

PA028/13A

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Ecole National Polytechnique

Département d'Automatique



Projet de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur en Automatique

Thème :

**GESTION DE L'ÉNERGIE ET OPTIMISATION
DU FONCTIONNEMENT
D'UN VÉHICULE ÉLECTRIQUE HYBRIDE.**

Réalisé par :

Nour-eddine HADDADI
Mohamed Adlane MAGHENEM

Proposé et dirigé par :

Pr. M.S. BOUCHERIT
Dr. K. BENMANSOUR

JUIN 2013

Résumé:

Cette étude se divise en deux parties indépendantes: la première partie traite la modélisation et la simulation d'un véhicule électrique hybride ayant comme source d'énergie principale un moteur thermique et une machine électrique comme source secondaire, le couplage des deux sources indique une architecture de type « parallèle simple arbre », la simulation du prototype vise à minimiser sa consommation en appliquant un ensemble de stratégies dites «stratégies de gestion de l'énergie » permettant d'optimiser la répartition de la puissance entre les deux sources. La deuxième partie portera une perspective de réalisation pratique d'un quad hybride dans laquelle la caractérisation des éléments nécessaires à la réalisation ainsi que l'architecture globale du prototype sont détaillées.

Mots clés :

Véhicule électrique hybrides, Simulation, Modélisation, Stratégie de gestion de l'énergie, Quad.

ملخص :

تنقسم هذه الدراسة إلى جزئين مستقلين عن بعضهما البعض: يعنى الجزء الأول بدراسة نمذجة و محاكاة سيارة كهربائية هجينة, حيث يتمثل المصدر الأساسي للطاقة في محرك حراري, أما المصدر لثاني فهو عبارة عن محرك كهربائي, طريقة ترابط المصدرين تنبئ عن هندسة من النوع توازي أحادي الجذع, الهدف المنشود من محاكاة النموذج هو التقليل من كمية الوقود المستهلك خلال شوط معين, و ذلك بتطبيق جملة من الخطط و التي تعرف بخطط تسيير الطاقة, والتي تفرض توزيعا طاويا متقنا بين المصدرين الشيء الذي يسمح بتوفير أكبر كمية ممكنة من الوقود.

أما الجزء الثاني فيحمل اقتراح إنجاز سيارة من نوع كواد هجي, إذ يتضمّن الجزء تشخيصا تاما لكافة العناصر الداخلة في تشكيل النموذج التجريبي إضافة إلى الهندسة الإجمالية لتكوين عناصره.

كلمات مفتاحية :

السيارة الكهربائية الهجينة, المحاكاة, النمذجة, استراتيجية تسيير الطاقة, كواد.

Summary:

This study is divided into two independent parts: The first part deals with the modeling and simulation of a hybrid electric vehicle having as main source of energy, a thermal motor and an electric machine as a secondary source, the coupling of the two sources indicates the « parallel simple tree » architecture, the prototype simulation aims to minimize its consumption by applying what we call "Energy Management Strategies " to manage the distribution of power between the two sources. The second part will cover a practical realization perspective of a hybrid quad, in which the necessary elements characterization is achieved and the overall architecture of the prototype is described.

Key Words: Hybrid electric vehicle, Simulation, Modeling, Energy Management Strategy, Quad.

Dédicace :

Nous dédions se travail à :
nos familles,
nos amis,
et à la famille de l'école nationale polytechnique.

Remerciement :

Nous tenons à remercier Monsieur MS. BOUCHRIT et Monsieur K. BENMANSOUR, encadreurs de ce travail, pour leurs aides et leurs encouragements ainsi que leurs précieux conseils. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.

Nous remercions aussi tous les Enseignants du Laboratoire de Commande des Processus pour leur disponibilité, leurs conseils et leurs efforts.

Sommaire

La liste des symboles	7
Les abréviations	7
Introduction générale	9
I Présentation des véhicules électrique hybrides :	12
I.1 Contribution du secteur de transport à la pollution	12
I.2 Conséquences liées à cette croissance	12
I.3 Enjeux et perspectives liés au trafic routier	13
I.4 Les progrès technologiques envisagées	14
I.4.1 Amélioration de la technologie à essence	14
I.4.2 Amélioration de la technologie diesel	15
I.5 Insuffisances de la motorisation classique	16
I.6 La motorisation E et EH concepts de progrès et d'avenir	16
I.6.1 La motorisation électrique	16
I.6.2 La motorisation à la pile à combustible	16
I.6.3 La motorisation Hybride	17
I.7 Définitions des VEHS	18
I.8 Les modes de fonctionnement d'un VEH	18
I.9 Classification des VEHS	19
I.9.1 Le taux d'hybridation des VEHS	19
I.9.2 L'architecture des VEHS	21
I.10 Les composants technologiques des VEHS	26
I.10.1 La source primaire	26
I.10.2 Le moteur électrique	27
I.10.3 Les Batteries :	28
I.10.4 La transmission :	30
I.10.5 Les convertisseurs électroniques	31
I.11 Conclusion	33
II Modélisation des VEHS	34
II.1 Modèles et outils de simulation	34
II.2 Modèle de commande	35
II.2.1 Le moteur thermique	37
II.2.2 La machine électrique :	38
II.2.3 La batterie	38

II.2.4	La boîte de vitesses . . . . .	.39
II.2.5	Le réducteur de vitesse . . . . .	.40
II.2.6	L’embrayage . . . . .	.41
II.2.7	Le modèle dynamique du véhicule . . . . .	.42
II.2.8	Données numériques . . . . .	.43
II.3	Simulation du modèle dynamique . . . . .	.44
II.4	Formulation du problème d’optimisation . . . . .	.44
II.4.1	Le critère . . . . .	.45
II.4.2	L’équation d’état . . . . .	.45
II.4.3	Les contraintes égalités . . . . .	.46
II.4.4	Les contraintes inégalités . . . . .	.46
II.4.5	Les conditions aux limites . . . . .	.46
II.4.6	Réécriture du problème . . . . .	.47
II.5	Conclusion . . . . .	.48
III	Les stratégies de gestion off ligne	49
III.1	Etat de l’art . . . . .	.49
III.1.1	Classification des stratégies . . . . .	.50
III.1.2	Stratégies hors ligne et cycles normalisés . . . . .	.50
III.2	Application des stratégies <i>off ligne</i> . . . . .	.52
III.2.1	Le calcul des variations . . . . .	.52
III.2.2	La programmation dynamique . . . . .	.55
III.3	Conclusion . . . . .	.60
Conclusion générale et perspectives		61
Références bibliographiques		62

La liste des symboles

a et b : Coefficients de résistance au roulement.

C_e : Couple électrique en Nm .

C_{emax} : Couple électrique maximum en Nm .

C_{emin} : Couple électrique minimum en Nm .

C_{eopti} : Couple électrique optimal en Nm .

C_r : Couple aux roues en Nm .

C_{res} : Couple résistant en Nm .

C_{th} : Couple thermique en Nm .

C_{thmax} : Couple thermique maximum en Nm .

C_{thmin} : Couple thermique minimum (résistant) en Nm .

C_{thopti} : Couple thermique optimal (résistant) en Nm .

C_x : coefficient de trainée.

$D(W_{th}, C_{th})$: Débit de carburant nécessaire pour produire le couple C_{th} au régime moteur W_{th} en g/s .

Dx_{desire} : Variation désirée de l'état de charge en Ah .

Dx_{global} : Variation globale de l'état charge en Ah .

E_b : Tension à vide de la batterie en V .

EMB : Etat de l'embrayage : $\{0,1\} = \{\text{ouvert, fermé}\}$.

F_{aero} : Force résistante aérodynamique en N .

F_{frein} : Force du frein mécanique en N .

F_{grav} : Force résistante de la gravité en N .

F_{res} : Somme des forces résistantes en N .

F_{roul} : Force résistante gravité en N .

F_{trac} : Forces de traction du véhicule en N .

g : Accélération de la gravité en m/s^2 .

H : L'Hamiltonien.

I_b : Courant batterie en A .

i, j : Numéro d'échantillon.

J_{roue} : Inertie à la roue en kg/m^2 .

J_{th} : Inertie du moteur thermique en kg/m^2 .

k : Numéro du rapport de boite.

m_{GMP} : masse inertielle de tous les éléments en rotation du groupe motopropulseur y compris les roues en kg .

m_v : Masse du véhicule sans tenir compte des inerties des parties tournantes en kg .

m_{vt} : Masse totale y compris les inerties des parties tournantes en kg .

N_{bv} : Nombre de rapports disponibles.

P_{AUX} : Puissance des auxiliaires électriques en W .

P_b : Puissance batterie (pertes résistives et faradiques comprises) en W .

$P_e(C_e, W_e)$: Puissance perdue dans l'ensemble (machine électrique+convertisseur) en w .

R : Rayon du pneu en m .

R_b : Résistance interne en ohm .

$R(k)$: rapport de réduction du k ième numéro de rapport.

S_f : surface frontale du véhicule en m^2 .

SOC : Etat de charge(State Of Charge) en %.

T_e : Periode d'échantillonnage en s .

t_f : Durée du profil de vitesse en s .

U_b : Tension de la batterie en V .

$u(i)$: Vecteur commande à $t = i.T_e$.

$U(w)$: l'ensemble des commandes admissibles.

V_r : Vitesse véhicule en m/s .

W_e : Régime électrique en rad/s .

W_{emax} : Régime électrique maximum en rad/s .

W_{emin} : Régime électrique minimum en rad/s .

$w(i)$: Conditions de roulage du véhicule.

W_r : Régime de la roue en rad/s .

W_{th} : Régime thermique en rad/s .

W_{thmax} : Régime thermique maximum en rad/s .

W_{thmin} : Régime thermique minimum (ralenti) en rad/s .

X_{maxi} : Etat de charge maximal en Ah .

X_{mini} : Etat de charge minimal en Ah .

θ : Etat du moteur thermique : $\{0,1\}=\{\text{éteint,allumé}\}$.

$\eta_{bv}(k)$: rendement du k ième numéro de rapport.

ρ : rapport de réduction du réducteur.

η_{red} : Rendement du réducteur.

ρ_{air} : masse volumique de l'air en kg/m^3 .

λ : Facteur de Lagrange.

α : Pente de la route en rad.

Les Abréviations

- AUX** : Auxiliaires électriques.
BAT : Batterie.
BV : Boite de vitesse.
EMB : Embrayage.
GMP : Groupe Moto-Propulseur.
MCI : Moteur à combustion interne.
ME : Machine électrique.
VE : Véhicule électrique.
VEH : Véhicule hybride.

Introduction générale

Le secteur du transport est entrain de connaitre une croissance considérable et incontournable, alors qu'il constitue un facteur irréfutable et une cause majeure du danger actuel qui menace la vie sur terre surnommé : *la pollution atmosphérique*.

En effet, la réaction de combustion se faisant à l'intérieur des moteurs thermiques conventionnels, pour permettre la propulsion des véhicules, s'accompagne toutefois avec le rejet d'un certain nombre de molécules dont la nuisance se mesure selon deux échelles [1] :

1. *Emissions à l'échelle locale* : limitées à un espace géographique précis (environnement immédiat : rue, quartier, ville, etc). Ces polluants affectent directement les habitants, la végétation, l'eau, etc. Parmi les polluants impliqués, on cite par exemple les oxydes d'azote NO_x , etc.
2. *Emissions à l'échelle globale* : l'étendue géographique considérée est plus vaste et peut aller d'un ensemble de pays et s'étend jusqu'à l'ensemble de la planète. C'est le cas des gaz dits à *effet de serre* qui sont à l'origine des changements climatiques et du réchauffement de la planète. Le dioxyde de carbone CO_2 est considéré comme le plus important gaz responsable de l'effet de serre.

Rajoutant à cela le fait que le secteur du transport fut le plus exigeant en termes d'énergie fossile en l'occurrence le pétrole, qui constitue une des bases sur les quelles repose l'essor de notre civilisation et dont le manque excessif et sans prévoir d'alternative équivalente conduira certainement à la déstabilisation de notre mode de vie.

Devant cette pénurie d'énergie à venir et la crise écologique actuelle un certain nombre de dispositifs à la fois technologiques et administratifs est mis en place afin de contrecarrer ces dangers :

- L'application d'un certain nombre de normes de plus en plus sévères et restrictives (la taxe carbone, l'interdiction de la circulation des véhicules très polluants).
- L'amélioration des technologies de motorisation conventionnelle, dans l'optique de diminuer leur consommation en carburant, ainsi que d'éliminer au mieux leurs déchets toxiques. Mais souvent ces améliorations sont à la fois coûteuses et loin de correspondre aux spécifications décrites par les normes imposées.
- L'utilisation des nouveaux concepts de motorisations, dites à *énergie propre*, ou motorisation avec *zéro émission*, parmi lesquelles figure la motorisation électrique, seulement cette solution a été rapidement épargnée en raison des problèmes liés à l'utilisation des batteries dont les inconvénients sont très pesants (faible autonomie, le surpoids, le cout, le recyclage).

Une autre initiative consiste en l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur d'énergie pour des moteurs notés : *moteurs à hydrogène*, mais ce concept n'a pu voire le jour en raison du manque de maturité des technologies nécessaires à la production de l'hydrogène, son stockage et sa distribution, son usage à grande échelle ne peut être envisagé qu'à long

terme.

En attendant la maturité des technologies *zéro émissions* pour le transport, l'hybridation de la source conventionnelle avec une seconde source propre s'avère comme l'alternative la plus prometteuse à court et moyen terme et c'est cette solution qui fera l'objet de cette étude.

En effet, le premier chapitre, évoquera en détail le contexte d'apparition des véhicules hybrides allant du *pourquoi* au *comment*, le deuxième chapitre contiendra une description des véhicules hybrides de part leurs définitions, leurs architectures, leurs modes de fonctionnements et la technologie des composants constituant leur chaîne de traction.

Sachant que l'adjonction d'une nouvelle source d'énergie ajoute un degré de liberté supplémentaire exigeant une certaine maîtrise pour faire fonctionner le véhicule d'une manière efficace. Cette gestion de l'énergie à bord d'un VEH nécessite l'application d'un certain nombre de stratégies de gestion tenant à satisfaire un cahier de charge donné (la minimisation de la consommation en carburant, L'élimination des émissions toxiques, le contrôle de la température des catalyseurs, etc).

Ces stratégies s'arrêteront pour notre cas au stade de la simulation, ainsi le troisième chapitre tiendra compte des différents outils de modélisation et de simulation des véhicules hybrides, puis un état de l'art sur les différents algorithmes de gestions et une application d'un certain nombre de stratégies hors ligne feront l'objet du quatrième chapitre, quant au cinquième chapitre, il portera sur la description ainsi que l'évaluation d'un certain nombre de stratégies de type temps réel. En, effet ces techniques de gestion s'appliqueront sur le modèle de commande d'un prototype réel dont les caractéristiques sont reprises de la littérature, dans le but d'évaluer le minimum de consommation possible pour chaque approche.

Le sixième chapitre portera une perspective de réalisation d'un quad hybride à partir de son homologue conventionnel, muni d'un moteur thermique, et de deux roues ayant chacune un moteur électrique intégré. Une caractérisation des éléments nécessaires à la réalisation de la chaîne hybride sera détaillée dans ce chapitre, ainsi que l'architecture globale du prototype annoncé.

Enfin, le projet s'achèvera par une série de perspectives et une conclusion générale.

Chapitre I

Présentation des véhicules électrique hybrides :

Actuellement, notre planète se trouve menacée par un réchauffement qui entraînant des changements de climat avec des conséquences néfastes sur la vie. Ce désastre est lié à l'augmentation rapide des gaz à effet de serre. Ces gaz proviennent de presque toutes les activités humaines mais leurs sources principales sont les industries, le chauffage résidentiel et le transport. Car le gaz le plus responsable de l'effet de serre, de part ses quantités énormes présentes dans l'atmosphère, est le dioxyde de carbone (CO_2) rejeté lors de la combustion des combustibles fossiles dont le pétrole figure en tête.

I.1 Contribution du secteur de transport à la pollution

Le secteur de transport connaît une croissance moyenne de 2% par an. Concernant le transport routier, il consomme, à lui seul, 1,7 GTEP (Gigatonne équivalent de pétrole) en énergie dont 58,6% d'essence, 37,7% de gazole et le reste, soit 3,7%, concerne les carburants alternatifs dont le gaz naturel, le GPL et les biocarburants qui ne représentent que 1,5%. Selon l'étude *The Sustainable Mobility Projet* réalisée par WBCSD (*World Business Council for Sustainability Development*) en 2004, la demande en transport routier connaît une forte croissance que ce soit pour les passagers ou les marchandises.

L'étude prévoit une augmentation de la demande de transport routier de 62% pour les passagers (calculée en passagers kilomètres) et de 100% pour les marchandises (calculée en tonnes kilomètres) dans les 30 prochaines années et elle sera doublée en 2050. Les régions qui connaîtront une large augmentation sont l'Afrique, l'Amérique Latine, l'Inde et la Chine. Les zones comme l'Europe et l'Amérique du nord connaissent une demande relativement stable [2].

I.2 Conséquences liées à cette croissance

Cette croissance du trafic routier ne manque pas de conséquences désagréables :

1. *L'inefficacité des moyens de transport* : La congestion du trafic rend inefficace le moyen de transport et limite la compétitivité. Les centres urbains sont les plus touchés et les grands axes routiers deviennent impraticables [3].

2. *La mauvaise qualité de l'air* : En ce qui concerne les polluants locaux, le transport contribue essentiellement aux oxydes d'azote (NO_x) et au monoxyde de carbone (CO). En dépit des baisses de consommation et des émissions polluantes des véhicules, le transport routier reste un contributeur important de la pollution : 50% des oxydes d'azote et de monoxydes de carbone, 36% des particules lui sont imputables.
Les dommages sur l'environnement, causés par les émissions issues du transport sont surtout sensibles en zone urbaine, car c'est dans les villes que l'on observe une présence simultanée d'un grand nombre de sources de pollution (voitures) et d'un grand nombre de récepteurs (habitants et bâtiments). Une étude visant l'évaluation des coûts externes des secteurs de l'énergie et du transport a été réalisée dans le cadre du projet européen Externe et a mis en évidence l'importance des dommages associés à la pollution atmosphérique d'origine automobile. Par exemple, l'impact du transport dans la Région de Bruxelles-Capitale a été évalué à 774 millions d'Euros par an.
3. *Le dioxyde de carbone* : L'augmentation de la demande de transport va de paire avec l'augmentation de la consommation des carburants principalement le pétrole et par conséquent une augmentation des émissions de CO_2 . Le secteur du transport représente à lui seul 28% des émissions de CO_2 dans l'Union Européenne dont 84% revient au transport routier. L'accroissement des émissions de dioxyde de carbone constitue une menace pour le réchauffement global de la planète.
4. *L'insécurité routière* : Bien que des progrès sensibles soient enregistrés en matière de sécurité, la route demeure de loin le moyen de transport le plus dangereux. Le coût social et économique de ce phénomène est énorme : 45.000 morts et plus de 1,3 million de blessés par an à l'échelle de l'Union Européenne [4].
5. *La déplétion des ressources de pétrole* : Le pétrole représente 35% de la demande mondiale de l'énergie primaire. La consommation mondiale de pétrole était de 83 millions de barils/jour en 2005 (contre 69,5 en 1995). L'OPEP (Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole) assure 41,7% de la production totale. D'après l'Association Internationale de l'Energie (AIE), les réserves de pétrole exploitable s'élèveraient à 130 milliards de tonnes (Gtep) soit l'équivalent de 13 années de consommation mondiale d'énergie primaire. Actuellement, la planète consomme 3,9 Gtep de pétrole par an dont 50% pour les transports (diesel, essence, LPG, kérosène...). Au rythme actuel, les réserves mondiales prouvées peuvent couvrir environ 40 années de production, mais c'est sans compter sur une augmentation vraisemblable de la demande tandis que la découverte de nouveaux gisements est de plus en plus difficile [5].

I.3 Enjeux et perspectives liés au trafic routier

En résumé, les enjeux liés au transport routier auxquels nous devons faire face sont les trois suivants :

1. La diversification des sources d'énergie pour se libérer de cette dépendance au pétrole qui n'est pas une source inépuisable et s'orienter vers d'autres sources plus propres telles que les biocarburants, l'électricité ou l'hydrogène.
2. La réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) surtout le CO_2 .
3. La réduction des émissions polluantes réglementées (HC, NO_x, CO , particules) et non réglementées, des nuisances comme le bruit et l'encombrement et les accidents de la route.

Les solutions à tous ces problèmes s'orientent sur trois axes : la technologie, la planification et le comportement individuel.

La technologie : concerne non seulement la motorisation mais également la communication (transfert d'informations entre véhicules et infrastructures).

La planification : concerne la gestion des différents modes de transports.

Le comportement individuel : concerne le choix et l'usage du véhicule.

L'amélioration de la motorisation est susceptible d'apporter plus de progrès en matière d'émissions de CO_2 et des polluants. Les moteurs (essence, diesel) et les carburants conventionnels constituent le pilier de la motorisation. C'est pour cette raison que le transport routier et surtout la voiture particulière fait objet d'une forte pression de la part de la législation en vue de réduire les émissions polluantes.

Les normes d'émissions deviennent de plus en plus sévères et leur évolution montre une tendance à la convergence des limites d'émissions pour les deux types de moteurs.

En effet, les limites d'émissions de NO_x pour le diesel ont fortement diminuées depuis 2000 et pourront atteindre le même niveau que celles autorisées pour l'essence en 2013. Le moteur diesel devra diminuer respectivement ses émissions de NO_x et de particules, de 85% et de 90%, par rapport à l'année 2000 [6].

