

République Algérienne Démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique

Université A.Mira Béjaïa
Faculté de technologie
Département de Génie Electrique



Mémoire de fin d'étude
En vue de l'obtention du diplôme de master en électrotechnique
Option : Automatismes industriels

Thème

**Gestion d'énergie par logique floue d'un véhicule électrique hybride.
Implémentation sur arduino.**

Présenté par

CHIKHI Lyes

BENZAID Hocine

Dirigé par

Mr Taib Nabil

Remerciement

On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Mr TAIB Nabil, on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

Nous tenons également à remercier nos professeurs pour la haute qualité de l'enseignement qui nous a été dispensé à l'Université A. Mira de Bejaia au cours des cinq dernières années.

Sommaire

Remerciement	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des nomenclatures	
Introduction générale	1

Chapitre 1. Généralités sur les véhicules électriques hybrides.

1.1 Introduction.....	4
1.2 Types de véhicules.....	4
1.3 Les points positifs et négatifs des différents véhicules	4
1.4 Véhicule électrique	5
1.5 Véhicule électrique hybride	7
1.6 Gestion matériel	7
1.6.1. Hardware.....	7
1.6.1.1. Véhicules électriques hybrides série.....	7
1.6.1.2. Véhicules électriques hybrides à moteurs en parallèle.....	8
1.6.1.3. Véhicules électriques hybrides compound ou dual.....	9
1.7. Classification des véhicules hybrides.....	9
1.7.1. L'hybridation légère.....	10
1.7.2. L'hybridation classique.....	10
1.7.3. L'hybride rechargeable.....	11
1.8. Véhicule électrique Hybride à « pile à combustible ».....	11
1.9. Choix des sources d'énergie pour le véhicule hybride.....	11
1.10. Pile à combustible.....	12
1.10.1. Principe de fonctionnement de la pile à combustible.....	13
1.11. Super-Condensateur.....	14
1.12. Choix du véhicule électrique hybride.....	14
1.13. Conclusion.....	15

Chapitre 2. Gestion d'énergie dans les véhicules électriques hybrides.

2.1. Introduction.....	16
2.2. Modèle mécanique du véhicule.....	18
2.3. Dimensionnement des sources énergétique.....	19

2.4. Les différentes stratégies de gestions d'énergies dans un véhicule électrique hybride.....	20
2.4.1. Approche d'optimisation.....	20
2.4.1.1. Minimisation de la consommation équivalente du carburant (ECMS).....	20
2.4.2. Approche basé sur des règles.....	20
2.4.2.1. Stratégie de contrôle du thermostat.....	20
2.4.2.2 Gestion d'énergie d'un véhicule électrique hybride à l'aide de la logique floue.....	21
2.4.2.2.1 La fuzzification.....	22
2.4.2.2.2 Le traitement d'inférence.....	24
2.4.2.2.3 La défuzzification.....	26
2.5 La conclusion.....	26

Chapitre 3. Implémentation de la gestion d'énergie du véhicule électrique hybride à l'aide de la logique floue dans arduino.

3.1. Introduction.....	28
3.2. Définition du module Arduino.....	28
3.3. La constitution de la carte Arduino UNO.....	28
3.4. Conversion analogique / numérique.....	28
3.4.1. Précaution à prendre.....	29
3.5. Les différentes étapes de la réalisation.....	29
3.6. Présentation de la bibliothèque fuzzy (eFLL).....	33
3.7. Documentation bibliothèque fuzzy.....	33
3.7.1. Fuzzy object.....	33
3.7.2. FuzzyInput.....	33
3.7.3. FuzzyOutput.....	33
3.7.4. FuzzySet.....	33
3.7.4.1. Fonction triangulaire.....	33
3.7.4.2. Fonction trapézoïdales.....	34
3.7.4.3. Fonction singleton.....	35
3.7.5. FuzzyRule.....	35
3.7.6. FuzzyRuleAntecedent.....	35
3.7.7. FuzzyRuleConsequent.....	35

3.8. Explication des étapes du programme.....	35
3.9. Les résultat de la réalisation pratique sur arduino IDE.....	37
3.10. Conclusion.....	40
Conclusion générale.....	41
Références bibliographiques.....	42
Annexe.....	44

Liste des figures

Figure 1.1 : Architecture d'un véhicule électrique.....	6
Figure 1.2 : Architecture d'un véhicule hybride série.....	8
Figure 1.3 : Architecture d'un véhicule hybride parallèle.....	8
Figure 1.4 : Architecture d'un véhicule hybride série/ parallèle.....	9
Figure 1.5 : Diagramme de Ragone.....	12
Figure 1.6 : Pile à combustible.....	13
Figure 1.7 : structure du véhicule choisi dans ce travail : PAC, Super-condensateur.....	15
Figure 2.1 : Classification des systèmes de gestion de l'énergie.....	17
Figure 2.2 : Contrôle par logique floue.....	17
Figure 2.3 Bilan de forces sur le véhicule.....	18
Figure 2.4 : Modélisation de la puissance demandée par le moteur électrique.....	23
Figure 2.5 : Modélisation de l'état de charge de l'élément de stockage.....	23
Figure 2.6 : Modélisation de la puissance fournie par la pile à combustible.....	24
Figure 2.7 : Surface de décision floue.....	26
Figure 3.1 : Carte arduino UNO.....	30
Figure 3.2 : potentiomètre 50 k Ω	30
Figure 3.3 : Une platine d'essai.....	30
Figure 3.4 : Câble USB type A/B.....	31
Figure 3.5 : Maquette assemblant tous les composants nécessaire à la réalisation de la gestion d'énergie du véhicule électrique hybride.....	32
Figure 3.6 : Image rapproché de la figure 3.5.....	32
Figure 3.5. : FuzzySet* fs = FuzzySet(10, 20, 20, 30);.....	33
Figure 3.6 : FuzzySet* fs = FuzzySet(10, 33, 33, 33);.....	34
Figure 3.7 : FuzzySet* fs = FuzzySet(5, 5, 5, 30);.....	34
Figure 3.8 : FuzzySet* fs = FuzzySet(10, 20, 30, 40);.....	34
Figure 3.9 : FuzzySet* fs = FuzzySet(0, 0, 10, 20);.....	34
Figure 3.10 : FuzzySet* fs = FuzzySet(20, 30, 40, 40);.....	34
Figure 3.11 : FuzzySet* fs = FuzzySet(20, 20, 20, 20);.....	35
Figure 3.12 : Résultat de la réalisation pour des entrées Pdem=-60kW et SoC=0%.....	37

- Figure 3.13** : Résultat de la réalisation pour des entrées $P_{dem}=60kW$ et $SoC=100\%$38
- Figure 3.14** : Résultat de la réalisation pour des entrées $P_{dem}=18kW$ et $SoC=57\%$38
- Figure 3.15** : Résultat de la réalisation pour des entrées $P_{dem}=12kW$ et $SoC=34\%$39

Liste des tableaux :

Tableau 1.1. : Les points positifs et négatifs des différents véhicules.....5

Tableau 2.1. : Récapitulatif des règles floues.....25

Liste des nomenclatures

AF : Assez faible.

DC/DC : Convertisseur Continue / Continue.

E : Elevé.

e : Elevé

El : Elevé.

F : Faible.

f : Faible.

Fa : Faible.

HT : Haute tension.

M : Moyenne.

m : Moyen.

Mo : Moyen.

N : Négatif.

NUL : Nulle.

OPEP : Organisation des pays exportateur du pétrole.

PAC : Pile à combustible.

P_{dem} : La puissance demandée par le véhicule électrique hybride.

P_{fcs} : La puissance a fournir par la pile à combustible PAC.

SC : La batterie.

SoC : L'état de charge de batterie.

TH : Taux d'hybridation.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La déforestation intensive actuelle à l'égard de l'urbanisation et les guerres provoquées par l'être humain pour lesquelles la nature est aussi confrontée, cela a causé le manque d'approvisionnement en oxygène. En rajoutant à cela la croissance démographique, la réduction des ressources naturelle et la pollution de l'environnement qui constituent des enjeux majeurs de notre siècle. Beaucoup de problèmes environnementaux sont apparus ces dernières années dont des périodes de sécheresse plus longues et des inondations plus intenses. Parmi les causes principales de ces changements climatiques, on trouve les émissions des gaz à effet de serre attribués au secteur de transport dont le transport routier. Face à tous ces enjeux, la protection de l'environnement est devenue une préoccupation majeure pour l'homme, obligeant ainsi les gouvernements et les scientifiques à s'organiser pour envisager un développement durable et des solutions beaucoup plus prometteuses en termes d'énergie propre. Ce qui nécessite une coopération à l'échelle mondiale, qui ne se résume pas aux pays développés seulement. Cependant, un vieux automobile peut polluer jusqu'à dix fois plus qu'un nouveau véhicule. Pour cela, de nouveaux prototypes de véhicules à traction énergétique hybridant plusieurs sources ou tout simplement électrique ont vu le jour dans ce contexte d'activité [1].

L'électrification du secteur industrielle prend forme à partir de la fin du 19^{ème} siècle et avec elle, un nouveau système énergétique se met en place et s'articule autour de la production, du transport et de la distribution de l'électricité. La traction électrique s'est véritablement ancrée dans la vie quotidienne dès la première moitié du 20^{ème} siècle par l'intermédiaire des métros, trains ou tramways. Les transports en commun ne tardent pas à adopter un tel procédé pour leur fonctionnement : le lieu de production de l'énergie électrique est indépendant de celui de son utilisation. Le stockage embarqué de l'électricité prend seulement un rôle secondaire. Au fil des décennies, ce type de transport en commun s'est révélé à la hauteur des attentes et s'est rapidement imposé au sein de la société. Dans le cas de « véhicule sans fil », le problème du stockage de l'électricité constitue l'un des principaux enjeux [2].

Les voitures électriques sont longtemps restées absentes du paysage automobile, vraisemblablement jugées trop peu performantes en comparaison à leurs équivalents thermiques. Les dispositifs de stockage d'électricité, électrochimiques notamment, ont souvent été pointés du doigt, symboles d'une autonomie limitée et condamnée à le rester. Cependant, depuis quelques années, une filière électrique du secteur automobile semble émerger : il n'est plus rare de croiser un modèle 100 % électrique, que l'on peut notamment distinguer par le silence de son moteur. Les bornes de recharges se multiplient [2].

Les constructeurs automobiles ne sont pas en reste de cette évolution et anticipent déjà sur une demande considérable : ils investissent des sommes considérables dans la recherche et le développement de nouveaux prototypes de véhicules à traction énergétique hybride ou électrique. Des véhicules « propres » voient le jour, sans cesse perfectionnés, utilisant deux ou plusieurs sources d'énergie [4].

Cette tendance, soutenue par les innovations technologiques et la mise au point de matériaux, combinant légèreté et sécurité de structure et de nouveaux supports de stockage et de production d'énergie (piles à combustible, condensateurs, batteries, convertisseurs, etc.),

bénéficie d'un système embarqué de gestion de l'énergie électrique qui permet de rationaliser, de manière autonome, les flux d'énergie dans le véhicule en fonction des contraintes et des sollicitations auxquelles il doit s'adapter. Ce système de gestion de l'énergie constitue ainsi l'outil essentiel qui permet d'atteindre les performances attendues du véhicule hybride ou du système multi-source, tout en puisant l'énergie électrique en circuit fermé, c'est-à-dire minimiser les pertes énergétiques dues au fonctionnement du véhicule et optimiser l'apport des principales sources d'énergies disponibles [4].

Ce mémoire nous permettra d'aborder, dans le deuxième chapitre, une des différentes approches de gestion de l'énergie qui est la logique floue, cette approche donne accès à des solutions adéquates en fonction de la disponibilité d'informations sur le profil de mission.

Historique de l'évolution de la voiture électrique :

Dès 1830, Robert Anderson conçoit le premier prototype de véhicule électrique connu à partir d'une calèche. En 1834, l'Américain Thomas Davenport conçoit le tout premier modèle de véhicule électrique, qui est plutôt une locomotive. La commercialisation du premier modèle de voiture électrique était en 1852. Mais à cette époque, puisque la recharge n'existait pas encore, les voitures n'étaient pas munies de batteries rechargeables [5].

L'année 1859 Gaston Planté inventait la batterie rechargeable au plomb acide. Elle sera ensuite améliorée par les travaux de Camille Faure en 1881. Grâce à ces hommes, les voitures électriques prendront leur réel essor, car la voiture électrique deviendra viable alors qu'elle peut être rechargée [6].

En 1881, un premier modèle viable de voiture électrique est mis au point par trois Français dont Camille Faure, électro-chimiste qui travaille à l'amélioration des batteries au plomb, Charles Jeantaud, constructeur automobile et Nicolas Raffard, ingénieur en mécanique. La même année, Gustave présente un autre automobile électrique à l'Exposition internationale d'électricité de Paris. Une concurrence s'installe entre la voiture à explosion (thermique), la voiture à vapeur et la voiture électrique [7].

Le progrès et le potentiel de la voiture électrique se fait remarqué en 1899 alors que la voiture de Camille Jenatzy nommée La « Jamais Contente » bat un record de vitesse en dépassant les 100 km/h. En 1900, les taxis électriques circulent dans les rues de New York. À cette époque, c'est 38% du marché américain de l'automobile qui est électrique. On décrit que les voitures électriques sont faciles à démarrer et qu'elles ne laissent pas un nuage irrespirable de fumée noire derrière elles. Déjà à cette époque, on qualifie que ces voitures sont bien supérieures aux voitures thermiques [8].

Abandon de la voiture électrique dans les années 1900. En 1908, Ford lance son modèle T, symbole de l'essence bon marché, de l'accessibilité et de la puissance du moteur

thermique. C'est un point de rupture dans l'histoire de la voiture électrique puisque les progrès de l'électrique cèderont au profit des innovations de Ford. Dès 1920, c'est donc le début de l'ère de la voiture thermique accessible à tous alors que l'essence est bon marché. Malheureusement, la voiture électrique tombe dans l'oubli pour les 40 prochaines années.

L'année 1966 marque le retour vers le potentiel de l'électrique. Les fluctuations du prix du pétrole ramènent l'intérêt envers les voitures électriques. En plus, La pollution est de plus en plus présente et les impacts environnementaux commencent à se faire sentir. Ainsi, la réduction de la pollution de l'air entre dans les problématiques du Congrès américain qui recommande dès 1966 la construction de voitures écologiques [8].

En 1973, la voiture électrique devient un sujet d'actualité avec le premier choc pétrolier et l'embargo de l'OPEP envers les États-Unis. Plusieurs initiatives partout à travers le monde sont lancées et des prototypes sont développés. Renault produit une version électrique de la R5, mais elle ne sera jamais commercialisée [5].

En 1990, Un point tournant pour la voiture électrique, la Californie vote pour le Zéro Emission Véhicule (ZEV). La loi prévoit que chaque constructeur devra compter 2% de véhicules verts dans ses ventes en 1998 pour être autorisé à commercialiser ses autres voitures. Tous les grands constructeurs se mobilisent alors pour lancer des modèles de voiture écologiques [7].

En 1997, Toyota lance la Prius au Japon. Une première voiture hybride dont 18000 exemplaires seront vendus la première année de commercialisation. De nombreux constructeurs sortiront à leur tour des modèles hybrides : le Ford Ranger pickup EV, la Honda EV Plus, la Chevy S-10 EV, le Toyota RAV4 EV et la Nissan Altra EV. Les projets seront abandonnés puisque la clientèle n'est pas au rendez-vous. En 2003, la Californie retire sa loi du Zéro Emission Véhicule sous la pression des grands constructeurs automobiles [6].

20 Ans plus tard, le début de l'ère de la voiture électrique. En 2008, Nissan présente la Leaf 100% électrique, il s'agit de la première voiture électrique commercialisée dans le monde. La même année, Tesla commercialise le roadster 100% électrique revendiquant 340 km d'autonomie. Les progrès en matière d'autonomie sont impressionnants. Tesla marque l'imaginaire et fait accélérer les processus en offrant des produits toujours plus innovants, technologiques et performants. Depuis 2010, c'est le début de l'ère de la voiture électrique dans laquelle nous sommes aujourd'hui. La course est lancée, les constructeurs automobiles relancent les modèles hybrides, mais cette fois, le marché est au rendez-vous!

La voiture électrique hybride ne se présente plus comme la voiture du futur, c'est maintenant la voiture d'aujourd'hui [6].

Chapitre 1. Généralités sur les véhicules électriques hybrides.

1.1. Introduction :

De nos jours, le secteur des transports dépend quasiment exclusivement des carburants conventionnels d'origine pétrolière. Dans le contexte de la transition vers un système énergétique durable et écologique, l'électrification des véhicules contribue à la fois à la réduction de la dépendance au pétrole et à la diminution des émissions de polluants et de gaz à effet de serre. L'hybridation de la motorisation est largement considérée comme une technique prometteuse et le véhicule hybride électrique fait l'objet d'importants travaux de recherche scientifique et de développement industriel.

Ce chapitre introduit le système du véhicule électrique hybride. Il commence par une présentation introductive des véhicules hybrides, du développement des différentes architectures de la chaîne de traction, choix des sources énergétique pour les véhicules hybrides.

1.2. Types de véhicules :

Les différents types de véhicules électriques et hybrides :

- EV (Electric Vehicle) : véhicules électriques.
- BEV (Battery Electric Vehicle) : véhicules électriques à batterie.
- HEV (Hybrid Electric Vehicle) : véhicules électriques hybrides.
- REEV (Range Extended Electric Vehicle) : Véhicules électriques a porté étendue.
- FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle) : véhicules électriques à pile à combustible.
- PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle) : véhicules électriques hybrides rechargeables.
- SEV (Solar Electric Vehicle) : Véhicules électriques solaires.

