



Université  
de Toulouse

# THÈSE

En vue de l'obtention du

## DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse)

Discipline ou spécialité :

Systemes Embarqués

---

Présentée et soutenue par :

M. MOULOU D GUEMRI

le lundi 16 décembre 2013

Titre :

HEURISTIQUES OPTIMISEES ET ROBUSTES DE RESOLUTION DU  
PROBLEME DE GESTION D'ENERGIE POUR LES VEHICULES  
ELECTRIQUES ET HYBRIDES

---

Ecole doctorale :

Systemes (Systemes)

Unité de recherche :

Laboratoire Plasma et conversion d'Energie (LAPLACE)

Directeur(s) de Thèse :

M. STEPHANE CAUX

Rapporteurs :

M. PATRICK SIARRY, UNIVERSITE PARIS 12

M. SEDDIK BACHA, UNIVERSITE GRENOBLE 1

Membre(s) du jury :

M. RACHID OUTBIB, UNIVERSITE AIX-MARSEILLE 3, Président

Mme SANDRA NGUEVEU, INP TOULOUSE, Membre

M. STEPHANE CAUX, INP TOULOUSE, Membre



## Résumé

Le système étudié durant cette thèse est un véhicule électrique hybride avec deux sources d'énergies (pile à combustible et supercondensateurs). L'objectif fixé est de minimiser la consommation du carburant tout en satisfaisant la demande instantanée en puissance sous des contraintes de puissance, de capacité et de stockage. Le problème a été modélisé sous la forme d'un problème d'optimisation globale. Nous avons développé de nouvelles méthodes heuristiques pour le résoudre et proposé le calcul d'une borne inférieure de consommation, en apportant de meilleurs résultats que ceux trouvés dans la littérature. En plus, une étude de robustesse a été réalisée afin de minimiser la consommation de pire-cas suite à une perturbation ou du fait d'incertitudes sur les données d'entrée, précisément sur la puissance demandée. Le but de cette étude est de prendre en compte les perturbations dès la construction des solutions afin d'éviter l'infaisabilité des solutions non robustes en situation perturbée. Les heuristiques de résolution du problème robuste modélisé sous la forme d'un problème de Minimax ont fourni des solutions moins sensibles aux perturbations que les solutions classiques.

**Mots-clés :** Optimisation globale, Programmation dynamique, Heuristiques, Quasi-Newton, véhicules électriques hybrides, Robustesse.

## Abstract

The system studied in this thesis is a hybrid electrical vehicle with two energy sources (fuel cell system and super-capacitor). The first goal is to minimize the fuel consumption whilst satisfying the requested power for each instant, taking into account constraints on the availability and the state of charge of the storage element. The system was modeled as a global optimization problem. The heuristics developed for obtaining the best power split between the two sources and the lower bound consumption proposed provide better results than those found in the literature. The second goal of the thesis is the study of the robustness of the solutions in order to minimize the worst-case consumption when perturbation happens or uncertainty is added to the input data. In this study the uncertainty concerns the power required for traction. The objective is to maintain the feasibility of solutions and limit the worst consumption that can happen due to a demand fluctuation. Dedicated heuristics are proposed for solving the identified robust variant of the problem, modeled as a Minimax problem. The solutions provided are less sensitive to the perturbations than the previous ones.

**Keywords:** Global optimization, Dynamic Programming, Heuristics, Quasi-Newton, Hybrid electric vehicles, Robustness.



# *Remerciements*

Les travaux de la thèse se sont déroulés pendant trois ans au sein du Laboratoire PLAsma et Conversion d'Énergie (LAPLACE) de Toulouse au sein du groupe de recherche COMmande et DIAgnostic des Systèmes Electriques (CODIASE).

Je tiens tout d'abord à remercier mes deux chefs : Monsieur Stéphane CAUX et Madame Sandra Ulrich NGUEVEU : Stéphane, je te remercie de m'avoir choisi sur ce sujet de thèse qui m'a passionné pendant trois ans. Merci de m'avoir fait confiance et de m'avoir confié ce sujet. Merci de m'avoir facilité les tâches administratives et d'avoir intervenu sans hésitation à chaque fois et ce de la première inscription à la soutenance. Sandra, je te remercie pour tous les conseils méthodologiques, bibliographiques et de recherche que tu m'as apportés au cours de la thèse. Je te remercie aussi pour nos diverses discussions scientifiques.

Je veux également remercier tous les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer mon travail de thèse:

- M. Rachid OUTBIB, Professeur des universités, Université d'Aix-Marseille
- M. Seddik BACHA, Professeur des universités, Université Joseph Fourier Grenoble
- M. Patrick SIARRY, Professeur des universités, Université Paris-Est Créteil

Je tiens à remercier aussi Frédéric MESSINE pour la collaboration qu'il a apporté au début de la thèse. J'ai beaucoup appris pendant nos discussions. Je tiens aussi à remercier Monsieur Maurice Fadel, directeur adjoint du laboratoire LAPLACE, pour son accueil dans le laboratoire site ENSEEIHT. Mes remerciements vont aussi à toute l'équipe CODIASE avec en tête Monsieur Pascal Maussion, mais aussi à tout le personnel du LAPLACE, plus particulièrement les informaticiens Messieurs Jacques Benaïoun et David Bonnafous et n'oublions pas le personnel administratif du LAPLACE : Cécile Daguillanes, Valérie Schwarz, Catherine Moll Mazella, Carine Bastie et la secrétaire de l'école doctorale EDSYS Madame Hélène Thirion, ainsi le personnel de l'INP de Toulouse, spécialement Sylvie Riethmuller et Marie-Claude Portell.