Concernant les émissions de CO_2 , la situation européenne montre, d'une part, l'engagement de l'ACEA (Association des Constructeurs Automobile Européens) de réduire les émissions de CO_2 à moins de 120 g/km en 2012 ; d'autre part, en raison des objectifs arrêtés lors de la conférence de KYOTO, la proposition du parlement européen consistait à passer à 120g/km en 2006 pour atteindre 90g/km en 2010.

Mais au regard de la situation actuelle, la moyenne des émissions de CO_2 des voitures diesel en Europe tourne autour de 150g/km et 170g/km pour les essences. On est donc loin des objectifs de KYOTO [6].

I.4 Les progrès technologiques envisagés

Notons que de gros efforts doivent donc être consentis pour réduire encore les émissions de NO_x et de particules pour le moteur diesel et simultanément pour améliorer le rendement (émissions de CO_2) pour le moteur à essence avec un coût de plus en plus élevé.

I.4.1 Amélioration de la technologie à essence

En effet, pour le moteur à essence, les niveaux d'émissions des polluants sont généralement très bas grâce aux systèmes de post-traitement basés sur des catalyseurs à 3 voies qui éliminent simultanément le CO , les HC et les NO_x . Toutefois, ces systèmes restent inefficaces au démarrage à froid et génère des pics d'émissions (70 à 85% des émissions de CO ont lieu à ce moment).

Pour pallier ce problème, les recherches s'orientent vers des techniques d'amorçage du catalyseur à froid mais une solution commerciale n'est pas pour demain.

Le plus grand défi du moteur à essence réside dans la réduction de ses émissions de CO_2 qui sont de 20% plus élevées par rapport au diesel. Pour y parvenir, certaines voies ont été envisagées d'autres sont en cours de développement. L'injection directe et la combustion stratifiée pour moteur à essence permet d'atteindre potentiellement des gains de 10 à 15% sur le cycle

NDEC mais cette technique n'est rentable que lorsque le moteur fonctionne à faible régime et en mélange pauvre et, l'excès d'air combiné à de fortes températures entraîne la production, par réaction chimique, des oxydes d'azotes. Le catalyseur classique n'est donc plus efficace et il faut recourir aux catalyseurs permettant de piéger ces oxydes pour les réduire ensuite, ce qui conduit à une surconsommation du moteur lors des phases de déstockage de ces NO_x , réduisant ainsi les gains obtenus.

Le système à distribution variable combiné au downsizing basé sur la suralimentation par turbocompresseur est une technologie en développement qui permet d'envisager des gains entre 7 et 13%. Mais l'augmentation de température des gaz d'admission augmente le risque de cognement (auto allumage) et de formation des NO_x . Ce qui nécessite l'utilisation d'un échangeur de chaleur au risque de l'augmentation du coût du système et de l'énergie consommée atténuant ainsi les gains obtenus sur la consommation.

Enfin de nouveaux procédés de combustion CAI (Controlled Auto Ignition) ou HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) sont étudiés et font entrevoir des gains de consommation de 10 à 15%.

I.4.2 Amélioration de la technologie diesel

La technologie diesel est très éprouvée et le rendement du moteur diesel est plus élevé que celui des moteurs à essence. L'injection directe à haute pression combinée à la suralimentation permet une diminution de la consommation de 15 à 20%, ce qui entraîne une diminution d'émissions de CO_2 . L'optimisation de la combustion, le système EGR (Exhaust gaz recirculation) et la réduction de la taille du moteur (downsizing) augmentent encore le rendement. Toutefois, pour ce qui concerne les progrès à venir sur le diesel, il faut noter des émissions en oxydes d'azote et en particules qui restent importantes relativement au moteur à essence. Ce fait est en quelque sorte reconnu par la réglementation actuelle avec des seuils d'émission de NO_x supérieurs à ceux autorisés pour l'essence. Le *post-processing* des gaz d'échappement pour le diesel (Catalyseurs 4 voies, filtres à particule, Selective Catalytic Reduction (SCR), continuously regenerating trap, etc.) contribuera à la réduction des émissions polluantes avec la généralisation du filtre à particules.

Mais le filtre à particules est un système complexe et coûteux qui nécessite un carburant sans soufre et entraîne une surconsommation de l'ordre de 2 à 5%. De plus, le système EGR est accompagné par un refroidisseur qui abaisse la température de combustion et réduit ainsi la formation des NO_x mais la diminution de la température de combustion favorise l'augmentation du monoxyde de carbone et d'autres imbrûlés.

Notons également que le développement des systèmes de contrôle de la combustion (modèles embarqués, capteurs/actionneurs) pour réduire les émissions polluantes mais ce sont des systèmes de plus en plus complexes et coûteux. Les coefficients de résistance aérodynamique et de frottement des véhicules ont aussi diminués grâce au nouveau design. Mais en même temps, les consommateurs continuent à exiger davantage de sécurité et de confort, ce qui se traduit en général par une augmentation du poids des véhicules défavorable à la consommation.

L'usage de carburants alternatifs (CNG, LPG, Méthanol, H_2 ...) a été aussi envisagé mais leur diffusion reste controversée.

I.5 Insuffisances de la motorisation classique

De ce qui précède, le grand constat est que malgré le progrès technologies envisageables pour améliorer encore le rendement comme le HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) pour le diesel et le CIA (Combustion Control Auto Ignition) pour les essences, les technologies traditionnelles semblent avoir atteint une asymptote et ne pourront peut être plus répondre aux nouvelles exigences. Car, par exemple, il s'installe par exemple un conflit entre les techniques d'optimisation de la combustion et la réduction des émissions de polluants locaux.

Les nouveaux systèmes d'optimisation de la combustion favorisent parfois une augmentation des émissions de certains polluants locaux nécessitant des systèmes de dépollution supplémentaires. L'ensemble devient complexe et consomme plus d'énergie réduisant ainsi les gains espérés.

I.6 La motorisation E et EH concepts de progrès et d'avenir

D'autres solutions ont été envisagées et certaines ont déjà porté leur fruit : il s'agit des véhicules électriques et hybrides. Un des exemples les plus récents est la nouvelle Toyota Prius qui a déjà marqué des points en émettant moins de 120g/km de CO_2 .

I.6.1 La motorisation électrique

Le véhicule électrique est théoriquement la meilleure solution : aucune émission directe de CO_2 ni de polluants avec un bruit très réduit. De plus, ce véhicule se prête bien à la diversification des sources d'énergies car, l'électricité qu'il consomme n'est pas une source mais un vecteur d'énergie qui peut donc être produit à partir de plusieurs sources dont les énergies renouvelables.

Le principal problème du véhicule électrique est lié aux batteries, en effet l'autonomie reste faible (moins de 200km) et toute tentative d'amélioration de la capacité de stockage d'énergie entraîne une augmentation du poids (réduisant ainsi les performances du véhicule) et du coût des batteries. Les meilleures batteries en termes d'énergie stockable sont les batteries au lithium ion mais elles restent très chères. Il n'y a pas d'amélioration spectaculaire envisageable dans un proche avenir.

I.6.2 La motorisation à la pile à combustible

La pile à combustible constitue également une solution intéressante, car elle est une alternative technologique pour la conversion du carburant en électricité. Elle n'émet que de l'eau à l'échappement et son fonctionnement silencieux le rend plus adéquate en trafic urbain.

Le rendement est théoriquement élevé (80%) mais en pratique, il est compris entre 50% et 60%. Toutefois, la pile à combustible est fabriquée à base de matériaux très coûteux. Il s'agit notamment du catalyseur en platine, du graphite et de la membrane perméable aux ions H^+ .

En outre, plusieurs problèmes liés au réseau de production et de distribution à grande échelle de H_2 , à son stockage ou à sa production à bord du véhicule restent toujours sans réponse.

Il existe plusieurs filières de production de l'hydrogène mais le bilan de la consommation d'énergie et des émissions globales de CO_2 reste problématique. Ces différentes filières de production

devront attendre longtemps pour être validées et la pile à combustible apparaît comme une solution à long terme.

1.6.3 La motorisation Hybride

Le Véhicule Hybride est une solution intermédiaire très prometteuse. L'avantage majeur de ce type de véhicule est sa capacité de combiner les deux sources d'énergie (thermique et électrique) et de bénéficier ainsi des avantages des deux sources.

Ces systèmes de propulsion permettent de résoudre certains problèmes que l'on rencontre avec les systèmes conventionnels.

Les moteurs à combustion interne ont une grande variabilité de régimes et fonctionnent parfois à très faible rendement. À l'arrêt du véhicule, dans les files ou devant les feux, le moteur thermique continue à tourner entraînant plus de consommation alors qu'avec le système hybride, on peut couper le moteur thermique et le redémarrer très rapidement ou tout simplement rouler *en tout électrique* lorsque la demande en puissance est faible.

Dans d'autres cas, le moteur électrique apporte le supplément de puissance au moteur thermique lui évitant ainsi de fonctionner en dehors de ses capacités lorsque la demande en puissance est élevée.

Le système hybride offre la possibilité de récupérer l'énergie de freinage (généralement dissipée en chaleur) et d'augmenter ainsi le rendement. De plus, à haut rendement, le système hybride stocke le surplus d'énergie dans les batteries quitte à l'utiliser ultérieurement.

Enfin, le downsizing du moteur thermique combiné à la bonne gestion de l'énergie permet également d'obtenir un très bon rendement global.

Le grand inconvénient du véhicule hybride reste son coût élevé. La masse et le volume du système de propulsion doivent aussi être optimisés sur une puissance donnée.

Mais, ce véhicule a de l'avenir parce qu'il peut être décliné en plusieurs configurations, selon l'usage.

L'hybride léger appelé aussi *mild hybrid* permet de gagner 10% sur la consommation bien que ses performances ne soient pas des plus appréciées mais pour un coût peu élevé. Le *full hybrid* ou hybride complet a de très bonnes performances et permet des gains de consommation allant jusqu'à 40% mais présente un coût plus élevé.

Le véhicule hybride se prête non seulement à la diversification des sources d'énergie mais également à l'usage d'autres nouveaux composants comme les Supercapacités et les accumulateurs Hydrauliques ou pneumatiques.

L'usage des composants hydrauliques a certes des inconvénients, liés surtout à leur masse et encombrement, mais suscite beaucoup d'intérêts au regard de leurs coûts et de leur recyclabilité moins polluante par rapport aux batteries. Il ressort de ce qui précède qu'il existe beaucoup de solutions alternatives eu égard à la diversité des sources d'énergie d'une part et à la possibilité d'avoir plusieurs technologies de propulsion par combinaisons de différents composants d'autre part.

Il est dès lors difficile de cerner les solutions les plus intéressantes sur tous les aspects lorsqu'on est encore à la phase de la conception préliminaire. Certaines filières de productions des carburants et ou de fabrication des véhicules par exemple restent méconnues quant à leur bilan énergétique et gaz à effet de serre (GES). Ainsi donc, bien que les véhicules hybrides soient prometteurs sur le plan environnemental, certaines interrogations subsistent :

- Satisferont-ils mieux que les véhicules conventionnels les besoins de l'utilisateur ?
- Constitueront-ils un réel progrès pour l'environnement ?

- Les performances environnementales ne seront-elles pas offertes à un prix nettement plus élevé en regard des ressources consommées ?

I.7 Définitions des VEHs

D'une façon générale, un véhicule hybride est un véhicule dont l'énergie nécessaire à la propulsion provient non pas d'une seule source mais de plusieurs sources d'énergies.

La source principale dite source primaire ou (*primer mover*) est généralement un moteur à combustion interne. Mais il peut également s'agir d'une pile à combustible, d'une turbine à gaz ou à vapeur. L'énergie provenant de la source secondaire peut être sous forme cinétique (*volant d'inertie*), électrique (*batteries*) ou hydraulique (*accumulateurs hydrauliques*).

Les véhicules hybrides électriques (VHE) sont définis comme les véhicules pour lesquels, l'énergie de propulsion provient de deux ou plusieurs sources d'énergie ou systèmes de stockage ou de conversion d'énergie avec au moins une qui délivre de l'énergie électrique.

Cette définition est plus générale et offre plusieurs combinaisons possibles entre les différents composants. Elle n'est pourtant pas acceptée unanimement et beaucoup préfèrent considérer un véhicule hybride électrique comme étant simplement un véhicule ayant à la fois un moteur thermique et un moteur électrique.

I.8 Les modes de fonctionnement d'un VEH

Le Stop-and-Start : Nommé aussi Stop-and-Go ou Stop-Start selon les constructeurs, ce système permet au moteur thermique d'être démarré rapidement, et sans vibration, après un arrêt de courte durée. Cette fonctionnalité est en particulier destinée à être utilisée lors d'un arrêt aux feux rouges, ou bien dans des embouteillages. Le gain apporté par ce système provient de la disparition de la consommation de carburant au ralenti, lorsque le moteur thermique n'est pas utilisé pendant plusieurs secondes. En contrepartie, une faible quantité d'énergie électrique est utilisée à chaque démarrage pour ramener le moteur à son régime de ralenti.

Le mode régénération : Dans ce mode, le moteur électrique fournit un couple négatif, le moteur thermique fournissant alors un couple supérieur au couple de consigne (demandé par le conducteur). L'énergie provenant du moteur électrique est ensuite stockée dans les batteries, afin d'être réutilisée ultérieurement.

Le mode freinage récupératif : Il s'agit du fonctionnement d'un moteur électrique utilisé pour fournir un couple résistant, dans le but de récupérer l'énergie cinétique du véhicule sous la forme d'une énergie électrique, qui est ensuite stockée.

Le mode boost : Le mode boost correspond à une assistance du moteur thermique par le moteur électrique, celui-ci développant un couple positif conjointement au moteur thermique. Ce mode peut être actionné pour décharger le moteur thermique afin de placer celui-ci sur un point de fonctionnement de meilleure efficacité. Il peut aussi être utilisé lors d'une importante demande de couple, lorsque le moteur thermique développe un couple insuffisant par rapport au couple de consigne.

Le mode alternateur : Le mode alternateur correspond au fonctionnement classique d'un alternateur que l'on trouve sur chaque véhicule. Au lieu d'imposer un couple au moteur électrique, on impose une consigne de tension aux bornes de la batterie (ou aux bornes

de la supercapacité), le moteur électrique se chargeant ensuite de réguler cette tension. Ce mode n'est pas optimal d'un point de vue énergétique, puisqu'il est utilisé, sur les véhicules traditionnels, quel que soit le point de fonctionnement du moteur thermique, même lorsque celui-ci est au ralenti.

Le mode thermique pur : Il s'agit du mode classique durant lequel le moteur électrique n'est pas utilisé. Ce mode peut être utilisé pour des raisons de rendement (par exemple, lors d'un trajet sur autoroute, pour lequel le moteur thermique est utilisé à un bon rendement), ou bien parce que la batterie est déchargée.

Le mode électrique pur : Il s'agit du mode pour lequel le moteur thermique est arrêté. Dans ce mode, les conséquences directes sont l'absence de bruit, l'absence de rejet de polluants (*zéro émission*), et une consommation de carburant nulle. La durée durant laquelle ce mode pourra être actif dépend de la capacité de la batterie. Si celle-ci est faible, ce mode pourra être activé durant quelques minutes tout au plus, le moteur thermique devant alors être rallumé pour ramener la batterie à un état de charge correct.

I.9 Classification des VEHS

La classification des VEHS peut se faire soit par rapport à l'architecture de la chaîne de traction hybride, soit par rapport au degré d'hybridation.

I.9.1 Le taux d'hybridation des VEHS

Cette classification est surtout utilisée par les constructeurs et équipementiers. Elle ne prend pas en compte l'architecture du véhicule mais plutôt les fonctionnalités qu'elle peut réaliser en fonction de son taux d'hybridation. Cette classification se distingue par quatre niveaux : le micro hybrid, le mild hybrid, le full hybrid et le plug-in hybrid.

On appelle taux d'hybridation la part de la puissance que peut fournir la seconde source d'énergie par rapport à la puissance totale disponible à bord. 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 : $TH = \frac{P_e}{P_e + P_{th}} \cdot 100$

En allant d'un véhicule thermique ($TH=0\%$), jusqu'au véhicule électrique ($TH = 100\%$) plusieurs nominations peuvent exister : Micro ou mini-hybride, mild-hybrid, full hybrid, etc. Notons que ces dénominations sont très variables selon les auteurs et/ou les constructeurs automobiles. D'autres définissent le taux d'hybridation suivant le nombre de fonctionnalités qu'un véhicule hybride peut assurer.

Micro Hybride (Start and Go) : Les véhicules hybrides du type Start and Go ne sont pas des vrais hybrides car l'électricité de la batterie n'est pas employée pour propulser le véhicule. Cependant ce dispositif d'arrêt/marche est très important dans l'économie d'énergie utilisé dans les véhicules hybrides.

La technologie Start and Go conserve l'énergie en coupant le moteur thermique quand le véhicule est au repos. Comme dans les feux de carrefour et le remet automatiquement quand le conducteur pousse la pédale de gaz pour aller en avant.

Les véhicules munis du Stop-and-Start, n'exploitant pas le freinage récupératif par le moteur thermique, peuvent ou non être considérés comme des véhicules hybrides en tant

que tels. En effet s'ils sont munis d'un moteur électrique pour l'entraînement du moteur thermique (dont la puissance est supérieure à celle d'un démarreur classique), le moteur électrique ne participe pas, en revanche, à la traction du véhicule.

Full Hybride : Les Full hybrides utilisent un moteur thermique comme première source de puissance, et le moteur électrique fournit la puissance supplémentaire si nécessaire.

En outre les Full hybrides utilisent seulement le moteur électrique comme source de puissance lors des phases de basse-vitesse.

Le mode pur électrique peut diminuer l'utilisation du carburant.

Mild Hybride : Les Mild hybrides sont essentiellement des véhicules conventionnelles équipés d'une grande machine électrique (un moteur / générateur dans une configuration parallèle) qui permet au moteur thermique de s'éteindre lorsque la voiture est en situation de roulement libre, de freinage, ou à l'arrêt, mais en la redémarrent rapidement. Les Mild hybride peuvent employer un freinage avec récupération d'énergie et aussi dans certain cas assister le moteur thermique, mais elle ne dispose pas de mode pur électrique.

Comme ils n'ont pas de transmissions hybride et ils intègrent seulement des petits moteurs électriques (~20 kW ou moins) qui sont incapables de propulser le véhicule, alors ils ne nécessitent pas le même niveau de puissance de la batterie et ne peuvent pas atteindre les mêmes niveaux d'économie de carburant par rapport au Full hybrides.

En les comparant avec les Full hybrides, les Mild hybrides peuvent donner certains avantages de l'application de l'hybridation, avec un coût bas, et une moindre surcharge de poids. Néanmoins les économies de carburant seraient aussi moins qu'une Full hybride.

Plug In Hybride : Un plug-in de véhicules électriques hybrides (PHEV), est un véhicule hybride avec des piles rechargeables qui peuvent être restaurés à pleine charge en branchant une fiche à une source externe d'énergie électrique. PHEV partage à la fois les caractéristiques d'un véhicule électrique hybride classique, ayant un moteur électrique et un moteur thermique et celles d'un véhicule tous électrique, tous ayant également une prise pour se connecter au réseau électrique.

La plupart des véhicules électriques hybrides rechargeables sur les routes aujourd'hui sont les voitures particulières, mais il ya aussi des versions PHEV de véhicules utilitaires et fourgonnettes, camions utilitaires, autobus, trains, motos, scooters et véhicules militaires.

Les performances de ces différents degrés d'hybridation sont classées dans le tableau suivant :

Type d'hybrid	Gain en carburant (cycle urbain)	Exemples de véhicules	Puissance ME(kW)
Micro hybrid	5 à 8%	Citroën C3, Toyota Crown	2 à 3
Mild hybrid	20 à 30%	Honda Insight, Civic Accord	10
Full hybrid	30 à 40%	Toyota Prius, Ford Escape	50
Plug-in hybrid		Gruau Microbus, DaimlerChrysler Sprinter	>=30

TABLE I.1 – Mode de fonctionnement d'un certain nombre de VEH

I.9.2 L'architecture des VEHS

Selons la combinaison des éléments de la chaîne de traction hybrides le véhicule connaîtra une architecture différente. Le choix de ces dernières dépend du type de véhicule et de son usage (cycle de conduite).

La partie suivante décrira les architectures des véhicules hybrides les plus connues.

I.9.2.1 Hybride électrique série

Le système hybride électrique série est le plus simple. Il s'agit, en fait, d'un moteur électrique assisté par un moteur thermique ou une pile à combustible pour améliorer l'autonomie du véhicule. La puissance mécanique délivrée par le moteur thermique est transformée en électricité via le générateur. Cette électricité peut servir à charger la batterie via le convertisseur ou à propulser directement le véhicule via le moteur électrique jouant à la fois le rôle de moteur et de transmission mécanique. L'avantage principal de cette configuration est lié au fait que le moteur thermique peut être utilisé à une vitesse constante dans sa plage de meilleur rendement. De plus, l'absence d'embrayage dans tout le lien mécanique lui confère une bonne flexibilité. Par contre, bien que sa chaîne de traction soit la plus simple, il a besoin de trois dispositifs de propulsion : deux moteurs (électrique et thermique) et un générateur. En plus, la double transformation d'énergie (mécanique-électrique-mécanique) pénalise le rendement global du système. Un autre désavantage est que les trois composants doivent être dimensionnés sur la puissance maximale pour les cycles les plus exigeants. Mais, pour de petits trajets, l'ensemble générateur/moteur électrique peut être dimensionné sur une puissance moyenne plus faible.

