60% mixture Fig. 5 and Fig. 6 the increase in NO_x emissions for low speeds is due to a bad combustion, and for high speeds the ICE operates with lean conditions resulting in a minimum of NO_x emissions.

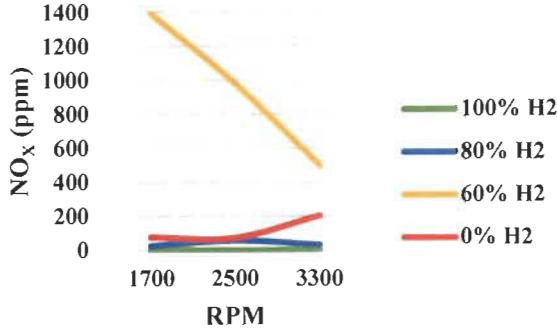


Fig. 5: Variation of NO_x emission with speed for different hydrogen-gasoline mixture of fractions for P = 1000W

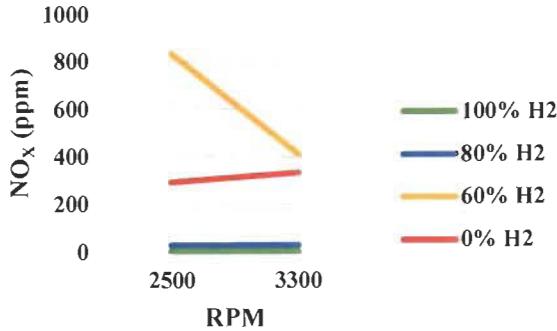


Fig. 6: Variation of NO_x emission with speed for different hydrogen-gasoline mixture of fractions for P = 2050W

V. OFFLINE MODEL GENERATOR BI-FUEL

The generator has a nonlinear. For this, we adopt the approach of the neuron network to find a model of the generator. At this time, the study is based on finding a model of the generator in the permanent regime to run the generator in the best conditions. Through the values collected by the tests, a model of the generator hydrogen-gasoline dual fuel was a draw. Indeed, these input and output values were simulated in an artificial neural network (ANN) for training, we use 15 intermediate layers and 2 output channels, to identify performance and NO_x emissions from the generator. Fig. 7 shows the profiles of each input parameter (RPM, Power, % H₂ / Gasoline). Fig. 8 shows a comparison between experimental values and the values given by the neural network. The average error of the efficiency is around 7.63%, which allows adopting this model. This error can be reduced with the added tests for the training of our model.

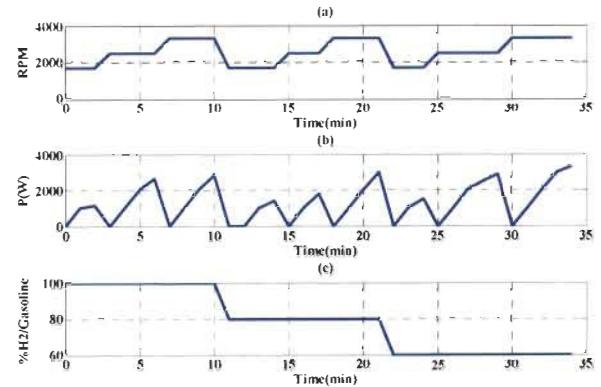


Fig. 7: (a) ICE concatenated speed profile; (b) Generator power profile; (c) blend of H₂/Gasoline profile

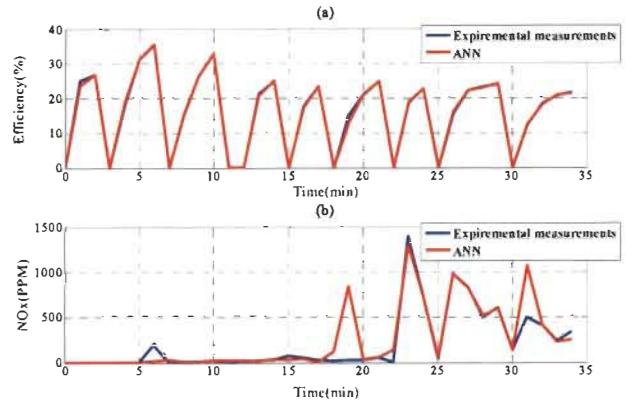


Fig. 8: Experimental validation of the generator model: (a) Efficiency comparison; (b) Emission NO_x comparison

VI. CONCLUSIONS

In this work, an experimental study carried out on a bi-fuel generator to see the effect of the addition of hydrogen with gasoline view performance and NO_x for different regimes of speed and power. The main conclusions are:

1. Pure hydrogen can be increased more than 2 times the efficiency of the generator with respect thereto obtained by 100% gasoline.
2. For low and middle powers, it is better to mix a great percentage of hydrogen in order to benefit from the high performance and get away from bad combustion produced by gasoline.
3. The use of a stoichiometric coefficient around 0.5, to generate emissions even lower than those obtained by pure gasoline.

An empirical model was developed for a bi-generating fuel by the neural network approach which will serve to optimize the functioning of this system performance point of view and NO_x according to the request of the vehicle as power for charging batteries and drive motor.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by « Bureau de l’Efficacité et de l’Innovation Énergétiques, Ministère des Ressources Naturelles

et de la Faune du Québec » and « Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada ».

REFERENCES

- [1] S. G. Wirasingha and A. Emadi, "Classification and Review of Control Strategies for Plug-In Hybrid Electric Vehicles," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, pp. 111-122, 2011.
- [2] A. Emadi, S. S. Williamson, and A. Khaligh, "Power electronics intensive solutions for advanced electric, hybrid electric, and fuel cell vehicular power systems," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 21, pp. 567-577, 2006.
- [3] L. J. Kere, S. Kelouwani, K. Agbossou, Y. Dubé, N. Henao, and R. Courteau, "Tracking maximum efficiency of hydrogen genset used as electric vehicle range extender," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, pp. 3433-3443, 2/25/ 2014.
- [4] J. Ko and H. Ju, "Comparison of numerical simulation results and experimental data during cold-start of polymer electrolyte fuel cells," *Applied Energy*, vol. 94, pp. 364-374, 2012.
- [5] P. Chippa and H. Ju, "Evaluating cold-start behaviors of end and intermediate cells in a polymer electrolyte fuel cell (PEFC) stack," *Solid State Ionics*, vol. 225, pp. 85-91, 2012.
- [6] N. Henao, S. Kelouwani, K. Agbossou, Y. Dub, and x00E, "PEMFC low temperature startup for electric vehicle," in *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2012, pp. 2977-2982.
- [7] A. Delorme, A. Rousseau, P. Sharer, S. Pagerit, and T. Wallner, "Evolution of hydrogen fueled vehicles compared to conventional vehicles from 2010 to 2045," SAE Technical Paper2009.
- [8] J. B. Heywood, *Internal combustion engine fundamentals* vol. 930: McGraw-hill New York, 1988.
- [9] C. Ji, S. Wang, and B. Zhang, "Performance of a hybrid hydrogen-gasoline engine under various operating conditions," *Applied Energy*, vol. 97, pp. 584-589, 9// 2012.
- [10] C. Park, C. Kim, Y. Choi, S. Won, and Y. Moriyoshi, "The influences of hydrogen on the performance and emission characteristics of a heavy duty natural gas engine," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, pp. 3739-3745, 3// 2011.
- [11] N. Saravanan and G. Nagarajan, "Performance and emission studies on port injection of hydrogen with varied flow rates with Diesel as an ignition source," *Applied Energy*, vol. 87, pp. 2218-2229, 7// 2010.
- [12] K. V. Shivaprasad, S. Raviteja, P. Chitragar, and G. N. Kumar, "Experimental Investigation of the Effect of Hydrogen Addition on Combustion Performance and Emissions Characteristics of a Spark Ignition High Speed Gasoline Engine," *Procedia Technology*, vol. 14, pp. 141-148, // 2014.
- [13] H. Li and G. A. Karim, "Exhaust emissions from an SI engine operating on gaseous fuel mixtures containing hydrogen," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 30, pp. 1491-1499, 10// 2005.
- [14] M. A. R. S. Al-Baghdadi and H. A. K. S. Al-Janabi, "A prediction study of a spark ignition supercharged hydrogen engine," *Energy Conversion and Management*, vol. 44, pp. 3143-3150, 12// 2003.
- [15] C. Ji and S. Wang, "Combustion and emissions performance of a hybrid hydrogen-gasoline engine at idle and lean conditions," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, pp. 346-355, 1// 2010.
- [16] S. Verhelst, T. Wallner, H. Eichlseder, K. Naganuma, F. Gerbig, B. Boyer, et al., "Electricity powering combustion: hydrogen engines," *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, pp. 427-439, 2012.
- [17] A. Emadi, K. Rajashekara, S. S. Williamson, and S. M. Lukic, "Topological overview of hybrid electric and fuel cell vehicular power system architectures and configurations," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 54, pp. 763-770, 2005.