1.3. Les points positifs et négatifs des différents véhicules :

	Points positifs	Points négatifs
BEV	<ul style="list-style-type: none"> - Energie électrique propre. - - Zéro émissions. - Energie de freinage récupéré. - Main d'ouvre peu élevé. 	<ul style="list-style-type: none"> - court trajet - Batterie à améliorer. - Peu de borne public.

	-Rechargement de la batterie depuis une borne	
HEV	- Consommation, émissions réduites. - Energie de freinage récupéré.	- Couteux. - Fabrication complexe
FCEV	- Zéro émissions. - Energie de freinage récupéré. - Zéro pétrole. - Grand efficacité énergétique.	- Couteux. - Production et stockage d'hydrogène. - Peu de stations. - Pas assez évoluer
PHEV	- Connecté. - Consommation et émission réduit. - Performance optimisées. - Energie de freinage récupéré. - Zéro émissions.	- Couteux. - Fabrication complexe - Lourd - Composants difficiles à trouver
SEV	- Plein puissance. - Autonome. - Zéro émissions nocives. - Entretien peu cher	- Couteux. - Inferieur a d'autre véhicule. - Dépend du soleil.

Tableau 1.1. : Les points positifs et négatifs des différents véhicules.

1.4. Véhicule électrique :

Un véhicule électrique est une automobile mue par la force électromotrice de moteurs électriques, alimentée par une batterie d'accumulateurs [4].

Une batterie de traction massive et de forte tension reliée à un chargeur est logée dans le châssis spécifique du véhicule électrique, cette batterie emmagasine l'énergie récupérée en vue de sa réutilisation, elle se différencie du véhicule thermique par un temps de recharge plus long que la réalisation d'un plein de carburant, ainsi que par la facilité de transporter et distribuer l'électricité, comparée à celle de distribuer les produits pétrolier. Pour transformer l'énergie en force de propulsion, le chargeur comporte également des composants spécifiques dont un

convertisseur onduleur (convertisseur de puissance). Celui-ci reçoit les paramètres de multiples capteurs, des pédales d'accélérateur et de frein pour commander le moteur, et une batterie nécessaire au bon fonctionnement des circuits de bord du véhicule, elle-même reliée par l'intermédiaire d'un convertisseur DC/DC. Ce convertisseur recharge la batterie au moyen de la batterie (HT) et alimente les dispositifs électriques. Le moteur du véhicule sert de convertisseur de l'énergie électrique en énergie mécanique lors des phases de traction et inversement, d'énergie mécanique en énergie électrique, lors des phases de freinage permettant ainsi la recharge de la batterie [4].

Une deuxième voie de recherche prometteuse axée sur l'utilisation non pas d'une seule source d'énergie mais de deux ou de plusieurs sources sur un même véhicule lui conférant ainsi un atout considérable : effectuer sans discontinuer des distances plus longues [4].

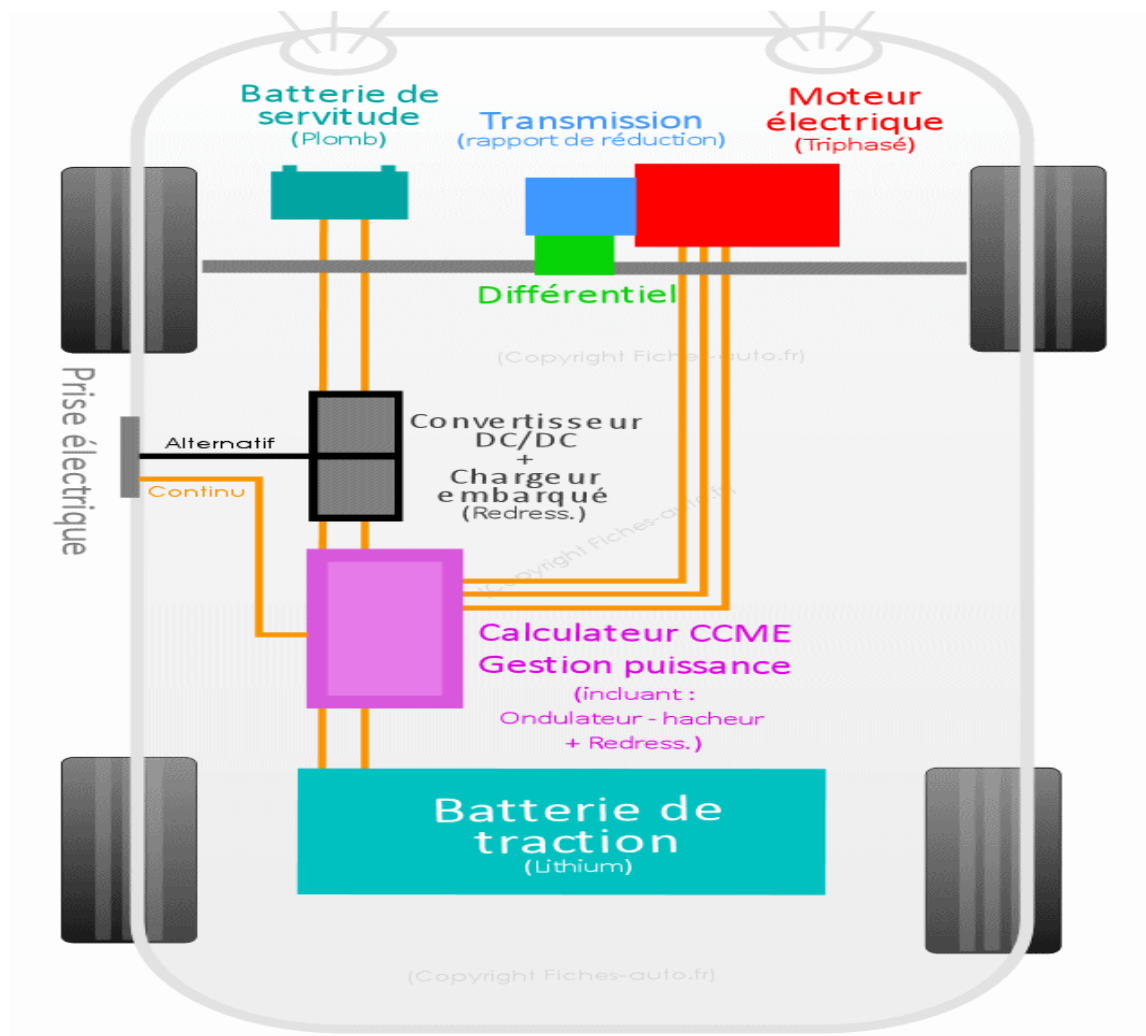


Figure 1.1 : Architecture d'un véhicule électrique.

1.5. Véhicule électrique hybride :

Un véhicule est dit hybride s'il dispose d'au moins deux sources d'énergie dont l'une doit être réversible.

Les hybrides optimise l'efficacité d'un véhicule et réduisent les émissions de CO₂ et donc les émissions de gaz à effet de serre, les hybrides utilisent carburant et électricité, ils ont des moteurs à combustion interne et électrique alimentant les roues et des batteries qui emmagasine et distribue l'énergie.

L'essentiel de la conception d'un véhicule électrique hybride sont les deux types de groupe propulseur travaillent en harmonie en premier un moteur à combustion interne à l'essence ou au diesel ou au biocarburant qui fournit de l'énergie motrice et contribue à la recharge des batteries, deuxièmement un ou plusieurs moteurs électrique, ces moteurs sont situées à des endroits différents dans le véhicule en fonction du fabricant, tous ces moteurs sont reliés aux transmissions et aux roues motrices, la troisième composante est une batterie ou une série de batteries qui emmagasine et distribue l'électricité.

Les batteries des véhicules hybrides ne sont jamais branchées puisque le système de gestion du véhicule répond à leurs besoins de recharge il ne s'approvisionne pas à partir du réseau électrique, Les batteries des véhicules hybrides durent généralement toute la vie du véhicule. Les hybrides gèrent toutes ces technologies par un ordinateur ou un groupe d'ordinateurs, ces ordinateurs décident d'où provient l'énergie et où sera distribuée, des milliers de fois par seconde ils analysent l'état du système de charge et ce qu'on demande aux véhicules.

1.6. Gestion matériel :

1.6.1 Hardware :

Au niveau de hardware l'objectif principal d'un véhicule électrique c'est l'utilisation et la régénération optimale de l'énergie du véhicule et ce quel que soit le nombre de sources d'énergie c'est pourquoi il existe différentes configurations du groupe moteur propulseur pour les **HEV** (véhicule hybride) il existe trois architectures différentes.

1.6.1.1. Véhicules électriques hybrides série :

Le système hybride série représenté dans la figure 1.1 permet au moteur électrique de diriger seul la rotation des roues en utilisant la puissance générée par le moteur thermique. Un hybride série, est composé d'un moteur thermique, d'un moteur électrique, d'une batterie aussi d'un générateur et d'un inverseur. Lors des faibles vitesses, le moteur thermique est utilisé par intermittence pour alimenter soit le moteur électrique, soit pour recharger la batterie. Le tout électrique, est utilisé en ville, sur route le moteur thermique assure la recharge de la batterie ainsi que l'alimentation du moteur électrique. Le nom série vient du fait que le moteur thermique et le moteur électrique sont directement liés en série [9].

Hybride série

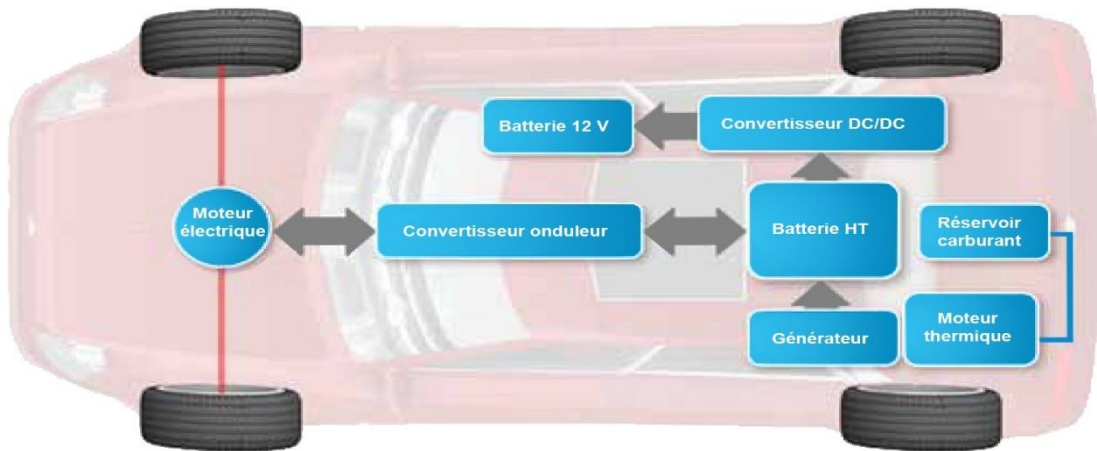


Figure 1.2 : Architecture d'un véhicule hybride série.

1.6.1.2. Véhicules électriques hybrides à moteurs en parallèle :

Ici, les moteurs électrique et thermique assurent tous les deux la rotation des roues, par contre, c'est le moteur électrique qui recharge la batterie. Un hybride parallèle se compose d'un moteur thermique, un moteur électrique, une batterie, un inverseur, et d'une transmission. Le moteur électrique, est alimenté cette fois par la batterie et non par le moteur thermique, il fonctionne également en tant que générateur pour recharger la batterie. L'inconvénient est qu'il ne peut produire de l'électricité durant la conduite. Encore une fois le moteur électrique fonctionne lors des conduites en ville et le moteur thermique lors des plus fortes demandes en puissance soit sur la route. Le nom parallèle vient du fait que le courant est parallèle [10].

Hybride parallèle

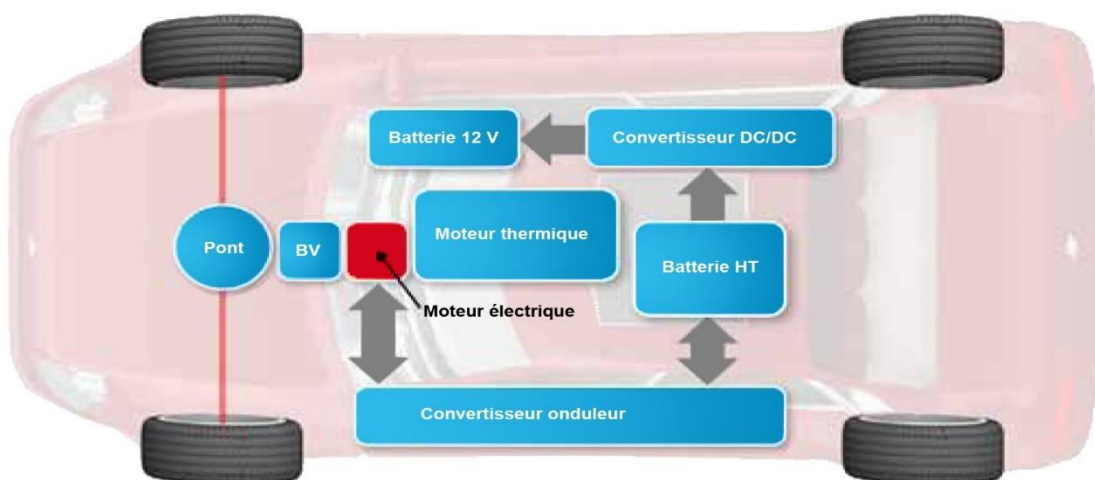


Figure 1.3 : Architecture d'un véhicule hybride parallèle.

1.6.1.3. Véhicules électriques hybrides compound ou dual :

Le système série/parallèle est la combinaison du moteur électrique et thermique permettant la rotation des roues en rendant de l'électricité à la recharge de la batterie par l'intermédiaire du générateur. Ce système a l'avantage de pouvoir sélectionner les moteurs soit électrique soit thermique ainsi qu'une recharge permanente des batteries. Il est composé d'un moteur électrique, d'un moteur thermique, un générateur, un répartiteur d'énergie, d'un module de commande l'alimentation (inverseur/convertisseur). Le répartiteur, permet de faire fonctionner le moteur électrique ainsi que de produire de l'électricité pour recharger les batteries, ceci tout en essayant d'obtenir le meilleur rendement possible en fonction des conduites (ville, route...) [11].

Hybride série parallèle

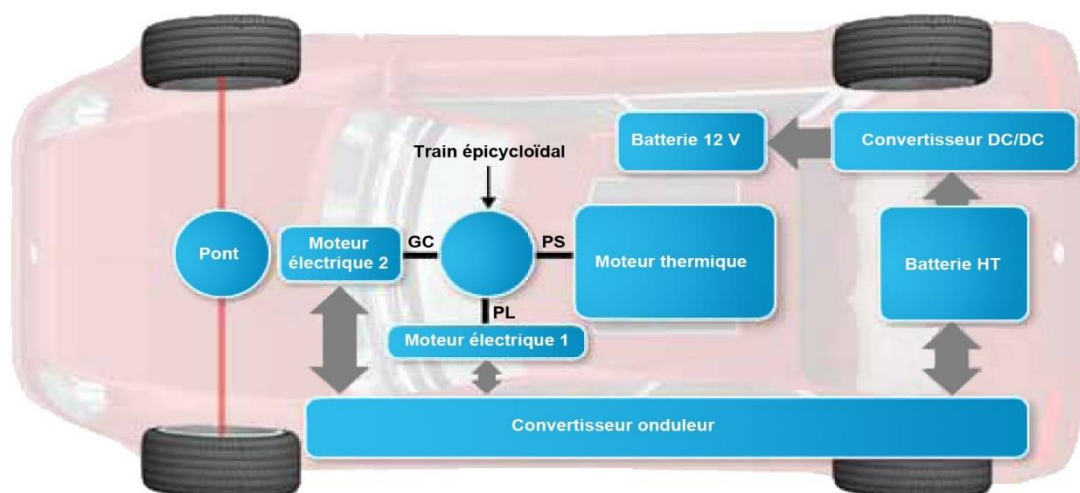


Figure 1.4 : Architecture d'un véhicule hybride série/ parallèle.

1.7. Classification des véhicules hybrides :

On classe les véhicules hybrides en fonction de l'importance de la partie électrique et de la façon dont elle est combinée avec le moteur thermique.

- **Le degré d'hybridation** : C'est le rapport entre la puissance de la machine électrique et la puissance du moteur thermique [12].
- **Le taux d'hybridation** : On appelle le taux d'hybridation la part de puissance que peut fournir la seconde source d'énergie par rapport à la puissance totale disponible à bord du véhicule [12].

Remarque : Puissance totale = puissance électrique + puissance thermique

Pour un véhicule hybride thermique/électrique, le taux d'hybridation est égal au rapport de la puissance électrique sur la puissance totale exprimé en pourcentage :

$$TH = \frac{\text{puissance électrique}}{\text{puissance totale}} \times 100$$

A partir de cela plusieurs nomenclatures peuvent exister :

1.7.1. L'hybridation légère :

Niveau d'hybridation minimal dans lequel, sauf à l'arrêt, le moteur thermique tourne en permanence. Dans ce cas on aura le Micro hybride ainsi que le Mild hybride [13].