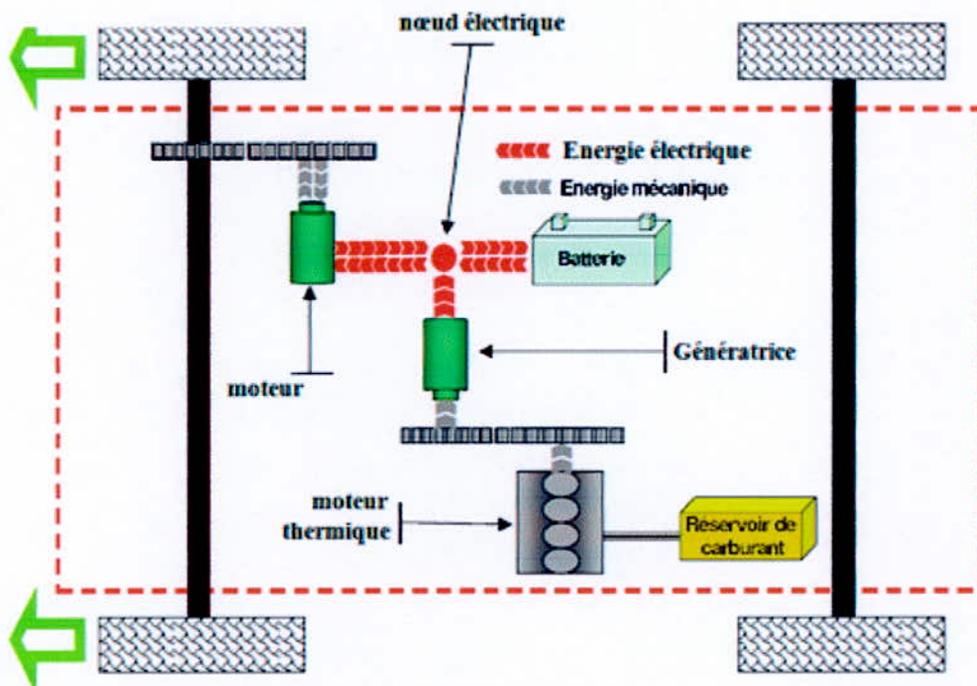


FIGURE I.1 – Architecture série [7]

I.9.2.2 Hybride électrique parallèle

A la différence du système hybride série, l'hybride parallèle permet aux deux moteurs (thermique et électrique) de fournir en parallèle la puissance de propulsion au train roulant.

Les deux moteurs sont généralement couplés à l'arbre de transmission par l'intermédiaire de deux embrayages. La puissance propulsive est alors fournie soit par le moteur thermique, soit par le moteur électrique ou par les deux à la fois.

Conceptuellement, il s'agit d'un moteur thermique aidé par un moteur électrique pour diminuer la consommation et l'émission des polluants. La charge de la batterie est assurée par le moteur thermique quand la puissance fournie est supérieure à celle requise pour la propulsion du véhicule. Le moteur électrique peut aussi être utilisé comme générateur pour charger la batterie par le freinage récupératif.

Un autre avantage est que de petits moteurs peuvent être utilisés tout en gardant les mêmes performances.

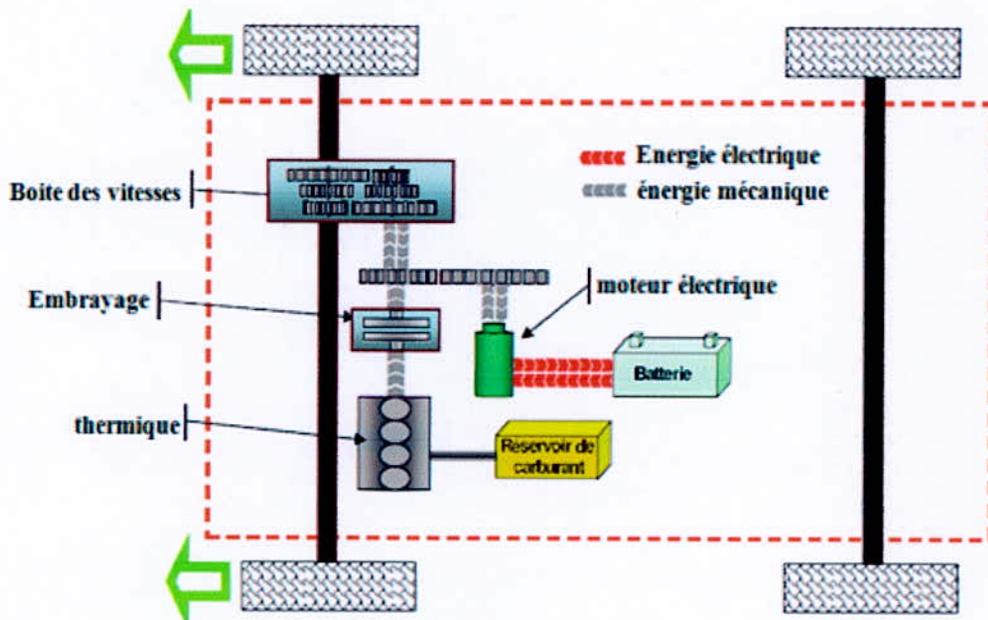


FIGURE I.2 – Architecture Parallèle [7].

I.9.2.3 Architecture micro-hybride

L'architecture micro-hybride correspond à une version allégée de l'hybride parallèle, pour laquelle le moteur électrique reste constamment mécaniquement lié au moteur thermique. La liaison pourra s'effectuer de diverses manières : par engrenage, ou bien par courroie.

La Figure suivante représente l'architecture micro-hybride, composée d'un moteur thermique et d'un moteur électrique en liaison directe avec le moteur thermique.

C'est en fait la forme la plus simple des différentes architectures hybrides, puisque les véhicules micro-hybrides sont essentiellement des véhicules conventionnels équipés d'un alternodémarrreur, permettant notamment de profiter du Stop-and-Start et éventuellement du freinage récupératif. Si les gains que l'on peut obtenir sont les plus faibles parmi toutes les architectures (ils ne dépassent guère 10%), C'est aussi celle dont l'implantation des organes dans le véhicule,

tels que la batterie et le moteur électrique, est la plus simple.

Les inconvénients majeurs de cette architecture résident dans sa définition même : il n'est pas possible d'utiliser le moteur électrique seul pour la propulsion du véhicule, notamment à faible charge lorsque l'efficacité du moteur thermique est faible. De plus, l'énergie qui peut être obtenue lors d'un freinage récupératif sera amputée par le couple de frottement du moteur thermique (pertes par pompage et frottements moteur), puisque le moteur thermique ne peut être désaccouplé du moteur électrique, ce qui réduit la quantité d'énergie récupérable.

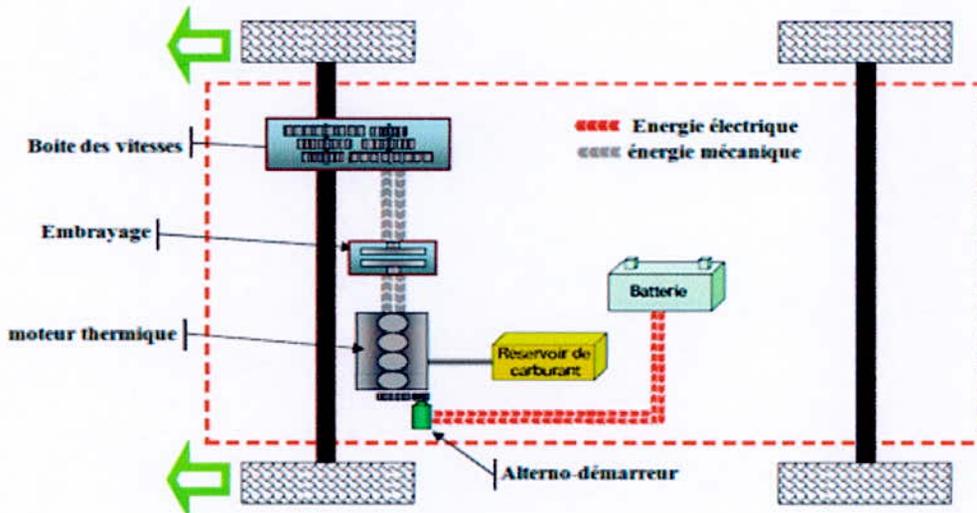


FIGURE I.3 – Architecture micro-hybride [7].

I.9.2.3.1 Remarque : Les véhicules munis du Stop-and-Start, et n'exploitant pas la régénération par freinage récupératif ou par moteur thermique, peuvent ou non être considérés comme des véhicules hybrides en tant que tels. En effet, s'ils sont munis d'un moteur électrique pour l'entraînement du moteur thermique (dont la puissance est supérieure à celle d'un démarreur classique), le moteur électrique ne participe pas, en revanche, à la traction du véhicule. Cette question de l'appartenance ou non des véhicules uniquement munis du Stop-and-Start au monde des véhicules hybrides a été abordée par [8].

I.9.2.4 Hybride électrique mixte

Suite à de nouvelles combinaisons entre les systèmes série et parallèle, il est apparu, il y a quelques temps, une troisième catégorie : les véhicules hybrides électriques (VHE) série-parallèle.

Depuis l'année 2000 on parlait déjà d'une quatrième catégorie : VHE parallèles complexes.

L'hybride série-parallèle ou l'hybride à dérivation de puissance est la combinaison des deux architectures précédentes avec un lien mécanique additionnel comparable au système parallèle et un générateur additionnel comparable au système série.

Le train épicycloïdal [9] Le lien mécanique se fait au niveau du train épicycloïdal qui est un mécanisme à plusieurs degrés de liberté. Sa constitution doit induire au moins un élément pouvant avoir deux mouvements de rotation. Cet élément se nomme satellite. Celui-ci

peut tourner autour d'un axe qui lui est propre et autour d'un autre. Notons que le train planétaire se fait également appelé train épicycloïdal. Ce terme provient de la trajectoire qu'opère un satellite observé par rapport au planétaire (trajectoire en épicycloïde ou hypocycloïde selon que la couronne soit à dentures intérieures ou extérieures).

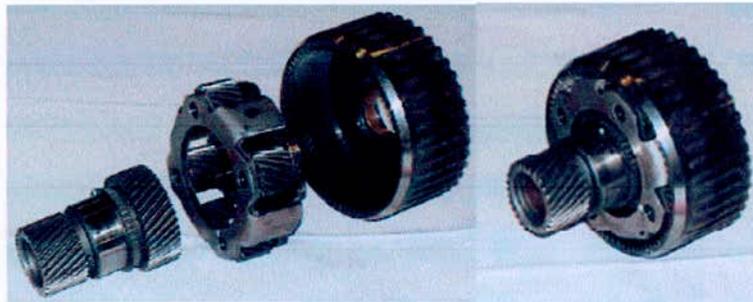


FIGURE I.4 – Train planétaire simple de la Toyota Prius

Les applications du train planétaire dans le milieu automobile sont principalement le différentiel mécanique (train simple) et la boîte de vitesses (train complexe). Toyota en a trouvé une tout autre utilité en l'insérant dans sa chaîne de puissance afin de répartir la puissance entre plusieurs sources mécaniques.

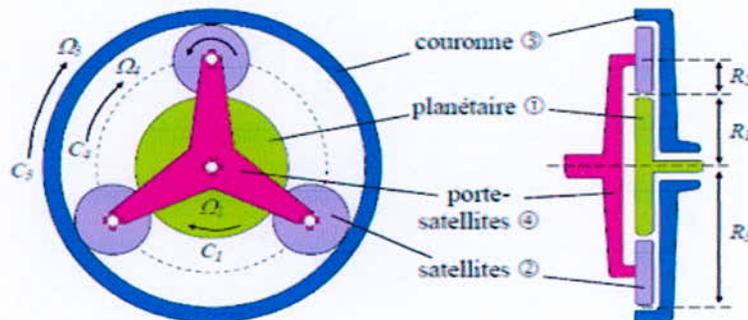


FIGURE I.5 – Description du train planétaire [10]

Les principaux avantages de son utilité sont des rapports de vitesse élevés pour un encombrement réduit, un rapport différent possible dans un même mécanisme et un excellent rendement. Néanmoins, ce mécanisme reste assez coûteux et la structure des pièces est assez complexe.

La structure mixte regroupe tous les avantages liés aux deux systèmes séries et parallèles. Mais les systèmes hybrides série-parallèle et hybrides complexes sont des systèmes relativement compliqués et coûteux. Cependant, avec les avancées en technologie de commande et de fabrication, certains constructeurs préfèrent ces systèmes. La Prius II est un exemple d'hybride complexe avec une transmission souple.

I.9.2.5 Autres architectures [7]

On trouve quelques autres architectures, qui restent souvent au stade de prototypes, mais dont le potentiel est intéressant :

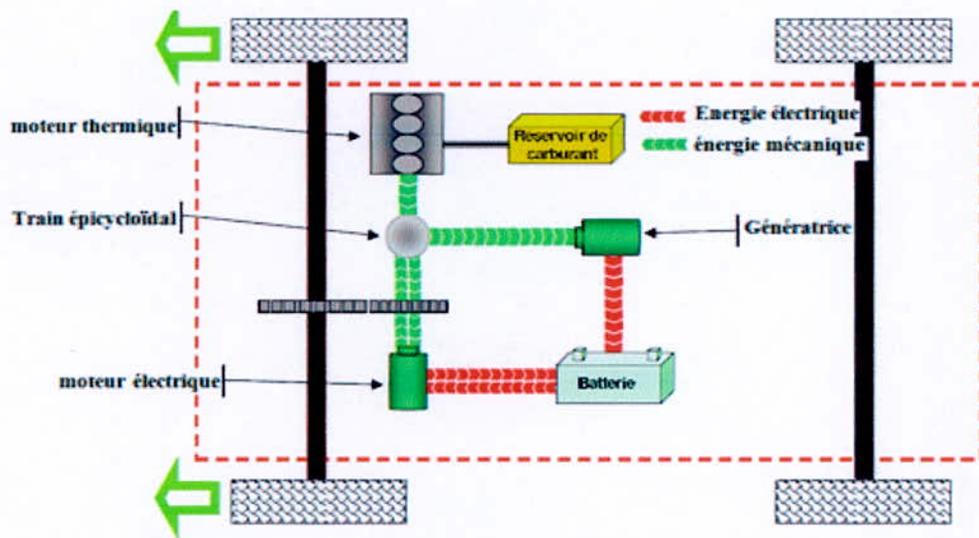


FIGURE I.6 – Architecture Mixte [7].

- Architecture de type parallèle, avec moteurs dans les roues : Plusieurs constructeurs ont déjà présenté des prototypes de véhicules hybrides dont deux moteurs électriques, ou davantage, sont localisés dans les roues. D'un point de vue énergétique, cette solution est idéale, puisque les moteurs sont situés au plus près du point de transmission finale de la puissance, qui se trouve au niveau du point de contact entre le pneu et la route. Notamment, cet emplacement permet d'éviter de subir les rendements des transmissions, qui réduisent sensiblement l'énergie récupérable.

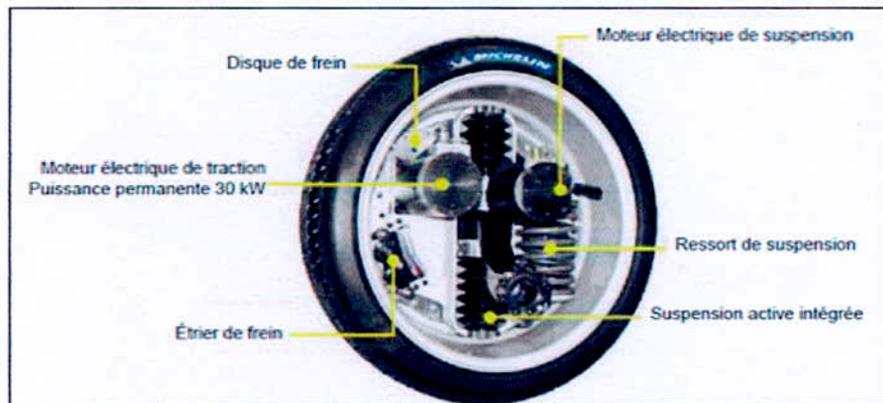


FIGURE I.7 – Roue avec moteur électrique intégré

Parmi les autres intérêts de cette architecture, chaque roue peut être contrôlée indépendamment les unes des autres, ce qui peut être intéressant pour l'utilisation de l'ESP (Electronic Stability Program, système de stabilisation du véhicule en courbe, agissant sur les systèmes de freinages pour corriger la trajectoire du véhicule).

- Les architectures hébergeant plusieurs *trains épicycloïdaux*, permettant une variation continue des rapports.

I.10 Les composants technologiques des VEHS

Les principaux composants d'un véhicule hybride électrique sont : la source d'énergie primaire, la source d'énergie secondaire (énergie électrique), caractérisée par des machines électriques fonctionnant dans les deux modes (génératrices ou moteurs), des dispositifs de modulation de cette énergie (convertisseurs de l'électronique de puissance), des accumulateurs de l'énergie secondaire qui sont des packs de batteries ou des supercapacités, un dispositif de contrôle et de gestion de l'énergie (hybrid control unit) et un système de transmission mécanique. Dans ce qui suit une description d'une grande partie de ces composants sera détaillée.

I.10.1 La source primaire

Rappelons que dans un VEH la source primaire (la plus autonome et celle rechargeable de l'extérieur) est soit un moteur à combustion interne classique, comme elle peut être issue d'une autre forme de motorisation plus ou moins polluante relativement aux motorisations classiques, prenons comme exemple les moteurs à pile à combustible, les moteurs à Hydrogène...

I.10.1.1 Le Moteur à combustion interne

Les récents développements technologiques aussi bien pour le moteur à essence que pour le moteur diesel, rendent ces deux moteurs plus attractifs pour les véhicules hybrides électriques et ceci pour trois raisons :

1. c'est la grande densité énergétique des carburants d'origine pétrolière qui confère une grande autonomie au véhicule avec quelques dizaines de litres.
2. Les processus de production et de distribution des carburants pétroliers sont totalement maîtrisés et les infrastructures nécessaires à leur diffusion sont largement établies depuis longtemps.
3. la troisième raison est lié aux améliorations successives des moteurs à combustion interne que ce soit au niveau des systèmes de dépollution (catalyseurs trois voies ou 4 voies, filtres à particules, etc.) ou au niveau de l'optimisation de la combustion (injection directe et suralimentation, contrôle électronique et des valves de timing, etc).

L'optimisation de la combustion et la réduction de la taille du moteur (downsizing) améliorent fortement le rendement et se trouve particulièrement adaptée aux fonctionnements des hybrides.

Notons que le moteur diesel a un grand rendement et se prête mieux au downsizing par rapport au moteur à essence. Il constitue un premier choix pour tout type de véhicule hybride.

I.10.1.2 La pile à combustible

La pile à combustible constitue également une solution intéressante car elle n'émet que des vapeurs d'eau à l'échappement et son fonctionnement silencieux la rend plus adéquate en trafic urbain. Le rendement théorique est aussi élevé. Cependant, le succès de la pile à combustible est intimement lié à celui du carburant qu'elle utilise.

L'hydrogène constitue la solution prometteuse au problème environnemental (émissions des gaz à effet de serre) et énergétique (déplétion des fossiles).

Mais c'est une solution à prendre avec précautions, car l'hydrogène est un vecteur énergétique et non pas une énergie primaire. L'utilisation de l'hydrogène nécessite donc la mise en place de l'infrastructure de production, de transport, de stockage et de distribution avec par exemple des stations service (où l'hydrogène pourrait être obtenu par reformage du gaz naturel).

L'utilisation massive de l'hydrogène comme carburant suppose qu'à la fois des problèmes techniques soient résolus, et que cette solution soit économiquement viable.

Mais si l'hydrogène devait être utilisé, on se retrouverait face au problème de qui doit être introduit en premier, les véhicules à PAC ou l'infrastructure nécessaire.

Dans tous les cas, de telle transition demanderont du temps et des progrès technologiques et moraux.

Néanmoins les acteurs économiques doivent s'en préoccuper pour être prêts dans l'hypothèse où l'hydrogène prendrait une place significative comme vecteur d'énergie. Il paraît vraisemblable que le changement dépendra d'un choix politique et stratégique, plus qu'un problème technique dans les prochaines années.

Ainsi la Commission européenne envisage-t-elle 20% de substitution aux énergies fossiles d'ici 2020. Enfin, il faut encore signaler deux obstacles qui devront encore être surmontés :

1. Vaincre l'inertie de l'industrie pétrolière.
2. Convaincre les consommateurs réticents à utiliser l'hydrogène.

I.10.1.3 Autres sources primaires

Un des avantages des véhicules hybrides électriques est que le moteur thermique peut fonctionner à charge et à vitesse constantes. Ce qui fait qu'il peut être monté en dehors de la chaîne de traction. Pour cette raison, d'autres moteurs peuvent être utilisés. Il s'agit des turbines à gaz ou à vapeur. Cependant, la littérature ne rapporte que de rares applications à l'heure actuelle [11].