Search for the Optimal Condition of an Intelligent Bi-Fuel Hydrogen-Gasoline Generator for HEV Applications

Mohamed Rebai, *Student Member, IEEE*, Soussou Kelouwani, *Member, IEEE*, Yves Dubé, and Kodjo Agbossou, *Senior Member, IEEE*

Abstract—The energy storage autonomy challenges limit the development of EVs. The hybridization is widely used as a solution to this problematic. The objective of such hybridization is to reduce the emissions of green gas houses while maximizing the efficiency of the vehicle. This article presents a control strategy of bi-fuel generator supplied by a mixture of hydrogen and gasoline. The experimental tests show that the evolution of the efficiency as a function of the speed and the electric power for each mixture can be represented by a smooth surface. This allows the use of Taylors formulation to build an online parametric model of the variables. The search for the operating conditions of the generator is ensured by a non-linear optimization method to monitor the efficiency. The online parametric model used in this study realize a maximum relative error with the experimental values equal to 6.93%. Which is less than the 8.76% and 37.56% achieved with a Neural Network Algorithm and an offline recursive least square simultaneously. In addition, the approach presented allows an increase of the efficiency of 7.11% compared to the industrial method at a constant speed.

Index Terms—Hybrid electric vehicle, energy efficiency, hydrogen, gasoline, generator, emission.

I. INTRODUCTION

SEVERAL human activities pollute the environment. This is due to the use of fossil fuels in different sectors. Canadian statistical study shows that both of industrial and transportation sectors are the primary consumers of energy [1]. Nevertheless, transportation sector is the first sector that produces greenhouse gas emissions [2]. In this context, electrical vehicles EVs, which are close to zero emissions, have reemerged as strong candidate among available transport alternatives [3], [4]. However, this solution has various challenges that need to be treated to get closer to the conventional vehicles in terms of storage of electrical energy, autonomy, long charging time and limited lifespan, purchase value [5], [6]. Therefore, the orientation towards hybridization of EVs by the addition of a second energy source under different systems was a practical way to widen the operating range [7]. Hybrid electric vehicles (HEVs) differ mainly in design. There are three types of architectures, serial, parallel and serial-parallel. For the series architecture, the second energy source

M. Rebai, S. Kelouwani, and Y. Dubé are with the Hydrogen Research Institute and the Department of Mechanical Engineering, Université du Québec à Trois-Rivières, Trois-Rivières, QC G9A 5H7, Canada (e-mail: Mohamed.rebai@uqtr.ca; Soussou.kelouwani@uqtr.ca; Yves.dube@uqtr.ca).

K. Agbossou is with the Hydrogen Research Institute and the Department of Electrical and Computer Engineering, Université du Québec à Trois-Rivières, QC G9A 5H7, Canada (e-mail: Kodjo.agbossou@uqtr.ca).

Manuscript received April 19, 2017

has an unique role in the production of electrical energy for charging the battery. As for the parallel architecture, movement of the vehicle is ensured either by an internal combustion engine (ICE) or by a battery pack, which supplies an electric motor. The third hybridization solution is the serial-parallel architecture, which combines the two previous architectures to benefit from the advantages of each topology [7], [8].

Fuel cells present themselves as an environmentally efficient solution thanks to their zero emissions of polluting gases. Thus, the efficiency of this system can reach 50% compared to other machines. Nevertheless, several ongoing researches has been performed to remedy technical difficulties such as the cold starting of the fuel cell at a temperature below 0C. To date, it does not withstand the rapid changes of charge, which lead directly to minimize lifespan [9]–[12]. A comparative study of fuel cell electric vehicles and internal (FCEV) combustion engine vehicle (ICEV) shows a 30% increase in the total price of an FCEV compared to the traditional vehicle despite the advantages and the discounts offered for this type of vehicles. Also, the price of the fuel cell represents 24% of the price of the traditional vehicle which remains a disadvantage in the marketing of these vehicles [13]. On the other hand, studies carried out on the use of generators in order to increase their yields and reduce the polluting emissions generated by the ICE, especially with the possibility of mixing fossil fuels and hydrogen (H_2) as a source of renewable energy. Indeed, the injection of small particles of H_2 into the ICE makes it possible to approach a homogeneous mixture with fossil fuels because of the high coefficient of H_2 diffusion. In addition, the speed of propagation of the flame is very high by comparing it to other fuels which that makes the combustion complete [14]. A simple modification of the injection system and the controller part of the ICE converts it from a fossil fuel-powered engine to a bi-fuel engine [15]. Chulyoung et al [16] studied the efficiency of a generating set with regard to the production of emissions on hydrogen and biogas mixtures by varying the stoichiometric coefficient. The addition of 15% H_2 to the mixture allows an efficiency increase of 14.7% with respect to a pure biogas mixture. But this did not prevent the increase of nitrogen oxide emission NO_x because of the speed of the flame propagation and the increase of the temperature in the chamber, which in turn favors its production. Research has been returned to visualize the effect of adding H_2 to fossil fuels. At the cold start of the ICE, H_2 can reduce the emissions of hydrocarbons HC