Je tiens à remercier aussi Madame Maria Pietrzak-David pour les riches conversations qu'on a eues autour des cafés ainsi que pour son soutien.

Je tiens tout particulièrement à remercier l'ensemble des doctorants et post-doctorants avec qui j'ai appris beaucoup des choses et nous avons passé de beaux temps avec une ambiance conviviale. Merci à l'équipe «Coffee break» pour le respect du rendez-vous quotidien et les discussions que nous avons eues.

- Merci Mustafa, mon collègue de bureau, qui a pris ma place dans le bureau (la place du chef), pour ta bonne humeur quotidienne, merci pour la music Chaabi qui j'ai beaucoup appréciée pendant la thèse,
- Merci Yacine, l'éditeur en chef de l'équipe, pour les discussions scientifiques qu'on a eues ensemble, pour tes services et l'ambiance partagée,
- Merci Thoura, acteur principal de la pause-café, un ami qu'on ne peut pas oublier après une thèse. Merci pour les repas que tu nous as faits, le circuit quotidien de Toulouse et les balades à Paris.
- Merci Alaric pour les discussions, pour tes invitations, pour les repas qu'on a partagés ensemble et les jeux de société qu'on a joués.

Je tiens aussi à remercier les collègues du LAPLACE :

- Étienne Fournier, Eduard Solano, Julián Suarez, Amel Damdoum : doctorants du LAPLACE,
- Ahmed Neffati, Sébastien Carrière (il connaît tout ou presque), Baptiste Trajin, Damien Bidart, Majid Souley, Julien Yong, Julie Égalon, Mounir Amokrane : docteurs et anciens collègues,
- Jean-Marc Blaquièrre et Sébastien Vinnac, personnels techniques avec qui j'ai eu de riches discussions.

Je tiens à remercier spécialement mes amis en dehors du LAPALCE :

- Khaled ben Brahim, j'avais avec lui au moins un rendez-vous hebdomadaire, j'ai appris beaucoup en discutant avec lui, un grand merci AMKhaled,
- Fethi (Mhamdi + Hneyen), Habib, Mounir, Wahid, Rahmouni, Selmi, Essahbi,

Enfin, je dédicace cette thèse avec beaucoup d'émotion à mes parents : Fatima et Ahmed, à ma grand-mère Selma, à mon frère Ali pour son soutien moral et matériel durant mes études, à mes sœurs Souad, Roukaya, Emna et Bouthaina pour leurs encouragements précieux. J'ai enfin une pensée particulière pour ma fiancée Marwa qui m'a accompagné durant la rédaction de cette thèse.

# Table des matières

Table des matières	i
Introduction générale	1
<b>1 Les véhicules hybrides et électriques</b>	<b>5</b>
1.1 Introduction	6
1.2 Aperçu historique et état de l'art	6
1.3 Définitions et contexte de l'hybridation	9
1.3.1 Crise énergétique	9
1.3.2 Crise économique liée à la crise énergétique	10
1.3.3 La croissance économique et la mobilité	10
1.3.4 Contexte environnemental	10
1.3.5 Problème de comparaison - sujet tabou	11
1.4 Les architectures hybrides	12
1.4.1 Classification des architectures hybrides selon la disposition mécanique	13
1.4.1.1 Principe d'un véhicule de type hybride série	13
1.4.1.2 Hybride parallèle	16
1.4.1.3 Architecture hybride série-parallèle	16
1.4.1.4 Hybride complexe	17
1.4.2 Classification des architectures hybrides selon le niveau d'hybridation	18
1.4.2.1 Hybridation micro	18
1.4.2.2 Hybridation légère	19
1.4.2.3 Hybridation complète - intégrale	19
1.4.2.4 Hybridation rechargeable	19
1.4.3 Stratégie de gestion de la source électrique selon le mode de fonctionnement	20
1.4.3.1 Appauvrissement de l'état de charge	20
1.4.3.2 Maintien de l'état de charge	20
1.4.3.3 Mode combiné	21
1.4.4 Classification des architectures hybrides selon le carburant utilisé	21
1.4.4.1 Véhicule hybride à moteur à combustion	22
1.4.4.2 Véhicule hybride à pile à combustible	22
1.5 Véhicule hybride à pile à combustible	23
1.5.1 Système à Pile à Combustible (SPAC)	24