- **Micro hybride** : La caractéristique principale du micro hybride est que l'alternateur et le démarreur du véhicule forment un seul moteur électrique appelé l'alternateur-démarrateur, qui est capable d'assurer deux fonctions, à savoir le démarrage du moteur à combustion interne et la charge de la batterie. Cette configuration active également la fonction « Stop&Go » qui représente le premier niveau d'hybridation. Ainsi, dès que la vitesse passe au-dessus de 6 km/h, c'est-à-dire à l'approche d'un feu rouge ou dans un embouteillage, le véhicule qui en est équipé passe en mode veille. Au démarrage, le moteur redémarre automatiquement dès que le conducteur relâche la pédale de frein [13].
- **Mild hybride** : La principale différence entre le micro hybride et le mild est l'alternateur-démarrateur est le remplacement d'un alternateur-démarrateur par un moteur électrique capable d'accomplir de nouvelles tâches et donc de puissance plus grande, ainsi la batterie étant aussi de taille plus grande, le moteur électrique assiste le moteur thermique dans la traction, mais le véhicule est rarement entraîné tout seul. Aussi l'hybride mild a la possibilité de récupérer l'énergie cinétique du véhicule lors du freinage. Une configuration permet un gain de consommation entre 20 % et 25 % par rapport à une voiture classique de même catégorie, cette configuration est que le moteur électrique est d'habitude branché sur le même arbre que le moteur thermique et la boîte de vitesse [12].

1.7.2. L'hybridation classique :

- **Full Hybride** : Par rapport à la configuration mild le moteur électrique augmente en importance, la batterie devient aussi plus grande et permet grâce au moteur électrique d'entraîner le véhicule en fonctionnement tout électrique (zéro émission). Le moteur thermique pouvant être diminué de taille. Ce mode de fonctionnement peut être sous le contrôle de la gestion électronique du véhicule ou sous le contrôle direct du conducteur. Le full Hybrid est équipé d'un moteur thermique et d'un moteur électrique d'une puissance relativement équivalente. Dans le premier cas, le fonctionnement tout électrique couvre des distances courtes aux vitesses faibles, laissant la priorité aux biocarburants sur route où quand la circulation est fluide. Donc le deuxième cas, en général compatibles avec l'usage urbain, le conducteur peut choisir un mode tout

électrique pour des distances plus longues (20 Km ou plus). La variété des modes de fonctionnement d'un véhicule full hybride procure une importante flexibilité dans la gestion énergétique. Le contrôle de tel système est complexe, mais l'amélioration du rendement global entraîne une diminution de consommation de 40 % à 45 % [14].

1.7.3. L'hybride rechargeable :

- **Plug-In Hybrid :** Le plug-In Hybride est un véhicule full hybride qui a la fonctionnalité d'être rechargé à travers une prise électrique [13].

1.8. Véhicule électrique Hybride à « pile à combustible » :

Le remplacement du générateur électrique à base de moteur thermique par une pile à combustible, permet d'avoir un poids plus réduit et surtout un rendement global meilleur, tout en gardant les performances du véhicule en termes d'autonomie et flexibilité [15].

Une pile à combustible permet la production de l'électricité et de l'eau grâce à la combinaison de l'hydrogène et de l'oxygène dans cette pile à combustible, l'oxygène présent dans l'atmosphère pénètre dans la calandre avant du véhicule et l'hydrogène est fourni par les réservoirs à hydrogène du véhicule ces gaz sont ensuite dirigés vers la pile à combustible, où des réactions chimiques se produisent dans chacune des nombreuses cellules. L'électricité est produite lorsque l'hydrogène est acheminé vers une anode négative ce qui libère l'électron, qui circule alors vers la cathode positive, produisant de l'électricité après s'être libéré de son électron, l'hydrogène devient un ion hydrogène il se déplace vers la cathode positive et se lie à l'oxygène de l'air pour former une molécule d'eau [15].

Lors de la conduite sous très faible charge, l'électricité est fournie à l'unité de contrôle de puissance par la batterie haute tension, puis elle est transmise au moteur électrique pour propulser le véhicule. La conduite sous faible charge permet à la pile à combustible de transmettre l'électricité directement à l'unité de contrôle de puissance, puis au moteur électrique afin de propulser le véhicule l'unité de contrôle de puissance dirige aussi de l'électricité vers la batterie haute tension, dans laquelle est stockée pour une utilisation ultérieure. La batterie haute tension peut aussi stocker l'énergie récupérée pendant la décélération et par le freinage à récupération.

En conduite sous forte charge, la batterie haute tension et la pile à combustible fournissent toutes deux de l'électricité à l'unité de contrôle de puissance et au moteur électrique pour permettre une forte accélération [15].

Cette pile à combustible novatrice jumelée à la technologie hybride procure une mobilité plus propre et plus durable, facile à adopter par les nouveaux propriétaires [15].

1.9. Choix des sources d'énergie pour le véhicule hybride :

Actuellement, de nombreuses sources d'énergie ont vu le jour grâce à l'attention des nouvelles technologies visant à concevoir des sources d'énergie chimiques décarbonées (piles à combustible, batteries, super-condensateurs) comme éléments de production ou de stockage sans décharge. Cependant, le choix sur l'hybridation de ces sources dépend des objectifs attendus du véhicule. La condition de la source utilisée pour le stockage est qu'elle doit pouvoir profiter au maximum de l'énergie de freinage. Par conséquent, les sources doivent garantir une densité

d'énergie élevée et être capable de répondre à des demandes de puissance élevées, pour cela, elles doivent garantir une densité de puissance suffisante pour répondre à la puissance requise lors de l'accélération pour participer à l'échange d'énergie, qu'elle que soit les Phase du système (demande de puissance faible, élevée, positive ou négative). [16]

Le diagramme de Ragone qui peut être embarqué dans un véhicule hybride est un graphique qui permet de comparer les différentes techniques de stockage, plus précisément les performances des techniques de stockage.

rag

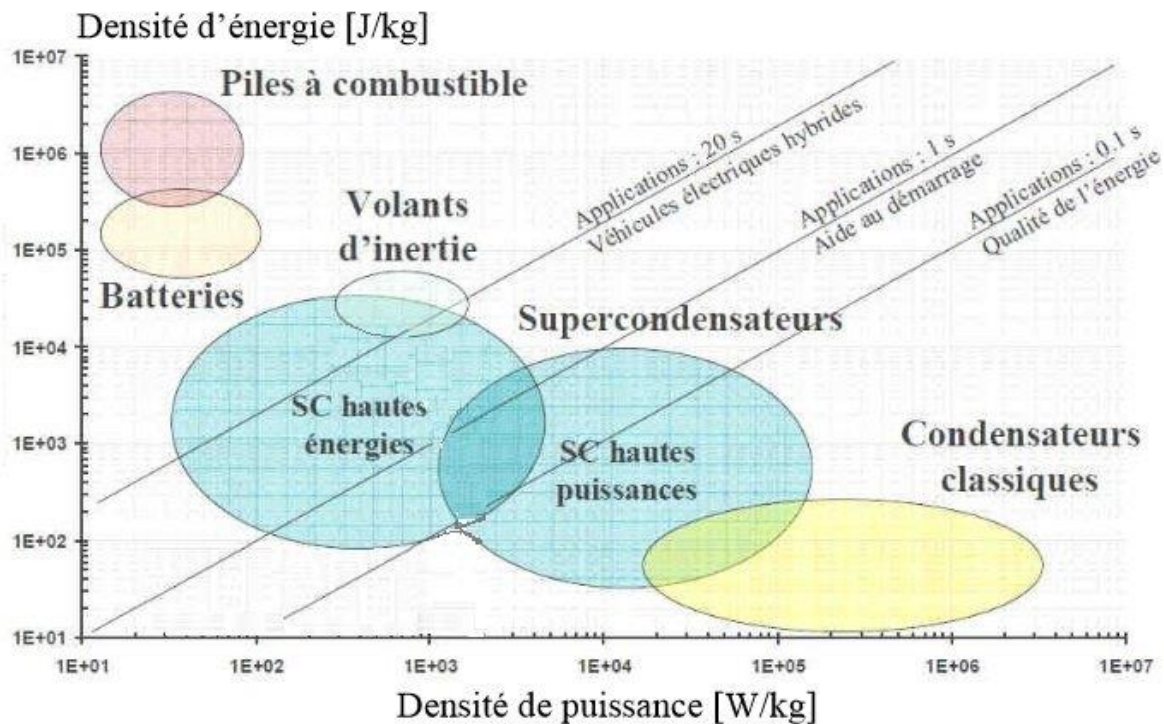


Figure 1.5 : Diagramme de Ragone.

D'après le diagramme de Ragone on remarque qu'en vue de la densité énergétique la pile à combustible présente une particularité intéressante. Cependant, les super-condensateurs sont marqués par leur densité en puissance et ils sont bien meilleurs par rapport à leurs homologues condensateurs classiques en termes de densité énergétique.

1.10. Pile à combustible :

Une pile à combustible, ou PAC, est un générateur énergétique. Appliqué au domaine de la mobilité, elle permet de transformer l'hydrogène en électricité pour animer une voiture, un bus ou un camion, qui présente un moyen d'avenir dont plusieurs industries ont investi des fonds considérables pour la construction et le développement de cette technologie, qui est l'une des sources d'énergie récemment utilisées dans le domaine du transport actuel.

Le principe de la pile à combustible a été découvert en 1839 par Christian Schönbein, un chercheur d'origine allemande. Quelques années plus tard, Sir William Grove lui donna vie en tant que prototype. A la fin du 19^{ème} siècle, les générateurs prennent leur forme actuelle, et

ce n'est que dans les années 1930 que Francis Thomas Bacon reprend les travaux sur les piles à combustible. L'ingénieur britannique a développé le premier prototype de 1 kW en 1953, puis le deuxième prototype de 5 kW en 1959. Son invention a ensuite servi de modèle pour la conception des piles à combustible utilisées dans les missions spatiales Apollo de 1961 à 1972 [4].

Trop chère, la technologie a été réservée pendant des années à un marché de niche. Ce n'est que dans les années 1990, lorsque diverses préoccupations écologiques ont émergé, que les industriels se sont enfin intéressés aux piles à combustible [4].

1.10.1. Principe de fonctionnement de la pile à combustible :

Le fonctionnement des piles à combustible découle d'une réaction appelée oxydoréduction. Le cœur d'une pile comprend trois éléments : deux électrodes (une anode oxydante qui émet des électrons et une cathode réductrice qui collecte des électrons) et un électrolyte qui les sépare. L'électrolyte central a la capacité de transporter les molécules porteuses d'ions d'une électrode à l'autre et de les bloquer afin qu'elles puissent traverser le circuit externe de la pile à combustible afin que leur force électromotrice puisse être exploitée. Le réservoir fournit également du combustible pour les deux électrodes. Dans le cas d'une pile à hydrogène, l'anode recevra de l'hydrogène et la cathode recevra de l'oxygène. L'anode oxyde le combustible libérant ainsi des électrons que l'électrolyte forcera à traverser un circuit externe. Cela produit du courant continu. Ce processus est appelé « oxydation » [17].

De son côté, l'oxygène présent dans la cathode va réagir au contact des électrons libérés par les réactions décrites précédemment. C'est la "réduction" qui produit de la chaleur et de l'eau [17].

Pour catalyser correctement ce processus, le platine est généralement déposé en couches minces sur chaque électrode (en plus grande quantité sur la cathode). Cependant, ce métal est rare et cher, ce qui nuit à la compétitivité des piles à combustible. Pour répondre à cette problématique, plusieurs études ont été menées sur des nanomatériaux bénéfiques pour la catalyse [17].

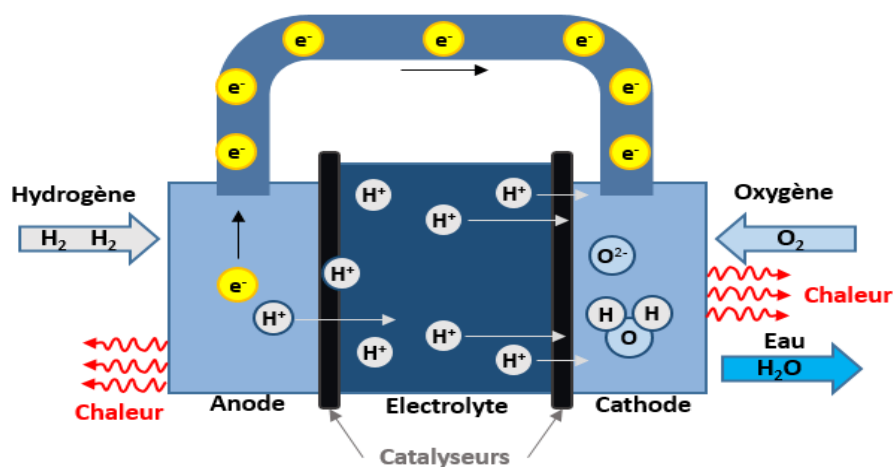


Figure 1.6 : Pile à combustible.

1.11. Super-Condensateur :

Diagramme de Ragone peut justifier l'utilisation de super-condensateurs comme éléments de stockage en raison de leur densité de puissance très élevée par rapport aux batteries. La durée de vie de la batterie est également faible, ce qui, en plus du coût élevé, affecte leur utilisation dans les transports. Cela a donné naissance aux super-condensateurs, qui ont une durée de vie de plus d'un million de cycles mais une densité d'énergie plus faible par rapport à ces derniers. Pour cela, il doit être hybridé avec d'autres sources d'énergie, telles que les batteries, les piles à combustible, Panneaux photovoltaïques ou éoliennes, etc... [13].

Contrairement aux batteries, qui fonctionnent différemment, les super-condensateurs stockent l'énergie directement sous la forme d'un champ électrostatique. L'électricité peut être fournie ou stockée plus rapidement que les batteries, une caractéristique importante pour l'accélération du véhicule et la récupération de l'énergie de freinage. L'utilisation de batteries pour développer des véhicules électriques est essentielle [16].

L'énergie électrique est fournie ou emmagasinée plus rapidement en l'absence du processus électrochimique. Le super-condensateur peut se recharger 10.000 fois plus vite qu'une batterie et générer une puissance extrêmement élevée en un temps très court. Son état de charge et sa tension chutent très rapidement en fonction des puissances élevées fournies [16].

Le fonctionnement d'un super condensateur est similaire à celui d'un condensateur. Néanmoins, sa structure est basée sur le concept d'une double couche électrochimique sur laquelle repose le stockage d'énergie, développé par Helmholtz au cours du XIXème siècle. Elle est constituée de deux électrodes, généralement en charbon actif qui est un matériau composé de multiples pores afin que les ions puissent s'y accrocher. Les deux électrodes sont séparées par une membrane isolante pour assurer la conduction ionique. Un champ électrique permet aux ions de s'accrocher ou de se libérer des électrodes sans aucune réaction chimique, et la double couche électrochimique se développe sur chaque interface électrode-électrolyte, formant une structure semblable à deux condensateurs en série [16].

1.12. Choix du véhicule électrique hybride :

Dans ce travail, la configuration hybride du véhicule est constituée d'une pile à combustible et d'un super-condensateur, pour l'assister dans des fortes accélérations et absorber l'énergie du freinage, et d'un moteur électrique pour la traction comme montre la figure 1.6

D'une part, cette structure est l'œuvre de nombreux travaux actuels vu que les recherches essaient de fuir les technologies à base des énergies fossiles et de se focaliser sur les alternatives qui ont une autonomie assez considérable avec zéro émission de polluants.

D'autre part la gestion d'énergie ne dépend que de l'état de charge de la source secondaire et de la puissance demandée par la machine de traction. Donc la structure choisie n'influe pas vraiment sur le choix de la gestion d'énergie à développer.

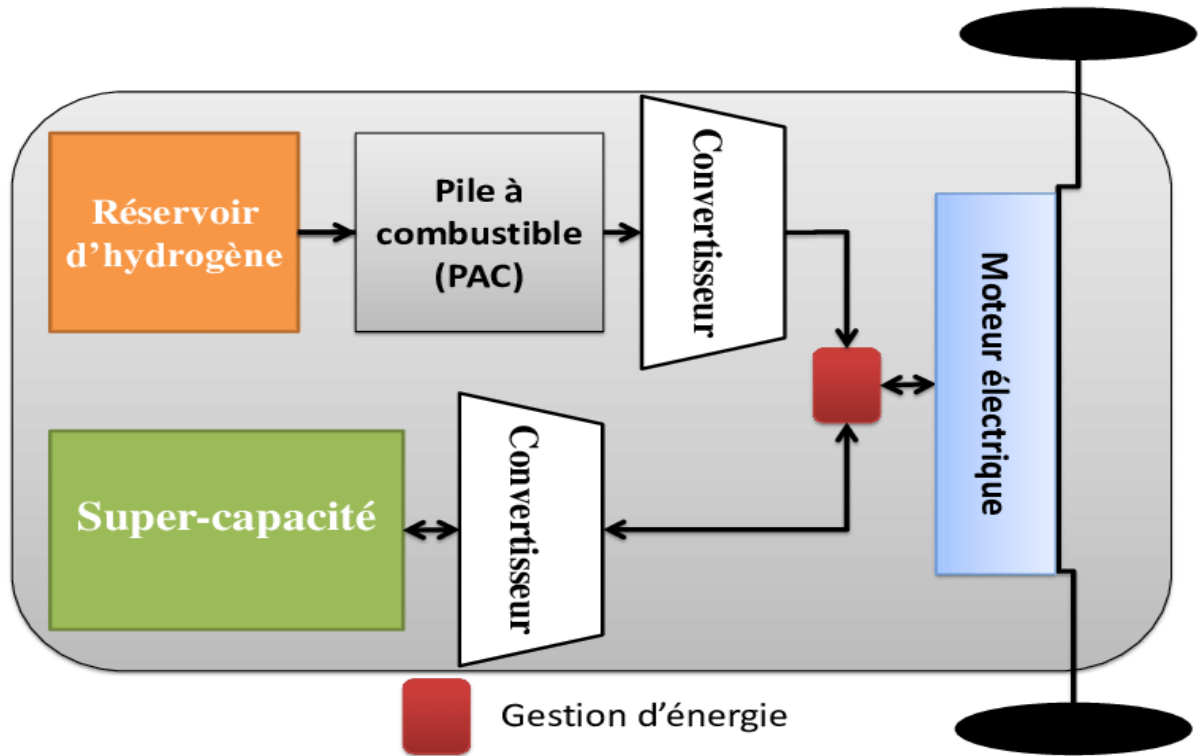


Figure 1.7 : structure du véhicule choisi dans ce travail : PAC, Super-condensateur.