and carbon monoxide CO to 94.7% and 99.5% simultaneously with gasoline (*Gas*). To mitigate its emissions, low and average loads have been evaluated with mixtures rich in percentage of H_2 , while heavy loads are given for *Gas* [17]. Experimental studies have been reported on the addition of H_2 with different fossil fuels such as natural gas, diesel, and *Gas* [18]–[21]. The results show that the addition of H_2 has considerably increased the efficiency of the engine. Under leaner operating conditions and idling the engine stabilizes with mixtures that are rich in H_2 . In the case of diesel, an improvement in the engine brake thermal efficiency of 15.8% with the addition of 42% H_2 . In addition, H_2 significantly reduces emissions of carbon monoxide CO , carbon dioxide CO_2 . Unlike other emissions, NO_x have been increased. In fact, the formation of NO_x is associated with the increase of the temperature in the combustion chamber, the oxygen concentration and the duration of the reaction. The purity of the H_2 in the ICE is low by comparing it to the requirement of fuel cells, which operates with a purity of 99.9%. Interestingly and as an advantage, this makes the cost of H_2 very low for ICEs. Verhelst et al [22] worked on the production effect of nitrogen oxide emissions from an ICE running on H_2 . Among the results found, the stoichiometric coefficient which is the ratio of fuel to air is the predominant factor for NO_x emissions. Indeed, for low stoichiometric coefficients (between 0.2 and 0.5), NO_x emissions are negligible. After $\phi = 0.5$, an exponential increase in NO_x emissions and peaked at $\phi = 0.8$. This result was explained by the increase in the temperature of the combustion chamber, which facilitates the production of nitrogen oxide. Beyond $\phi = 0.8$, NO_x emissions begin to decrease due to lack of the amount of oxygen in the cylinder. Among the advantages of H_2 as fuel in the ICE is the operation with poor mixtures, which is not the case for other fossil fuels [23]. In this study, the ICE operates with a stoichiometric coefficient equal to $\phi = 0.5$ with H_2 . While, *Gas* is set at the ideal ratio that generates the least polluting emissions [24].

The efficiency of generators is lower than that obtained by fuel cells. Therefore, it is necessary to operate the generator at optimum efficiency in order to reduce this deviation. Indeed, the behavior of the generator is non-linear, which makes monitoring efficiency is difficult. This non-linearity is due to the presence of the ICE. To perform adaptive approaches for the bi-fuel generator, it is essential to identify the system parameters in real time. But this is not possible because the complexity of thermodynamic models that take into account the combustion of the engine [25]. Concerning the spark-ignition engine, two models have been described: The generic mean value model (MVM) and the discrete event model (DEM) [26], [27]. But these two models require several parameters of the engine in advance with a high precision to converge that are not suitable in this work for monitoring the efficiency in real time. The approach given by the manufacturer of generator is based on a map of efficiency [28]. This method does not take into account the dynamics of the system in real time. Certainly, the state of aging and wear of the various components of the ICE results in a change in the behavior of the generator. Hence, the efficiency card is not the same card given by the manufacturer because this card is static

[29]. The neural network is an efficient method for modeling the bi-fuel generator using a large experimental database [30]. But the major disadvantage of this approach is the collection of data, as well as the convergence of the method, is influenced by the training of the block. Kere et al [31] proposes a new approach to monitoring efficiency by relying on an adaptive yield map to account for the behavior of the generator in real time. In addition, the efficiency of the generator is improved by 7.15% compared to the control strategy commonly found at constant speed. This article examines an approach for tracking the maximum real-time efficiency of a hydrogen-gasoline bi-fuel generator as an intermediate solution for HEVs.

This document is organized as follows. After the introduction of section I, a presentation of the bi-fuel hydrogen-gasoline generator with the various modifications. Development of the generator efficiency map with a pollutant emission projection for different mixtures is described in Section III. Modeling and optimization of the generator are given in Section IV. The experimental validation of the proposed method followed by a comparative study is provided in Section V. Finally, the conclusion is presented in Part VI.

II. BI-FUEL HYDROGEN-GASOLINE GENERATOR

The nonlinearity of the generator makes the problem of modeling and optimization more complex. This is due to the presence of the internal combustion engine in this system. In addition, thermodynamic models are difficult to integrate into an optimization process. Therefore, the development of an empirical model overcomes these difficulties by carrying experimental tests to characterize the generator in order to find the optimal conditions.

A. Description of the generator

A 5 kW Honda commercial generator, shown in Table I, has been modified to operate with *Gas*, hydrogen or mixture of both fuels under different percentages. Indeed, this group consists of an ICE of a single cylinder with four-stage controlled ignition. In addition, two synchronous generators of 2.5 kW each are coupled to the output shaft of the ICE. This generator was installed on a rechargeable electric vehicle to convert it into an hybrid electric vehicle as shown in Fig. 1.

TABLE I
CHARACTERISTICS OF THE GENERATOR

Parameter	Value
Engine type	4-stroke, single cylindre
Model	GX340K1
Maximum horsepower	8.1 kW at 3600 rpm
Compression ratio	8.1:1
Excitation	Self-excitation
Maximum output	5 kVA
Rated output	4.5 kVA

Fig. 2 shows the main modifications made in this study: the carburetor change by an intelligent injection system, which has two injectors: the first for gasoline and the second for hydrogen installed on the intake manifold. The combustion takes place indirectly, the fuel air mixture is formed upstream of the intake



Fig. 1. Generator bi-fuel hydrogen-gasoline

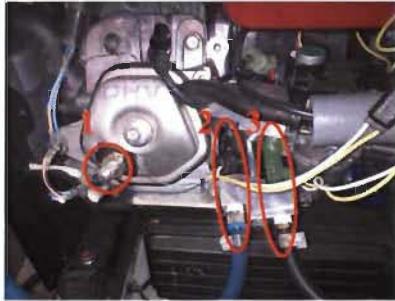


Fig. 2. The modified bi-fuel generator: 1-camshaft sensor; 2-hydrogen injector and 3-Gasoline injector

valve. The inverter is replaced by a motor controller and a camshaft sensor is installed to control the injection time.

After this modification, the generator was placed on an electric test vehicle to convert it to a hybrid electric vehicle with a serial architecture. Thus, two power interfaces are connected between the generator and the battery to ensure the AC to DC conversion and subsequently charge the batteries. Several sensors are installed: Two flow meters to measure the consumption of each fuel in real time. Two sensors placed on the exhaust pipe to measure polluting emissions. The software and hardware are based on the Labview / cRIO system as shown in Fig. 3.

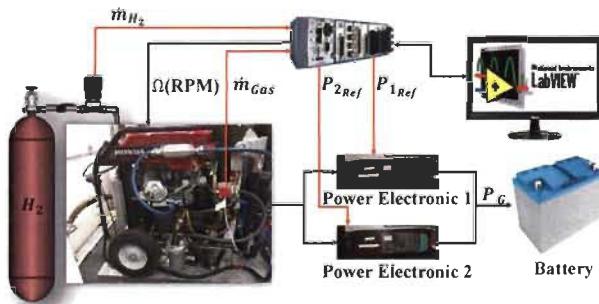


Fig. 3. Representation of the bi-fuel generator with the different parts

B. Experimental procedure

The generator must be operated under the best conditions in order to benefit from an optimum efficiency and low polluting

emissions. Depending on the level of charge of the batteries and the trajectory to be traveled, the control of the power to be delivered by the generator given by the energy management system often varies. For this purpose, the aim of the study is to deliver each electrical power by the generator, with the minimum torque and the minimum speed of rotation of the ICE *RPM* as well as the appropriate percentage of each fuel. Several tests were carried out on the test bench presented in the previous section has been used to scan various power regimes (low, medium and high). Table II shows the various input parameters of the generator. About electrical power, four power levels have been selected. $P_G = 1000W$ and $P_G = 2050W$ represent the electric powers consumed by the test vehicle batteries shown in Fig. 1 for the two speeds respectively $v = 10\text{km/h}$ and $v = 20\text{km/h}$ with a zero road gradient. Whereas $P_G = 3000W$ is the maximum power of the generating set to be delivered. Four levels of *RPM* set which corresponds to low, medium and high speeds. Six levels for the percentages of each fuel with a 20% step were chosen. The procedure followed in the tests is as follows: For each electrical power, different values of RPM and gas mixture have been swept (all values shown in Table II), to generate the output parameters.