1.5.1.1	Aperçu historique . . . . .	25
1.5.1.2	Les différents types de piles à combustible . . . . .	25
1.5.1.3	Pile à combustible à membrane échangeuse de protons . . . . .	26
1.5.2	Système de Stockage Electrique (SSE) . . . . .	28
1.5.2.1	La batterie . . . . .	29
1.5.2.2	Le supercondensateur . . . . .	32
1.5.2.3	La différence entre une batterie et un supercondensateur . . . . .	34
1.5.3	Traction des véhicules hybrides à pile à combustible . . . . .	35
1.5.4	Avantages des véhicules à pile à combustible . . . . .	36
1.5.5	Inconvénients des véhicules à pile à combustible . . . . .	37
1.6	Conclusion . . . . .	37
<b>2</b>	<b>La gestion d'énergie dans un véhicule hybride et électrique</b>	<b>39</b>
2.1	Introduction . . . . .	40
2.2	Objectif . . . . .	40
2.3	La nécessité d'un système de gestion des puissances . . . . .	41
2.3.1	Le dimensionnement du système . . . . .	41
2.3.2	L'optimisation des puissances après le dimensionnement . . . . .	43
2.4	Classification des stratégies de gestion d'énergie dans les véhicules hybrides . . . . .	44
2.5	Formulation générale du problème . . . . .	45
2.5.1	Fonction objectif . . . . .	47
2.5.2	Contraintes . . . . .	50
2.5.2.1	Contrainte de capacité . . . . .	50
2.5.2.2	Satisfaire la demande . . . . .	50
2.5.2.3	Limites sur l'état de charge . . . . .	51
2.5.2.4	état de charge final du SSE égal à l'état de charge initial . . . . .	54
2.6	Stratégies d'optimisation globale . . . . .	56
2.6.1	La programmation dynamique . . . . .	56
2.6.2	La programmation linéaire . . . . .	61
2.6.3	La commande optimale . . . . .	64
2.7	Stratégies d'optimisation instantanée . . . . .	65
2.7.1	La méthode Thermostat . . . . .	66
2.7.2	L'algorithme de Toyota Prius et Honda Insight . . . . .	67
2.7.3	La logique floue . . . . .	69
2.8	Conclusion . . . . .	72
<b>3</b>	<b>Optimisation globale de la distribution des puissances pour les véhicules électriques et hybrides</b>	<b>75</b>
3.1	Introduction . . . . .	76
3.2	Étude approfondie de la programmation dynamique . . . . .	76
3.2.1	Performances et limites de la programmation dynamique classique . . . . .	77
3.2.2	Correction des points faibles identifiés . . . . .	77
3.2.2.1	Récupération de l'intégralité de l'énergie de freinage . . . . .	78
3.2.2.2	Problème du point de départ d'énergie stockée égal au point d'arrivée . . . . .	80



3.2.3	Points forts de l'approche corrigée . . . . .	81
3.2.3.1	Résolution : à partir de n'importe quel état de charge initial, le point d'état de charge final désiré peut être atteint . . . . .	82
3.2.3.2	Solutions faisables et ligne optimale de la consommation . . . . .	83
3.2.3.3	Intersection des chemins . . . . .	85
3.3	Heuristiques proposées . . . . .	87
3.3.1	Heuristique H1 . . . . .	87
3.3.2	Heuristique H2 . . . . .	92
3.3.3	Heuristique H3 . . . . .	94
3.3.4	Heuristique H4 . . . . .	96
3.3.4.1	Modèle et résolution par Quasi-Newton . . . . .	96
3.3.4.2	Points de départ aléatoires ( <i>multi-start points</i> ) . . . . .	97
3.3.4.3	Points de départ spécifiques( "smart start point") . . . . .	98
3.3.4.3.1	La puissance demandée comme point de départ . . . . .	99
3.3.4.3.2	La solution de l'heuristique H2 comme point de départ . . . . .	100
3.4	Bornes de consommation . . . . .	101
3.5	Conclusion . . . . .	104
<b>4</b>	<b>Étude de la robustesse des solutions</b> . . . . .	<b>107</b>
4.1	Introduction . . . . .	108
4.2	L'optimisation robuste : Définition et généralités . . . . .	108
4.3	Classification des perturbations . . . . .	110
4.4	Déroulement en ligne de solutions calculées hors ligne . . . . .	111
4.5	Formulation robuste du problème . . . . .	115
4.6	Identification du pire cas de perturbation pour une solution donnée . . . . .	118
4.6.1	Formulation mathématique du pire cas de perturbation . . . . .	119
4.6.2	Résolution du problème du pire cas . . . . .	120
4.6.3	Exemple d'évaluation des solutions . . . . .	121
4.7	Heuristiques de génération de solutions robustes . . . . .	122
4.7.1	Heuristique R1 : Reformulation bi-niveau et résolution itérative . . . . .	122
4.7.1.1	Résolution et Simulations . . . . .	123
4.7.1.2	Validation des résultats pour des perturbations aléatoirement générées . . . . .	126
4.7.2	Heuristique R2 : Résolution du problème par une formulation multi-objectifs (solution expérimentale) . . . . .	127
4.7.2.1	Résolution et Simulations . . . . .	128
4.7.2.2	Validation des résultats pour des perturbations aléatoirement générées . . . . .	129
4.7.3	Heuristique R3 : Quasi-Newton sur formulation modifiée suivant les spécificités du véhicule . . . . .	131
4.7.3.1	Démonstration . . . . .	131
4.7.3.2	Résolution et simulations . . . . .	132
4.7.3.3	Validation . . . . .	133
4.7.4	Heuristique R4 : Adaptation de la programmation dynamique . . . . .	133