1.13. Conclusion :

Les efforts de l'industrie automobile ont donné naissance à des véhicules hybrides, qui diffèrent par le type d'architecture envisagée et les différentes sources d'énergie incluses. Chaque architecture présente des avantages et des inconvénients.

Le choix d'un véhicule électrique hybride à pile à combustible est justifié car ce dernier ne présente aucun danger pour l'environnement, mais nécessite une source d'alimentation auxiliaire pour répondre aux besoins de fonctionnement du véhicule, et le choix a été fait pour le super-condensateur en se reposant sur le diagramme de Ragone et sa durée de vie élevée.

Chaque source d'énergie a ses limites et obstacles opérationnels, souvent dus à la complexité de la gestion à mettre en œuvre et au coût de maintenance des véhicules. Dans le chapitre suivant traite les gestions d'énergies du véhicule électrique hybride selon la consommation de l'hydrogène de la PAC.

Chapitre 2. Gestion d'énergie dans les véhicules électriques hybrides.

2.1. Introduction :

Ce chapitre présente une des stratégies permettant de résoudre le problème de gestion énergétique de la chaîne de traction d'un véhicule électrique hybride, cela consiste à trouver la meilleure harmonie entre les sources d'énergie pour fournir la puissance demandée pour la machine de traction afin de mouvoir ce véhicule dans de meilleures performances. A savoir que la gestion permet de calculer la référence de la puissance à générer par la pile à combustible pour satisfaire la demande de puissance en respectant les contraintes sur les sources d'énergies. L'objectif étant de minimiser autant que possible la consommation d'hydrogène, plusieurs stratégies peuvent être développées.

Dans notre cas, l'ajout de deux sources auxiliaires peut réduire considérablement les sollicitations en courants sur la PAC et ainsi améliorer les performances globales du véhicule. De plus la présence de ces deux sources d'énergie secondaire permet d'envisager des fonctionnalités supplémentaires, notamment du fait de la réversibilité et du gain énergétique. Tout l'énergie de freinage peut alors être récupérée [18].

Cette distribution doit répondre aux besoins électriques du moteur électrique et respecter les contraintes électriques et énergétiques du système de stockage. De tels systèmes hybrides nécessitent des stratégies de gestion d'énergie adaptée à fin d'utiliser au mieux le potentiel des divers ressources et d'utiliser efficacement l'énergie embarquée [18].

A présent, les stratégies de gestion pour les véhicules hybrides sont seulement évaluées par rapport au critère sur la consommation d'hydrogène. Cependant, si on intègre d'autres critères de comparaison un travail considérable s'impose pour évaluer les différentes stratégies excepté le critère sur la consommation. Tandis, deux catégories de stratégies coexistent : celles dites à base de règles et d'autres basées sur l'optimisation, de ces catégories dérive deux sortes de stratégies, les stratégies en ligne et les stratégies hors ligne.

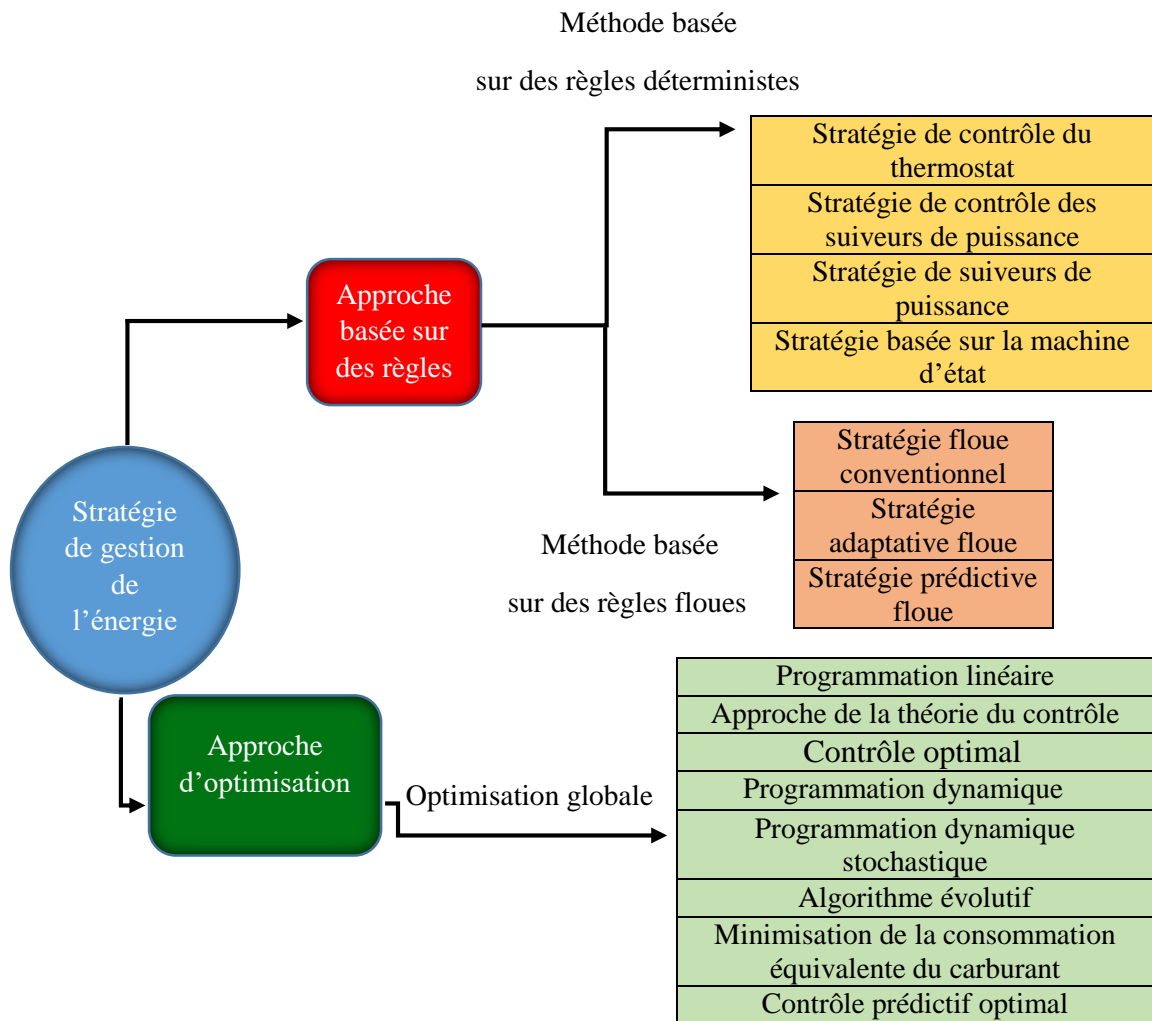


Figure 2.1 : Classification des systèmes de gestion de l'énergie.

Chaque stratégie diffère dans le principe utilisé pour trouver la puissance de référence à appliquer à la pile combustible, dans tout qui suit on utilisera la stratégie de gestion qui est basée sur la logique floue l'objectif est de fournir la puissance P_{fcs} pour un état de charge SOC et une puissance demandée P_{dem} comme monté sur la figure 2.2.

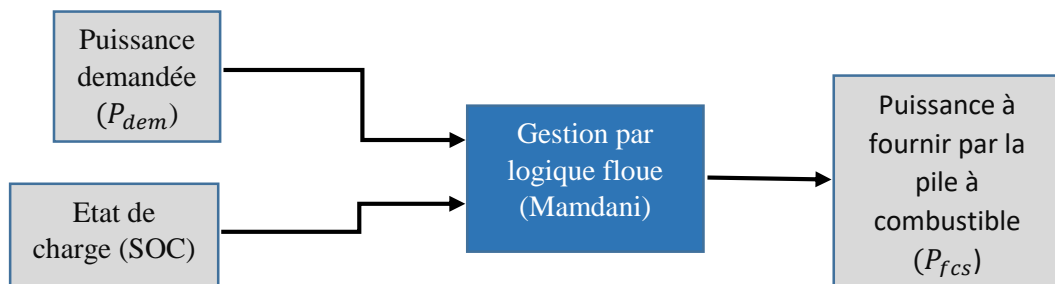


Figure 2.2 : Contrôle par logique floue.

2.2. Modèle mécanique du véhicule :

Établir le modèle mécanique permet de calculer la puissance nécessaire pour propulser le véhicule en fonction de ses caractéristiques, dont ses deux caractéristiques principales sont sa masse et le volume qu'il occupe dans l'espace. Le volume du véhicule implique un effort à fournir pour écarter l'air de la route lors d'un déplacement. Sa masse quant à elle, donc le poids, implique qu'une force est nécessaire pour accélérer le véhicule et vaincre les forces de résistance à l'avancement. Les différentes forces qui agissent sur le véhicule peuvent donc être identifiées à partir de la Figure 2.3.

Afin de dimensionner les sources d'énergie du véhicule, il est important d'estimer la puissance demandée par le véhicule et la démarche qui permet de calculer la puissance nécessaire à l'avancement du véhicule, est d'appliquer le principe fondamental de la dynamique :

$$M_v \frac{d\vec{v}}{dt} = \sum \vec{F}_{ext} \quad [12] \quad (2-1)$$

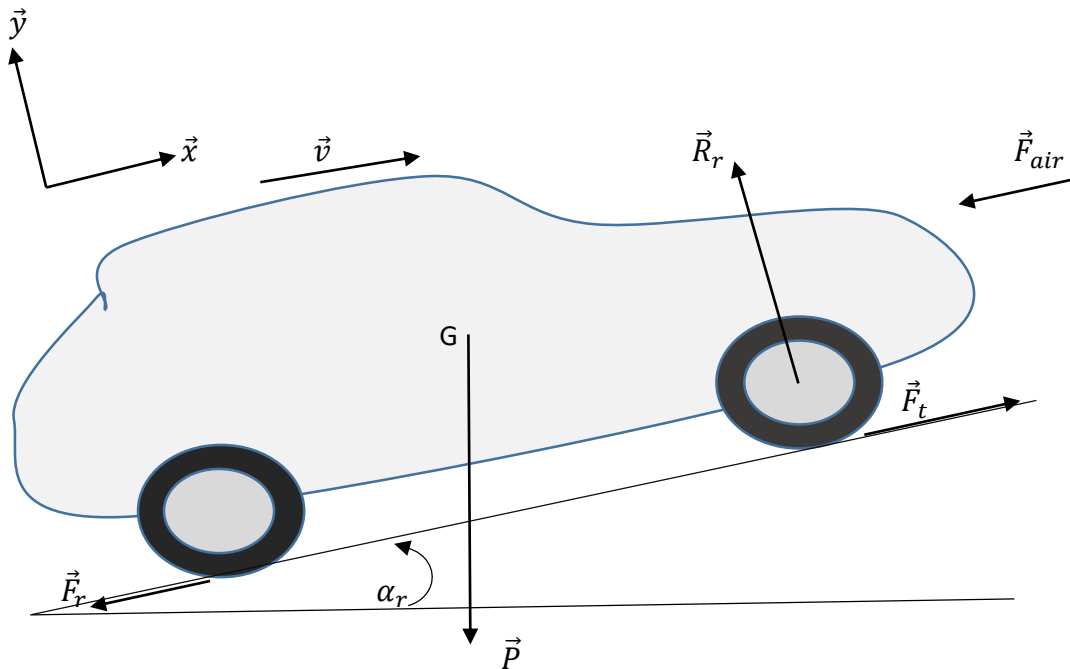


Figure 2.3 Bilan de forces sur le véhicule.

$$M_v \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_{air} + \vec{F}_p + \vec{F}_t + \vec{R}_r + \vec{F}_r \quad [12] \quad (2-2)$$

Seule la résultante de l'effort généré par les pneumatiques est prise en compte, les mouvements latéraux et les mouvements de suspensions ne sont pas considérés, le modèle du véhicule est longitudinale. Dans ce cas, la force équivalente à la résistance de l'air \vec{F}_{air} sur le véhicule est donnée par l'équation.

$$\vec{F}_{air} = -\frac{1}{2} \rho_{air} v_{res}^2 S C_x \vec{x} \quad [12] \quad (2-3)$$

ρ_{air} : Densité de l'air (kg/m³).

v_{res} : vitesse relative du véhicule, $v_{res} = v + v_w$ (m/s) avec v la vitesse du véhicule et v_w la vitesse du vent de face (négative en cas de vent arrière).

C_x : Coefficient de frottement aérodynamique.

$A = S$: Surface frontale du véhicule (m²).

La résistance des roues sur le sol \vec{F}_r est donnée par la formule :

$$\vec{F}_r = -P C_{rl} \cos \alpha_r \vec{x} \quad [12] \quad (2-4)$$

P : Poids du véhicule, $P = mg$ (kg) avec m masse du véhicule (kg) et g accélération gravitationnelle (m/s²)

C_{rl} : Coefficient de résistance des roues au roulement.

α : Angle d'inclinaison (degré).

La force d'inclinaison \vec{F}_h est donnée par la formule :

$$\vec{F}_h = P \sin \alpha_r \quad [12] \quad (2-5)$$

D'après la figure 2.3, on peut constater que la composante de la force de traction \vec{F}_t suivant l'axe des ordonnées est nulle, on pose dans ce cas les équations que sur l'axe des abscisses

$$M_v \frac{dv}{dt} = \left(-\frac{1}{2} \rho_{air} v^2 A C_x - M_v g \sin \alpha_r - M_v g C_{rl} \cos \alpha_r + F_t \right) \vec{x} \quad [12] \quad (2-6)$$

L'expression de la force de traction F_t mécanique est :

$$F_t = M_v \frac{dv}{dt} + \frac{1}{2} \rho_{air} v^2 A C_x - M_v g \sin \alpha_r - M_v g C_{rl} \cos \alpha_r \quad [12] \quad (2-7)$$

Pour l'avancement du véhicule la puissance mécanique P_m est nécessaire qui est égale au produit de la force de traction et de la vitesse.

$$P_m = F_t v \quad [12] \quad (2-8)$$

Selon l'expression de la puissance de traction du véhicule et de (2-7), l'expression de la puissance de traction en fonction de la vitesse et de l'accélération $\frac{dv}{dt}$ devient :

$$P_m = v \left(M_v \frac{dv}{dt} + \frac{1}{2} \rho_{air} v^2 A C_x - M_v g \sin \alpha_r - M_v g C_{rl} \cos \alpha_r \right) \quad [12] \quad (2-9)$$

2.3. Dimensionnement des sources énergétiques :

Dans un système hybride électrique, le constructeur du système doit s'assurer que les sources énergétiques couvriront l'ensemble des consommations électriques demandées par la charge. Le dimensionnement est une phase nécessaire pour tout système autonome afin d'identifier la puissance et la capacité nécessaires pour les différentes sources et autres dispositifs de conversion d'énergie et pour mieux répondre aux exigences du système.

Le dimensionnement des sources d'énergie se fait en plein régime (vitesse maximale, poids maximal) du véhicule. La source principale qui est la PAC doit fournir toute la puissance nécessaire pour alimenter la machine de traction. D'après l'expression de la puissance de

traction en fonction de la vitesse et de l'accélération (2-9), pour un poids maximal du véhicule de 1600 kg et d'une vitesse maximale de 150 km/h, la puissance maximale est estimée au environ de 38.5 kW ajoutant à cela 20 % de puissance qui estime la consommation des auxiliaires ainsi que les éléments du bord du véhicule, ce qui implique que la puissance maximale de la PAC choisie est $P_{fcs} = 46.2 \text{ kW} \approx 50 \text{ kW}$.

2.4. Les différentes stratégies de gestions d'énergies dans un véhicule électrique hybride :

Deux approches différentes sont conçues pour la gestion d'énergie dans un véhicule électrique hybride, une approche basée sur des règles et une autre d'optimisation.

2.4.1. Approche d'optimisation :

Elle se base sur la méthode d'optimisation globale.

2.4.1.1. Minimisation de la consommation équivalente du carburant (ECMS) :

ECMS (Equivalent Consumption Minimization Strategy) est basée sur une formulation d'une optimisation globale et locale en minimisant la consommation équivalente du carburant [24]. Elle considère la batterie comme étant un réservoir de combustible auxiliaire, ce qui lui permet de choisir à chaque instant la commande qui minimise l'énergie totale prélevée aux deux réservoirs (la source principale et la batterie) par l'introduction des facteurs d'équivalence permettant de ramener les différentes consommations dans le même espace énergétique.

La consommation future d'hydrogène est affecté par l'utilisation de la batterie à chaque instant. En tenant compte de tous les rendements de la chaîne de traction, il est possible de calculer un coût d'hydrogène équivalent associé à la sollicitation de la batterie.