I.10.2 Le moteur électrique

Dans beaucoup de cas, les machines électriques (moteurs et alternateurs) utilisés dans les véhicules hybrides électriques ne diffèrent pas conceptuellement des moteurs électriques classiques utilisés dans d'autres applications. Selon les performances recherchées, les moteurs électriques qui équipent les voitures peuvent être des moteurs à courant continu (shunt ou série) ou des moteurs à courant alternatif asynchrone (monophasés ou triphasés) ou synchrones monophasés. Le système de commande électronique entièrement analogique utilisé jadis a fortement évolué avec le développement de l'électronique de puissance et la commande digitale, ce qui permet de prendre en compte beaucoup de paramètres lors du fonctionnement et de minimiser la consommation d'énergie. Chaque constructeur possède ses propres algorithmes de commande. Les moteurs électriques de traction doivent être caractérisés par les caractéristiques suivantes :

- Un couple élevé à basse vitesse, (ce qui permet aux véhicules électriques de s'insérer sans difficultés dans la circulation).
- Des puissances massique et volumique les plus élevées possibles.
- Une possibilité de récupération d'énergie pendant le freinage.
- Une stratégie de pilotage qui optimise continuellement la consommation d'énergie.

La récupération d'énergie au freinage est possible grâce à la propriété des moteurs électriques de fonctionner de manière réversible soit en moteur, soit en générateur.

Le tableau d'en bas évalue de façon chiffrée et sur base de six critères, les différentes technologies de moteurs électriques utilisés dans les véhicules électriques et hybrides [12] et [13].

	Moteur CC	Moteur asynchrone	Moteur Brushless	Moteur Synchrone (A.A)
Densité de puissance	2.5	3.5	5	4
Efficacité	2.5	3.5	5	5
Contrôlabilité	5	4	4	4
Fiabilité	5	4	4	4
Maturité	5	5	4	3
Coût	4	5	3	3

TABLE I.2 – Performances des MEs utilisés

Les moteurs asynchrones sont avantageux quant à la fiabilité, la robustesse et surtout le coût. Ils sont peu coûteux, car leur construction est simple et ils ne nécessitent pas beaucoup d'entretien. Ils sont par contre plus lourds et de rendement inférieur par rapport au moteur synchrone à aimants permanents mais ils restent concurrentiels en raison de leur coût réduit. Les innovations en matière de conception des moteurs électriques sont bien remarquables dans la configuration hybride parallèle qui est la plus utilisée. Par exemple la Honda Insight est équipée d'une machine électrique particulièrement performante. C'est un moteur/générateur synchrone, à aimants permanents, ultrafin (60 mm) de 41 cm de diamètre. Il est positionné sur l'arbre moteur à la place du volant d'inertie et joue en plus le rôle de ce dernier.



FIGURE I.8 – Machine électrique de la Honda Insight [Nzisabira.2008].

Mais tous les véhicules n'utilisent pas évidemment le même type de moteur ni de montage. Dans certains cas, le moteur électrique est connecté sur l'arbre moteur via une courroie ou directement sur la transmission via une boîte de vitesse basée sur un réducteur épicycloïdal comme c'est le cas chez la Toyota Prius.

I.10.3 Les Batteries :

Les batteries constituent un tampon énergétique pour les véhicules hybrides électriques. Elles servent à stocker l'énergie électrique quand le moteur thermique développe son meilleur

rendement et encore pendant le freinage récupératif. Cette énergie sera restituée par la suite pour la propulsion du véhicule. Les caractéristiques principales des batteries utilisées dans les véhicules électriques et hybrides électriques sont les suivantes :

L'énergie spécifique (exprimée en Wh/kg ou Wh/l) : C'est la quantité totale d'énergie qu'une batterie peut contenir par unité de masse ou de volume à une vitesse de décharge déterminée. Ce paramètre caractérise l'autonomie de la source électrique.

La puissance spécifique (W/kg ou W/l) : puissance maximale qu'une batterie peut développer par unité de poids ou de volume à un taux de décharge bien déterminé. Ce paramètre caractérise la puissance de la source réversible à la fois pendant l'accélération et le freinage récupératif.

Les deux caractéristiques sont dépendantes et généralement antagonistes. Pour un type de batterie donné, le choix d'une grande puissance spécifique entraîne une énergie spécifique minimale et vice versa. On préfère l'énergie spécifique pour les véhicules électriques et la puissance spécifique pour les hybrides.

Le rendement de charge/décharge (%) : le rapport de l'énergie récupérée en sortie (décharge) sur l'énergie nécessaire à la recharge suivante. Le rendement dépend de l'intensité du courant et donc des puissances lors de ces opérations. Les pertes sont dues à l'effet joule le long du bus hybride et aux réactions électrochimiques internes à la batterie ainsi qu'à la puissance des auxiliaires (chauffage, circuits de bords etc).

La profondeur de décharge (%) : seuil au delà duquel la batterie subit des dommages irréversibles.

La durée de vie (nombre de cycles) : période pendant laquelle la batterie peut fonctionner en conservant des performances proches de ses performances initiales.

Il existe d'autres caractéristiques déterminantes quant au choix des batteries telles que le coût, la nocivité des composants, l'autodécharge et la température de fonctionnement.

Les batteries utilisées dans les véhicules électriques et hybrides sont nombreuses et sont sélectionnées suivant le paramètre privilégié pour un usage donné, on cite par exemple : l'accumulateur acide-plomb, Nickel-Cadmium, Nickel-Métal-Hydrures, les accumulateurs au Lithium (Lithium-ion, Lithium-polymère) et la batterie ZEBRA (NaNiCl : Sodium-Nickel-Chloride).

La Tableau suivant reprend les versions les plus avancées, mais ne sert qu'à titre indicatif puisqu'il peut perdre rapidement sa validité suite au développement continue des batteries.

Batteries	Pb Acide	Ni-Cd	Ni-MH	Li-ions	NaNiCl
Energie spécifique(Wh/kg)	30-40	40-50	50-80	80-200	90-130
Puissance spécifique(W/kg)	140-300	500	500-1400	600-3000	100-160
Rendement charge/décharge(%)	70-85	70-75	70-80	85-90	80-90
Durée de vie (cycle) à 80%DOD	300-1000	1000-3000	500-2000	1000-3000	600-1000

TABLE I.3 – Caractéristiques des batteries utilisées

Quant au tableau suivant, il compare les performances énergétiques des batteries Li-ions, les plus performantes parmi ceux citées précédemment, aux carburants liquides de type essence

et gasoil. Le problème fondamental des batteries apparaîtrait clairement : les meilleures d'entre elles n'apportent qu'une énergie spécifique 200 fois plus faible que celle contenue dans les carburants pétroliers. Les véhicules électriques autonomes sont donc très fortement pénalisés en poids ce qui limite leur rayon d'action et leur autonomie.

Seulement on doit rester prudent, car l'énergie spécifique du diesel n'est pas directement comparable à celle des batteries dans le cas où on n'a pas besoin de beaucoup de capacité de stockage et quand l'efficacité énergétique est élevée (cas des véhicules électriques).

Hormis peut-être pour les flottes captives de véhicules, l'autonomie des véhicules électriques est le principal frein à la multiplication des véhicules électriques. La solution réside dans l'adjonction d'une seconde source d'énergie à bord du véhicule, soit au concept de véhicule hybride.

Carburant	Essence	Diesel	Batterie Li-ions
Energie spécifique (Wh/kg)	11833	11667	105
Rendement moyen (%)	12	18	85
Energie spécifique à la roue (Wh/kg)	1420	2100	84

TABLE I.4 – Comparaison entre la source E et les sources th

I.10.4 La transmission :

Dans le cas des véhicules hybrides électriques séries où c'est toujours le moteur électrique qui assure la traction du véhicule, on n'a pas un besoin réel d'un embrayage ni d'une boîte de vitesses compte tenu de la grande plage de fonctionnement des moteurs électriques, d'un couple important et à l'existence de contrôleur électronique pour faire varier le couple et la vitesse.

Cependant lorsqu'il se trouve le lien entre le moteur thermique et les roues, un embrayage et une boîte de vitesse sont nécessaires pour adapter les caractéristiques du moteur à combustion aux différentes conditions de fonctionnement (couple, vitesse). Ils permettent également au moteur de démarrer depuis l'arrêt et au véhicule de s'arrêter sans caler le moteur.

Les différents types de transmissions utilisées dans les véhicules conventionnels restent valables pour les véhicules hybrides en gardant les mêmes caractéristiques.

La transmission manuelle (TM) est relativement efficace mais doit respecter certaines règles d'usage pour diminuer la consommation. La transmission automatique (TA) est confortable et permet d'éviter les pertes de puissance aux roues pendant le changement de vitesse. Mais elle reste complexe et coûteuse. De plus, la transmission automatique a un rendement relativement faible (présence d'un convertisseur de couple et d'un système hydraulique) par rapport à la transmission manuelle.

La transmission variable continue (CVT) est très prometteuse. Elle permet de transmettre continuellement (avec un minimum de pertes) le couple du moteur aux roues et de faire travailler le moteur dans des conditions de couples et de vitesse indépendantes de la vitesse des roues.

Le problème majeur de la transmission variable est son coût et sa masse plus élevés par rapport à la transmission manuelle. Elle donne aussi lieu à des conditions de fonctionnement inhabituelles.

I.10.5 Les convertisseurs de l'électronique de puissance [14]

Le convertisseur est le calculateur de puissance du moteur. Il reçoit les paramètres de multiples capteurs dont les pédales d'accélérateur et de frein puis commande le moteur en traction ou en régénération (freinage).

I.10.5.1 Le hacheur :(cas des moteurs à courant continu)

Le convertisseur électronique, encore appelé hacheur, permet de faire varier la tension aux bornes du moteur et par conséquent la vitesse de rotation. Il agit par découpage de la tension, d'où son nom de hacheur.

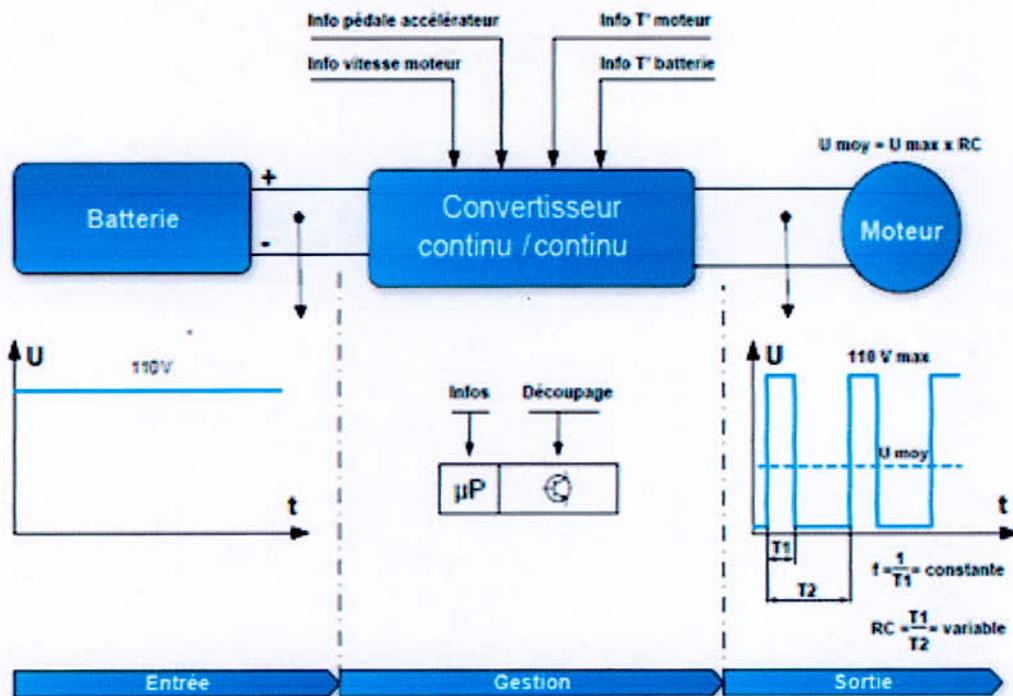


FIGURE I.9 – Principe de fonctionnement d'un hacheur de courant

Le convertisseur MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) présente une fréquence de travail fixe. Il fait varier le rapport cyclique T_1/T_2 , qui provoque la variation de tension (U moyen). Pour un moteur à excitation séparée, le convertisseur est composé de deux hacheurs qui permettent d'adapter le moteur à tous les besoins en couple et tension. Il en résulte un fonctionnement très souple et économique.

I.10.5.2 L'onduleur :(cas des machines à courant alternatif)

L'onduleur est un convertisseur continu-alternatif qui permet l'alimentation des moteurs alternatifs triphasés à partir de l'énergie fournie par la batterie.

Il fait varier la fréquence qui détermine la vitesse de rotation ($N = F/P$), et contrôle en permanence l'intensité qui définit le couple. Le convertisseur onduleur, en régulant couple et vitesse, maîtrise la puissance du moteur ($P = C.\omega$). Lors des phases de récupération d'énergies cinétiques et potentielles, l'onduleur doit être réversible pour convertir et contrôler le courant alternatif produit par le moteur en courant continu, afin de le stocker dans la batterie haute tension.

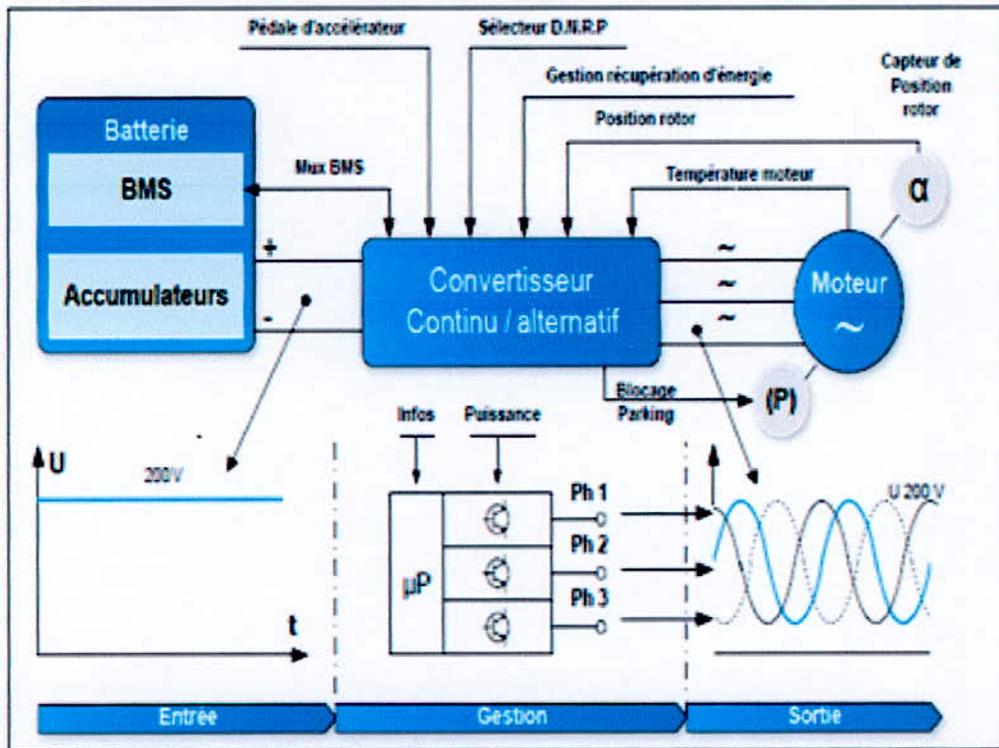


FIGURE I.10 – Principe de fonctionnement de l'onduleur

Il reçoit de nombreux paramètres, comme la position de la pédale d'accélérateur, de la pédale de frein, la température moteur, etc. Il dialogue avec le BMS (Batterie Management System) afin de connaître la puissance disponible par la batterie pour la charge comme pour la décharge, ainsi que ses besoins de réchauffage et de charge en fonction du *SOC* (State Of Charge).

I.10.5.3 Le convertisseur de bord

Le circuit de bord d'un véhicule électrique ou hybride est identique à celui d'un véhicule thermique et doit être alimenté par une batterie de 12 V.

Hormis les véhicules micro-hybrides, tous les autres véhicules électriques et hybrides ne peuvent plus être équipés d'un alternateur pour charger la batterie de bord. Cette fonction est alors confiée à un convertisseur DC/DC, qui puise l'énergie électrique dans la batterie haute tension et la transforme pour charger la batterie 12 V, tout en assurant l'isolement électrique entre les deux batteries (isolation galvanique).

Le schéma synoptique ci-dessous montre le principe de fonctionnement de la plupart des convertisseurs utilisés, lesquels sont de type unidirectionnel.

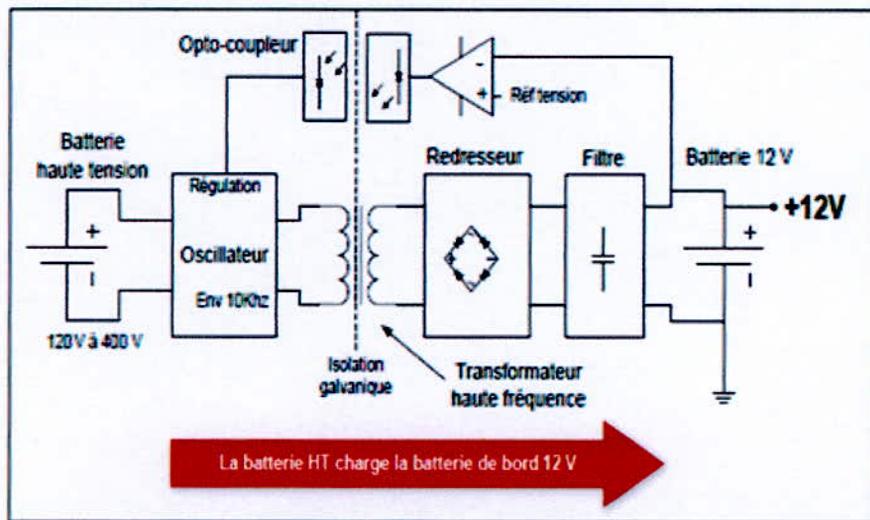


FIGURE I.11 – Convertisseur DC/DC unidirectionnel

I.11 Conclusion

Ce chapitre à concernée, en première partie, une classification des VEHs de part leurs modes de fonctionnement, leurs taux d'hybridation ainsi que leurs architectures, puis une description des différents éléments nécessaires à la mise en œuvre d'une chaîne de traction hybride est venue compléter la deuxième partie.

Chapitre II

Modélisation des VEHS

II.1 Modèles et outils de simulation des VEHS

L'évaluation d'une architecture hybride, d'un dimensionnement du véhicule et/ou de sa gestion énergétique nécessite de déterminer sa consommation en carburant. Ceci ne peut se faire que difficilement en conditions réelles, car d'une part cela nécessite de réaliser un prototype et de changer ses composants pour chaque étude paramétrique, et d'autre part parce que divers paramètres non commandables pourraient nuire à la reproductibilité de l'essai. Ces deux difficultés n'existent pas en simulation, c'est pourquoi un grand nombre de logiciels ont été développés, principalement suite aux engagements des constructeurs concernant les déchets de la combustion [8].

Les logiciels existants sur le marché sont de type *structurel*, qui est une représentation du système s'attachant à détailler sa topologie contrairement à une représentation fonctionnelle qui se focalise sur le rôle de chaque élément dans son environnement.

Cette tendance se justifie par le fait qu'en intégrant des bibliothèques de modèles et que l'utilisateur construit le système d'une manière topologique, tel qu'il est représenté sur un synoptique. la simulation du système complet se fait en « quelques clics ». Restant à charge de l'utilisateur d'effectuer le paramétrage des modèles. Néanmoins, ces avantages ont des contreparties. Tout d'abord, l'utilisateur n'a pas la maîtrise des modèles et, dans certains cas, il n'en a même pas accès et il faut compter avec ça les difficultés de définition des hypothèses que cela implique.

Ensuite, si le procédé d'interconnexion est valable sur un modèle statique ou quasi-statique, avec des entrées-sorties flottantes, il n'en va pas de même pour un modèle dynamique, à cause du risque de perte de causalité en allant d'une analyse quasi-statique vers une analyse dynamique [9].

Citons comme exemples de logiciel structurels : Advisor, Dymola (développé à partir de Modelica), AMESim ou PSIM (électronique de puissance) [15].

Les logiciels structurels se veulent dans leur grande majorité systémiques cela veut dire qu'ils envisagent les éléments d'une conformation complexe, non pas isolément mais globalement, en tant que partie intégrante d'un ensemble dont les différentes composantes sont dans une relation de dépendance réciproque (Le dictionnaire Larousse, Paris, édition 1992). D'autres termes dans une approche systémique toutes les dynamiques en interactions et agissants sur le système global sont prises en compte.

Ces approches de modélisation reposent sur des méthodes de représentations graphiques et modulaires (Bonds graphs [16], La Représentation Énergétique Macroscopique (REM) [9], Le puzzle énergétiques [17], VEHLIB [1]).

Ces logiciels structurels sont classés en deux catégories [8] :

1. *Logiciel BACKWARD « en arrière »* : (ADVISOR, SIMULCO), le point de départ est le cycle vitesse-temps : la vitesse à la roue étant connue, il est possible de calculer le couple demandé, en tenant compte du modèle dynamique du véhicule. La démarche consiste à remonter la chaîne de traction en calculant à partir de ce couple les valeurs des variables endogènes (caractérisant le point de fonctionnement du GMP).
2. *Logiciel FORWARD « en avant »* : (PSAT), la vitesse à la roue n'est pas, le point de départ pour le calcul des valeurs des variables endogènes, mais représente une consigne de vitesse qu'une modélisation du conducteur va tenter de poursuivre. La variable de commande est généralement l'enfoncement de la pédale d'accélération.