TABLE II
INPUT PARAMETER OF THE BI-FUEL GENERATOR

Power (W)	Ω (RPM)	% Gas	% H_2
500	1700	0	100
1000	2500	20	80
2050	3000	40	60
3000	3300	60	40
***	***	80	20
***	***	100	0

The recording of the tests is ensured through the software and hardware system which consists of the collection of the measurements given by the sensors in real time whenever the input parameters change.

III. EFFICIENCY MAP OF A BI-FUEL GENERATOR AND POLLUTING EMISSIONS

A. Derivation of efficiency map

The efficiency of the generating set is calculated by equation (1):

$$\eta = \frac{P_G}{\dot{m}_{H_2} LHV_{H_2} + \dot{m}_{Gas} LHV_{Gas}} \times 100 \quad (1)$$

Where:

- \dot{m}_{H_2} and \dot{m}_{Gas} are respectively the flow rates of H_2 and Gas.
- LHV_{H_2} and LHV_{Gas} are lower heating value of the H_2 and Gas.

Fig. 4 shows the evolution of the efficiency of the generator with respect to four different fuel input of the bi-fuel generator.

The efficiency is significantly affected by the percentages of each fuel. Indeed, in the case where the combustion takes place with a pure H_2 mixture, the efficiency can reach 32%

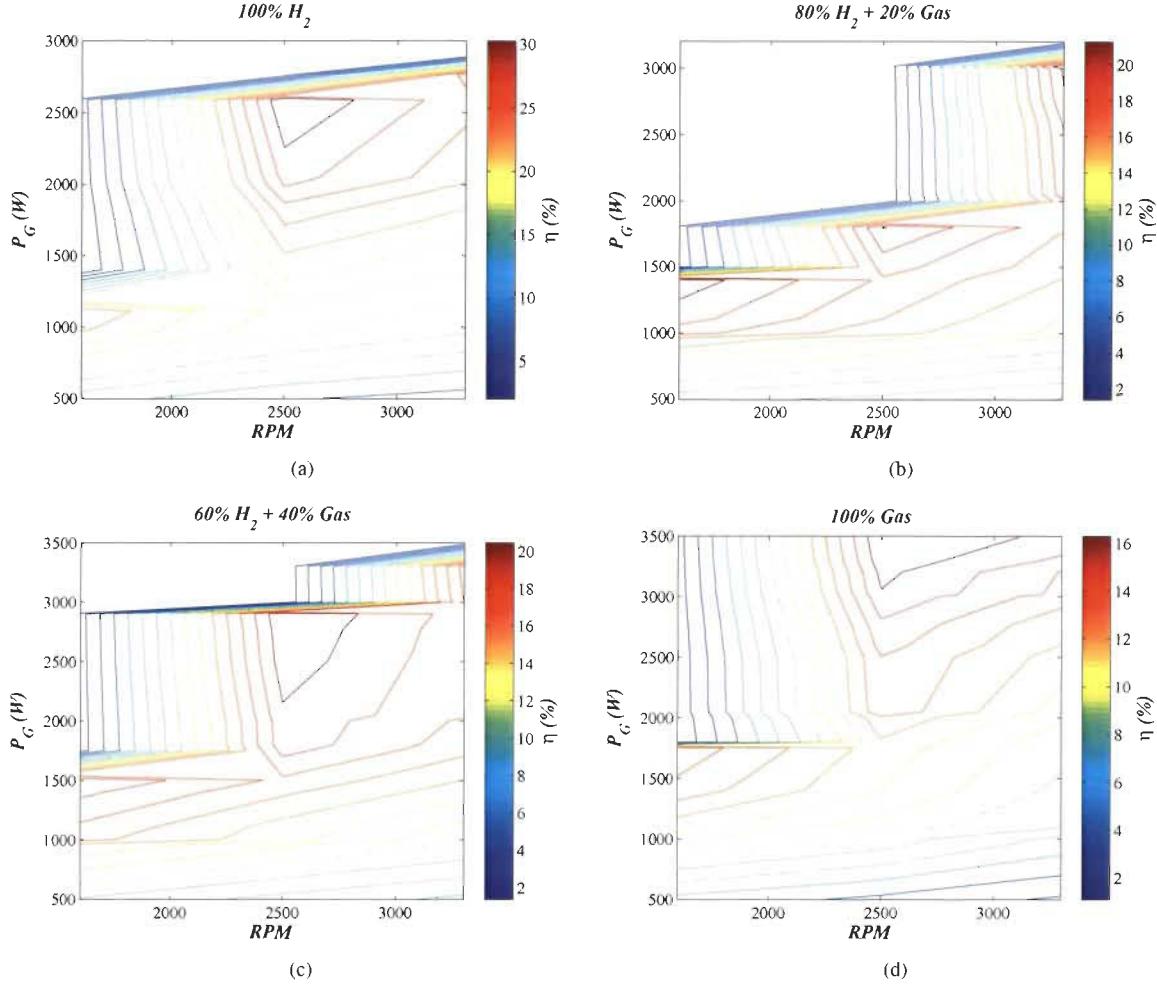


Fig. 4. Mapping the efficiency of the bi-fuel generator as a function of P_G and RPM

for average power regimes compared with what can deliver the group, which is higher than the case with 100% gas. This increase is explained by the high calorific value of H_2 which is about three times greater than that of *Gas* and diesel. But the power of the generator with H_2 is lower compared to *Gas* which is justified by the major disadvantage of H_2 at the low energy density level compared to other fossil fuels. On the other hand, the more the percentage of *Gas* with H_2 increases, the higher powers the group can deliver. The mixture 40% *Gas* and 60% H_2 can reach high power levels. this explain why we need to go with hydrogen-rich mixtures and avoid mixtures rich in *Gas*, which have low yields.

B. Emission NO_x

The production of nitrogen oxide emissions is directly related to the amount of nitrogen entering the combustion chamber from the air. Under high temperature, N_2 decomposes into monoatomic N and reacts with oxygen to produce nitrogen oxide. For this purpose, Fig. 5 shows in the first place the emission of NO_x in function RPM for an electrical power of 1000 W and for four mixtures followed by the second graph which represents the temperature of the gas released by the combustion chamber. The lowest emission is obtained for the mixture with 100% H_2 which is explained by two factors. The first is the use of a lean mixture of H_2 ($\phi = 0.5$) which results

in lower emissions compared to pure *Gas*. Second, the lowest temperature obtained for this mixture which does not facilitate the production of its emissions. This phenomenon is observed for the different electrical powers delivered by the generator.

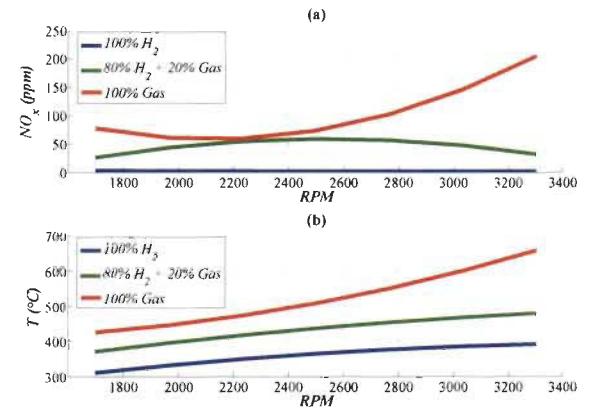


Fig. 5. (a): The evolution of NO_x emissions with the speed of rotation for different mixtures. (b): The evolution of the temperature with the speed of rotation for different mixtures.