L'objectif de l'ECMS est de déterminer à chaque instant la stratégie de commande qui minimise la consommation équivalente totale : la consommation d'hydrogène et la variation de l'état de charge de la batterie.

2.4.2. Approche basé sur des règles :

Il existe deux méthode celle basé sur les règles déterministes et celle basé sur les règles floues.

2.4.2.1. Stratégie de contrôle du thermostat :

Stratégie de contrôle du thermostat est une méthode basé sur les règles déterministes appelé aussi stratégie ON/OFF permet également de gérer l'énergie dans un véhicule hybride [23].

La méthode Thermostat est connue par son efficacité et sa robustesse ainsi de faible complexité, il peut donc être implémenté très facilement dans un calculateur embaquées d'un véhicule électrique hybride étant donné que son principe de fonctionnement ne dépend pas du type des sources utilisées. Son principe de fonctionnement Permet à la source primaire (pile à combustible) de fonctionner la plupart du temps à son point de rendement maximum afin de minimiser les pertes énergétiques et par conséquent la consommation d'hydrogène, tout en maintenant la capacité des éléments de stockage entre ces bornes SoC^{min} et SoC^{max} [23].

Selon le principe de conversion de l'énergie cinétique en énergie électrique, la source de stockage récupère l'énergie électrique d'origine cinétique, par le moteur, en respectant les contraintes de limitation, alors que le surplus d'énergie est dissipé sous forme de chaleur dans une résistance [4].

La source principale est activée en fournissant de la puissance en utilisant son point de rendement si l'état de charge de l'élément de stockage est inférieur à un seuil de déclenchement « consigne » SoC^{dec} défini par le constructeur avec $SoC^{min} \leq SoC^{dec} \leq SoC^{max}$, dans les phases de traction [4].

Le surplus d'énergie est stocké dans la source de stockage réversible dans la mesure de sa dimension si la puissance fournie est supérieure à la demande du moteur, sinon la source principale assure la totalité de la demande en utilisant un autre point de rendement. Dès que l'état de charge dépasse le seuil de déclenchement, celle-ci est désactivée laissant ainsi la source de stockage assurer la traction du véhicule [4].

Cet algorithme peut être amélioré hors ligne par des profils de mission de référence afin d'ajuster le seuil de déclenchement [23].

2.4.2.2 Gestion d'énergie d'un véhicule électrique hybride à l'aide de la logique floue :

La logique floue est une approche basée sur des règles, qui est une extension de la logique booléenne issue du domaine de l'intelligence artificielle. Elle est introduite par Zadeh (1965) en se basant sur sa théorie mathématique des ensembles flous, qui est une généralisation de la théorie des ensembles classique [19].

Son application aux problèmes de gestion de l'énergie est devenue courante car elle est indépendante de la nature et de la complexité du problème. Plusieurs travaux ont été réalisés en utilisant la logique floue comme stratégie de contrôle pour gérer la distribution d'énergie d'un système multi-sources en temps réel, car elle peut fournir une bonne référence de courant pour le convertisseur afin d'optimiser la consommation de combustible par la source principale [20].

Le but de cette approche est de répondre à la demande instantanée du moteur électrique sans connaître la demande future, en augmentant l'autonomie du véhicule en minimisant la consommation d'hydrogène de la source principale, tout en respectant les contraintes d'encombrement et de fonctionnement [4].

La base théorique de la logique floue est établie en étant capable de traiter des variables incertaines avec des valeurs continues comprises entre 0 et 1 selon leurs degrés d'appartenance dans la vérification d'une condition, contrairement à la logique de Boole où les variables ne peuvent prendre que des valeurs discrètes 0 et 1.

Soit par exemple, $(P) = \{v/v \geq 90\text{km/h}\}$ la propriété traduisant que le véhicule roule à une vitesse élevée. Dans la logique de Boole, la propriété (P) est vraie lorsque la vitesse est supérieure à 90km/h $P(90 \leq v \leq 130\text{km/h}) = 1$ et elle est fausse lorsque celle-ci est inférieure à 90km/h $P(v < 90\text{km/h}) = 0$, donc $P(v = 89\text{km/h}) = 0$ est considérée comme faible alors qu'en

réalité une vitesse de 89km/h est quand même élevée. En utilisant la logique floue, on peut modéliser d'une manière plus fine les situations réelles

Donc, $P(90 \leq v \leq 130\text{km/h}) = 1$ et $P(50 \leq v \leq 90\text{km/h})$ peut être considérée comme vraie avec un certain degré de réalisation $\alpha \in [0, 1]$; ainsi, la propriété $P(v = 89\text{km/h})$ est mieux interprétée et elle est vraie à 95%. On définit ainsi une étape de « Fuzzification » pour passer des variables physiques à des variables normalisées floues (variables linguistiques).

La logique floue permet de résoudre des problèmes complexes sans recourir à la modélisation mathématique du problème c'est pour cela qu'on a choisis d'opter pour cette méthode dans ce mémoire afin de réaliser la gestion d'énergie du véhicule électrique hybride.

D'autre part, afin d'obtenir des solutions fiables et précises, une expertise et une connaissance du système sont nécessaires. En effet, nous pouvons déjà noter le choix à faire sur le domaine de variation de cette fonction. Il y a trois étapes importantes : la fuzzification, le traitement de l'inférence et la défuzzification.

2.4.2.2.1. La fuzzification :

La fuzzification est la première étape du traitement flou. Elle consiste à définir les variables linguistiques et ses fonctions d'appartenance des systèmes flous La forme d'un triangle, d'un trapèze ou d'une fonction gaussienne. Dans notre cas, définissez Les fonctions d'appartenance suivent un type trapézoïdal qui permet des calculs et des transitions Plus souple, contrairement aux fonctions de type sinus, gaussiennes, etc... [21].

Chaque variable linguistique a une valeur qui reflète son état. Par exemple : les valeurs de la variable linguistique « état de charge de l'élément de stockage » sont : assez faible, faible, moyen, élevé. Ces valeurs sont représentées en logique floue par une fonction mathématique spécifique appelée "fonction d'appartenance", qui définit un domaine de changement des variables linguistiques [21].

L'utilisation des informations sur le mode de conduite du chauffeur et sur l'état des sources énergétiques en temps réel, les variables d'entrée du système floue correspondent à la demande en puissance du groupe moto-propulseur P_{dem} , et l'état de charge actuel de l'élément de stockage SoC. En considérant l'objectif principal qui est de minimiser la consommation de combustible afin de maximiser le nombre de cycles réalisés par le véhicule et en fonction de ces variables d'entrée, la variable de sortie est relative à la puissance fournie par la source principale P_{fcs} .

Pour attribuer un degré d'appartenance pour une valeur donnée x de la variable linguistique désignée, les fonctions d'appartenance sont de type trapézoïdal. Chaque fonction d'appartenance est caractérisée par ses paramètres d'appartenance x_i . Le nombre de paramètres d'appartenance pour une variable quelconque est égal à $4n$, avec n le nombre de fonctions d'appartenance de la variable considéré

Soit A_i^j le paramètre permettant de coder la variable linguistique j avec sa fonction d'appartenance i , modélisé comme suit :

$$A_i^j(x) = \begin{cases} 0 & x < x_{2i-2} \\ \frac{x-x_{2i-2}}{x_{2i-1}-x_{2i-2}} & x_{2i-2} \leq x < x_{2i-1} \\ 1 & x_{2i-1} \leq x < x_{2i} \\ \frac{x_{2i+1}-x}{x_{2i+1}-x_{2i}} & x_{2i} \leq x < x_{2i+1} \\ 0 & x \geq x_{2i+1} \end{cases}$$

Maintenant, il suffit de construire l'ensemble des variables floues comme suit : La variable P_{dem} (Figure 2.4) contient quatre fonctions d'appartenance A_i^1 $i \in \{N, F, M, E\}$, avec **N** : demande Négative, **F** : demande Faible, **M** : demande Moyenne et **E** : demande Élevée.

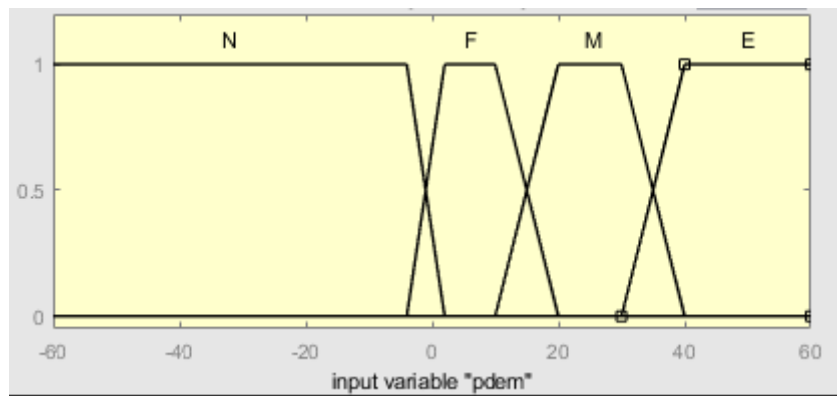


Figure 2.4 : Modélisation de la puissance demandée par le moteur électrique.

La variable SoC contient quatre fonctions d'appartenance A_i^2 $i \in \{AF, f, m, e\}$, avec **AF** : état de charge Assez Faible, **f** : état de charge Faible, **m** : état de charge Moyen et **e** : état de charge Élevé.

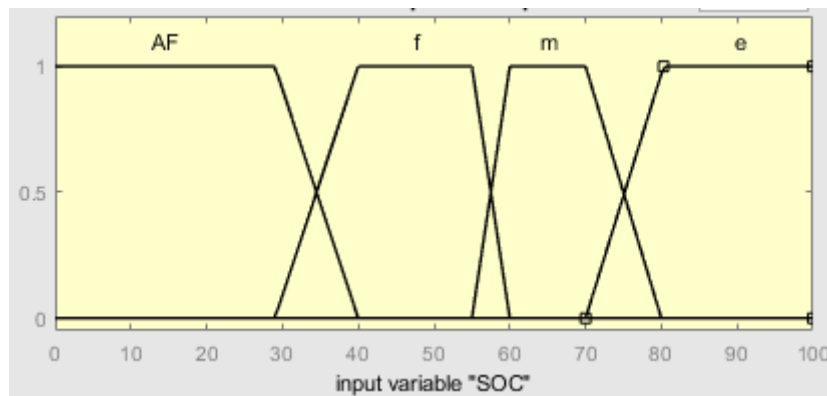


Figure 2.5 : Modélisation de l'état de charge de l'élément de stockage.

La variable P_{fcs} (**Figure 2.6**) contient quatre fonctions d'appartenance A_i^3 $i \in \{\text{NUL}, \text{Fa}, \text{Mo}, \text{El}\}$, avec **NUL** : puissance Nulle, **Fa** : puissance Faible, **Mo** : puissance Moyenne et **El** : puissance Élevée.

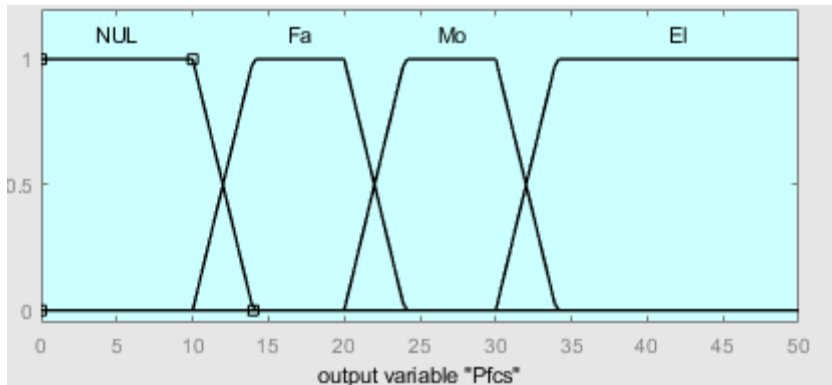


Figure 2.6 : Modélisation de la puissance fournie par la pile à combustible.

La difficulté se présente dans le choix des paramètres d'appartenance x_i des fonctions d'appartenance A_i^j . Cette difficulté est contournée par la mise en place d'une optimisation hors ligne en utilisant un algorithme génétique sur des profils connus permettant ainsi de corriger et de régler ces paramètres afin d'aboutir à des solutions précises et meilleures.

2.4.2.2.2. Le traitement d'inférence :

Les variables linguistiques sont liées entre elles par des règles afin d'en tirer des conclusions appelées aussi déductions floues ou inférences, récapitulées dans le tableau **2.1**, par exemple

- Si "la demande du moteur électrique est **N**" et "l'état de charge de l'élément de stockage est **AF**" alors "la puissance fournie par la source principale est **Nul**" ou
- Si "la demande du moteur électrique est **N**" et "l'état de charge de l'élément de stockage est **f**" alors "la puissance fournie par la source principale est **Nul**" ou
- Si "la demande du moteur électrique est **N**" et "l'état de charge de l'élément de stockage est **m**" alors "la puissance fournie par la source principale est **Nul**" ou
- Si "la demande du moteur électrique est **N**" et "l'état de charge de l'élément de stockage est **e**" alors "la puissance fournie par la source principale est **Nul**" ou
- Si "la demande du moteur électrique est **F**" et "l'état de charge de l'élément de stockage est **AF**" alors "la puissance fournie par la source principale est **El**" ou
- Si "la demande du moteur électrique est **F**" et "l'état de charge de l'élément de stockage est **f**" alors "la puissance fournie par la source principale est **Mo**" ou

- Si "la demande du moteur électrique est **F**" et "l'état de charge de l'élément de stockage est **m**" alors "la puissance fournie par la source principale est **Fa**" ou
- Si "la demande du moteur électrique est **F**" et "l'état de charge de l'élément de stockage est **e**" alors "la puissance fournie par la source principale est **Nul**" ou
- Si "la demande du moteur électrique est **M**" et "l'état de charge de l'élément de stockage est **AF**" alors "la puissance fournie par la source principale est **El**" ou
- Si "la demande du moteur électrique est **M**" et "l'état de charge de l'élément de stockage est **f**" alors "la puissance fournie par la source principale est **Mo**" ou
- Si "la demande du moteur électrique est **M**" et "l'état de charge de l'élément de stockage est **m**" alors "la puissance fournie par la source principale est **Fa**" ou
- Si "la demande du moteur électrique est **M**" et "l'état de charge de l'élément de stockage est **e**" alors "la puissance fournie par la source principale est **Fa**" ou
- Si "la demande du moteur électrique est **E**" et "l'état de charge de l'élément de stockage est **AF**" alors "la puissance fournie par la source principale est **El**" ou
- Si "la demande du moteur électrique est **E**" et "l'état de charge de l'élément de stockage est **f**" alors "la puissance fournie par la source principale est **El**" ou
- Si "la demande du moteur électrique est **E**" et "l'état de charge de l'élément de stockage est **m**" alors "la puissance fournie par la source principale est **Mo**" ou
- Si "la demande du moteur électrique est **E**" et "l'état de charge de l'élément de stockage est **e**" alors "la puissance fournie par la source principale est **Fa**"

P_{dem} \ SoC	AF	f	m	e
N	NUL	NUL	NUL	NUL
F	El	Mo	Fa	NUL
M	El	Mo	Fa	Fa
E	El	El	Mo	Fa

Tableau 2.1. : Récapitulatif des règles floues.

Le choix sur les règles dépend du fonctionnement désirer sur la PAC, donc le choix de ses règles reste arbitraire, tout en respectant les contraintes sur l'état de charge et la valeur des puissances maximales sur les sources d'énergie. Par exemple, lorsque l'état de charge du SC est faible et la puissance demandée par le véhicule est d'autant élevée donc la puissance que la PAC doit fournir sera élevée. De même que la pile fournit une puissance aussi faible que la demande en puissance est faible et le SC est chargé élevée car dans ce cas faut solliciter le SC pour réduire à une charge moyenne pour en profiter de récupérer l'énergie de freinage. Si une règle non approprier est prise, cela peut générer des dégâts sur le système. En prenant comme exemple la demande élevée en puissance et l'état de charge du SC faible et on attribue la

décision que la puissance de la PAC sera faible, le SC va fournir une puissance maximale pour répondre à la puissance demandée qui est élevée (surcharge). Et si le SC est chargé et la référence de la PAC est élevée par rapport à la puissance demandée, cette décision peut endommager le SC en le chargeant plus que sa limite. Pour faire fonctionner le système du SC de manière efficace, il est nécessaire de garder le SOC au-dessous de 85% en tout temps pour profiter de l'énergie du freinage. La limite inférieure en état de charge est fixée à 45% selon [12].

2.4.2.2.3. La défuzzification :

A la fin du traitement flou, l'ensemble flou de sortie n'est pas directement utilisable pour donner une information précise à l'opérateur malgré qu'il soit déterminé. Il est nécessaire de passer du mode flou au mode réel. Afin de déterminer l'abscisse de la variable P_{dem} résultante, il faut procéder à une étape de défuzzification pour laquelle il existe plusieurs méthodes, la plus utilisée étant le calcul du centre de gravité de l'ensemble flou [21].

Le résultat obtenu est une surface de décision permettant de déduire, la puissance nécessaire fournie par la pile à combustible, pour chaque niveau de charge de l'élément de stockage et la demande en puissance du moteur électrique, comme le montre la figure 2.7.