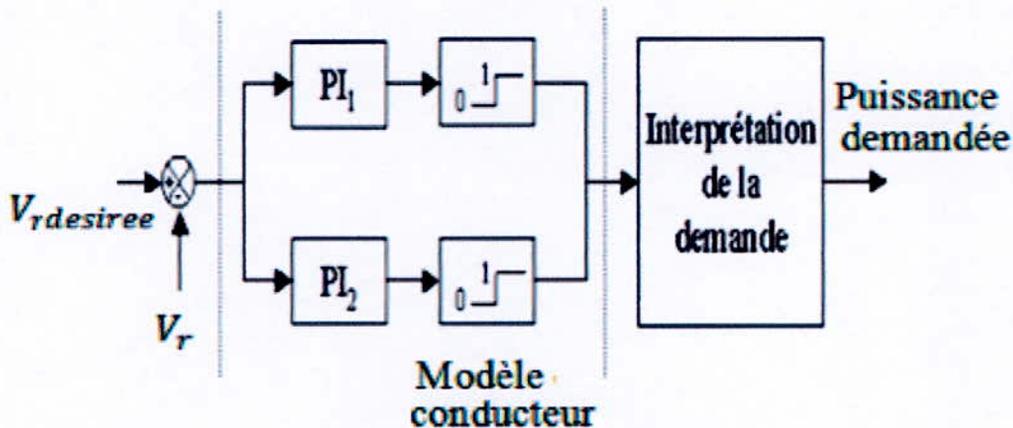


FIGURE II.1 – Boucle de poursuite de la vitesse désirée

La modélisation backward ne respecte pas la causalité de la situation réelle car la puissance demandée dépend de l'accélération du véhicule qui est fonction non causale de la vitesse (le couple est proportionnel à l'accélération), où le conducteur essaie de respecter une certaine vitesse, la commande étant la pédale d'accélérateur. Schématiquement, les machines thermique et électrique fournissent un couple, la route et l'inertie du véhicule ainsi que de ses parties tournantes constituent le couple résistant.

La modélisation forward est donc plus représentative de la réalité. Ceci lui donne l'avantage de ne nécessiter que peu d'adaptations pour une application en temps réel.

Ainsi, à l'outil VEHLIB développé au laboratoire LTE pour la simulation des véhicules, correspond une version temps réel utilisée sur banc dynamique, nommée : *VEHIL*.

Notons aussi que d'une manière générale, le processus de régulation de la vitesse du véhicule par rapport à un profil de consigne peut entraîner des effets de pompage. Ceux-ci n'apparaîtraient pas pour un usage réel sur prototype, qui, s'il n'est pas exactement en boucle ouverte, est tout de même dans ce cas moins contraint (réaction humaine relativement lente par rapport au réglage automatique).

II.2 Modèle de commande du prototype adopté

Il s'agit d'un prototype développé dans le cadre de la coopération entre PSA Peugeot Citroën, le LAMIH, le Fond Européen pour le Développement Régional (FEDER) et l'Agence De



FIGURE II.2 – La Berlingo-Full-hybride-Essence

l'Environnement et la Maîtrise de l'Énergie (ADEME), le prototype a été conçu et réalisé lors de la thèse de Gino Paganelli [18].

Consistant en une hybridation du moteur Essence de la Berlingo conventionnelle avec une machine électrique réalisant une architecture parallèle simple arbre à un seul embrayage situé avant le couplage des deux sources d'énergie. Le nom complet du véhicule est : *Berlingo-*

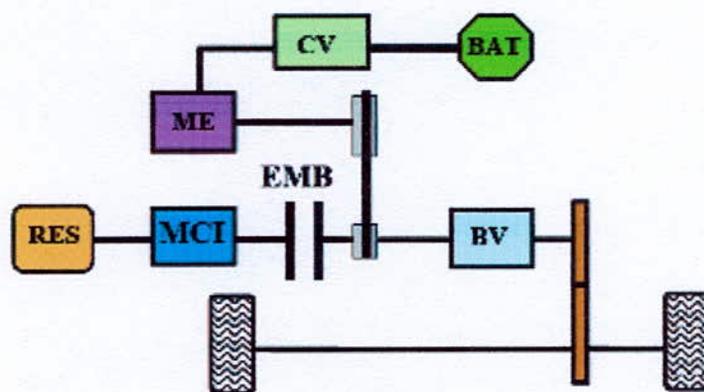


FIGURE II.3 – Architecture du prototype adopté

Full-hybride-Essence , c'est-à-dire qu'il incarne la catégorie des « Full-hybrid » avec un taux d'hybridation de 44% proposant tout les modes de fonctionnements possibles d'une motorisation hybride. Les caractéristiques du véhicule seront citées aux cours de sa modélisation.

Le modèle adopté pour se genre d'étude est un modèle dit « quasi-statique » dans lequel ne figure pas les dynamiques qui sont rapides par rapport à celle du véhicule, dans notre cas toutes les dynamiques mises à part celle de la batterie seront considérées comme étant des dynamiques instantanées, donc l'état de la batterie constituera notre seule variable d'état.

II.2.1 Le moteur thermique

Le modèle d'un moteur thermique exprime sa consommation en carburant en fonction du couple et du régime appliqués sur l'arbre (C_{th}, W_{th}), on note : $D(C_{th}, W_{th})$ donné souvent en g/s, le débit de carburant consommé nécessaire pour produire un couple C_{th} en Nm et une vitesse W_{th} en tr/min sur l'arbre du moteur. Cette consommation peut aussi être exprimée en terme d'une consommation spécifique caractérisant la quantité de carburant consommée en [g] par unité d'énergie produite sur l'arbre de sortie en [kWh]. On note :

$$C_{spec} = \frac{D}{C_{th} \cdot W_{th}} \text{ Qui se trouve en fait proportionnelle à l'inverse du rendement du moteur thermique : } C_{spec} = \frac{1}{E \cdot \text{rend}_{th}}$$

Où E est le potentiel énergétique stocké dans un gramme de carburant.

Pour une approche de modélisation dite statique on ne trouve pas de formule analytique exprimant la relation existante entre ces grandeurs, à ce moment on fait appelle à des cartographies matricielles construites à partir des testes réalisés sur banc d'essai, les résultats ne sont considérés qu'aux régimes statiques et à des températures de fonctionnement stabilisées ($> 70^{\circ}C$).

Une cartographie de consommation est un tableau d'éléments dont les lignes et les colonnes correspondent aux régimes ($W_{thmax} > W_{th} > W_{thmin}$) et aux couples C_{th} respectifs [8].

	C_{th1}	...	C_{thm}
W_{th1}	D_{11}	...	D_{1m}
\vdots	\vdots	\ddots	\vdots
W_{thn}	D_{n1}	...	D_{nm}

TABLE II.1 – Forme matricielle d'une cartographie de consommation

De plus nous auront besoin de deux vecteurs correspondants aux couples maximal et optimal que peut fournir le Mth à une vitesse W_{th} donnée, noté : $C_{thmax}(W_{th})$ et $C_{thopt}(W_{th})$, par contre le couple thermique minimal est nulle pour tout W_{th} : $C_{thmin}(W_{th}) = 0$, (freinage exclusivement assuré la ME) [19].

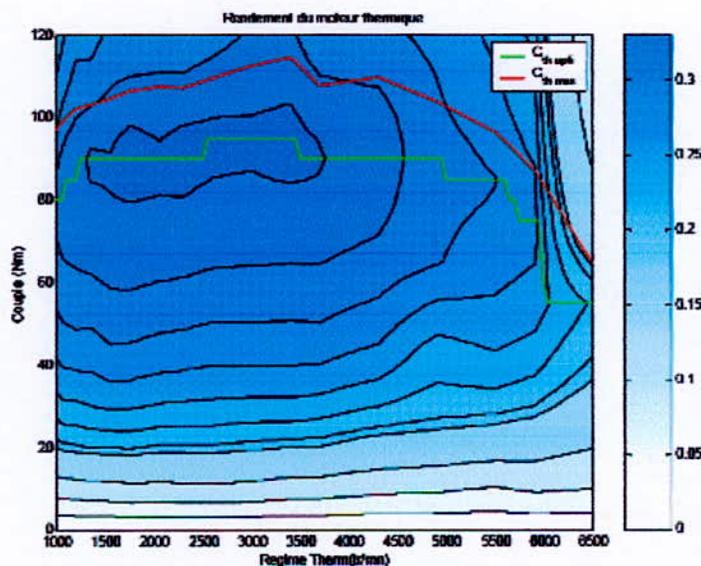


FIGURE II.4 – Cartographie du rendement du moteur thermique

II.2.2 La machine électrique :

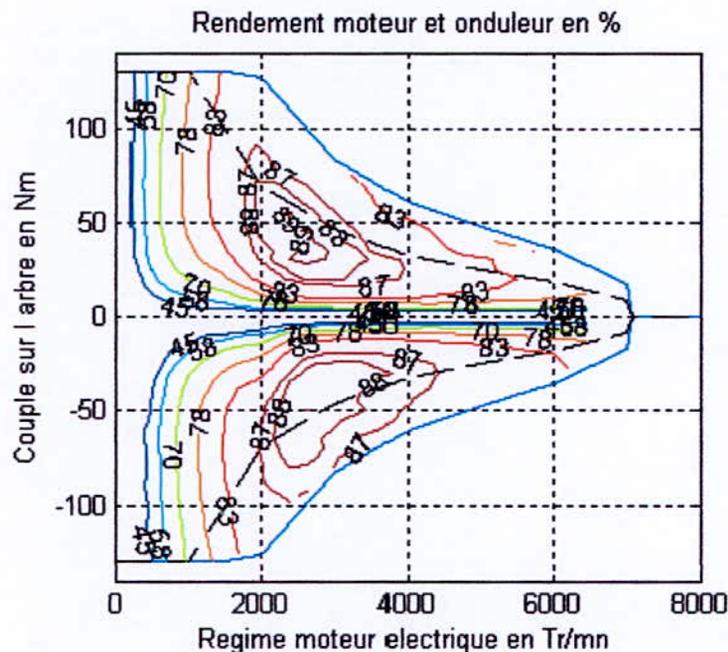


FIGURE II.5 – Cartographie du rendement de l'ensemble (ME+convertisseur)

Comme pour le moteur thermique le point de fonctionnement de la ME est définie par un couple C_e et un régime sur l'arbre W_e . Pour chaque point de fonctionnement une puissance perdue P_e est donnée par une cartographie, cette dernière correspond à l'énergie perdue au niveau de l'ensemble : (ME+convertisseur) [8]. Un rendement peut caractériser cette perte

$$\text{noté : } \text{rend}_e = \frac{C_e \cdot W_e}{C_e \cdot W_e + P_e}$$

En faite, la cartographie fournit les pertes uniquement pour des couples $C_e > 0$, à ce moment on utilise le fait que : $P_e(-C_e, W_e) = P_e(C_e, W_e)$, pour déduire les pertes correspondants aux couples négatifs (étant donné que la ME fonctionne dans les quatre quadrants du plan couple-vitesse). Comme pour le moteur thermique nous auront besoin encore de deux vecteurs correspondants aux couples maximal et optimal que peut fournir la ME pour W_e donnée, on note : $C_{e\max}(W_e)$ et $C_{e\text{opt}}(W_e)$, tout en gardant à l'esprit la réversibilité de la ME, c'est-à-dire : $C_{e\min}(W_e) = -C_{e\max}(W_e)$ [19].

II.2.3 La batterie

Pour notre cas un modèle simplifié est utilisé considérant la batterie comme un générateur de tension dont la tension à vide E_b est constante et reliée en série à une résistance R_b caractérisant la résistance interne de la batterie. En réalité, la résistance R_b dépend du sens du courant I_b la traversant, seulement pour simplifier l'étude une résistance moyenne est retenue.

Néanmoins il se trouve essentielle de citer les hypothèses permettant d'aboutir à ce modèle de la batterie :[1]

- E_b et R_b sont indépendants de l'état de charge de la batterie (alors qu'en réalité elles sont déterminées à partir d'un niveau de charge de 50%, et dépendent de sa variation).
- L'influence de la température n'a pas été prise en compte.

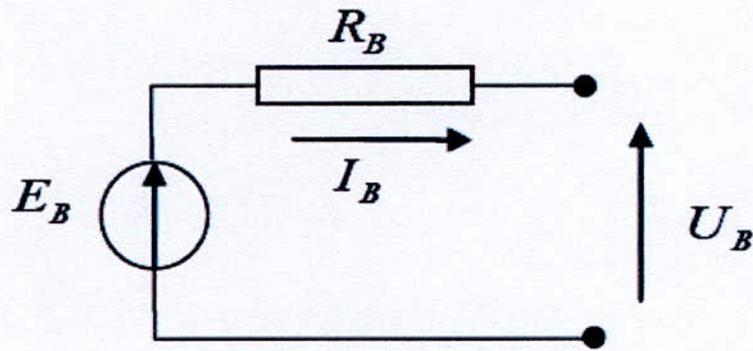


FIGURE II.6 – Circuit équivalent de la batterie

– Le niveau du courant de décharge n’affecte pas la capacité de la batterie[8].
L’état de la batterie peut être caractérisé à travers une des deux grandeurs équivalentes (variable d’état) :

1. La charge contenue dans la batterie Q_b :

$$I_b = \frac{dQ_b}{dt}$$

En échantillonné on trouve :

$$Q_b(i + 1) = Q_b(i) - I_b(i).T_e$$

Souvent un rendement de 0.96 est introduit sur le courant en phase de recharge ($I_b < 0$), nommé *acceptance de charge* [8], que nous prendront égale à 1.

2. L’énergie contenue dans la batterie X :

En mettant :

$$E_b.Q_b(t) = X(t)$$

On obtient :

$$X(i + 1) = X(i) - E_b.I_b.T_e$$

$$X(i + 1) = X(i) - P_b.T_e$$

Avec P_b la puissance fournie (reçue) par la batterie à l’instant $i.T_e$.

Notons que c’est cette formulation qui sera adoptée pour notre étude.

En ce qui concerne l’état de charge noté : $SOC(t)$, il peut être déduit à partir de l’une des deux formulations précédentes, en effet :

$$SOC(t) = \frac{X(t)}{X_{max}} = \frac{E_b.Q_b(t)}{E_b.Q_{bmax}} = \frac{Q_b(t)}{Q_{bmax}}$$

II.2.4 La boite de vitesses

Elle comprend deux rapports {1,2} dont le passage de l’un vers l’autre est considéré comme étant instantané (boite de vitesse sous entend le différentiel intégré), en effet :

$$C_r = R(k).\eta_{bv}^\alpha.C_r' \text{ et } W_r = \frac{W'}{R(k)}$$

$R(k)$: Le rapport de réduction correspondant au k ième numéro de boîte.

C_r : Le couple aux roues.

W_r : La vitesse aux roues.

η_{bv} : Le rendement de la boîte.

W' : La vitesse de rotation à l'entrée de la boîte.

C'_r : Le couple à l'entrée de la boîte.

Le rendement de la boîte caractérise l'énergie perdue par frottement au niveau du mécanisme de transmission (engrenage, courroie) de puissance situé au niveau la boîte (différentiel y compris), donc suivant le sens dans lequel transite cette dernière le rendement prend valeur (on le considère Independent du nombre du rapport k) on note : $\alpha = \text{sign}(C_r)$

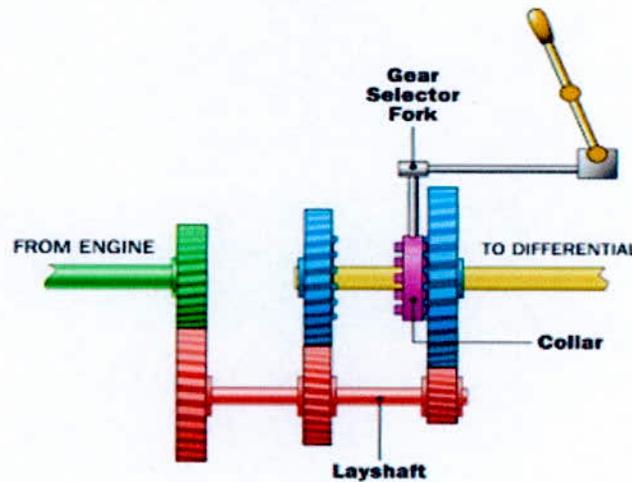


FIGURE II.7 – Schéma de principe de la boîte à vitesse

II.2.5 Le réducteur de vitesse

Comme pour la boîte de vitesse, le réducteur est modélisé par un rapport de réduction constant et un rendement dépendant du sens de l'énergie électrique transférée :

$$C'_e = \eta_{red}^{\beta} \cdot C_e$$

$$W_e = W'_e \rho$$

$$\beta = \text{sign}(C_e)$$

C_e : Le couple sur l'arbre de la ME (à l'entrée du réducteur).

C'_e : Le couple à la sortie du réducteur.

W_e : La vitesse de rotation de la machine électrique.

W'_e : La vitesse de rotation à la sortie du réducteur.

η_{red} : Le rendement du réducteur.

En fait, le réducteur est utilisé pour adapter les vitesses de rotations des deux organes de tractions, d'autre terme le couplage impose que les deux arbres couplés aient la même vitesse de rotation, seulement, il se peut que l'un des deux ne peut assurer la vitesse imposée par l'autre, d'où la nécessité d'un réducteur du côté de la ME afin qu'elle puisse supporter les régimes

élevés du M_{th} , ou encore, le réducteur a été calculé pour que les deux moteurs atteignent simultanément leur régime maximal [19], on note :

$$\rho = \frac{W_{emax}}{W_{thmax}}$$

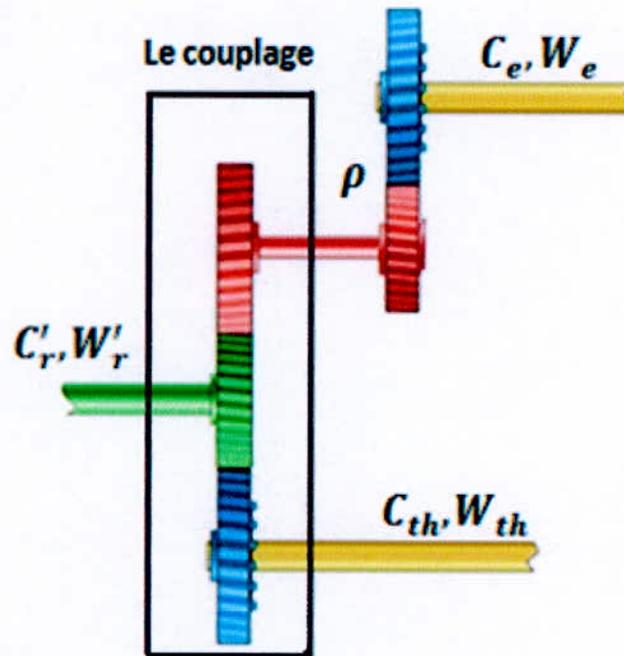


FIGURE II.8 – Couplage entre les deux sources d'énergie

II.2.6 L'embrayage

Le modèle étudié présente l'embrayage dans le cas où il est situé entre le moteur thermique et le couplage des deux sources. Afin de garantir un bon fonctionnement du moteur thermique, il est supposé que l'embrayage soit ouvert quand le régime de son arbre de sortie est inférieur au régime de ralenti ou bien quand $W_{th} < W_{thmin}$, à ce moment c'est à le moteur électrique seul d'assurer la traction du véhicule quant à l'autre moteur est soit éteint, soit commandé en son régime de ralenti, les deux modes de fonctionnement de l'embrayage sont présentés dans la figure suivante :

On note :

$$W_{th} = \max(W_{thmin}, W'_{th})$$

$$C'_{th} = EMB.C_{th}$$

W'_{th} : La vitesse de rotation à la sortie de l'embrayage. W_{thmin} : La vitesse de rotation minimale du Mth pour que ce dernier reste allumé. EMB : Variable Booléenne caractérisant l'état de l'embrayage {ouvert, fermé} = {0,1}. C'_{th} : Le couple à la sortie de l'embrayage.

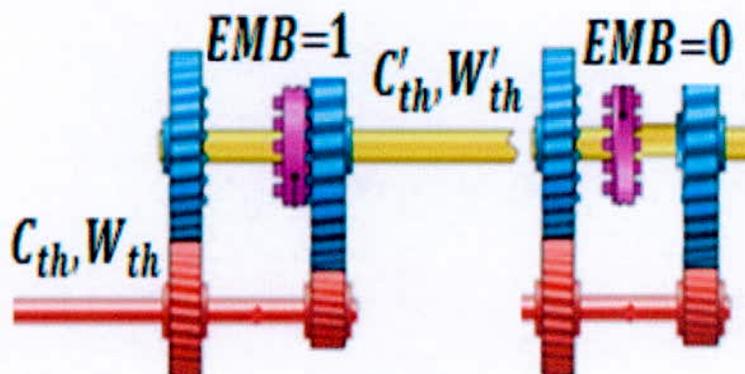


FIGURE II.9 – Les modes de fonctionnement de l’embrayage

II.2.7 Le modèle dynamique du véhicule

Afin d’établir un modèle dynamique du véhicule un certain nombre d’hypothèses sera posé :[1]

- le véhicule se déplace longitudinalement.
- le véhicule est considéré comme un solide ponctuel.
- certaines dynamiques rapides telles que le glissement des roues sur la chaussée sont négligées.
- le véhicule est équipé d’une seule roue (virtuelle) qui est soumise au couple développé par le groupe motopropulseur.