C. Emission CO_2

The variation in the CO_2 emission of the three H_2 and *Gas* mixtures is shown in Fig. 6. For its emissions, it is clear

where the mixture 100% H_2 low-emission products since the absence of carbon in the combustion chamber. Despite this, low CO_2 particles are measured during this test due to the combustion of the lubricating oil film on the cylinder wall.

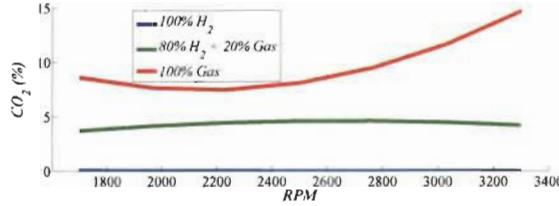


Fig. 6. The evolution of the CO_2 emission with the speed of rotation for the different mixtures

IV. BI-FUEL GENERATOR ONLINE MODEL

A. Estimation of the online model parameter

Several tests are carried out on the bi-fuel generator in order to visualize the behavior with respect to the efficiency and the level of the polluting emissions which are presented in the previous section. These tests allow us to observe the interactions between the input variables of the generator and their influence on the output variables. The presence of the ICE makes the behavior of the generator non-linear. For each H_2 and *Gas* mixture used in the tests, the representation of the efficiency as a function of P_G and *RPM* results from smooth surfaces locally [31]. Using the decomposition of the third-order Taylor series, the efficiency is expressed as a function of the electrical power P_G , *RPM* and the last parameter F which represents the percentage of each fuel that takes 0 when combustion is only with gasoline. The more its F increases, the more there is a subtraction of the amount of *Gas* replaced by H_2 until it reaches 100 which represents a pure mixture with *Gas*.

For each timestamp k , the efficiency is presented by equation (2):

$$\begin{aligned} \eta(i) = & \theta_0 + \theta_1 P_G(i) + \theta_2 \Omega(i) + \theta_3 F(i) \\ & + \theta_4 P_G(i) \Omega(i) + \theta_5 P_G(i) F(i) + \theta_6 \Omega(i) F(i) \\ & + \theta_7 P_G^2(i) + \theta_8 \Omega^2(i) + \theta_9 F^2(i) \end{aligned} \quad (2)$$

In matrix form, equation (2) is rewritten as follows:

$$\eta(i) = \varphi(i) \theta(i) \quad (3)$$

Where $\varphi(i)$ represents the regressor vector:

$$\begin{aligned} \varphi(i) = & [1, P_G(i), \Omega(i), F(i), P_G(i)\Omega(i), P_G(i)F(i) \\ & , \Omega(i)F(i), P_G^2(i), \Omega^2(i), F^2(i)]^T \end{aligned} \quad (4)$$

and

$$\theta(i) = [\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6, \theta_7, \theta_8, \theta_9] \quad (5)$$

$\theta(i)$ represents the vector of the model parameter which must be identified online to minimize equation (3) which is the error between the model and the actual value:

$$\delta = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (\eta(k) - \varphi^T(i) \theta(k-1))^2 \quad (6)$$

Equation (2) shows that $\eta(i)$ is linear with respect to the parameter $\theta(i)$, thus the error function (6). Subsequently, the recursive least squares algorithm can be applied. Therefore, $\theta(i)$ is computed by equation (7):

$$\theta = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T \Upsilon \quad (7)$$

Where

$$\Phi = [\varphi^T(1), \varphi^T(2), \dots, \varphi^T(N-1), \varphi^T(N)]^T \quad (8)$$

and

$$\Upsilon = [\eta(1), \eta(2), \dots, \eta(N-1), \eta(N)]^T \quad (9)$$

If the matrix $(\Phi^T \Phi)$ is invertible, it becomes possible to determine the values of $\theta(i)$. Through the least square estimate, $\theta(i)$ values are identified to develop the bi-fuel generator model in order to optimize the best-operating conditions that should be within the allowable ranges of the system.

B. Genset optimization

The objective in this approach is to operate the generator with optimal efficiency. This requires finding the best conditions. The first step in the optimization is the determination of the operating space of each input parameter that are given by the generator manufacturer as follows:

- The minimum electrical power $P_{G_{min}}$ of the generator and the maximum electrical power $P_{G_{max}}$.
- The minimum speed of rotation of the generator Ω_{min} and the maximum speed Ω_{max} .
- The mixture of fuel which varies between a mixture with pure gasoline F_{min} and a mixture of pure hydrogen F_{max} .

Thereafter, the operating space is defined by $P_{G_{min}}$, $P_{G_{max}}$, Ω_{min} , Ω_{max} , F_{min} and F_{max} . This space is decomposed at operating points to construct a grid. The Line Search algorithm described in [32], identifies the optimal conditions for each operating condition using a point of the grid as an initial estimation point.

Fig. 7 shows the steps of monitoring the efficiency of the generator. Initially, the database are imported from the generator and are updated at each time. Then, the parameters of the model online are identified. The third step is, looking for the following generator optimal operating conditions: Ω^* and F^* . The exception of the electric power P_G^* to be delivered by the generator which is given by the system of energy management. The result of the Line Search algorithm is imposed on the generator to compare the efficiency with respect to the previous state. These steps are performed in closed loops allowing real-time tracking.

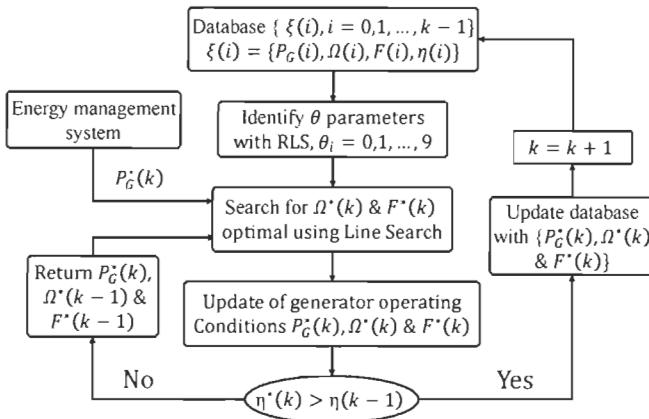


Fig. 7. Monitoring the efficiency of the bi-fuel generator

V. EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSIONS

A. Validation of the online model of the bi-fuel generator

To validate the online model of the proposed bi-fuel generator, tests are carried out through the test bench of a generator running with *Gas* and *H₂* Fig. 3. During the experiments, the input parameters of the system vary with time such that the rotational speed Ω in Fig. 8 graph (a), the electrical power P_G in Fig. 8 graph (b), and the quantity of each fuel F in Fig. 8 graph (c). This cycle scans all possible regimes of electric power at different speeds and percent of each fuel in order to visualize the behavior of the generator model targets the measurement values of efficiency.