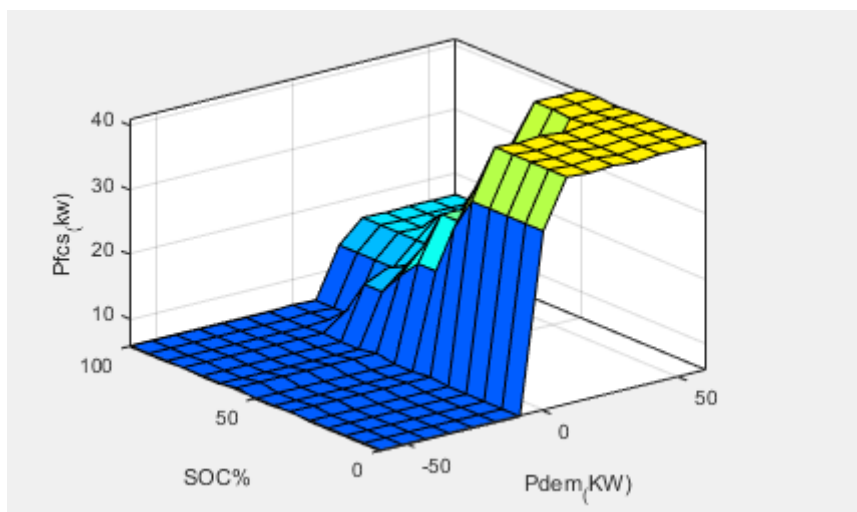


Figure 2.7 : Surface de décision floue.

2.5. Conclusion :

La gestion énergétique des systèmes multi-sources sur les véhicules hybrides électriques est essentielle. Il permet d'augmenter l'autonomie du véhicule en réduisant la consommation de combustible à la source principale, réduisant ainsi les nuisances liées aux émissions de CO₂.

Plusieurs méthodes et approches différentes ont été développées dans le but de contrôler la distribution d'énergie de différentes sources embarquées hors ligne ou en temps

réel tel que la programmation dynamique, La commande optimale la méthode de programmation non linéaire de type quasi-Newton. Chacune de ces méthodes à ses propres avantages et inconvénients, pour l'étude faite dans notre mémoire on a utilisé la logique floue qui est la stratégie à base de règle. Cette stratégie est stressante pour la pile à combustible à cause de la valeur de référence qui change tout moment suivant l'évolution de l'état de charge et de la puissance demandée.

Cette stratégie satisfait peu de critères à cause de la difficulté d'adaptation et le temps de calcul long à cause du traitement numérique interne. L'implémentation en temps réel nécessite un espace mémoire suffisant pour la mise en place des trois processus de traitement (fuzzification, traitement d'inférence, déffuzification).

Chapitre 3. Implémentation de la gestion d'énergie du véhicule électrique hybride à l'aide de la logique floue dans arduino.

3.1. Introduction :

Dans ce chapitre, on présentera de manière sommaire une vue d'ensemble du dispositif expérimental « réalisation de la gestion d'énergie du véhicule électrique hybride à l'aide de la logique floue en utilisant la carte arduino UNO ».

Après avoir donné dans le chapitre précédent une description théorique sur la logique floue et comment utiliser cette méthode afin de réaliser la gestion d'énergie dans un véhicule électrique, On va procéder à l'application expérimentale, pour cette raison, plusieurs étapes ont été nécessaires afin de réaliser notre gestion d'énergie.

3.2. Définition du module Arduino :

Le module Arduino est un circuit imprimé en matériel libre (plateforme de contrôle) dont les plans de la carte elle-même sont publiés en licence libre dont certains composants de la carte : comme le microcontrôleur et les composants complémentaires qui ne sont pas en licence libre. Un microcontrôleur programmé peut analyser et produire des signaux électriques de manière à effectuer des tâches très diverses. Arduino est utilisé dans beaucoup d'applications comme l'électrotechnique industrielle et embarquée ; le modélisme, la domotique mais aussi dans des domaines différents comme l'art contemporain et le pilotage d'un robot, commande des moteurs et faire des jeux de lumières, communiquer avec l'ordinateur, commander des appareils mobiles (modélisme). Chaque module d'Arduino possède un régulateur de tension +5 V et un oscillateur à quartez 16 MHz (ou un résonateur céramique dans certains modèles). Pour programmer cette carte, on utilise l'logiciel IDE Arduino. [22].

3.3. La constitution de la carte Arduino UNO :

Un module Arduino est généralement construit autour d'un microcontrôleur ATMEL AVR, et de composants complémentaires qui facilitent la programmation et l'interfaçage avec d'autres circuits. Chaque module possède au moins un régulateur linéaire 5V et un oscillateur à quartz 16 MHz (ou un résonateur céramique dans certains modèles). Le microcontrôleur est préprogrammé avec un bootloader de façon à ce qu'un programmeur dédié ne soit pas nécessaire.

3.4. Conversion analogique / numérique :

Nous allons montrer comment mesurer des tensions avec une carte Arduino UNO, nous verrons comment mesurer une tension et comment interpréter le résultat de la mesure.

On parle tellement souvent de numérique de nos jours, qu'on en oublie presque que derrière un bon nombre de valeurs numériques se trouve des grandeurs physiques analogiques.

Un convertisseur analogique-numérique est un dispositif électronique dont la fonction est de traduire une grandeur analogique en une valeur numérique codée sur plusieurs bits.

En électronique numérique, on travaille avec des bits et des octets. En analogique, on travaille avec des grandeurs physiques : tension, courant, résistance, fréquence, etc.

Pour pouvoir exploiter des mesures analogiques avec un microcontrôleur, il faut convertir la mesure analogique en une grandeur numérique, c'est justement le but des convertisseurs analogique / numérique [25].

Un convertisseur analogique / numérique permet de mesurer une tension (valeur analogique) et de représenter cette tension au moyen d'une valeur numérique, il faut associer une valeur numérique (un nombre entier) pour chaque valeur analogique d'une plage de tension bien précise [25].

Les cartes Arduino – disposent d'un convertisseur analogique / numérique intégré. Dans le cas d'une carte Arduino UNO, il y a 6 entrées analogiques, pouvant mesurer des tensions comprises entre 0 et 5 volts, avec une précision de 10 bits (soit 1024 points).

3.4.1. Précaution à prendre

- Injecter une tension supérieure à 5 volts ou inférieure à 0 volt sur une broche analogique endommagera immédiatement et définitivement votre carte Arduino.
- La précision de la mesure (10 bits) n'est pas modifiable,
- Le résultat est sur 10 bits, soit entre 0 et 1023 (inclus).
- La mesure prend environ 100µs, cela fait un maximum de 10 000 mesures par seconde

3.5. Les différentes étapes de la réalisation :

Notre réalisation pratique a été faite en trois parties:

- La première partie est la conception de tout le système électronique.
- La deuxième partie est la réalisation pratique de la carte.
- La troisième partie est la programmation sur arduino IDE afin de réaliser la gestion d'énergie d'un véhicule électrique hybride.

La première partie de notre projet est très importante, tout d'abord présenter les différents éléments ou composants constituant notre maquette en choisissant des composants aux caractéristiques voulus, à défaut, on choisira ceux disponibles sur le marché.

Composants utilisés :

- Carte arduino UNO.
- Deux potentiomètre, on utilise deux potentiomètre de 50 K ohms chacun.
- Une platine d'essai et des fils.

- Câble USB type A/B.



Figure 3.1 : Carte arduino UNO.

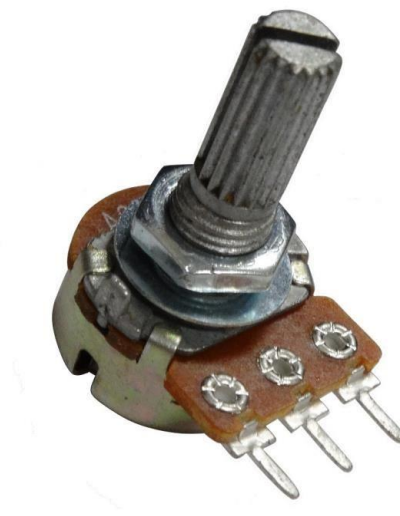


Figure 3.2 : potentiomètre 50 kΩ.

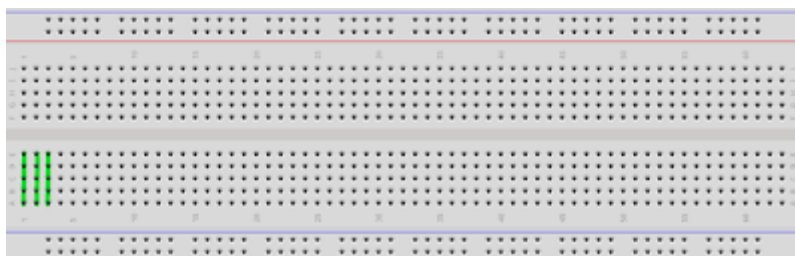


Figure 3.3 : Une platine d'essai.



Figure 3.4 : Câble USB type A/B.

La deuxième étape « réalisation pratique » tout d'abord faut savoir qu'un potentiomètre est composé d'une résistance de valeur fixe et d'un curseur, le curseur peut se déplacer le long de la résistance de valeur fixe pour donner une résistance de valeur variable, en connectant une extrémité de la résistance fixe et le curseur à un circuit, on obtient une résistance de valeur variable. En connectant les deux extrémités de la résistance fixe à une alimentation et le curseur à un circuit, on obtient une sorte de mini générateur de tension variable.

On assemble ensuite les composants suivants notre montage. Tout d'abord, on relie l'alimentation 5V ainsi que la mise à terre (GND) à la platine d'essai, ensuite on relie les branches du milieu des deux potentiomètres qui sont les curseurs des deux potentiomètre sur les branches d'entrées analogiques A0 qui représente la puissance demandé (Pdem) en kW et A1 qui représente l'état de charge de la batterie (SoC) en %, aussi relier les branches des deux extrémités sur l'alimentation 5V ainsi que la mise à terre respectivement. Enfin relier le port d'USB à l'ordinateur.

Ensuite l'arduino va lire la tension sur les broche A0 et A1, après ça il va convertir les valeurs analogiques en valeurs numériques, enfin il envoie les valeurs au PC pour l'affichage.

La figure 3.5 si dessous montre réalisation pratique de la maquette en assemblant tous les composants nécessaire, programme ainsi que les résultats de la réalisation.

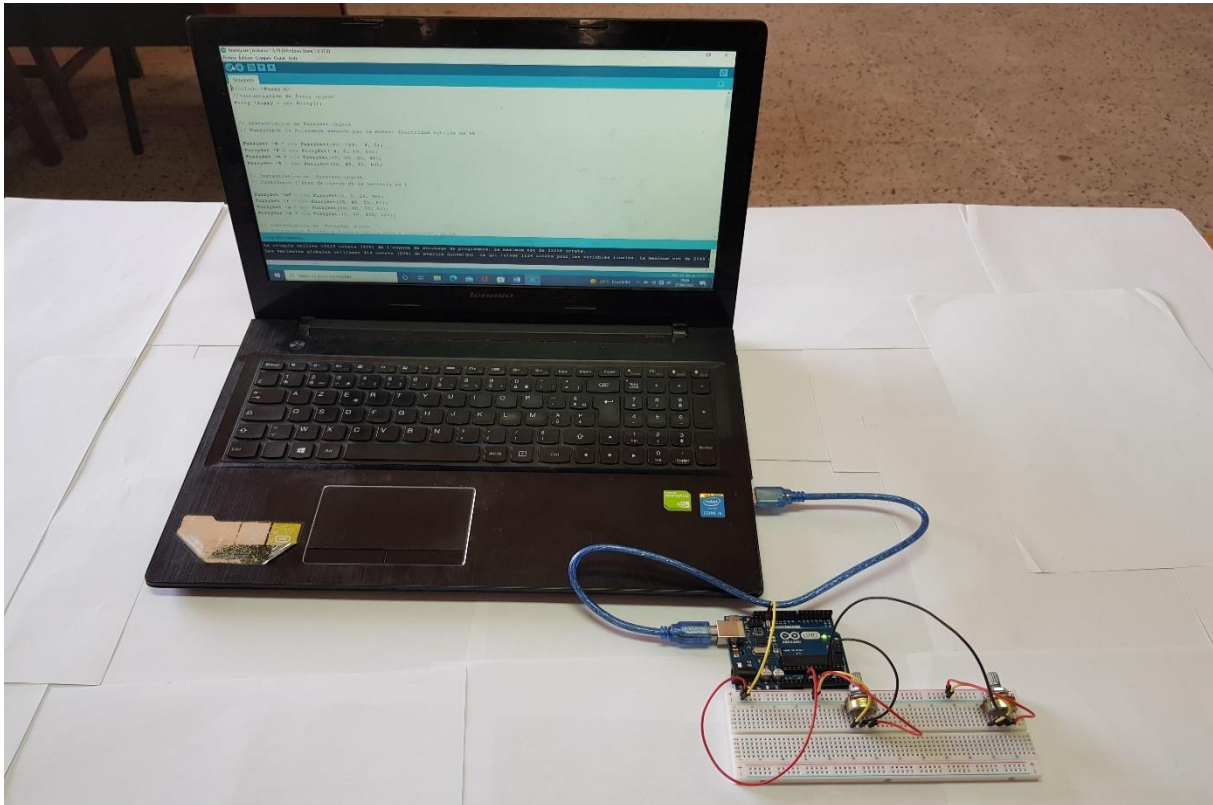


Figure 3.5 : Maquette assemblant tous les composants nécessaire à la réalisation de la gestion d'énergie du véhicule électrique hybride.

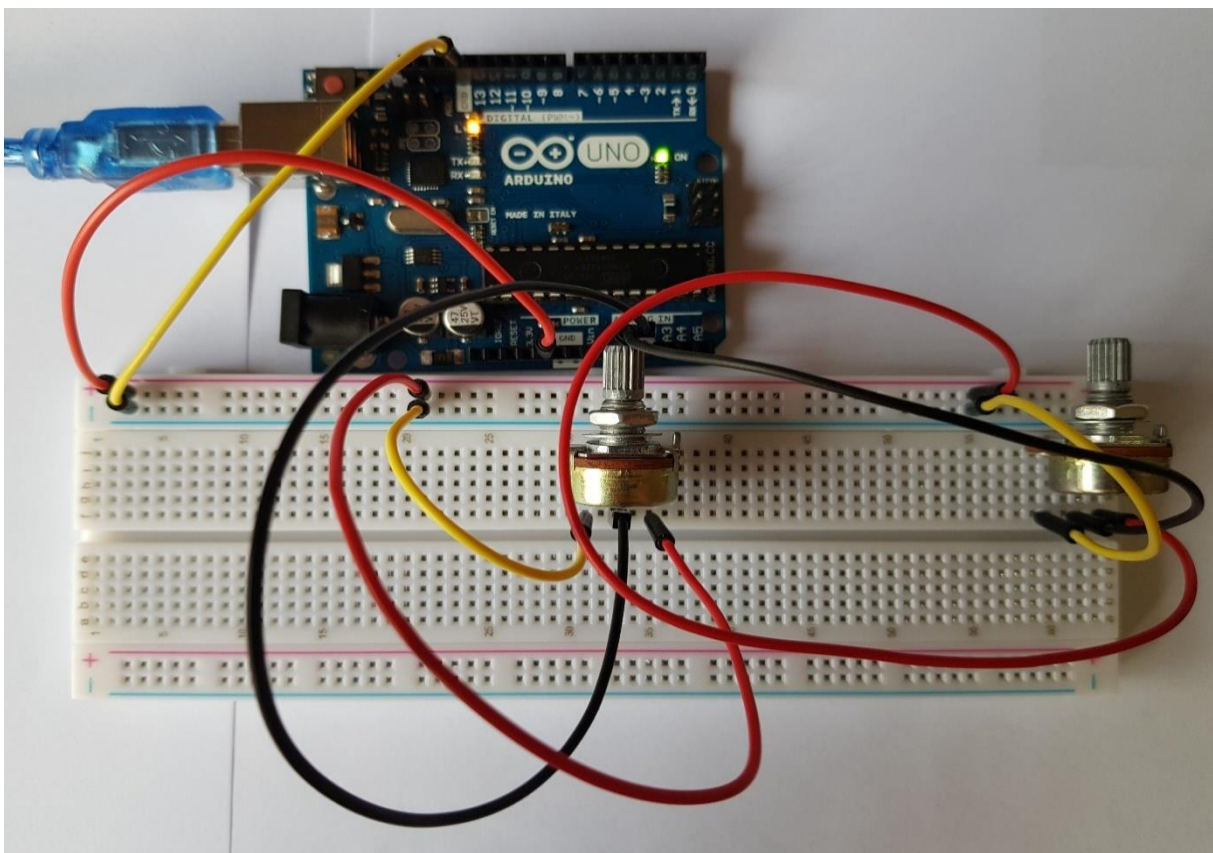


Figure 3.6 : Image rapproché de la figure 3.5.

La troisième étape consiste à Programmer notre application sur arduino IDE, dans notre cas on doit d'abord inclure la bibliothèque Fuzzy sur notre logiciel arduino IDE avant de commencer à programmer.

3.6. Présentation de la bibliothèque fuzzy (eFLL) :

L'eFLL (Embedded fuzzy logic library) est une bibliothèque standard pour les systèmes embarqués permettant d'implémenter des systèmes flous simple et efficaces.

Ecrit en C++ /C, utilise uniquement la bibliothèque de langage C, donc eFLL est une bibliothèque conçue non seulement pour arduino, mais tout système embarqué.

Il n'a pas de limitations explicites sur la quantité de règles floues, Fuzzy Rules, Inputs ou Output.

Il utilise le processus (MAX-MIN) et (Mamdani Minimum) pour l'inférence et la composition, (Centre de gravité) à la défuzzification dans un univers continu.