4.7.4.1	Réponse à une variation d'énergie dans le SSE . . . . .	134
4.7.4.2	Heuristique R4 : H1 avec pénalisation dans les zones de perturbation potentielles . . . . .	136
4.8	Borne inférieure de consommation et validation . . . . .	137
4.9	Conclusion . . . . .	140
<b>Conclusions et perspectives</b>		<b>143</b>
<b>Références bibliographiques</b>		<b>147</b>

# Table des figures

1.1	La voiture électrique "Jamais contente". . . . .	8
1.2	Découverte de réserves de pétrole et consommation cumulée dans le monde [Ehs 09]. . . . .	9
1.3	Évolution de la population mondiale et nombre de véhicule . . . . .	11
1.4	Hybride série. . . . .	14
1.5	Architecture hybride parallèle. . . . .	15
1.6	Hybride série-parallèle. . . . .	17
1.7	Architecture hybride complexe. . . . .	18
1.8	Les modes de fonctionnement d'un véhicule hybride rechargeable. . . . .	21
1.9	Schéma détaillé du SPAC avec ses auxiliaires et le raccordement avec SSE et la chaîne de traction . . . . .	24
1.10	Modèle général du SPAC . . . . .	25
1.11	Modèle et principe de fonctionnement d'une cellule de pile à combustible à hydrogène du type PEMFC . . . . .	28
1.12	Véhicule General Motors EV1 avec une batterie Pb-acide. . . . .	30
1.13	Véhicule Nissan Altra avec une batterie Lithium-ion. . . . .	31
1.14	Véhicule Honda EVplus avec une batterie NiMH. . . . .	31
1.15	Véhicule Kia avec une batterie li-polymère. . . . .	32
1.16	Véhicule BYD-F3DM avec une batterie Li-Fe-Po. . . . .	33
1.17	Structure d'un supercondensateur. . . . .	33
1.18	Diagramme de Ragone. . . . .	34
1.19	Modèle d'un VHPAC avec les flux énergétiques. . . . .	36
2.1	Le rôle de chaque élément . . . . .	41
2.2	Processus d'optimisation des véhicules hybride à pile à combustible . . . . .	42
2.3	Les scénarios possibles dans la gestion d'énergie dans un véhicule hybride à pile à combustible. . . . .	43
2.4	Flux des puissances brutes et nets . . . . .	46
2.5	Le flux d'énergie du SPAC. . . . .	48
2.6	Le rendement global du SPAC en fonction du $P_{SPAC}$ . . . . .	49
2.7	Allure de la puissance totale et de la puissance des auxiliaires en fonction de $P_{SPAC}$ . . . . .	49
2.8	Représentation graphique de la contrainte de satisfaction des puissances demandées sur un profil de mission. . . . .	51
2.9	Caractéristique du SSE . . . . .	53
2.10	Cyclage d'une mission SOC maintenu. . . . .	55

2.11	Le domaine de validité avant limitation. . . . .	59
2.12	Le domaine de validité après limitation. . . . .	60
2.13	La stratégie du Thermostat vu comme une fonction d'hystérésis. . . . .	67
2.14	La relation entre le ON/OFF du moteur et l'état de charge instantané. . . . .	68
2.15	Les fonctions d'appartenance des variables d'entrées et la variable de sortie. . . . .	68
2.16	Principe de la logique floue. . . . .	70
2.17	Exemple d'une fonction d'appartenance. . . . .	70
2.18	Fonctions d'appartenance des variables d'entrées et de la variable de sortie. . . . .	71
2.19	Les fonctions d'appartenance des variables d'entrées et de sortie. . . . .	72
2.20	La surface de décision . . . . .	72
3.1	Profils . . . . .	78
3.2	Résultat de simulation sur l'extrait du profil de mission avec freinage et sans freinage . . . . .	79
3.3	profil de $P_d$ où le freinage excède l'accélération . . . . .	80
3.4	Problème de l'énergie finale égale à celle au départ . . . . .	82
3.5	Domaine de validité et les états à parcourir pour trouver le plus court chemin (profil INRETS) . . . . .	83
3.6	La programmation dynamique avec multi-départ. . . . .	84
3.7	la ligne des solutions et la relation entre les points de départ et le coût de la mission. . . . .	84
3.8	La programmation dynamique appliquée avec plusieurs point d'état de charge final. . . . .	85
3.9	La génération d'une solution alternative à partir de deux. . . . .	86
3.10	Le profil INRETS avec son voisinage jusqu'à 5 kW. . . . .	89
3.11	la solution de la programmation dynamique avec la relaxation de la contrainte. . . . .	90
3.12	Consommation en fonction du point de surplus pour le profil INRETS. . . . .	91
3.13	Le choix des bornes inférieure et supérieure en relation avec le rendement du SPAC . . . . .	93
3.14	Résultat de l'heuristique H2 appliquée sur le profil INRETS . . . . .	94
3.15	Le graphe "puissance-instant" . . . . .	95
3.16	Résultat de l'heuristique H3 appliqué sur le profil INRETS . . . . .	95
3.17	Résultats des points de départ pris aléatoirement . . . . .	97
3.18	Résultat de la stratégie avec annulation de quelques valeurs du vecteur de départ . . . . .	99
3.19	Résultats du point de départ spécifique $P_d$ . . . . .	100
3.20	Exemple de variation de point de départ. . . . .	101
3.21	Le rendement du SPAC devenu fixe . . . . .	102
3.22	Détail des solutions générées par toutes les heuristiques pour les 5 profils de mission . . . . .	104
4.1	Illustration de l'importance de l'étude de la robustesse . . . . .	111
4.2	profil de mission . . . . .	112
4.3	Répartition de la puissance demandée entre les deux sources d'énergie . . . . .	113
4.4	profil de la perturbation . . . . .	114
4.5	Répartition de la puissance demandée entre les deux sources d'énergie . . . . .	114