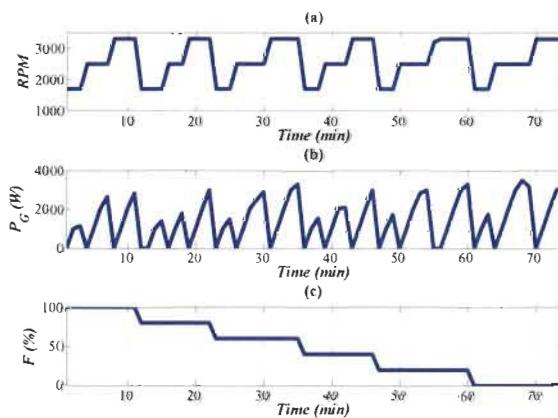


Fig. 8. (a) ICE concatenated speed profile; (b) Generator power profile; (c) blend of *H₂*/*Gas* profile

Through the loading cycle illustrated above, Fig. 9 shows a comparison between the measured efficiency values, the values estimated from the RLS_{Online} model and the values found by the $RLS_{Offline}$ model. Indeed, the difference between the two approaches is at the level of the parameters of the model. The offline model is based on a database collected from previous system tests that do not change as a function of time during generator operating. On the other hand, the online method is based on an initial database at the outset. When the generator starts, this given database will be updated

when it excites a difference between the values of the actual efficiency and the calculated values in order to minimize the error. A maximum relative error of 37.56% is given by the offline model which demonstrates that the generator is rapidly changing its behavior even though the initial database gathers all operating regimes. On the other hand, a maximum relative error of 6.93% by the online method better follows the behavior of the generator and allows the adoption of this model.

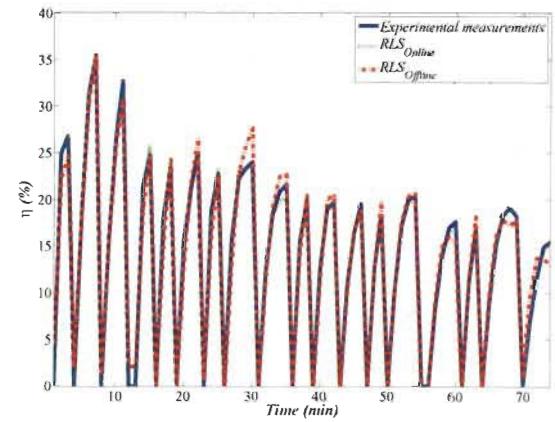


Fig. 9. Efficiency comparison between the measured values, recursive least squares offline model and online model

To ensure adoption of the model, a comparison was made by using the approach of artificial neural network (ANN). The ANN is an approach applicable in different domains that allows modeling a system by a collection of the data of the inputs and the outputs. In this study, the tests performed in

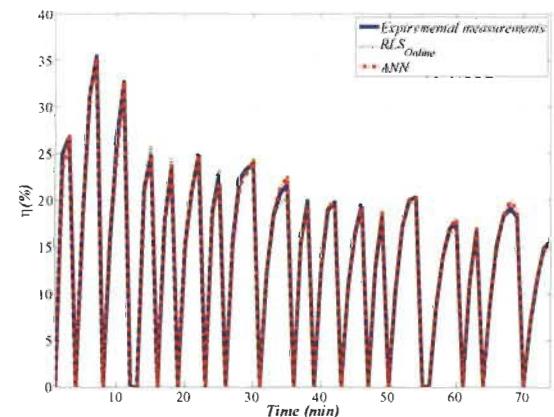


Fig. 10. Efficiency comparison between the measured values, recursive least squares online model and artificial neural network model

the mapping section were used for the training, validation, and testing of the ANN block. Seven hidden layers that take as P_G , RPM and F inputs with an output layer that represents the efficiency of the generator. Fig. 10 represents the difference between the two models (RLS_{online} and ANN) and the measured values. Both models correctly track the efficiency of the generator for the same loading cycle (Fig. 8). The

maximum relative error of the ANN model is 8.76% which is close to that obtained by the online RLS model. But, the main cause for the choice of the *RLS_{online}* model in this study as a more impressive approach is the online aspect. Indeed, the change in the behavior of the generator made the *ANN* method less advantageous. Since the database used to train the model is taken under such conditions, but the system operates under different operating conditions that affect the database.

B. Search for optimal efficiency

This section shows a comparison between the approach presented in this study and the industrial method (constant speed) for monitoring the efficiency of the generator. A scenario for a hybrid electric vehicle has been adopted to vitalize the behavior of the generator as a function of the electric power necessary for the electric traction motor. The standard driving cycle of the US Environmental Protection Agency US06 was used in this study as shown in Fig. 11 graph (a). This driving cycle is adjusted so that it can be applied with the physical parameters of the experimental hybrid electric vehicle (Fig. 1) in order to determine the electric traction power P_e (Fig. 11 graph (b)). This P_e is divided in two to get the power given by the battery pack P_B and the power delivered by the generator P_G illustrated in 11 graph (c). Indeed, using the cumulative moving average for P_e , we obtain the P_G to be delivered at each timestamp (k) using equation (10). Then the P_B is found by equation (11).

$$P_G(k) = P_G(k-1) + \frac{P_e(k) - P_G(k-1)}{k} \quad (10)$$

$$P_B(k) = P_e(k) - P_G(k) \quad (11)$$

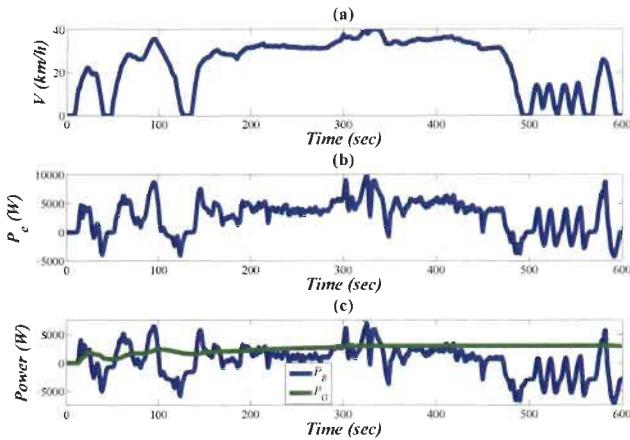


Fig. 11. Scenario for a hybrid electric vehicle based on a bi-fuel generator. (a): Driving Cycle US06; (b): Electrical traction power; (c): Distribution of electrical power

The algorithm begins with the database provided by the mapping of the generator. At each increment, the efficiency monitoring algorithm searches for optimal conditions (RPM , F) as a function of the power required to maximize efficiency.

Fig. 12 graph (a) represents the power delivered by the generator along the trajectory. The two graphs (b) and (c) of Fig. 12 show the variation in the rotational speed of the ICE and the percentage of each fuel which are directly related to the power of the generator. Indeed, the power is a parameter similar to the resistant torque. To do this, RPM and F vary to support this resistive torque at every moment. It is also observed in this scenario that the generator operates along the trajectory with mixtures rich in the percentage of hydrogen relative to the *Gas*. This achieves two advantages at a time, maximum efficiency of the generator and low emissions. Indeed, mixtures with a dominant percentage of H_2 relative to gasoline allow to generate low emission of CO , CO_2 and HC . NO_x emission is also low because of the use of mixtures poor in H_2 .