3.7. Documentation bibliothèque fuzzy :

3.7.1. Fuzzy object : Cet objet comprend tout le système floue, à travers lui vous pouvez manipuler les ensembles flous, les règles linguistiques, les entrées et les sorties.

3.7.2. FuzzyInput : Cet objet regroupe tous les ensembles flous d'entrées qui appartiennent au même domaine.

3.7.3. FuzzyOutput : Cet objet regroupe tous les ensembles flous de sorties qui appartiennent au même domaine.

3.7.4. FuzzySet : C'est l'un des principaux objets de la bibliothèque floue, avec chaque ensemble il est possible de modéliser le système en question. Actuellement la bibliothèque supporte les fonctions d'appartenance triangulaire, trapézoïdales et singleton, qui sont assemblées en fonction des points A, B, C et D, ce sont des paramètres dans son constructeur `FuzzySet(float a, float b, float c, float d)`.

3.7.4.1. Fonction triangulaire :

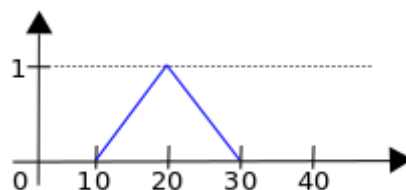


Figure 3.5. : `FuzzySet* fs = FuzzySet(10, 20, 20, 30);`

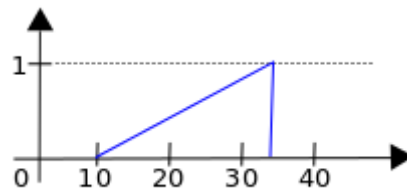


Figure 3.6 : FuzzySet* fs = FuzzySet(10, 33, 33, 33);

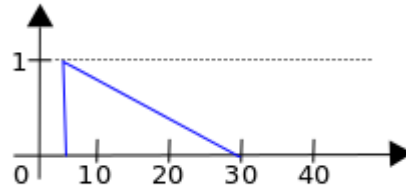


Figure 3.7 : FuzzySet* fs = FuzzySet(5, 5, 5, 30);

3.7.4.2. Fonction trapézoïdales :

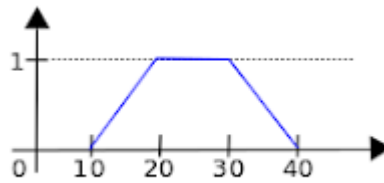


Figure 3.8 : FuzzySet* fs = FuzzySet(10, 20, 30, 40);

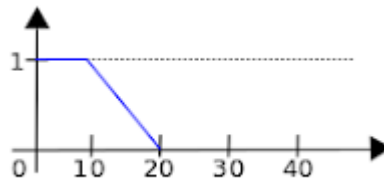


Figure 3.9 : FuzzySet* fs = FuzzySet(0, 0, 10, 20);

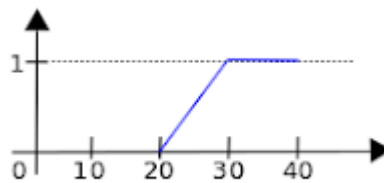


Figure 3.10 : FuzzySet* fs = FuzzySet(20, 30, 40, 40);

3.7.4.3. Fonction singleton :

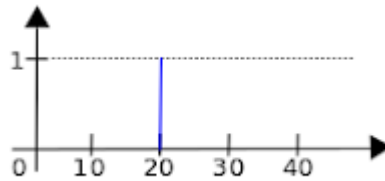


Figure 3.11 : `FuzzySet* fs = FuzzySet(20, 20, 20, 20);`

3.7.5 FuzzyRule : Cet objet est utilisé pour monter la règle de base de l'objet Fuzzy, qui contient un ou plusieurs de cet objet. Instancié avec
`FuzzyRule dz = new FuzzyRule (ID, antecedent, consequent).`

3.7.6. FuzzyRuleAntecedent : Cet objet est utilisé pour composer l'objet FuzzyRule, responsable de l'assemblage de l'antécédent de l'expression conditionnelle d'une FuzzyRule.

3.7.7. FuzzyRuleConsequent : Cet objet est utilisé pour rendre l'objet FuzzyRule, responsable de l'assemblage de l'expression de sortie d'une FuzzyRule.

3.8. Explication des étapes du programme :

Tout d'abord inclure la bibliothèque Fuzzy sur notre logiciel arduino IDE. Ensuite on va créer une classe qu'on va nommer `fuzzy` avec l'instruction suivante :

```
Fuzzy *fuzzy = new Fuzzy();
```

Après ça on doit définir les sous-ensembles de chaque entrée et sortie avec l'instruction `FuzzySet` en nommant chaque sous-ensemble tel que :

```
FuzzySet *N = new FuzzySet(-60, -60, -4, 2);
```

```
FuzzySet *F = new FuzzySet(-4, 2, 10, 20);
```

```
FuzzySet *M = new FuzzySet(10, 20, 30, 40);
```

```
FuzzySet *E = new FuzzySet(30, 40, 60, 60);
```

Dans cet exemple on a représenté les sous-ensembles de l'entrée de la puissance demandé P_{dem} .

Dans la boucle `void setup` on va créer un objet pour chaque entrées et sortie, dans notre exemple on nommera notre objet `Pdem` :

```
FuzzyInput *Pdem = new FuzzyInput(1);
```

Ensuite on doit associer chaque sous-ensemble à son entrée ou bien sa sortie en utilisant `FuzzyInput` pour l'entrée et `FuzzyOutput` pour la sortie :

```
Pdem->addFuzzySet(N);
```

```
Pdem->addFuzzySet(F);
```

```
Pdem->addFuzzySet(M);
```

```
Pdem->addFuzzySet(E);
```

Cependant, il faut lier tous les objets d'entrées FuzzyInput et de sortie FuzzyOutput à la classe créé "fuzzy" dans le début du programme :

```
fuzzy->addFuzzyInput(Pdem);
```

Après avoir terminé les configurations des sous-ensembles et des variables linguistiques, la suite est le traitement d'inférence, pour la construction de nos règles on va créer un objet FuzzyRules ensuite on utilisera l'objet FuzzyRuleAntecedent pour composer l'objet FuzzyRule, qui est responsable de l'assemblage de l'antécédent de l'expression conditionnelle d'une FuzzyRule.

Dans notre exemple on nommera l'objet FuzzyRuleAntecedent "ifPdemNAndSoCAF"

```
FuzzyRuleAntecedent *ifPdemNAndSoCAF = new FuzzyRuleAntecedent();
```

Afin d'intégrer les deux conditions dans l'objet FuzzyRuleAntecedent, on utilisera l'instruction joinWithAND car dans nos règles d'inférence, il faut que les deux conditions soient vraies.

```
ifPdemNAndSoCAF->joinWithAND(N, AF);
```

Ensuite on utilisera l'objet FuzzyRuleConsequente qui est utilisé pour rendre l'objet FuzzyRule, responsable de l'assemblage de l'expression de sortie d'une FuzzyRule.

On nommera l'objet FuzzyRuleConsequente "thenPfc1"

```
FuzzyRuleConsequent *thenPfc1 = new FuzzyRuleConsequent();
```

Afin d'intégrer le résultat des conditions dans FuzzyRuleConsequente on utilisera l'instruction addOutput(NUL).

```
thenPfc1->addOutput(NUL);
```

L'étape suivante est de nommer l'objet FuzzyRules "FuzzyRules1", cette dernière doit contenir le nombre de la règle, les conditions et le résultat tel que :

```
FuzzyRule *fuzzyRule1 = new FuzzyRule(1, ifPdemNAndSoCAF, thenPfc1);
```

On intègre l'objet FuzzyRule dans la classe fuzzy :

```
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule1);
```

Enfin dans la boucle void loop qui nous permettra d'exécuter notre programme, la fonction analogRead() retourne un nombre entier (int) compris entre 0 et 1023 [26]. Ce nombre correspondant à la tension mesurée, 0 = 0 volt, 1023 = tension alimentation = 5 volts, dans notre cas le nouveau intervalle pour la première entrée A0 qui est la puissance demandée P_{dem} est de -60 et 60 pour la deuxième entrée A1 qui est l'état de charge SoC est de 0 et 100, la fonction map permettra de transformer une valeur, qui initialement est dans un intervalle déterminé, en une autre valeur comprise dans un nouveau intervalle de façon que cette modification soit la plus proportionnelle possible.

```
int inputnew1 = map(input1, 0,1023, -60,60);
```

La fuzzification et la défuzzification se feront aussi dans la boucle void loop.

```
fuzzy->fuzzify();
```

```
float output1 = fuzzy->defuzzify(1);
```

3.9. Les résultat de la réalisation pratique sur arduino IDE :

Si dessous, on montre les résultats de cinq essais, dont différent valeurs son choisis pour les entrées qui sont la puissance demandé P_{dem} et l'état de charge SoC et aussi pour la sortie qui est la puissance fournie par la PAC P_{fcs} .

Pour la première entrée qui est la puissance demandé dont la valeur est $P_{dem} = -60$ kW, ce qui implique qu'on est soit dans la phase de décélération ou bien du freinage, Cependant la valeur de la deuxième entrée qui est l'état de charge est $SoC = 0\%$, On choisit que lors de la décélération et au freinage, la source de stockage récupère l'énergie électrique d'origine cinétique, selon le principe de conversion de l'énergie cinétique en énergie électrique.

On voit bien que d'après la valeur de P_{dem} dans le résultat si dessous le degré d'appartenance du sous-ensemble « Négatif » est de 100% par contre les degrés d'appartenances des autres sous-ensembles (F, M, E) sont nulle, et cela car on a défini lors de la fuzzification l'intervalle pour que la puissance demandé soit 100 % négatif qui est de $[-60 -4]$.

Pour l'état de charge SoC, le degré d'appartenance du sous-ensemble « AF » est de 100% par contre les degrés d'appartenances des autres sous-ensembles (f, m, e) sont nulle, et cela car on a défini lors de la fuzzification l'intervalle pour que l'état de charge soit 100 % AF « Assez faible » qui est de $[0 29]$.

D'après les règles mises dans le traitement d'inférence lorsque la puissance demandée est négatif quel que soit l'état de charge la puissance que doit fournir la PAC sera nulle à 100%, c'est pour cela que dans le résultat $P_{fcs} = NUL$ à 100% et le degré d'appartenance des autres sous-ensembles est de 0%.

```
Entrance:
                Pdem: -60, SoC: 0
Input:
    Pdem: N-> 1.00, F-> 0.00, M-> 0.00
, E-> 0.00
    SoC: AF-> 1.00, f-> 0.00, m-> 0.00, e-> 0.00
Output:
    PfcS: NUL-> 1.00, Fa-> 0.00, Mo-> 0.00
, El-> 0.00
Result:
                PfcS: 5.000
```

Figure 3.12 : Résultat de la réalisation pour des entrées $P_{dem} = -60$ kW et $SoC = 0\%$.

Pour les valeurs maximum $P_{dem} = 60$ kW et $SoC = 100\%$ le résultat obtenue de la puissance que doit fournir la PAC est faible à 100 %, tout d'abord car d'après le dimensionnement de la source de la PAC la puissance de la PAC P_{fcs} est plus grande que la puissance demandé P_{dem} de 20%, ensuite d'après nos règle d'inférence, tellement que la puissance demandé est élevé, aussi l'état de charge est élevé ainsi la distribution de l'énergie se

fera par les deux sources qui sont la batterie et la pile à combustible, tout ça pour répondre à la demande élevé du véhicule en terme de puissance demandé P_{dem} .

```
Entrance:
                                Pdem: 60, SoC: 100Input:
    Pdem: N-> 0.00, F-> 0.00, M-> 0.00
, E-> 1.00
    SoC: AF-> 0.00, f-> 0.00, m-> 0.00, e-> 1.00
Output:
    PfcS: NUL-> 0.00, Fa-> 1.00, Mo-> 0.00
, El-> 0.00
Result:
                                PfcS: 17.001023
```

Figure 3.13 : Résultat de la réalisation pour des entrées $P_{dem}=60kW$ et $SoC=100\%$.

Pour une valeur de $P_{dem} = 18 kW$ on a obtenu dans le résultat les degrés d'appartenances du sous-ensemble faible F est à 20% et du sous-ensemble moyen M est à 80% et pour la deuxième entrée $SoC = 57\%$ on a obtenu que le degré d'appartenance du sous-ensemble faible est à 60% et le sous-ensemble moyen a 40%, car d'après les figures 2.4 et 2.5 du chapitre 2 on remarque que les valeurs $P_{dem} = 18 kW$ et $SoC = 57\%$ sont dans l'intervalle faible et moyen qu'on a défini lors de la fuzzification.

Pour le résultat de la valeur de la puissance à fournir P_{fcS} , on a les degrés d'appartenances des sous-ensembles Mo et Fa sont à 60% et à 40% respectivement, cela est dû d'après nos règles d'inférences à répondre au besoin du véhicule au terme de la puissance demandé P_{dem} et aussi recharger la batterie SoC.

```
Entrance:
                                Pdem: 18, SoC: 57Input:
    Pdem: N-> 0.00, F-> 0.20, M-> 0.80
, E-> 0.00
    SoC: AF-> 0.00, f-> 0.60, m-> 0.40, e-> 0.00
Output:
    PfcS: NUL-> 0.00, Fa-> 0.40, Mo-> 0.60
, El-> 0.00
Result:
                                PfcS: 22.84665
```

Figure 3.14 : Résultat de la réalisation pour des entrées $P_{dem}=18kW$ et $SoC=57\%$.

Pour une valeur $P_{dem}=12kW$ on obtient dans les résultats que le sous-ensemble faible F a un degré d'appartenance de 80% et le sous-ensemble moyen M a un degré d'appartenance de 20%, la valeur du SoC qui est de 34% donne un degré d'appartenance assez faible AF de 55% et faible à 45%, c'est ainsi que nos entrées ont été choisies dans la fuzzification, la batterie est assez faible donc on doit la charger c'est pour cela que les résultats indiquent une puissance de PAC élevée à 55% et moyenne à 45%, une autre raison est de répondre à la puissance demandée par le véhicule P_{dem} .

```
Entrance:
                                Pdem: 12, SoC: 34Input:
    Pdem: N-> 0.00, F-> 0.80, M-> 0.20
, E-> 0.00
    SoC: AF-> 0.55, f-> 0.45, m-> 0.00, e-> 0.00
Output:
    Pfcs: NUL-> 0.00, Fa-> 0.00, Mo-> 0.45
, El-> 0.55
Result:
                                Pfcs: 34.60619
```

Figure 3.15 : Résultat de la réalisation pour des entrées $P_{dem}=12kW$ et $SoC=34\%$.

Pour ce dernier exemple, c'est le même principe que les résultats affichés précédemment de la figure 3.15.

```
Entrance:
                                Pdem: 11, SoC: 31Input:
    Pdem: N-> 0.00, F-> 0.90, M-> 0.10
, E-> 0.00
    SoC: AF-> 0.82, f-> 0.18, m-> 0.00, e-> 0.00
Output:
    Pfcs: NUL-> 0.00, Fa-> 0.00, Mo-> 0.18
, El-> 0.82
Result:
                                Pfcs: 38.74611
```

Figure 3.16 : Résultat de la réalisation pour des entrées $P_{dem}=11kW$ et $SoC=31\%$.

On remarque bien que les résultats sont cohérents en tenant compte des règles fixées et des objectifs attendus. Cela confirme l'efficacité de la méthode de logique floue ainsi que la structure de notre programme.

3.10. Conclusion :

La gestion d'énergie en temps réel d'un véhicule hybride électrique est cruciale pour améliorer sa performance et d'augmenter son autonomie. Dans cette communication, une approche de type floue a été développée et programmée en langage C/C++ en utilisant le logiciel arduino IDE, dont une librairie Fuzzy est ajoutée.

Les résultats de la réalisation montrent la robustesse et les performances dynamiques du contrôleur floue vis à vis des variations de la charge et montrent aussi : l'efficacité de la stratégie en termes de gestion d'énergie.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans la thématique «Gestion de l'énergie par la méthode logique floue pour un véhicule électrique hybride. Implémentation sur arduino». Il a pour objectif l'étude de stratégie de la gestion de l'énergie des différents systèmes hybrides composés d'une pile à combustible comme source principale et d'autres sources réversibles (Batterie et super-condensateurs) comme sources auxiliaires. Ces systèmes sont dédiés à la traction dans les véhicules électriques à pile à combustible, en réduisant autant que possible la consommation d'hydrogène, apporter une solution efficace pour éliminer les émissions de polluants et de gaz à effet de serre aussi diminuer la dépendance au pétrole.

Parmi les différentes techniques de la gestion de l'énergie utilisées dans les véhicules électriques hybrides, nous avons opté, dans ce travail, pour le contrôleur floue, qui est une stratégie à base de règle. Nous avons ainsi, en utilisant le contrôleur floue, pu optimiser la consommation de l'hydrogène par l'exploitation des moyens de stockage, de ce fait, nous permettant d'éviter le surdimensionnement de la pile à combustible qui devient moins sollicitée, et par conséquent, de gagner en coût du véhicule.

L'utilisation de cette méthode de contrôle donne une performance tout à fait acceptable en offrant la robustesse nécessaire face aux variations de la charge. Les résultats obtenus montrent qu'ils permettent une bonne répartition de la puissance entre les sources et la charge.