---

4.6	Changement d'ordre des solutions après la perturbation . . . . .	115
4.7	Principe du calcul de la pire perturbation . . . . .	119
4.8	Évaluation de la solution obtenue par l'heuristique H4 sur le profil IN- RETS dans la pire perturbation . . . . .	122
4.9	Principe de résolution du problème bi-niveau . . . . .	124
4.10	Zoom sur une partie du profil de la puissance demandée avec incertitude.	125
4.11	La répartition robuste des puissances par l'approche bi-niveau . . . . .	125
4.12	L'effet des perturbations sur la solution robuste et la solution de l'heuris- tique 4 . . . . .	126
4.13	La répartition robuste des puissances par l'approche multi-objectifs . . .	129
4.14	L'effet des 1000 perturbations . . . . .	130
4.15	L'effet des perturbations sur la solution robuste et la solution H4 . . . . .	130
4.16	L'allure de la fonction objectif . . . . .	131
4.17	La répartition robuste des puissances entre les sources d'énergie . . . . .	132
4.18	Effet des perturbations sur la solution heuristique R3 . . . . .	133
4.19	La solution fournie par la programmation dynamique . . . . .	134
4.20	La solution fournie par l'heuristique 1 du précédent chapitre . . . . .	135
4.21	La nouvelle solution générée après l'apparition de l'erreur . . . . .	136
4.22	La solution robuste obtenue fournie par la programmation dynamique avec relaxation . . . . .	137
4.23	Effet des perturbations sur la solution de la programmation dynamique relaxée ainsi sur la solution robuste . . . . .	138
4.24	Validation du résultat obtenu par l'heuristique R2 . . . . .	140



# Liste des tableaux

1.1	Comparaison entre les différents types de véhicules hybrides et électriques	20
1.2	Comparaison entre les différents types de piles à combustible . . . . .	27
1.3	Tableau comparatif des caractéristiques des batteries et supercondensateurs	35
3.1	Résultats de la programmation dynamique sur 5 profils . . . . .	77
3.2	Résultats de la programmation dynamique avec un profil sans freinage et un profil avec freinage. . . . .	79
3.3	Comparaison entre une solution alternative et une solution re-calculée . .	86
3.4	Cas puissance légèrement positive . . . . .	88
3.5	Cas puissance négative . . . . .	88
3.6	Résultats et comparaisons sur 5 profils . . . . .	91
3.7	Résultats de l’heuristique H2 et comparaisons sur 5 profils . . . . .	94
3.8	Résultats de l’heuristique H3 et comparaisons sur 5 profils . . . . .	96
3.9	Résultats du scénario <i>multi – départ</i> . . . . .	98
3.10	Résultats de l’heuristique H4 avec $P_a$ comme point de départ pour les 5 profils . . . . .	99
3.11	Résultats de l’heuristique H4 avec la solution de H2 comme point de départ pour les 5 profils . . . . .	102
3.12	$H4_{H2}$ : Résultats de l’heuristique H4 avec la solution de H2 comme point de départ pour les 5 profils . . . . .	103
3.13	Les bornes inférieures de chaque consommation . . . . .	103
4.1	La consommation de chaque solution . . . . .	113
4.2	Consommation de la solution robuste . . . . .	121
4.3	Résultat de l’approche bi-niveau R1 . . . . .	126
4.4	Résultat de l’approche Multi-objectifs R2 . . . . .	129
4.5	Résultat de la solution heuristique R3 . . . . .	133
4.6	Consommation en utilisant la programmation dynamique . . . . .	134
4.7	Résultat de la programmation dynamique et l’heuristique H1 . . . . .	135
4.8	Consommation de la solution robuste . . . . .	136
4.9	Une borne inférieure de la solution robuste . . . . .	139
4.10	Comparaison avec la borne inférieure des solutions robustes . . . . .	139
4.11	Validation des résultats robustes sur le profil INRETS . . . . .	139





# Introduction générale

De nos jours, l'industrie automobile est en pleine évolution autant sur le fond (technologie, motorisation, électrification...) que sur la forme (design, élégance, confort...). Chaque année les constructeurs mettent en avant leurs nouveautés dans plusieurs salons et forums de l'automobile tels que AutoRAI , Salon international de l'automobile de Genève, Salon de l'automobile de Bruxelles, Mondial de l'automobile de Paris et Salon automobile de Francfort.