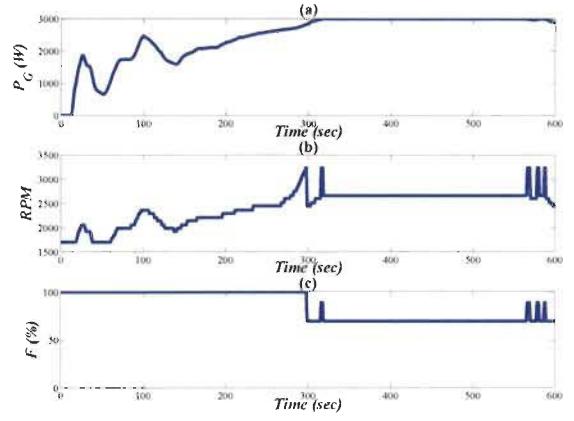


Fig. 12. Optimum condition for generator: (a) Generator power imposed; (B): Optimum rotational speed; (C) Optimal percentage of each fuel

The main objective of this study is to ensure operation with maximum efficiency of the generator. The use of both fuels in the generator essentially aims at optimum efficiency and low polluting emissions. Fig. 13 shows the evolution of the

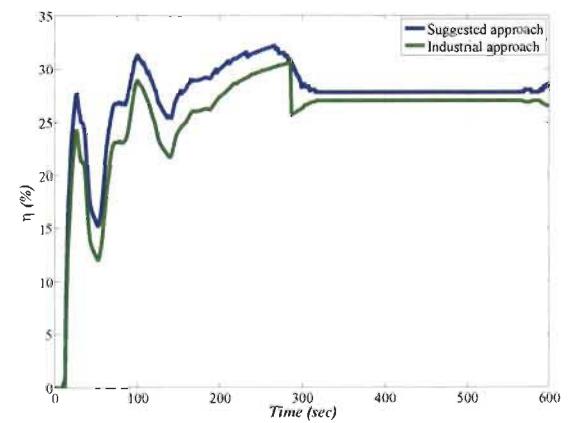


Fig. 13. Comparison of the evolution of the efficiency between the two approaches for a driving scenario of a hybrid electric vehicle based on a bi-fuel generator

efficiency of the generator for the industrial approach and the approach presented in this study. Indeed, in the industry,

generators operate at a constant speed set by the manufacturer. In this case, the rotational speed of the ICE is fixed at 2800 RPM to support all the powers given by the same scenario. The results show that the method of monitoring the effectiveness of the group is more advantageous. Compared to the industrial method, an increase of the efficiency by 7.11% was observed. Indeed, the method of efficiency monitoring makes it possible to give the amount of energy necessary for RPM and F to support the electric power. But, in the industrial method operated with a constant speed for all the regimes results in more loss of energy.

VI. CONCLUSION

In this paper, an approach to monitor the efficiency of a bi-fuel hydrogen-gasoline generator was developed as an extender of the range for EVs after the development of the mapping of each output parameter through a experimental study. The main conclusions of this study are:

- Adding H_2 with Gas allows an increase in the efficiency of the system. Indeed, the pure hydrogen mixture increases the efficiency more than twice with respect to this obtained by pure Gas.
- At the level of polluting emissions, the addition of hydrogen to Gas reduces the production of CO and CO_2 emissions since H_2 does not contain carbon. Thus, HC emissions decrease as the combustion in the chamber improves due to the speed of H_2 flame propagation.
- NOx emissions decrease in the case of mixtures which are rich in the percentage of H_2 with respect to Gas thanks to the use of the low stoichiometric coefficients of H_2 .
- In the context of hybrid EVs, the low and medium powers to be delivered by the generator are given for mixtures rich in H_2 . On the other hand, in order to withstand the high electrical powers, a quantity of Gas is added with H_2 to overcome this resistive torque.
- An online parametric model has been developed to represent the behavior of the bi-fuel hydrogen-gasoline generator in real time. Indeed, wear and aging of the mechanical part of the generator change the behavior of the generator. The comparative study shows that the inline RLS model is more robust than the other two models. A maximum relative error of 6.93% which is lower than the other two models.
- Monitoring efficiency with the proposed approach allows an increase of 7.11% compared to the industrial method at constant speed.

To conclude, an experimental study shows the importance of the use of H_2 with Gas in generating sets as a hybridization solution in EVs. A model and method of monitoring the efficiency of the hydrogen-gasoline bi-fuel generator have been presented which demonstrates a desirable improvement over the industrial method.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by Bureau de l'Efficacité et de l'Innovation Énergétiques, Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune du Québec and Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada.

REFERENCES

- [1] J. Whitmore and P.-O. Pineau, "État de l'énergie au Québec," 2015. [Online]. Available: http://www.ledevoir.com/documents/pdf/energie_quebec.pdf
- [2] T. H. Ortmeyer and P. Pillay, "Trends in transportation sector technology energy use and greenhouse gas emissions," *Proceedings of the IEEE*, vol. 89, no. 12, pp. 1837–1847, 2001.
- [3] P. Poudenx, "The effect of transportation policies on energy consumption and greenhouse gas emission from urban passenger transportation," *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 42, no. 6, pp. 901–909, 2008.
- [4] C. C. Chan, "The state of the art of electric and hybrid vehicles," *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, no. 2, pp. 247–275, 2002.
- [5] S. G. Wirasingha and A. Emadi, "Classification and Review of Control Strategies for Plug-In Hybrid Electric Vehicles," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 1, pp. 111–122, 2011.
- [6] T. H. Bradley and A. A. Frank, "Design, demonstrations and sustainability impact assessments for plug-in hybrid electric vehicles," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 1, pp. 115–128, 2009.
- [7] A. Emadi, S. S. Williamson, and A. Khaligh, "Power electronics intensive solutions for advanced electric, hybrid electric, and fuel cell vehicular power systems," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 21, no. 3, pp. 567–577, 2006.
- [8] A. Emadi, K. Rajashekara, S. S. Williamson, and S. M. Lukic, "Topological overview of hybrid electric and fuel cell vehicular power system architectures and configurations," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 54, no. 3, pp. 763–770, 2005.
- [9] A. Delorme, A. Rousseau, P. Sharer, S. Pagerit, and T. Wallner, "Evolution of hydrogen fueled vehicles compared to conventional vehicles from 2010 to 2045," *Evolution*, vol. 1, p. 1008, 2009.
- [10] J. Ko and H. Ju, "Comparison of numerical simulation results and experimental data during cold-start of polymer electrolyte fuel cells," *Applied Energy*, vol. 94, pp. 364–374, 2012.
- [11] P. Chippar and H. Ju, "Evaluating cold-start behaviors of end and intermediate cells in a polymer electrolyte fuel cell (PEFC) stack," *Solid State Ionics*, vol. 225, pp. 85–91, 2012.
- [12] N. Henao, S. Kelouwani, K. Agbossou, Y. Dub, and X00E, "PEMFC low temperature startup for electric vehicle," in *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2012, pp. 2977–2982.
- [13] S. Mekhilef, R. Saidur, and A. Safari, "Comparative study of different fuel cell technologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 1, pp. 981–989, 2012.
- [14] G. A. Karim, "Hydrogen as a spark ignition engine fuel," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 28, no. 5, pp. 569–577, 2003.
- [15] D. Sáinz, P. M. Diéguez, J. C. Urroz, C. Sopena, E. Guelbenzu, A. Pérez-Ezcurdia, M. Benito-Amurrio, S. Marcelino-Sádaba, G. Arzamendi, and L. M. Gandia, "Conversion of a gasoline engine-generator set to a bi-fuel (hydrogen/gasoline) electronic fuel-injected power unit," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 21, pp. 13 781–13 792, 2011.
- [16] C. Jeong, T. Kim, K. Lee, S. Song, and K. M. Chun, "Generating efficiency and emissions of a spark-ignition gas engine generator fuelled with biogashydrogen blends," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 23, pp. 9620–9627, 2009.
- [17] C. Ji, S. Wang, and B. Zhang, "Performance of a hybrid hydrogengasoline engine under various operating conditions," *Applied Energy*, vol. 97, no. 0, pp. 584–589, 2012.
- [18] C. Park, C. Kim, Y. Choi, S. Won, and Y. Moriyoshi, "The influences of hydrogen on the performance and emission characteristics of a heavy duty natural gas engine," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 5, pp. 3739–3745, 2011.
- [19] N. Saravanan and G. Nagarajan, "Performance and emission studies on port injection of hydrogen with varied flow rates with Diesel as an ignition source," *Applied Energy*, vol. 87, no. 7, pp. 2218–2229, 2010.
- [20] S. Verhelst, P. Maesschalck, N. Rombaut, and R. Sierens, "Efficiency comparison between hydrogen and gasoline, on a bi-fuel hydrogen/gasoline engine," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 5, pp. 2504–2510, 2009.
- [21] K. V. Shivaprasad, S. Raviteja, P. Chitrarag, and G. N. Kumar, "Experimental Investigation of the Effect of Hydrogen Addition on Combustion Performance and Emissions Characteristics of a Spark Ignition High Speed Gasoline Engine," *Procedia Technology*, vol. 14, pp. 141–148, 2014.