Ce travail peut être sujet d'amélioration dans le futur, par exemple s'ouvrir sur d'autre stratégie de gestion tel que des modèles combinatoires conduisant ainsi à de très bonnes performances en termes de qualité de solution et temps de calcul, aussi compléter la maquette en remplaçant les potentiomètres par les éléments réels permettant de mesurer le SoC et la puissance demandé par le véhicule.

Références bibliographiques

- [1] W.Hankache. Gestion optimisées de l'énergie électrique d'un groupe électrogène hybride à pile à combustible. Thèse de Doctorat, institut National Polytechnique de Toulouse, 2008. France.
- [2] Thomas_Foucquier. Livre Histoire de la voiture électrique et de ses constituants. Date de publication 2017.
- [4] Yacine Gaoua, « Modèles mathématiques et techniques d'optimisation non linéaire et combinatoire pour la gestion d'énergie d'un système multi-source : vers une implantation temps-réel pour différentes structures électriques de véhicules hybrides », Thèse en vue de l'obtention du Doctorat : Université de Toulouse. 18 Dec 2014.
- [5] *Shacket S.R., The Complete Book of Electric Vehicles, Chicago, Domus Books, 1979.*
- [6] L'Histoire de la voiture électrique » [archive], Voiture-electrique-populaire.fr. 2010
- [7] « Les voitures électriques du système Jeantaud », Le Chauffeur, n° 14, p. 263, 10 août 1897.
- [8] « La voiture électrique, une vieille histoire » [archive], sur ouest-france.fr. Publié le 29/05/2016
- [9] RAHERINIAINA Arsène. Mémoire de fin d'étude. Etude et conception d'une voiture hybride à moteur série. 31 mars 2011.
- [10] G. Noureddine et Hammadi rachid, Étude comparative entre influence des déférent paramétrer physique et la performance du véhicule électrique modélisation et simulation, Mostaganem: Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, 2018/2019.
- [11] T. Purnot, A Comparative Study and Analysis of an Optimized Control Strategy for the Toyota Hybrid System, Master's Thesis DCT041. 2009.
- [12] Haroune AOUZELLAG, Thèse, Optimisation de la gestion énergétique des véhicules hybrides : Université Abderrahmane Mira de Bejaia. 12/01/2017.
- [13] Thierry Mahé, Motorisations hybrides: Que Faire?, Industrie et Technologie, n°868, mai 2005, page. 38-41.
- [14] Victor Mester, « Conception Optimale Systémique des Composants des Chaînes de Traction Electrique », thèse de doctorat, Ecole centrale de Lille, mai 2007.
- [15] Site officiel de Honda <https://hondanews.eu/fr>.
- [16] M. Guemri. Heuristiques optimisés et robuste de résolution du problème de gestion d'énergie pour les véhicule électrique et hybride. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 2013. France.

- [17] Site web <https://www.h2-mobile.fr/dossiers/pile-combustible-fonctionnement-avantages-inconvenients/>.
- [18] BELHADJ Said. Thèse, Analyse et dimensionnement d'architecture de véhicule électrique hybride, Université A.MIRA-BEJAIA, 2020. Algerie.
- [19] LOUIS GACÔGNE Livre « Eléments de la logique floue » Edition « HERMES », p 256, parution 22/07/1997.
- [20] Erdinc et al. 2009; Ferreira. Articles universitaires. Stratégie de gestion de l'énergie basée sur la logique floue des ondelettes pour un système d'alimentation de véhicule hybride pile à combustible/batterie/ultra-condensateur.
- [21] MIGAN Anthony. Mémoire de fin de formation en vue de l'obtention du diplôme ingénieur. Commande floue d'un robot mobile à roues suiveur de ligne. 2021.
- [22] <http://www.generationrobots.com/fr/152-arduino>. Consulter le: mars 2015.
- [23] R. Shankar, J. Marco, and F. Assadian. "Design of an optimized chargeblended energy management strategy for a plugin hybrid vehicle". In : Control (CONTROL), 2012 UKACC International Conference on, pp. 619– 624, IEEE, 2012.
- [24] Zhang P, Yan F, Du C. A comprehensive analysis of energy management strategies for hybrid electric vehicles based on bibliometrics. Renew Sustain Enrgy Rev2015 ;48 ;88-104.
- [25] MIHOUBI Roua, ZABI Ilham. Conception d'un Modulateur Sigma-Delta Temps Continu en Technologie CMOS. Mémoire de master. UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA. 2018 Algérie.
- [26] Site officiel de l'arduino <https://www.arduino.cc/>.

Cette annexe montre le programme permettant la gestion du véhicule électrique hybride :

```
#include <Fuzzy.h>
//Instantiation de fuzzy object
Fuzzy *fuzzy = new Fuzzy();

// Instantiation de FuzzySet object
// FuzzyInput la Puissance demandé par le moteur électrique hybride en kW

FuzzySet *N = new FuzzySet(-60, -60, -4, 2);
FuzzySet *F = new FuzzySet(-4, 2, 10, 20);
FuzzySet *M = new FuzzySet(10, 20, 30, 40);
FuzzySet *E = new FuzzySet(30, 40, 60, 60);

// Instantiation de FuzzySet object
// FuzzyInput l'état de charge de la batterie en %

FuzzySet *AF = new FuzzySet(0, 0, 29, 40);
FuzzySet *f = new FuzzySet(29, 40, 55, 60);
FuzzySet *m = new FuzzySet(55, 60, 70, 80);
FuzzySet *e = new FuzzySet(70, 80, 100, 100);

// Instantiation de FuzzySet object
// FuzzyOutput Puissance fournie par la pile à combustible en kW

FuzzySet *NUL = new FuzzySet(0, 0, 10, 14);
FuzzySet *Fa = new FuzzySet(10, 14, 20, 24);
FuzzySet *Mo = new FuzzySet(20, 24, 30, 34);
FuzzySet *El = new FuzzySet(30, 34, 50, 50);

void setup() {
  // Définir une sortie série
  Serial.begin(9600);
  randomSeed(analogRead(0));

  //Instantiation de fuzzyInput object
  FuzzyInput *Pdem = new FuzzyInput(1);
  Pdem->addFuzzySet(N);
  Pdem->addFuzzySet(F);
  Pdem->addFuzzySet(M);
  Pdem->addFuzzySet(E);
  fuzzy->addFuzzyInput(Pdem);

  //Instantiation de fuzzyInput object
  FuzzyInput *SoC = new FuzzyInput(2);
```

```

SoC->addFuzzySet(AF);
SoC->addFuzzySet(f);
SoC->addFuzzySet(m);
SoC->addFuzzySet(e);
fuzzy->addFuzzyInput(SoC);

//Instantiation de fuzzyOutput object
FuzzyOutput *Pfcs = new FuzzyOutput(1);

Pfcs->addFuzzySet(NUL);
Pfcs->addFuzzySet(Fa);
Pfcs->addFuzzySet(Mo);
Pfcs->addFuzzySet(EI);
fuzzy->addFuzzyOutput(Pfcs);

// Contruction FuzzyRule

// Première règle
FuzzyRuleAntecedent *ifPdemNAndSoCAF = new FuzzyRuleAntecedent();
ifPdemNAndSoCAF->joinWithAND(N, AF);
FuzzyRuleConsequent *thenPfcs1 = new FuzzyRuleConsequent();
thenPfcs1->addOutput(NUL);
FuzzyRule *fuzzyRule1 = new FuzzyRule(1, ifPdemNAndSoCAF, thenPfcs1);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule1);

// deuxième règle
FuzzyRuleAntecedent *ifPdemNAndSoCf = new FuzzyRuleAntecedent();
ifPdemNAndSoCf->joinWithAND(N, f);
FuzzyRuleConsequent *thenPfcs2 = new FuzzyRuleConsequent();
thenPfcs2->addOutput(NUL);
FuzzyRule *fuzzyRule2 = new FuzzyRule(2, ifPdemNAndSoCf, thenPfcs2);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule2);

// troisième règle
FuzzyRuleAntecedent *ifPdemNAndSoCm = new FuzzyRuleAntecedent();
ifPdemNAndSoCm->joinWithAND(N, m);
FuzzyRuleConsequent *thenPfcs3 = new FuzzyRuleConsequent();
thenPfcs3->addOutput(NUL);
FuzzyRule *fuzzyRule3 = new FuzzyRule(3, ifPdemNAndSoCm, thenPfcs3);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule3);

// quatrième règle
FuzzyRuleAntecedent *ifPdemNAndSoCe = new FuzzyRuleAntecedent();
ifPdemNAndSoCe->joinWithAND(N, e);
FuzzyRuleConsequent *thenPfcs4 = new FuzzyRuleConsequent();
thenPfcs4->addOutput(NUL);
FuzzyRule *fuzzyRule4 = new FuzzyRule(4, ifPdemNAndSoCe, thenPfcs4);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule4);

```

```

// Cinquième règle
FuzzyRuleAntecedent *ifPdemFAndSoCAF = new FuzzyRuleAntecedent();
ifPdemFAndSoCAF->joinWithAND(F, AF);
FuzzyRuleConsequent *thenPfcs5 = new FuzzyRuleConsequent();
thenPfcs5->addOutput(EI);
    FuzzyRule *fuzzyRule5 = new FuzzyRule(5, ifPdemFAndSoCAF, thenPfcs5);
    fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule5);

// sixième règle
FuzzyRuleAntecedent *ifPdemFAndSoCf = new FuzzyRuleAntecedent();
ifPdemFAndSoCf->joinWithAND(F, f);
FuzzyRuleConsequent *thenPfcs6 = new FuzzyRuleConsequent();
thenPfcs6->addOutput(Mo);
    FuzzyRule *fuzzyRule6 = new FuzzyRule(6, ifPdemFAndSoCf, thenPfcs6);
    fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule6);

// septième règle
FuzzyRuleAntecedent *ifPdemFAndSoCm = new FuzzyRuleAntecedent();
ifPdemFAndSoCm->joinWithAND(F, m);
FuzzyRuleConsequent *thenPfcs7 = new FuzzyRuleConsequent();
thenPfcs7->addOutput(Fa);
    FuzzyRule *fuzzyRule7 = new FuzzyRule(7, ifPdemFAndSoCm, thenPfcs7);
    fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule7);

// huitième règle
FuzzyRuleAntecedent *ifPdemFAndSoCe = new FuzzyRuleAntecedent();
ifPdemFAndSoCe->joinWithAND(F, e);
FuzzyRuleConsequent *thenPfcs8 = new FuzzyRuleConsequent();
thenPfcs8->addOutput(NUL);
    FuzzyRule *fuzzyRule8 = new FuzzyRule(8, ifPdemFAndSoCe, thenPfcs8);
    fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule8);

// neuvième règle
FuzzyRuleAntecedent *ifPdemMAndSoCAF = new FuzzyRuleAntecedent();
ifPdemMAndSoCAF->joinWithAND(M, AF);
FuzzyRuleConsequent *thenPfcs9 = new FuzzyRuleConsequent();
thenPfcs9->addOutput(EI);
    FuzzyRule *fuzzyRule9 = new FuzzyRule(9, ifPdemMAndSoCAF, thenPfcs9);
    fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule9);

// Dixième règle
FuzzyRuleAntecedent *ifPdemMAndSoCf = new FuzzyRuleAntecedent();
ifPdemMAndSoCf->joinWithAND(M, f);
FuzzyRuleConsequent *thenPfcs10 = new FuzzyRuleConsequent();
thenPfcs10->addOutput(Mo);
    FuzzyRule *fuzzyRule10 = new FuzzyRule(10, ifPdemMAndSoCf, thenPfcs10);
    fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule10);

// Onzième règle

```



```

FuzzyRuleAntecedent *ifPdemMAndSoCm = new FuzzyRuleAntecedent();
ifPdemMAndSoCm->joinWithAND(M, m);
FuzzyRuleConsequent *thenPfcs11 = new FuzzyRuleConsequent();
thenPfcs11->addOutput(Fa);
    FuzzyRule *fuzzyRule11 = new FuzzyRule(11, ifPdemMAndSoCm, thenPfcs11);
    fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule11);

// Douzième règle
FuzzyRuleAntecedent *ifPdemMAndSoCe = new FuzzyRuleAntecedent();
ifPdemMAndSoCe->joinWithAND(M, e);
FuzzyRuleConsequent *thenPfcs12 = new FuzzyRuleConsequent();
thenPfcs12->addOutput(Fa);
    FuzzyRule *fuzzyRule12 = new FuzzyRule(12, ifPdemMAndSoCe, thenPfcs12);
    fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule12);

// Treizième règle
FuzzyRuleAntecedent *ifPdemEAndSoCAF = new FuzzyRuleAntecedent();
ifPdemEAndSoCAF->joinWithAND(E, AF);
FuzzyRuleConsequent *thenPfcs13 = new FuzzyRuleConsequent();
thenPfcs13->addOutput(EI);
    FuzzyRule *fuzzyRule13 = new FuzzyRule(13, ifPdemEAndSoCAF, thenPfcs13);
    fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule13);

// Quatorzième règle
FuzzyRuleAntecedent *ifPdemEAndSoCf = new FuzzyRuleAntecedent();
ifPdemEAndSoCf->joinWithAND(E, f);
FuzzyRuleConsequent *thenPfcs14 = new FuzzyRuleConsequent();
thenPfcs14->addOutput(EI);
    FuzzyRule *fuzzyRule14 = new FuzzyRule(14, ifPdemEAndSoCf, thenPfcs14);
    fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule14);

// quinzième règle
FuzzyRuleAntecedent *ifPdemEAndSoCm = new FuzzyRuleAntecedent();
ifPdemEAndSoCm->joinWithAND(E, m);
FuzzyRuleConsequent *thenPfcs15 = new FuzzyRuleConsequent();
thenPfcs15->addOutput(Mo);
    FuzzyRule *fuzzyRule15 = new FuzzyRule(15, ifPdemEAndSoCm, thenPfcs15);
    fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule15);

// seizième règle
FuzzyRuleAntecedent *ifPdemEAndSoCe = new FuzzyRuleAntecedent();
ifPdemEAndSoCe->joinWithAND(E, e);
FuzzyRuleConsequent *thenPfcs16 = new FuzzyRuleConsequent();
thenPfcs16->addOutput(Fa);
    FuzzyRule *fuzzyRule16 = new FuzzyRule(16, ifPdemEAndSoCe, thenPfcs16);
    fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule16);
}

```

```

void loop() {

    // Lire la valeur du potentiomètre
    int input1 = analogRead(A0);
    int input2 = analogRead(A1);
    int inputnew1 = map(input1, 0,1023, -60,60);
    int inputnew2 = map(input2, 0,1023, 0,100);

    // put your main code here, to run repeatedly:
    Serial.println(analogRead(A0));
    delay(1000);
    Serial.println(analogRead(A1));
    delay(200);

    Serial.println("\n\n\nEntrance: ");
    Serial.print("\t\t\tPdem: ");
    Serial.print(inputnew1);
    Serial.print(", SoC: ");
    Serial.print(inputnew2);
    fuzzy->setInput(1, inputnew1);
    fuzzy->setInput(2, inputnew2);

    fuzzy->fuzzify();

    Serial.println("Input: ");
    Serial.print("\tPdem: N-> ");
    Serial.print(N->getPertinence());
    Serial.print(", F-> ");
    Serial.print(F->getPertinence());
    Serial.print(", M-> ");
    Serial.println(M->getPertinence());
    Serial.print(", E-> ");
    Serial.println(E->getPertinence());

    Serial.print("\tSoC: AF-> ");
    Serial.print(AF->getPertinence());
    Serial.print(", f-> ");
    Serial.print(f->getPertinence());
    Serial.print(", m-> ");
    Serial.print(m->getPertinence());
    Serial.print(", e-> ");
    Serial.println(e->getPertinence());

    float output1 = fuzzy->defuzzify(1);

    Serial.println("Output: ");
    Serial.print("\tPfcs: NUL-> ");

```

```
Serial.print(NUL->getPertinence());  
Serial.print(", Fa-> ");  
Serial.print(Fa->getPertinence());  
Serial.print(", Mo-> ");  
Serial.println(Mo->getPertinence());  
Serial.print(", El-> ");  
Serial.println(El->getPertinence());  
  
Serial.println("Result: ");  
Serial.print("\t\t\tPfc: ");  
Serial.print(output1);  
  
// wait 12 seconds  
delay(12000);  
}
```


Résumé

La gestion de l'énergie des véhicules électriques hybrides (VEH) a fait l'objet d'un grand effort scientifique dans les dernières années. En outre, la puissance demandée dans un (VEH) doit être gérée en ligne en respectant les contraintes de charge et d'énergie disponible. Nous nous intéressons en particulier dans notre travail à la gestion de l'énergie d'un véhicule hybride, le problème est la distribution instantanée de la puissance électrique demandée à travers les deux sources d'énergie en optimisant autant que possible la consommation globale d'hydrogène. Nous commençons dans une première phase d'étude sur les généralités et problématique de gestion d'énergie pour les systèmes multi-source en classifiant les différentes architectures des véhicules électriques hybrides, aussi en expliquant notre choix des sources. Dans la deuxième phase d'étude, des stratégies de gestion d'énergie qui s'appuient sur des techniques de gestion fréquentielle ont été citées, ensuite nous présentons et développons une méthode de gestion d'énergie en ligne basée sur les règles floues. Cette stratégie conduit la pile à combustible à fonctionner aux points de meilleur rendement. Il a été vérifié que si cette méthode est appliquée en ligne sur un profil inconnu, la consommation obtenue est quasi-optimale. Enfin nous avons pu accomplir la réalisation pratique de ce projet, programmé sur le logiciel arduino IDE, et les résultats obtenus sont satisfaisants.