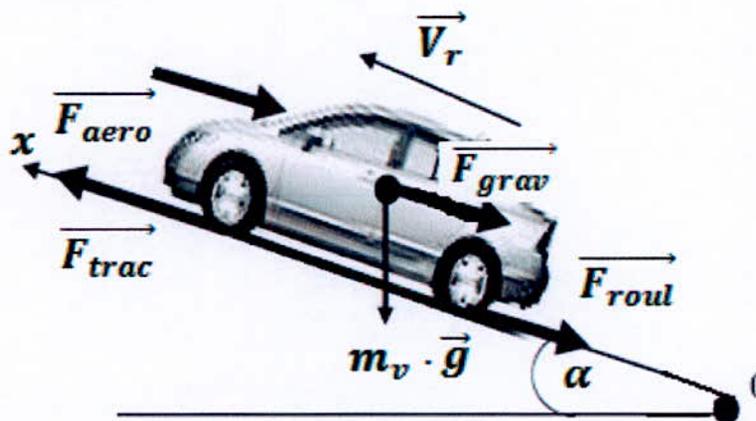


FIGURE II.10 – Les différentes forces agissants sur le véhicule

On utilisant le principe fondamental de la dynamique on obtient :

$$C_r = R(m_{vt} \cdot \frac{dV_r}{dt} + F_{res})$$

Avec :

C_r : Le couple demandé aux roues.

R : Le rayon de la roue.

V_r : La vitesse du véhicule.

m_{vt} : La masse totale du véhicule donnée par :

$$m_{vt} = m_v + m_{GMP}$$

Ou m_v est la somme des masses des différents éléments du véhicule, et m_{GMP} constitue la masse inertielle de la partie tournante de la chaîne de traction (roue, Mth, ME), donnée par :

$$m_{GMP} = \frac{1}{R^2} \cdot (4 \cdot J_{roue} + (J_{th} + \rho^2 \cdot J_e) \cdot R(k)^2)$$

Avec : J_{roue} , J_{th} et J_e constituent les moments d'inerties des éléments respectifs.

Lorsque le rapport de boîte $R(k)$ est à optimiser par la loi de commande une valeur moyenne est considérée [8]. F_{res} : La somme des forces de résistance donnée par :

$$F_{res} = F_{grav} + F_{aero} + F_{roul}$$

Avec :

$$F_{grav} = m_v \cdot g \cdot \sin(\alpha)$$

$$F_{roul} = m_v \cdot g \cdot \cos(\alpha) \cdot a$$

$$F_{aero} = 1/2 \cdot \rho_{aire} \cdot S_f \cdot C_x \cdot V_r^2$$

ρ_{aire} : La masse volumique de l'air.

S_f : La surface frontale du véhicule.

C_x : Coefficient de résistance aérodynamique.

a : Coefficients de résistance au roulement.

II.2.8 Données numériques du prototype utilisé

Sachant que le moteur est de type courant continu à excitation séparée alimenté en 240V déjà utilisé en série sur des véhicules électriques. Sa puissance maximale est de 43kW.

Alors que le moteur thermique est un moteur à essence ayant cylindrée de 1.4l, sa puissance maximale est de 75ch (55kW) à 5800tr/mn.

Quant la batterie choisie, Essentiellement pour des raisons de coût, la technologie *plomb pur* a été retenue, 20 modules de 12V-26Ah, représentant une masse de 200kg, assurent l'alimentation du moteur électrique et des différents accessoires du groupe motopropulseur (vérins, calculateurs, etc) [19].

Les autres caractéristiques des différents éléments sont détaillées dans le tableau suivant :

E	46.6kJ/g	m_v	1560 Kg
E_b/R_b	240V/0.03Ω	R :	0.29 m
Q_{bmax}	26 Ah	J_r	0.65Kg/m ²
ρ	0.92	J_{th}	0.15Kg/m ²
$R(k) = [R(1); R(2)]$	[8.4094 ; 3.6662]	J_e	0.103Kg/m ²
W_{emax}	6000tr/min	α	0
W_{emin}	0tr/min	S_f	2.59m ²
W_{thmax}	6500tr/min	C_x	0.37
W_{thmin}	1000tr/min	a	0.035
$\eta_{red} = \eta_{bv}$	0.96	ρ_{air}	0.3 Kg/m ³

TABLE II.2 – Données numériques du prototype adopté

II.3 Simulation du modèle dynamique

La simulation du modèle dynamique consiste à retrouver le couple demandé aux roues C_r , à partir d'un cycle de vitesse donné (le cycle NEDC pour notre cas), en utilisant la relation suivante :

$$C_r = R.(m_{vt} \cdot \frac{dV_r}{dt} + F_{res})$$

Les résultats obtenus constitueront des entrées pour les différentes lois de gestion de l'énergie du GMP.

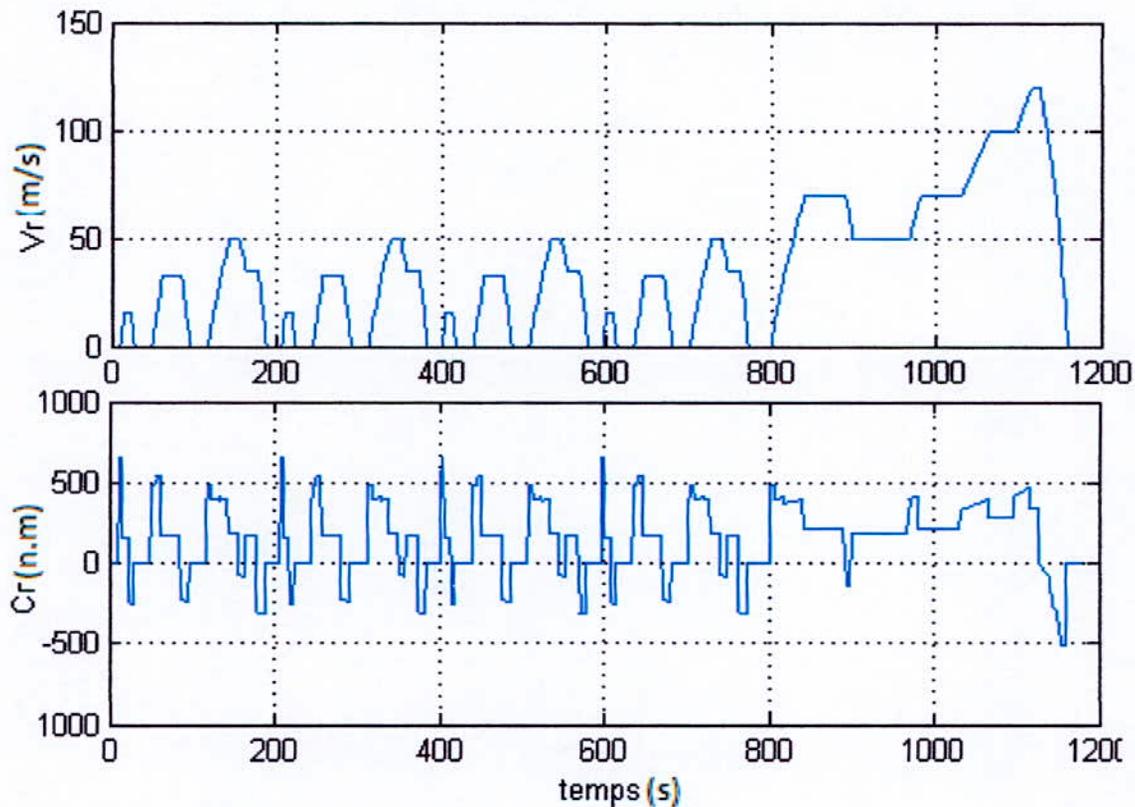


FIGURE II.11 – Simulation du modèle dynamique du prototype adopté

II.4 Formulation du problème d'optimisation [1]

Le prototype sur lequel se basera notre étude, est de type parallèle simple arbre à un seul embrayage situé entre le moteur thermique et le couplage des deux sources d'énergie. L'optimisation du fonctionnement d'une telle architecture est d'une complexité considérable, de part le nombre de contrainte à satisfaire et les types de variables à optimiser. Pour commencer, rappelons que Le problème est formulé en temps discret à une période d'échantillonnage $T_e = 1s$.

II.4.1 Le critère

Il résume les performances attendues, et se caractérise souvent par une expression mathématique à minimiser (ou à maximiser). Pour notre application nous cherchons à minimiser la consommation totale le long du cycle parcouru, on note :

$$J = \sum_{i=1}^N D(C_{th}(i), W_{th}(i)).T_e$$

D'autres composantes pondérées peuvent être rajoutées, elles peuvent caractériser le taux de polluants, la consommation au démarrage ou même parfois les températures du catalyseur (Elles concernent tous l'état du moteur thermique).

II.4.2 L'équation d'état

Rappelons que l'énergie contenue dans la batterie constitue notre seule variable d'état dont la dynamique est décrite ci-dessous :

$$X(i + 1) = X(i) - P_b(C_e(i), W_e(i)).T_e$$

Avec P_b , la puissance prélevée de (ou stockée dans) la batterie à l'instant $i.T_e$. Une partie de cette énergie est utilisée en propulsion ou provient de la récupération (par freinage ou par régénération), une autre partie sert à alimenter des dispositifs auxiliaires (climatisation, chauffage...), et une dernière partie se perd par effet joule le long du bus électrique de la voiture, selon le circuit illustré par la figure suivante : L'équation de conservation de puissance

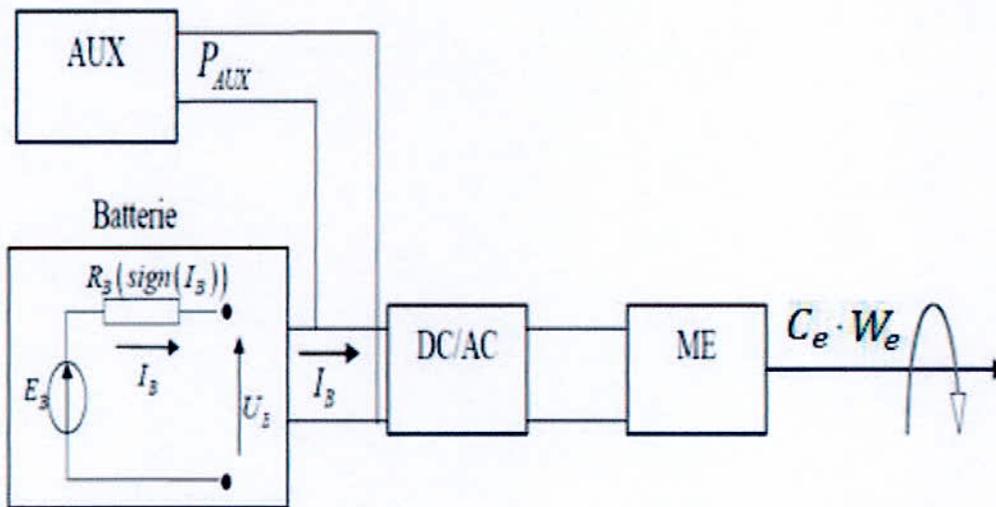


FIGURE II.12 – Circuit de charge/décharge de la batterie

électrique est alors donnée par :

$$P_b = E_b \cdot I_b = C_e \cdot W_e + P_e + R_b \cdot I_b^2 + P_{aux}$$

Où P_e est la puissance perdue dans l'ensemble (ME+convertisseur). Pour une première approximation P_{aux} est considéré nulle, par contre dans la majorité des approches ce terme est

considéré comme étant une perturbation par rapport au quel la robustesse de la stratégie sera évaluée. Rappelons aussi que pour un point de fonctionnement donné de la ME, $P_e(C_e, W_e)$ est donnée par la cartographie appropriée, I_b à ce moment se déduit de la résolution de l'équation du deuxième ordre suivante :

$$R_b \cdot I_b^2 - E_b \cdot I_b + C_e \cdot W_e + P_e + P_{aux} = 0$$

Deux solutions sont envisagées à ce type d'équation $\{I_{b2}, I_{b1}\}$, le courant le plus petit sera gardé afin de minimiser les pertes joules [8]. Notons de plus que l'état du moteur caractérisé par la variable $\theta = \{0, 1\}$ correspondant aux deux cas {moteur éteint, moteur allumé}, n'est pas considéré car il est redondant au couple thermique, c'est à dire : Lorsque $C_{th} = 0$, Mth est éteint et $\theta = 0$. Lorsque $C_{th} > 0$, Mth est allumé et $\theta = 1$.

II.4.3 Les contraintes égalités

L'architecture parallèle est une architecture à addition de couple et dont les vitesses des deux moteurs sont égales, à un rapport de réduction près, ce qui permettrait d'établir les égalités suivantes :

$$C_r(i) = R(k(i)) \cdot \eta_{bv}^\alpha \cdot (C_{th}(i) + \rho \cdot \eta_{red}^\beta \cdot C_e(i))$$

$$W_r(i) = \frac{W_{th}(i)}{R(k(i))} = \frac{W_e(i)}{\rho \cdot R(k(i))}$$

II.4.4 Les contraintes inégalités

Se sont des contraintes sur les vitesses, les couples et sur l'état de charge de la batterie :

$$W_{thralentie} = W_{thmin} < W_{th} < W_{thmax}$$

$$0 = W_{emin} < W_e < W_{emax}$$

$$0 = C_{thmin}(W_{th}) < C_{th} < C_{thmax}(W_{th})$$

$$-C_{emax}(W_e) < C_e < C_{emax}(W_e)$$

Pour un bon fonctionnement de la batterie et pour que les valeurs de ses éléments restent relativement constantes, il est indispensable de limiter son état de charge [20] :

$$X_{min} < X(i) < X_{max}$$

II.4.5 Les conditions aux limites

Les conditions aux limites concernent la variation globale de l'état de charge qui doit être respectée pour les VEHS non rechargeables (Plug in) :

$$X(N) = X(1) + DX_{desire}$$

Avec DX_{desire} est l'écart global désiré.

II.4.6 Réécriture du problème d'optimisation

Le couple thermique C_{th} et le rapport k constituent le vecteur commande, noté u dont la détermination à un instant donné suffit pour localiser le point de fonctionnement des différents organes de la chaîne de traction hybride.

Notons par $w(i)$ le vecteur caractérisant les conditions de roulages à l'instant i :

$$w(i) = [C_r(i), W_r(i)]$$

avec : W caractérise l'ensemble des conditions de roulage le long du cycle à parcourir : $w(i) \in W$.

On considère encore :

$$u(i) = [C_{th}(i), k(i)]$$

avec :

$$u(i) \in U(w(i))$$

Avec U caractérise l'espace de commande admissible tenant compte des conditions de roulage à chaque instant.

Le problème se réécrit de la manière suivante :

$$J = \sum_{i=1}^N Q(u(i), w(i)).T_e$$

$$X(i+1) = X(i) - P_{bat}(u(i), w(i)).T_e$$

$$P_{bat}(u(i), w(i)) = P_b(C_e(i), W_e(i))$$

$$k(i) \in K(w(i))$$

Avec :

$$K(w(i)) = \{k \setminus tq : k \in \{1, 2\} \text{ et } : W_{thmin} < W_r(i).R(k).\rho < W_{thmax}\}$$

$$C'_{thmin}(i) < C_{th}(i) < C'_{thmax}(i)$$

avec :

$$C'_{thmin}(i) = \max\left(\frac{C_r(i)}{R(k(i)).\eta_{bv}^\alpha} - \eta_{red}^\beta \cdot \rho \cdot C_{emax}(W_e(i)), 0\right)$$

$$C'_{thmax}(i) = \min\left(\frac{C_r(i)}{R(k(i)).\eta_{bv}^\alpha} - \eta_{red}^\beta \cdot \rho \cdot C_{emin}(W_e(i)), C_{thmax}(W_{th}(i))\right)$$

La résolution du problème d'optimisation revient à déterminer la séquence de commande optimale u_{opti} permettant de minimiser le critère choisit :

$$u_{opti}(i) = [C_{thopti}(i), k_{opti}(i)] = \arg \min_{u \in U(W)} J$$

Rappelant avant d'étaler les différentes stratégies de gestion, que la simulation du modèle adopté en mode thermique pur (ie :sans considérer la seconde source), et le long du cycle utilisé (NEDC) a donné une consommation finale de 8.20 l/100km. Ce qui servira de référence pour l'évaluation des stratégies à aborder dans les chapitres suivants.

II.5 Conclusion

Ce chapitre contient un état de l'art sur les outils et les techniques de modélisation des VEHS, et a mis le point sur les différents types de simulateurs existants selon leurs principes à la fois de mise en œuvre et de fonctionnement. Puis une approche de modélisation quasi-statique s'est appliquée sur un prototype réel dont les caractéristiques sont reprises de la littérature, cette modélisation nous servira d'outil pour l'évaluation des différentes stratégies de gestion dans les parties qui suivent. A cette fin une formulation du problème d'optimisation et de gestion de l'énergie se basant sur la minimisation de la consommation globale en carburant est venue compléter le chapitre.

Chapitre III

Les stratégies de gestion off ligne

III.1 Etat de l'art

La présence d'une seconde source d'énergie réversible dans le groupe motopropulseur hybride introduit des degrés de libertés supplémentaires pour satisfaire la puissance demandée par le conducteur.

Il est donc nécessaire de trouver une manière efficace de partager cette puissance entre les différentes sources. Effectivement une mauvaise gestion énergétique peut amener à des résultats absurdes : consommations analogues, voire supérieures de celles d'un véhicule conventionnel équivalent, à cause du surpoids qu'engendrent les batteries, les machines électriques, l'électronique de puissance associée, etc.

Le problème de la gestion énergétique revient alors à trouver la meilleure répartition de la puissance demandée par le conducteur entre les différentes sources d'énergie, de manière à minimiser un critère donné. Ce dernier peut-être basé sur la consommation en carburant, les émissions de polluants, la durée de vie de composants, le confort de conduite, etc.

En raison de la difficulté de prise en compte quantitative de certains paramètres de nature subjective (confort de conduite) et de la complexité de certains modèles (vieillesse de la batterie) les critères considérés sont souvent la consommation énergétique du véhicule et/ou les émissions de polluants. Les algorithmes permettant de résoudre ce problème d'optimisation sont appelés *lois de gestion d'énergie* ou encore *stratégie de commande*. À chaque instant, les stratégies de commande calculent les commandes de démarrages/arrêts du moteur thermique, les points de fonctionnement de chaque organe de traction ainsi que les alternances de phases de recharge/décharge de l'élément de stockage de l'énergie. Le conducteur peut forcer certains modes de fonctionnement, par exemple la Toyota Prius II dispose d'un bouton *ZEV* (Zero Emission Vehicle) permettant de forcer le mode *tout électrique* en ville [1]. En effet, les lois ou les algorithmes, prennent leurs places au niveau de la supervision dans l'hierarchie du contrôle du groupe motopropulseur, cette hiérarchie s'organise en trois niveaux :

- **Le niveau1** : concerne l'interface traduisant la demande du conducteur (la position des pédales d'accélérateur et du frein) en une puissance demandée aux roues.
- **Le niveau2** : concerne les algorithmes de gestion de l'énergie et de sa répartition entre les deux organes.
- **Le niveau3** : concerne la projection de la répartition imposée par le niveau 2 en des lois d'asservissement des différents organes de la chaîne de traction hybride.

III.1.1 Classification des stratégies de gestion d'énergie

Le long d'un parcours donné, la vitesse de l'engin et la puissance demandée par le conducteur à chaque instant caractérisent les données essentielles aux traitements par algorithmes d'optimisations, et selon la manière dont ces données sont exploitées, deux grandes classes de stratégies se distinguent à savoir les stratégies hors lignes et les stratégies temps réel (faisant l'objet du chapitre suivant).

III.1.2 Stratégies hors ligne et cycles normalisés

Qu'on trouve aussi sous le nom d'algorithmes d'optimisation globale ou algorithmes de traitement off ligne. Se sont des approches qui nécessitent une connaissance préalable du parcours à poursuivre, afin d'établir une gestion optimale de l'énergie.

La connaissance du parcours s'appuie sur la connaissance préalable des vitesses instantanées le long de ce dernier, et à partir du modèle dynamique du véhicule la puissance demandée à chaque point du cycle sera déterminée, d'où la connaissance préalable des données essentielles aux traitements par algorithmes d'optimisations.

Notion de cycle de vitesse normalisé : Il exprime l'évolution de la vitesse du véhicule en fonction du temps. Il permet d'évaluer la consommation et/ou les émissions de polluants du véhicule dans des conditions de roulage (vitesse véhicule et couple roues) identiques voir comparables [1].

Parmi ceux imposés par la norme Les cycles américains sont les plus utilisés, parmi lesquels on cite :

- *Le FTP-75 (Federal Test Procedure)* : il représente un cycle urbain avec une bonne partie de conduite en ville avec des arrêts fréquents et une partie sur autoroute.

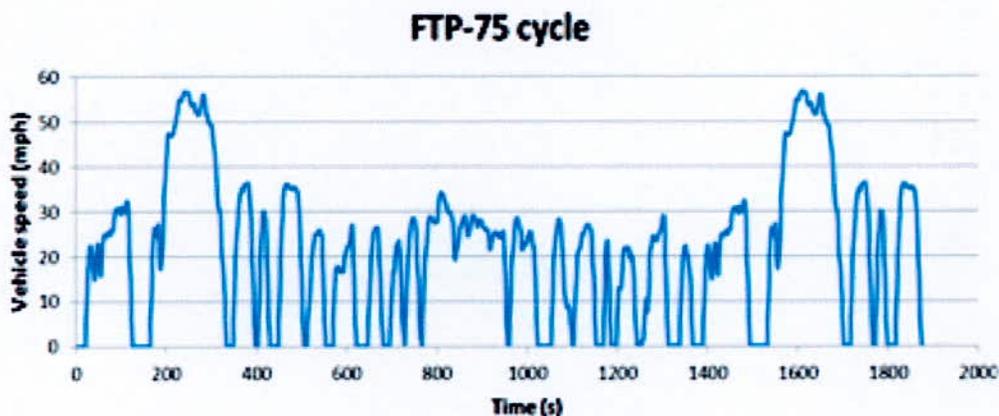


FIGURE III.1 – le cycle américain FTP-75 Normalisé

- *Le Highway fuel economy test (HWFET)* : il est utilisé pour évaluer la consommation en carburant sur un cycle de conduite type autoroute.