- [22] S. Verhelst, T. Wallner, H. Eichlseder, K. Naganuma, F. Gerbig, B. Boyer, and S. Tanno, "Electricity powering combustion: hydrogen engines," *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. 2, pp. 427–439, 2012.
- [23] Z. y. Zhao and F. s. Liu, "Experimental Study of Air-Fuel Ratio Control Strategy for a Hydrogen Internal Combustion Engine," in *2010 International Conference on Optoelectronics and Image Processing*, vol. 1, 2010, pp. 530–533.
- [24] Y. Kilagiz, A. Baran, Z. Yildiz, and M. Çetin, "A fuzzy diagnosis and advice system for optimization of emissions and fuel consumption," *Expert Systems with Applications*, vol. 28, no. 2, pp. 305–311, 2005.
- [25] S. Verhelst and T. Wallner, "Hydrogen-fueled internal combustion engines," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 35, no. 6, pp. 490–527, 2009.
- [26] M. A. Rizvi, A. I. Bhatti, and Q. R. Butt, "Hybrid Model of the Gasoline Engine for Misfire Detection," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 8, pp. 3680–3692, 2011.
- [27] Q. R. Butt and A. I. Bhatti, "Estimation of Gasoline-Engine Parameters Using Higher Order Sliding Mode," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 11, pp. 3891–3898, 2008.
- [28] M. Neve, G. D. Nicolao, G. Prodi, and C. Siviero, "Estimation of Engine Maps: A Regularized Basis-Function Networks Approach," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 17, no. 3, pp. 716–722, 2009.
- [29] P. K. Wong, L. M. Tam, K. Li, and C. M. Vong, "Engine idle-speed system modelling and control optimization using artificial intelligence," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 224, no. 1, pp. 55–72, 2010.
- [30] M. Rebai, S. Kelouwani, Y. Dubé, and K. Agbossou, "Intelligent blended hydrogen-gasoline generator emission / efficiency characterization in context of EV range extension," 2016.
- [31] L. J. Kere, S. Kelouwani, K. Agbossou, Y. Dubé, N. Henao, and R. Courteau, "Tracking maximum efficiency of hydrogen genset used as electric vehicle range extender," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 7, pp. 3433–3443, 2014.
- [32] C. Grosan and A. Abraham, "Modified Line Search Method for Global Optimization," in *First Asia International Conference on Modelling & Simulation (AMS'07)*, 2007, pp. 415–420.



Mohamed Rebai received the B.S. degree in mechanical engineering from the cole Nationale dIngenieurs de Sfax, Sfax, Tunisia, in 2013 and the M.S. degree in mechanical engineering from the Universit du Qubec Trois-Rivires, Trois-Rivires, QC, Canada, in 2017.

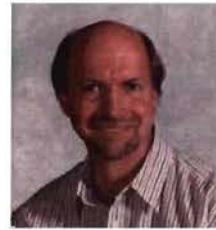
During 2013-2015, he was a production and design engineer at SPM-SUD in Tunisia. His current research interests include modeling and optimization of the operating conditions of the bi-fuel hydrogen-gasoline generator with respect to efficiency and polluting emissions as a hybridization solution of electric vehicles



Soussou Kelouwani (M14) received the B.S. and M.Sc.A. degrees from the Universit du Qubec Trois-Rivires, Trois-Rivires, QC, Canada, in 2000 and 2002, respectively, and the Ph.D. degree (automation and systems) from the cole Polytechnique de Montral, Montral, QC, in 2010, all in electrical engineering.

During 20052006, he was a Software Engineer with Cylis 53 Inc. and, during 20022005, with Openwave Inc. During 20112012, he was a Scientist with the Hydrogen Research Institute. He is currently a Professor with the Department of Mechanical Engineering, Universit du Qubec Trois-Rivires. His current research interests include fuel cell control and optimization, optimal energy management for hybrid electric vehicles, dynamic control of mobile robots, and intelligent control systems.

Dr. Kelouwani is a Professional Engineer and a member of the Ordre des Ingnieurs du Qubec.



Yves Dubé received the B.Sc. degree in physical engineering, the M.Sc. degree in mechanical engineering, and the Ph.D. degree in simulation and control from the Universit Laval, Qubec, QC, Canada, in 1977, 1979, and 1985, respectively.

He is currently a Professor with the Department of Mechanical Engineering, Universit du Qubec Trois-Rivires, Trois-Rivires, QC. He is the author or coauthor of more than 30 publications and is the holder of one patent. His present research activities are in the area of renewable energy, hydrogen-combustion engine development, and control of mechanical systems.

Dr. Dubé has been member of the Ordre des Ingnieurs du Qubec since 1977 and a Professional Engineer since 1977.



Kodjo Agbossou (M98SM01) received the B.S., M.S., and Ph.D. degrees in electronic measurements from the Universit de Nancy I, Nancy, France, in 1987, 1989, and 1992, respectively.

He is currently the Head of the Engineering School, Universit du Qubec Trois-Rivires (UQTR), Trois-Rivires, QC, Canada. He was a Postdoctoral Researcher (19931994) and a Lecturer (19971998) with the Department of Electrical Engineering, UQTR. Since 1998, he has been an Associate Professor and, since 2004, a Full Professor with the Department of Electrical and Computer Engineering, UQTR. He was the Head of the department. He was also the Director of Graduate Studies in Electrical Engineering. He is the author of more than 150 publications and has four patents. His present research activities are in the area of renewable energy, integration of hydrogen production, storage and electrical energy generation systems, hybrid electrical vehicles, and control and measurements.

Dr. Agbossou is a member of the Hydrogen Research Institute and Research group GREI of UQTR. He is also a member of the IEEE Power and Energy, Industry Applications, Communications Societies as well as the Industrial Electronics Society Technical Committee on Renewable Energy Systems. He is also a former Chair of the IEEE Section Saint Maurice, QC, Canada. He is a Professional Engineer and joined the Ordre des Ingnieurs du Qubec in 1998.