L'accroissement de la mobilité humaine a été accompagnée d'une forte augmentation du nombre de voitures à l'échelle mondiale. La voiture conventionnelle étant considérée comme le consommateur du carburant le plus polluant de la planète, ce développement important du marché des véhicules se confronte aux problèmes environnementaux et aux contraintes de limitation des ressources. La priorité n'est plus seulement de satisfaire la demande excessive de mobilité mais aussi la réduction de la consommation des énergies fossiles et par la suite la limitation de l'effet de serre imposée par les protocoles nationaux et internationaux (tel que le Protocole de Kyoto).

Depuis la première conférence des Nations Unies sur l'environnement, qui s'est tenue à Stockholm en 1972, et notamment après la seconde conférence qui s'est déroulée à Rio en 1992, le réchauffement climatique, la pollution atmosphérique, les gaz à effet de serre, l'épuisement des ressources fossiles d'un côté et d'un autre côté les énergies renouvelables, le développement durable, les nouvelles technologies, les découvertes de nouvelles ressources (gaz de schiste et autres) bénéficient d'un engouement médiatique sans précédent et préoccupent de plus en plus les scientifiques et chercheurs du monde entier afin de définir, optimiser et maîtriser les paramètres mis en jeu.

La notion d'"énergies fossiles" est une appellation très ancienne et désigne les énergies formées naturellement depuis plusieurs millions d'années. Une consommation excessive a été remarquée depuis la révolution industrielle selon l'Organisation de Coopération et de Développement économiques (OCDE). L'utilisation de l'énergie fossile est surtaxée dans plusieurs pays en vue d'une diminution de l'utilisation des véhicules à moteur à combustion, même si parfois le revenu de ces taxes est utilisé pour la construction des routes et leur maintenance [Iea 09].

Plusieurs alternatives de combustible, telles que l'éthanol et l'hydrogène, ont été introduites pour faire propulser les véhicules à la place de l'essence et du gasoil ; afin d'augmenter le rendement du fonctionnement et ainsi limiter la dépendance aux pays

producteurs des énergies fossiles. La combinaison entre deux sources d'énergie ou plus fait référence à une hybridation. Ainsi les utilisateurs s'intéressent de plus en plus à l'énergie électrique pour des raisons de coût, de transport et de propreté. Pour plus d'efficacité, les véhicules hybrides utilisent un système de stockage électrique rechargeable, soit à partir du réseau électrique, soit à partir du freinage régénératif, afin d'aider la source principale du fonctionnement et ainsi augmenter la performance, diminuer la consommation et limiter la pollution.

La gestion d'énergie a été sujet d'actualité depuis les années 2000 et a fait couler beaucoup d'encre. Plusieurs approches ont été développées afin de minimiser la consommation et réduire les émissions de gaz à effet de serre en satisfaisant la demande à chaque instant avec le respect total des contraintes. Dans ce contexte, la thèse de Hankache [Han 08] a traité les problèmes de gestion d'énergie et la commande des sources d'énergie, la thèse de Marcos Garcia [Gar 07] propose une approche par simple filtrage des missions, la thèse de Ahmed Neffati [Nef 13a] propose des bases de règles floues, tous ces travaux ont été réalisés dans le laboratoire LAPLACE (LABoratoire PLAsma et Conversion d'Énergie) notamment dans le groupe CODIASE (COMmande et DIAGnostic des Systèmes Electriques) dans lequel se déroulent également ces travaux de thèse. Dans cette thèse, un véhicule hybride à pile à combustible avec un système de stockage électrique a été l'objet des recherches. La chaîne de traction et les éléments constituant le groupe électrogène ont été dimensionnés dans les travaux précédents [Han 08]

Dans les travaux de Hankache, la programmation dynamique a donné la meilleure solution de répartition de la puissance demandée entre les deux sources d'énergie sur deux profils de mission réelle en optimisation globale hors ligne. Il s'agissait du profil INRETS : profil de mission routier fournit par Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (aujourd'hui IFSSTAR) et le profil ESKISEHIR qui est un profil de puissance demandée par un tramway en Turquie.

Le travail de cette thèse se situe dans la suite des travaux de Hankache dont nos objectifs sont de reformuler le problème d'optimisation, d'analyser les contraintes nécessaires et suffisantes pour ensuite améliorer les solutions obtenues avec de nouvelles méthodes heuristiques et d'étudier la robustesse des solutions, au cas où une perturbation de la puissance demandée est envisageable dans une fenêtre de temps.

Le premier chapitre de cette thèse présente l'évolution historique des véhicules, l'état de l'art des véhicules hybrides et électriques dans un contexte général lié aux différentes crises pétrolières, financières et économiques. La classification des architectures des véhicules hybrides selon plusieurs critères est décrite également. Le véhicule hybride à pile à combustible, sujet de notre étude, y est détaillé, ainsi que les sources d'énergie constituant cette voiture.