Dés 2007, d'autres cycles sont venues compléter les précédents dans le sens où les vitesses de pointe soient de plus en plus élevées, les accélérations de plus en plus fortes et le comportement de conduite de plus en plus agressif et même à des températures très

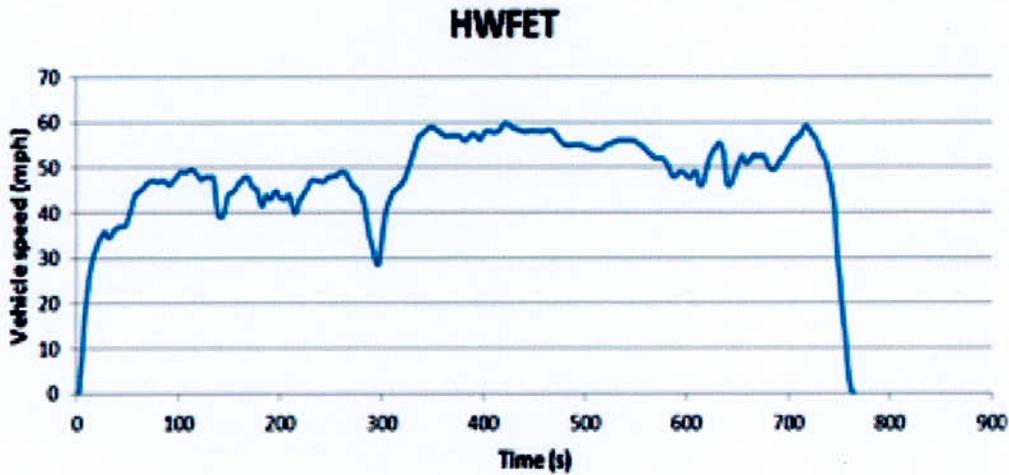


FIGURE III.2 – Le cycle américain HWFET normalisé

basses[21].

Quant aux cycles européens on trouve, parmi plein d'autres, le cycle *NEDC* (*New European driving cycle*) qui contient deux parties : une partie urbaine appelée *ECE15* qui est une répétition d'une même séquence quatre fois avec une vitesse moyenne de 17km/h. Et une partie extra-urbaine appelée *EUDC* avec une vitesse maximale de 120km/h, avec un parcours total de 11km de longueur. Le cycle NEDC ne reflète pas toutes les conditions d'usage réel du véhicule, néanmoins, il nous sert d'outil intéressant pour faciliter l'analyse et l'interprétation des résultats issus des différentes stratégies de commande[1].

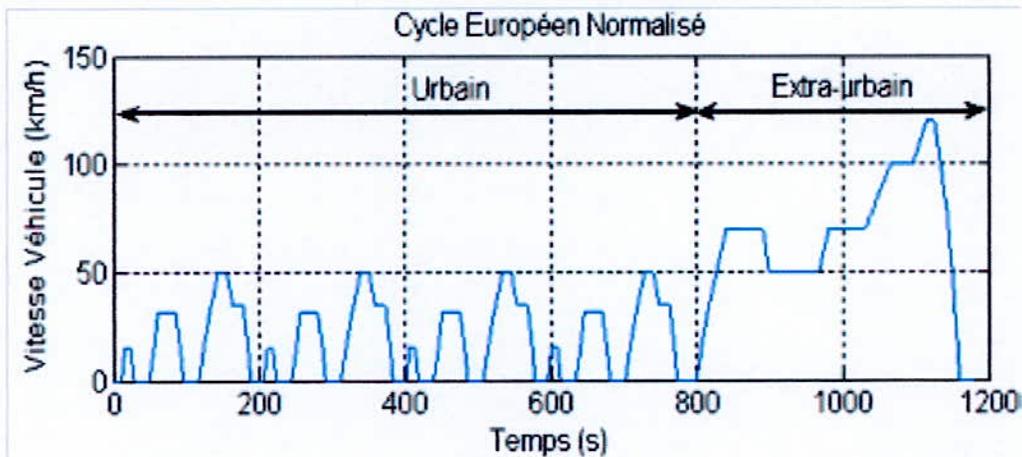


FIGURE III.3 – le cycle Européen normalisé NEDC

Il est évident que les stratégies d'optimisation globales sont des méthodes anticausales et non implémentables sur un véhicule réel, néanmoins leur utilité se justifie par deux éléments [18] :

- Elles nous permettent d'obtenir une indication sur le minimum de consommation qu'il nous serait possible d'atteindre sans connaissance à priori du cycle parcouru, c'est-à-dire qu'elles constituent une référence à approcher au mieux lors d'une application dans temps réel.

Il sera donc possible d'apporter un jugement sur la qualité d'une stratégie en ligne en comparant sa consommation sur cycle normalisé à celle issue d'une optimisation globale.

- Elles nous offrent la possibilité d'extraire des règles à partir des résultats de l'optimisation, qui pourront servir de base à l'élaboration de stratégie en ligne.
- Elles offrent aussi la possibilité d'intégrer les algorithmes d'optimisation globale dans une structure de commande temps réel à partir d'une estimation du parcours futurs (commande prédictive).

Dans les deux derniers cas, la solution ainsi obtenue est nécessairement sous-optimale [1].

Parmi ces approches on peut citer :

III.1.2.1 Les méthodes heuristiques et méta-heuristiques [8]

Ces méthodes demandent un encombrement mémoire variable, mais presque toujours présentant un temps de calcul prohibitif. Ajouter à cela, les difficultés que peut poser leur réglage afin d'obtenir une solution satisfaisante au problème. On peut citer brièvement les méthodes de type *recuit simulé* ont été testées par S. Delprat [19]. Les solutions fournies sont des optimaux locaux, souvent proches de l'optimum global. *Les algorithmes génétiques*, Dans ce cas, il faut formuler le problème en termes de génétique (définition de la population, des enfants, des critères d'hérédité, etc.) ce qui n'est pas toujours intuitif [22].

III.1.2.2 Les méthodes de résolution exactes

Elles se basent sur la théorie de la commande optimale et elles permettent de calculer l'optimum global sur un cycle de vitesse donné.

Ces méthodes sont regroupées en deux grandes catégories [1] :

1. *Les méthodes numériques* : qui consistent à parcourir l'espace de commande admissible afin de construire le chemin de commande minimisant le critère utilisé, souvent on s'incline sur des principes d'optimalité pour alléger la démarche, néanmoins, elles restent des méthodes très gourmandes en termes de temps de calcul et d'encombrement mémoire, citons par exemple la *programmation dynamique* [22], *les méthodes du tire* (simple ou multiple), *l'algorithme SCOP*, [7].
2. *Les méthodes d'optimisation analytique* : qui utilisent le calcul variationnel et le principe du *maximum de Pontriaguine*. Dans le cas général, les conditions d'optimalité peuvent être satisfaites, la difficulté consiste à résoudre ces conditions. [22]. Ces méthodes présentent l'avantage d'un calcul relativement rapide et d'un faible encombrement mémoire.

III.2 Application des stratégies *off ligne*

III.2.1 Le calcul des variations

III.2.1.1 Principe : [1],[19],[22]

Le calcul des variations s'inscrit dans les méthodes d'optimisation analytique utilisant à la fois le formalisme de Lagrange et les outils de la théorie de la commande optimale (*le*

Hamiltonien, principe du minimum de Pontriaguine), d'ailleurs, on la trouve souvent porter le nom de l'une des deux approches cités précédemment voire la commande optimale ou le formalisme de Lagrange.

Cette méthode est relativement simple et nécessite moins de temps de calcul et un espace mémoire beaucoup plus réduit que la programmation dynamique où les méthodes heuristiques. Pour être bref considérons le problème d'optimisation cette fois en temps continu et sans considérer la contrainte sur l'état de charge, ainsi on obtient :

1. *Le critère :*

$$J = \int_0^{t_f} Q(u(t), w(t)).dt$$

2. *Le système d'état :*

$$\dot{X}(t) = -P_{bat}(u(t), w(t))$$

3. *Le Hamiltonien :*

$$H = Q - \lambda \dot{X} = Q + \lambda \cdot P_{bat}$$

4. *Les équations canoniques d'Hamilton :*

$$\frac{\partial H}{\partial \lambda} = -\dot{X} = P_{bat}$$

$$\frac{\partial H}{\partial X} = \dot{\lambda} = 0 \Rightarrow \lambda(t) = \lambda(0) = \lambda_0 = cst$$

Donc l'Hamiltonien devient :

$$H = Q + \lambda_0 \cdot P_{bat}$$

Le principe du minimum nous dit que minimiser J revient à minimiser H , d'où on écrit que :

$$u_{opti}(i) = argmin_{u \in U(W)} H(u(i), w(i), \lambda_0)$$

Rappelons que $U(W)$ est l'espace de commande admissible, satisfaisant les deux contraintes suivantes :

$$C'_{thmin} < C_{th}(i) < C'_{thmax}$$

Avec :

$$C'_{thmin} = \max\left(\frac{C_r}{R(k) \cdot \eta_{bv}^\alpha} - \eta_{red}^\beta \cdot \rho \cdot C_{emax}(W_e), 0\right)$$

$$C'_{thmax} = \min\left(\frac{C_r}{R(k) \cdot \eta_{bv}^\alpha} - \eta_{red}^\beta \cdot \rho \cdot C_{emin}(W_e), C_{thmax}(W_{th})\right)$$

et :

$$k \in K(W)$$

Avec :

$$K(W) = \{k \setminus tq : k \in \{1, 2\} \text{ et } : W_{thmin} < W_r.R(k) < W_{thmax}\}$$

Donc l'approche consiste à balayer pour chaque rapport k , l'ensemble des couples thermiques admissible à la recherche de la paire $\{k^*(i), C_{th}^*(i)\}$ minimisant l'Hamiltonien $H(u(i), w(i), \lambda_0)$. Jusque là, nous n'avions pas tenu compte des variations de l'état de charge, par ce qu'en faite, un choix excessif de λ_0 pourrait conduire à une décharge voire une surcharge importante de la batterie. Pour remédier à ce problème, une approche dichotomique serait faite pour obtenir un λ_0 garantissant une variation globale de l'état de charge acceptable, mais en contrepartie cette étape transforme le problème de départ en un problème sous optimal.

III.2.1.2 Choix du facteur de Lagrange

Sachant que : $Dx_{global} = \sum_{i=1}^N P_{bat} \cdot T_e$ et que λ_0 pondère P_{bat} dans la formule du Hamiltonien à minimiser, ce qui fait que plus la valeur de λ_0 est grande plus les variations de P_{bat} seront limitées et de même pour les variations de X .

La courbe suivante nous montre la variation de Dx_{global} en fonction de λ_0 pour le prototype adopté.

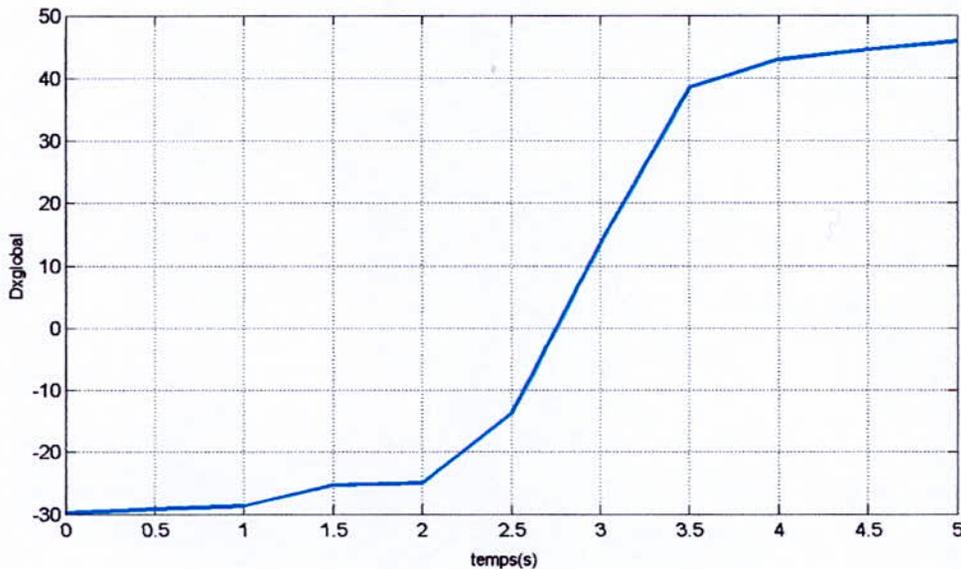


FIGURE III.4 – Variation de Dx_{global} en fonction de λ_0

III.2.1.3 Résultats et simulation

Etant donnée un état de charge initial $X_1 = 60\%$, et une variation admissible entre $X_{mini} = 55\%$ et $X_{maxi} = 65\%$ et pour une pondération optimale $\lambda_0 = 2.9$, nous avons obtenu une variation d'état de charge globale Dx_{global} de -0.94% et une consommation finale de $4.73 \text{ l}/100\text{km}$.

La figure suivante nous montre les résultats de simulation de cette approche : Nous remarquons que les séquences de démarrages/arrêt du moteur thermique et les changements de rapports de

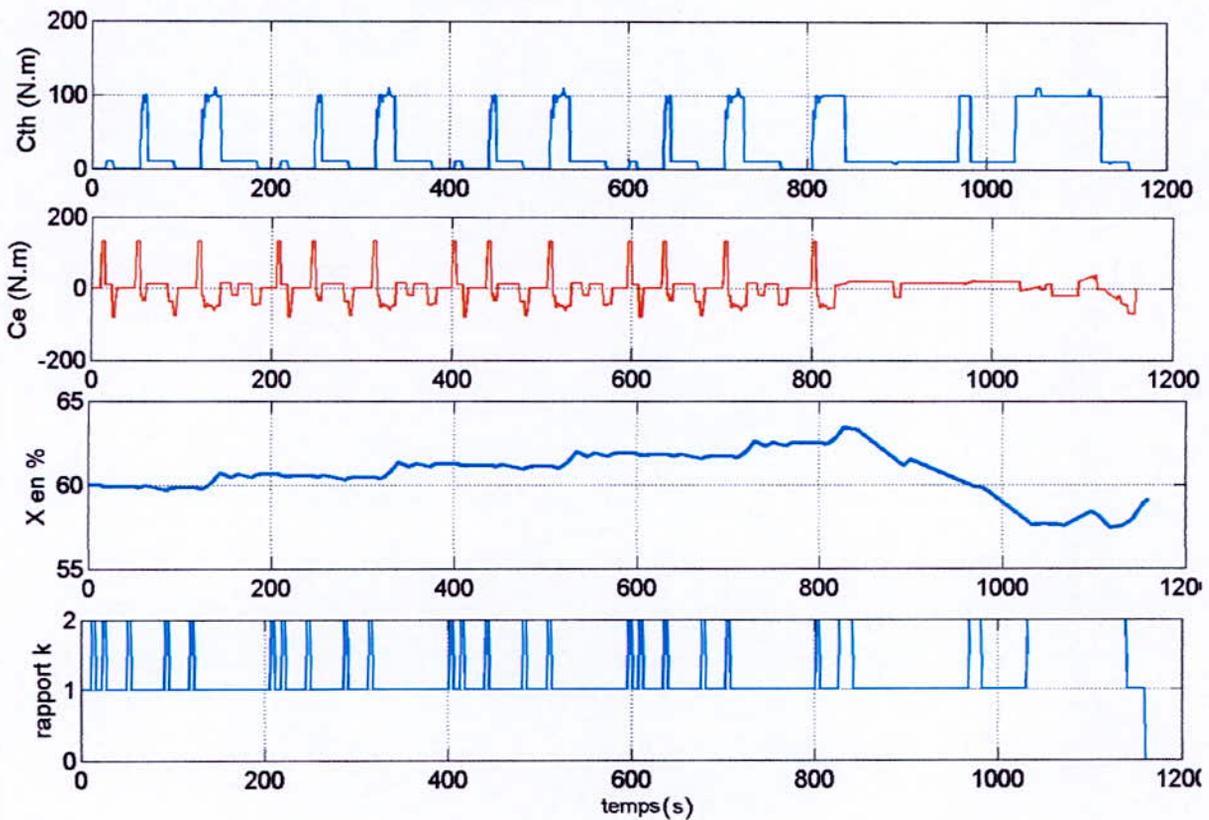


FIGURE III.5 – simulation des résultats de l'approche calcul des variations

boite obtenus sont peu réalistes (plusieurs arrêts/démarrages et changement de rapports sur des durées de quelques secondes et sauts dans les changements de rapports), cette constatation nous suivra le long de toutes les méthodes utilisées.

Néanmoins, l'objectif de cette étude étant d'évaluer le minimum de consommation de carburant atteignable par chaque stratégie, dès lors ces comportements seront tolérés.

Notons que pour des applications réalistes, l'état du moteur et les rapports de boîte obtenus par l'algorithme d'optimisation doivent être filtrés soit par une modification du critère soit par l'utilisation des filtres fréquentiels.

III.2.2 La programmation dynamique

III.2.2.1 Principe : [1], [22], [19]

La programmation prend sens lorsqu'on a un système dynamique régi par une équation de la forme $\dot{x} = f(x, u, t)$, et on se préoccupe de l'emmener d'un état initial donné vers un état final imposé en satisfaisant des contraintes et en garantissant l'optimalité de la trajectoire choisie en terme du critère adopté.

D'un point de vue technique la programmation dynamique repose sur un balayage de la quasi-totalité des trajectoires admissibles afin de retrouver l'optimale d'entre elles.

Ce qui s'avère très gourmand en terme de temps de calcul et de capacité mémoire, néanmoins quelques ajustements sont apportés à la méthode afin d'apaiser le coût d'une telle approche.

L'aspect théorique de la méthode repose sur le principe de *HBJ* (*Hamilton, Bellman, Jacobi*),

tout en reliant l'équation de HJB à la théorie des graphs via l'algorithme de Ford. L'aspect théorique se trouve formellement détaillé dans [8] et [7]. Dans ce qui suit, une explication pratique et adaptée à notre problème sera relatée.

En fait, l'approche se fera en trois étapes :

III.2.2.1.1 Construction de l'espace d'état admissible :

L'espace d'état admissible est l'ensemble des trajectoires d'état satisfaisants les contraintes du problème d'optimisation.

Donc cet espace sera délimité par deux courbes :

X_{max} : qui correspond à la séquence de charge maximale.

X_{min} : qui à son tour correspond à la séquence de charge minimale.

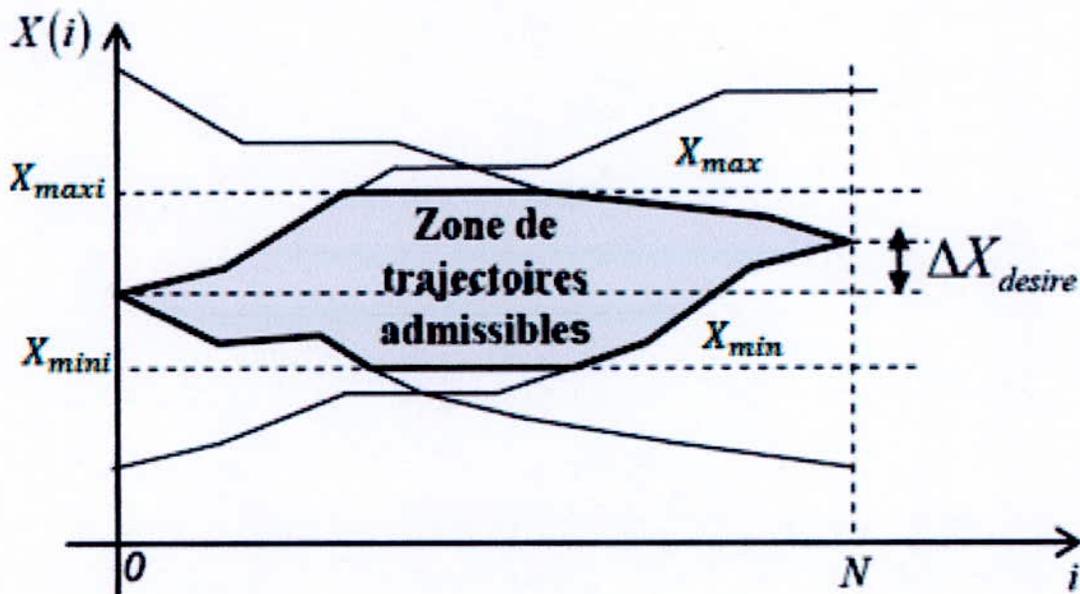


FIGURE III.6 – génération de la surface d'état admissible

Pour un profil de vitesse donné et sachant que $X_{max}(1) = X_{min}(1) = X_1$ (l'état de charge initial) on a :

$$X_{max}(i + 1) = X_{max}(i) - \min_{u \in U(W)} P_{bat}(u(i), w(i))$$

$$X_{min}(i + 1) = X_{min}(i) - \max_{u \in U(W)} P_{bat}(u(i), w(i))$$

Ce calcul itératif continue pour X_{max} jusqu'à ce qu'il franchisse la borne maximale sur l'état de charge imposée par la contrainte :

$$X < X_{maxi}$$

Est il continue pour X_{min} jusqu'à ce qu'il franchisse la borne minimale sur l'état de charge imposée par la contrainte :

$$X < X_{mini}$$

Reprenons le calcul cette fois depuis $X_{max}(N) = X_{min}(N) = X_N$ (l'état de charge final) avec :

$$X_{max}(i) = X_{max}(i + 1) + \max_{u \in U(W)} P_{bat}(u(i), w(i))$$

$$X_{min}(i) = X_{min}(i + 1) + \min_{u \in U(W)} P_{bat}(u(i), w(i))$$

De la même manière ce calcul se poursuit pour X_{max} et X_{min} jusqu'au franchissement des bornes respectives citées précédemment.