Le deuxième chapitre est consacré à la gestion d'énergie dans les véhicules hybrides et électriques. Une formulation mathématique du problème d'optimisation globale couramment utilisée dans la littérature sera présentée et détaillée, l'expression des contraintes, ainsi que la modélisation des sources d'énergie seront insérées. Une liste non exhaustive

des approches et méthodes existantes dans la littérature permettant de résoudre le problème de gestion d'énergie seront présentées et classées selon la connaissance du profil de mission. Ces études bibliographiques venant des domaines du Génie Electrique et de la Recherche Opérationnelle sont commentées pour justifier le travail de cette thèse concernant l'écriture et la résolution correcte du problème mathématique appliqué à la gestion d'énergie pour un véhicule hybride.

Le troisième chapitre est dédié à la résolution du problème d'optimisation globale de la répartition de la puissance demandée entre le système à pile à combustible et le système de stockage électrique. Une étude approfondie est consacrée à la programmation dynamique connue comme étant la méthode exacte qui donne la solution optimale dans la littérature. Les limites et les points forts de cette méthode ont été identifiées. Quatre méthodes heuristiques ont été développées et donnent des consommations meilleures que la programmation dynamique classique utilisée dans la littérature [Han 08]. Enfin, une borne inférieure de consommation a été construite afin d'avoir une référence de comparaison (*benchmark*) entre les consommations de chaque méthode heuristique et cette borne inférieure. Il est à noter que jusque-là dans la littérature, la comparaison était faite uniquement par rapport à la consommation sans hybridation (consommation en utilisant la pile à combustible seule pour la propulsion, que nous pouvons voir comme une borne supérieure).

Le quatrième chapitre traite le problème de la robustesse des solutions générées hors ligne. Lors de la mise en place ou l'exécution d'une solution optimale (ou proche de l'optimum), si une perturbation des données apparaît, cela peut conduire à une consommation excessive et même, selon l'amplitude et l'instant, à une solution peut être infaisable. L'étude de la robustesse dans cette thèse, est basée sur une fluctuation inconnue mais bornée, de la puissance demandée pendant une fenêtre de temps, ce qui permet de prendre des décisions anticipées sur la répartition des puissances en fonction de l'amplitude de la perturbation envisageable. Quatre heuristiques robustes ont été développées durant cette partie et sont basées sur un modèle robuste (optimisation incluant *a priori*, les variations possibles de la demande). Ces heuristiques donnent des solutions robustes, qui restent faisables et moins sensibles aux perturbations que les solutions optimales de la formulation sans perturbation.

En conclusion, la formulation robuste ayant amenée la plus faible consommation en un temps de calcul raisonnable, est privilégiée. En effet, une de nos heuristiques permet une adaptation de la programmation dynamique qui peut donner des solutions robustes à partir de l'utilisation des solutions générées par la programmation dynamique hors ligne et ceci dans une implémentation temps réel. Des pistes d'amélioration et d'expérimentation sont évoquées à la fin de ce travail.



# Chapitre 1

## Les véhicules hybrides et électriques

### Table des matières

---

<b>1.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>6</b>
<b>1.2</b>	<b>Aperçu historique et état de l'art</b>	<b>6</b>
<b>1.3</b>	<b>Définitions et contexte de l'hybridation</b>	<b>9</b>
1.3.1	Crise énergétique	9
1.3.2	Crise économique liée à la crise énergétique	10
1.3.3	La croissance économique et la mobilité	10
1.3.4	Contexte environnemental	10
1.3.5	Problème de comparaison - sujet tabou	11
<b>1.4</b>	<b>Les architectures hybrides</b>	<b>12</b>
1.4.1	Classification des architectures hybrides selon la disposition mécanique	13
1.4.1.1	Principe d'un véhicule de type hybride série	13
1.4.1.2	Hybride parallèle	16
1.4.1.3	Architecture hybride série-parallèle	16
1.4.1.4	Hybride complexe	17
1.4.2	Classification des architectures hybrides selon le niveau d'hybridation	18
1.4.2.1	Hybridation micro	18
1.4.2.2	Hybridation légère	19
1.4.2.3	Hybridation complète - intégrale	19
1.4.2.4	Hybridation rechargeable	19
1.4.3	Stratégie de gestion de la source électrique selon le mode de fonctionnement	20
1.4.3.1	Appauvrissement de l'état de charge	20
1.4.3.2	Maintien de l'état de charge	20
1.4.3.3	Mode combiné	21
1.4.4	Classification des architectures hybrides selon le carburant utilisé	21
1.4.4.1	Véhicule hybride à moteur à combustion	22
1.4.4.2	Véhicule hybride à pile à combustible	22
<b>1.5</b>	<b>Véhicule hybride à pile à combustible</b>	<b>23</b>

---

1.5.1	Système à Pile à Combustible (SPAC) . . . . .	24
1.5.1.1	Aperçu historique . . . . .	25
1.5.1.2	Les différents types de piles à combustible . . . . .	25
1.5.1.3	Pile à combustible à membrane échangeuse de protons . . . . .	26
1.5.2	Système de Stockage Electrique (SSE) . . . . .	28
1.5.2.1	La batterie . . . . .	29
1.5.2.2	Le supercondensateur . . . . .	32
1.5.2.3	La différence entre une batterie et un supercondensateur . . . . .	34
1.5.3	Traction des véhicules hybrides à pile à combustible . . . . .	35
1.5.4	Avantages des véhicules à pile à combustible . . . . .	36
1.5.5	Inconvénients des véhicules à pile à combustible . . . . .	37
1.6	<b>Conclusion</b> . . . . .	<b>37</b>