Un schéma de surface admissible est représenté dans la figure suivante [1] :

III.2.2.2 Maillage de la zone admissible

On prévoit un maillage vertical et régulier de pas δx de la surface admissible, et on définit :

$$\Omega_i = \{X_j(i.T_e) \mid X_j(i.T_e) = X_{min} + j.\delta x, j = \overline{0, n_i}\}$$

Avec :

$$n_i = \left[\frac{X_{max}(i.T_e) - X_{min}(i.T_e)}{\delta x} \right]$$

Cette subdivision est illustrée dans la figure suivante :

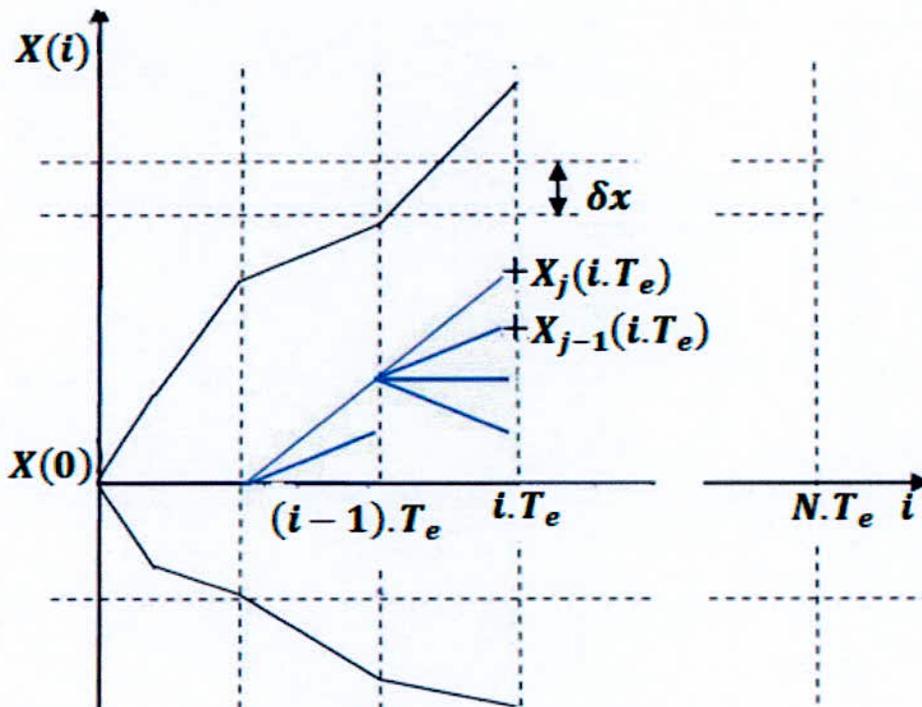


FIGURE III.7 – Maillage de la zone admissible

III.2.2.2.1 Calcule de la trajectoire optimale

Rappelons que l'objectif est de ramener l'état de charge d'un état initial X_1 vers un état final X_N en minimisant la consommation globale le long du cycle parcouru. Donc le problème se traduit en comment parcourir ce graphe à la recherche de l'optimum ?

Pour répondre à cette question on fait appel à la théorie des graphes, là où on trouve un principe fondamentale permettant de retrouver la trajectoire optimale à partir d'un ensemble donné, noté : *le principe d'optimalité de Bellman*.

Enoncé : [23] « Dans un processus d'optimisation dynamique, une suite de décisions est optimale si, quelque soient l'état et l'instant considéré sur la trajectoire qui lui est associée, les décisions ultérieures constituent une suite optimale de décisions pour le sous-problème dynamique ayant cet état et cet instant comme conditions initiales. » Pour se faire plaçons nous à l'instant d'échantillonnage $i \cdot T_e$ et considérons les variables suivantes :

$$C_{j \rightarrow l}(i) = \text{cout} (X_j(i) \rightarrow X_l(i + 1))$$

$$S_k(i + 1) = \text{le cout optimale du passage} (X_k(i + 1) \rightarrow X_N)$$

Ce qui nous permettra d'écrire : $S_{j \in \overline{0, n_i}}(i) = \min_{l \in \overline{0, n_{i+1}}} [C_{j \rightarrow l}(i) + S_l(i + 1)]$

Ces relations sont schématisées par la figure suivante :

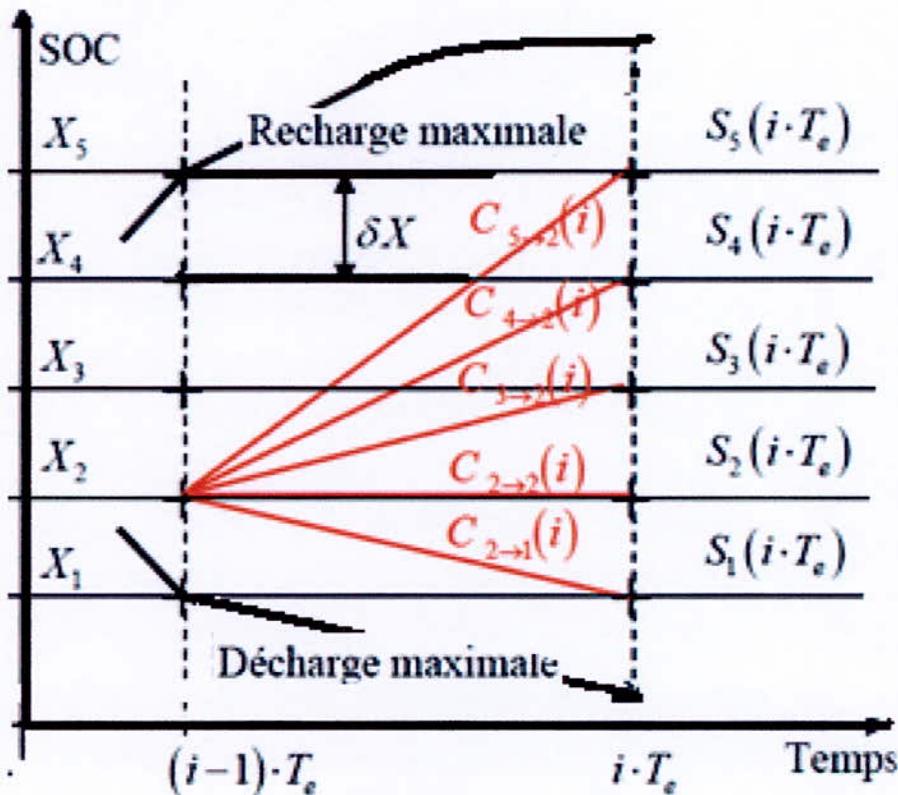


FIGURE III.8 – Parcours de la surface à la recherche de l'optimum de consommation

De ces trois relations on peut conclure sur la démarche globale qui est la suivante :

$S_{j \in \{0, n_{N-1}\}}(N-1) =$ le cout du passage de $(X_j(N-1) \rightarrow X_N)$

$C_{thj}^*(N-1) =$ couple necessaire pour aller de $(X_j(N-1) \rightarrow X_N)$

$T_j^*(N-1) =$ le rapport de boite necessaire pour aller de $(X_j(i) \rightarrow X_N)$

Pour $i = (N-2) \rightarrow 1$ et $j = 0 \rightarrow n_i$

$$S_j(i) = \min_{l \in \{0, n_{i+1}\}} (C_{j \rightarrow l}(i) + S_l(i+1))$$

$$l_j^*(i) = \arg \min_{l \in \{0, n_{i+1}\}} (C_{j \rightarrow l}(i) + S_l(i+1))$$

$C_{thj}^*(i) =$ couple necessaire pour aller de $(X_j(i) \rightarrow X_{l^*}(i+1))$

$T_j^*(i) =$ le rapport de boite necessaire pour aller de $(X_j(i) \rightarrow X_{l^*}(i+1))$

Ces données doivent être convenablement stockées dans des tableaux pour qu'elles puissent être réutilisées lors de la génération de la séquence de commande optimale U_{opti} . Notons que :

$$S_0(1) = \text{le cout optimale du passage de } (X(1) = X_1 \rightarrow X_N = X(N)) = D_{opti}$$

III.2.2.3 Résultats et simulation

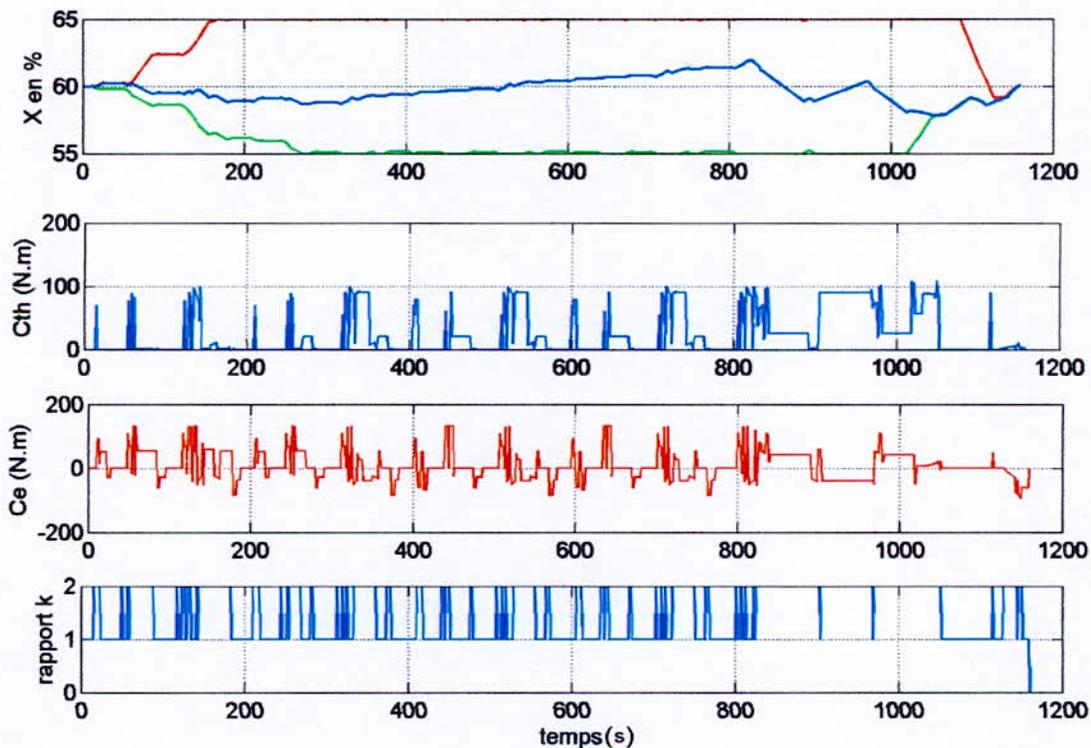


FIGURE III.9 – résultats de l'approche programmation dynamique

Dans cette approche, les mêmes conditions initiales sont considérées c'est à dire un état de charge initial $X_1 = 60\%$, et une variation admissible entre $X_{mini} = 55\%$ et $X_{maxi} = 65\%$ et

pour une variation globale de l'état de la batterie nulle ($Dx_{desire} = 0$). Le maillage de la surface s'est fait avec un pas $\delta x = 5kj$, ainsi la consommation finale obtenue par cette approche est de 4.66 l/100km, avec un temps de calcul égale à 318.30s et en occupant un espace mémoire de traitement de l'ordre de 10^7 bits. Ce qui montre en plus des performances évidentes de cette approche sa grande gourmandise en termes d'espace mémoire et de temps de calcul. La figure suivante nous montre les résultats de simulation de la technique :

III.3 Conclusion

Après l'élaboration du principe de la gestion de l'énergie, un état de l'art sur les stratégies hors ligne a eu lieu dans ce chapitre suivi par l'application de deux techniques nécessitant une connaissance préalable du cycle à parcourir, avec une première incarnant la catégorie des méthodes analytiques, et s'inclinant sur la théorie du calcul variationnel qui offre un temps de calcul et un espace mémoire très réduits pour des performances assez comparables à la deuxième méthode utilisant, cette fois, la programmation dynamique et consommant beaucoup plus de ressources contre des résultats qui s'avèrent les plus optimaux. La théorie ainsi que les simulations des deux approches sont détaillées dans ce chapitre.

Conclusion générale et perspectives

Après l'élaboration d'une discussion à caractère générique et controversé portant sur la survenue des véhicules électriques et électriques hybrides sur le marché de la compétition automobile, suivie d'un état de l'art sur la classe des véhicules hybrides de part leurs architectures, leurs modes de fonctionnements ainsi que la technologie des éléments constituant leur chaîne de propulsion. Le cœur de cette étude s'est axée sur deux aspects fondamentaux et qui sont indépendants l'un de l'autre.

Le premier concerne la problématique de la gestion de l'énergie à bord d'un véhicule électrique hybride, afin d'optimiser son fonctionnement en garantissant le minimum de consommation possible. Cette partie s'est faite à son tour suivant deux étapes : dans la première étape, une approche de modélisation *quasi-statique* a été appliquée sur un prototype de véhicule électrique hybride réel dont les caractéristiques étaient reprises de la littérature, pour se servir ensuite du modèle obtenu à l'évaluation d'une bonne partie de stratégies et d'algorithmes de gestion de l'énergie et c'est ce qu'a fait l'objet de la deuxième étape de cette partie.

Parmi ces stratégies, on trouve celles qui nécessitent une connaissance préalable du cycle à parcourir, donc le traitement se ferait en hors ligne. Ces techniques ne respectant pas la causalité physique des systèmes ne sont pas implémentables lors d'une application temps réel, néanmoins, elles servent de références pour ces dernières, du moment qu'elles traitent un problème parfaitement optimal, alors que les autres sont restreintes à des problèmes sous optimaux.

Deux de ces techniques sont étudiées à savoir la programmation dynamique et le formalisme de Lagrange dont les performances sont proches mais au prix d'une complexité, d'un espace mémoire, et d'un temps de calcul nettement différents d'une méthode à l'autre.

Concernant les approches temps réel, on trouve un bon nombre de stratégies, dites à base de règle, appliquées dans cette étude dont l'objectif global était de faire fonctionner le moteur thermique aux voisinages de son meilleur rendement et que le moteur électrique viendrait par la suite compléter ce fonctionnement afin de faire correspondre le fonctionnement global de la chaîne hybride à celui exigé par le conducteur. À cet égard, la logique floue se présente comme un outil très adapté à ce genre de traitement à la fois par les performances qu'elle offre mais en plus par le contexte réaliste des commandes qu'elle évoque.

On trouve encore parmi les approches temps réel les méthodes de gestion par minimisation instantanée des pertes au niveau du groupe motopropulseur ou LMS, offrant à la fois des résultats très intéressants pour une facilité de mise en œuvre, seulement leur difficulté réside au niveau de la gestion de l'état de charge de la batterie afin de le maintenir à l'intérieur d'une plage de variation admissible. À cette fin un certain nombre d'astuces dont l'enjeu principale était de garantir un contrôle permanent de l'état de charge tout en maintenant la consommation en carburant la plus basse possible.

La deuxième partie de ce travail consiste à l'élaboration d'une plateforme expérimentale menant à la réalisation d'un quad électrique hybride partant d'un quad muni d'une motorisation

conventionnelle en allant vers l'assemblage de deux roues, ayant chacune une machine électrique intégrée, à la place des roues avant du quad. Les caractéristiques des différents constituants de sa chaîne de traction ainsi que la technique de gestion et de commande de la chaîne électrique se trouvent élaborées dans cette partie.

Les perspectives :

Dans un contexte de réalisation expérimentale les perspectives envisagées sont les suivantes :

-La mise en marche du quad hybride.

-La modélisation et l'identification de sa chaîne de traction pour en faire un outil expérimental d'évaluation et d'application des différentes stratégies de gestion dans un ordre de difficulté ascendant.

En ce qui concerne l'aspect théorique des VEHS les perspectives envisagées sont les suivantes :

-L'évaluation des stratégies évoquées le long de cette étude, ainsi que plein d'autres, sur des modèles de plus en plus réalistes.

-L'utilisation de simulateurs évolués des VEHS pour une première validation des stratégies utilisées.

-l'utilisation des stratégies de plus en plus complexes en l'occurrence, celles cherchant un optimum global en temps réel soit par prédiction du trajet, soit l'utilisation des réseaux de neurones ou bien les méthodes stochastiques.

Références bibliographiques

- [1]S Kermani. *Gestion énergétique des véhicules hybrides : de la simulation à la commande temps réel*. Thèse de doctorat, université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2009.
- [2]WBCSD. The sustainable mobility project, 2004. <http://www.wbcd.org>.
- [3]S Dominic. Mid-term review of the european commission's 2001 transport white paper. Rapport technique, OTB Research Institute for Housing, Mobility and Urban Studies Delft University of Technology, 2006.
- [4]Ecorys and Swov. *Impact Assessment Road Safety Action Programme*. Assessment for mid term review, 2005.
- [5]C Mandil and F Loos. Le défi énergétique du transport routier. *Challenge Bibendum*, 2005.
- [6]P Pinchon. *Futures évolutions des motorisations dans l'automobile*. L'automobile du futur :les technologies de l'IFP, 2004. <http://www.ifp.fr>.
- [7]G Rousseau. *Véhicule hybride et commande optimale*. Thèse de doctorat, Ecole des mines de Paris, 2008.
- [8]J Scordia. *Approche systématique de l'optimisation du dimensionnement et de l'élaboration de lois de gestion d'énergie de véhicules hybrides*. Thèse de doctorat, Université Henry Poincaré-Nancy 1, 2004.
- [9]W Lhomme. *gestion d'énergie de véhicules électriques hybrides basé sur la représentation énergétique macroscopique*. Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, 2007.
- [10](J. T. B. A) KESSELS. *Energy management for automotive power nets*. Thèse de doctorat, University of Technology (Netherlands), 2007.
- [11]M Ehsani, Y Gao, S Gay, and A Emadi. Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles. Rapport technique, University of west florida, 2005.
- [12]C Chan. The state of the art of electric and hybrid vehicles. *Proc, IEEE vol.99*, 2002.
- [13]J.Y Wong. *Theory of Ground Vehicles*. 3rd edition, 2001.
- [14]M Wastraete. Véhicules électriques et hybrides. Rapport technique, Dossier technique ANFA, 2011.
- [15]L Boulon. *Modélisation multiphysique des éléments de stockage et de conversion d'énergie pour les véhicules électriques hybrides, Approche systémique pour la gestion d'énergie*. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2009.
- [16]B Ould_Bouamam and G.D Tanguy. Modélisation par bond graph : éléments de base pour l'énergétique. *Techniques de l'Ingénieur, BE 8280*, 2008.

- [17]H Piquet, H Foch, and F Bernot. Conception des systèmes de conversion de l'énergie électrique à l'aide d'éléments caractérisés. *Revue Internationale de Génie Electrique*, 2001.
- [18]G Paganelli. *Conception et commande d'une chaîne de traction pour véhicule hybride parallèle thermique et électrique*. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 1999.
- [19]S Delprat. *évaluation des stratégies de commande pour véhicules hybrides parallèles*. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2002.
- [20]J Bernard. *Véhicule hybride à pile à combustible :dimensionnement et stratégie de commande*. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2007.
- [21]Nocolas. <http://www.car-engineer.com>.
- [22]W Hankache. *Gestion optimisée de l'énergie électrique d'un groupe électrogène hybride à pile à combustible*. Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, 2008.
- [23]J.C Culioli. *Introduction à l'optimisation*. Ellipses, 1994.
- [24]R Dubouil. *Etude par simulation des transferts thermiques dans un groupe motopropulseur hybride électrique automobile*. Thèse de doctorat, Ecole centrale de Nantes, 2012.
- [25]A Dubray. *Adaptation des lois de gestion d'énergie des véhicules hybrides suivant le profil de mission suivie*. Thèse de doctorat, Institut polytechnique de Grenoble, 2002.
- [26]C Forgez, G Friedeich, and J.M Biedinger. Système flou de supervision des modes de fonctionnement d'un véhicule hybride électrique parallèle. Rapport technique, Université de technologie de Compiègne, 2000.
- [27]M Ehsani, Y Gao, and K.L Butler. Application of electrically peaking hybrid (elph) propulsion system to a full-size passenger car with simulated design verification. *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, 1999.
- [28]H Hannoun. Minimisation de l'énergie consommée dans un véhicule hybride thermique-électrique. Master2r, Laboratoire de génie électrique de Paris (GEP), 2005.
- [29]N.J Schouten, M.A Salman, and N.A Kheir. Energy management strategies for parallel hybrid vehicles using fuzzy logic. *Control Engineering Practice*, 2003.
- [30]M Djemai and T Mawloud. Commande de la vitesse et de la position d'un moteur à courant continu sans ballais pour les applications en robotique. Rapport technique, Ecole national polytechnique (ENP), 2007.
- [31]M Bouhrik. *Impact des Nouveaux Matériaux(NdFeB et SmCo) sur les Moteurs (BLDCM) Destinés aux Véhicules Electriques*. Thèse de doctorat, Université de Batna, 2007.
- [32]N de Laleu. *Conception de mini-drones avions : quadricoptere*. Thèse de doctorat, Centrale Paris, 2007.
- [33]P Mayé. *Moteurs électriques pour la robotique*. Editions Dunod,Paris, 2000.
- [34]P Abati. Les capteurs à effet hall, 2001. www.stielec.ac-aixmarseille.fr.