---

## 1.1 Introduction

Le développement des véhicules électriques (EV : *Electric Vehicle*) et des véhicules hybrides et électriques (HEVs : *Hybrid Electric Vehicles*) est devenu une nécessité pour faire face à l'explosion du prix du baril de pétrole et aux contraintes environnementales, notamment l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre liées au transport routier. Cette nécessité est devenue une obligation et ouvre de nouveaux défis pour découvrir des nouvelles technologies et exploiter des nouveaux composants et dispositifs électriques. Les véhicules hybrides seront des éléments multi-fonctions pour améliorer la conduite, diminuer la consommation, réduire les émissions, récupérer l'énergie du freinage... Tous ces avantages sont attractifs pour les chercheurs pour faire de la voiture hybride le moyen du transport pour le futur.

Dans ce chapitre, nous commençons par l'histoire des véhicules, allant des véhicules à vapeur de la fin du 18-ème siècle jusqu'aux véhicules hybrides d'aujourd'hui. Nous abordons ensuite le contexte de l'hybridation et nous décrivons les défis énergétiques, économiques et environnementaux confrontés au monde actuel. Dans la section suivante, nous allons décrire les différents classements des architectures hybrides, enfin nous allons nous concentrer sur le véhicule hybride à pile à combustible sujet de notre thèse : les sources d'énergie embarquées, leur principe de fonctionnement et les avantages et inconvénients devant être pris en compte pour une gestion intelligente des différentes sources d'énergie disponibles.

## 1.2 Aperçu historique et état de l'art

Dès le début du vingtième siècle, il y avait trois types de véhicules sur le marché [San 06] [And 10a] :

**véhicule à moteur à vapeur** : il est le fruit du développement des machines à vapeur au milieu du 18-ème siècle. Ce type de voiture a besoin de temps pour démarrer et plusieurs arrêts intermédiaires pour faire le plein d'eau.

**véhicule à moteur à combustion interne** (véhicule dit conventionnel) : le forage et la commercialisation du pétrole en 1850 ont permis aux chercheurs d'accélérer les inventions sur les moteurs à combustion interne, à cette étape la conception des véhicules a été déjà mûrie. Ainsi, à travers ces développements, les moteurs à combustion interne ont pris leur place dans le véhicule. La combustion se fait principalement à partir des énergies fossiles (essence/gasoil) [Van 04]. Le moteur à combustion interne a occupé le marché des voitures depuis plus de 100 ans et jusqu'à aujourd'hui, le pourcentage des véhicules autre qu'à moteur à combustion reste négligeable [Cha 07] et selon Villet et al [Van 11] la part de marché des véhicules à moteur à combustion est de 99%.

**véhicule électrique** (BEV : *Battery Electric Vehicle*) ou aussi *Pure Electric Vehicles* (PEV) : Dans la littérature, il n'y a pas de date précise, par exemple nous trouvons la première voiture électrique ayant été construite en 1881 par le français Gustave Trouvé [Ehs 09]. Selon Anderson et al [And 10a] l'âge des véhicules électriques est divisé en trois parties : les premières années (1890-1929), où la France et l'Angleterre sont leaders dans ce domaine ; les années intermédiaires (1930-1989) durant lesquelles les recherches sur les véhicules électriques ont complètement disparues du fait de la domination totale des véhicules à moteur à combustion ; les années en cours (1990-présent) qui marquent le retour vers l'intérêt de la qualité de l'air et l'importante pollution de l'environnement provoquée par les moteurs à combustion interne et l'apparition des nouvelles législations mises en vigueur, telle que le "Clean Air Act" de 1990. Selon Anderson toujours, le premier véhicule électrique a été construit par M. Raffard en 1881 également cité dans les publications [Mom 04] [Ind]. Le premier véhicule purement électrique propulsé par une batterie a été fabriqué par Thomas Davenport 1834 [She 11] [Cha 02b] [She 11]. L'ingénieur Belge, Camille Jenatzy, a construit la "Jamais contente" (figure 1.1) et a dépassé pour la première fois la vitesse de 100 km/h en 1899 [Cha 02b]. Généralement la voiture électrique est destinée aux routes urbaines du fait de sa faible autonomie [Cha 93].

En 1900, le véhicule électrique a plusieurs avantages par rapport au véhicule à moteur à combustion : propre, silencieux, sans vibration, facile à démarrer et à contrôler, pas d'émission de polluants. Les principaux inconvénients de ce type de véhicule sont les mêmes qu'à ce jour : le coût de fabrication élevé et la courte autonomie [Cha 01].

Malgré les avantages qu'a ce véhicule, il n'a pas résisté au développement de la voiture à moteur à combustion lié à l'avancement et à la progression des découvertes concernant les énergies fossiles et leur efficacité, ce qui a contribué à sa disparition totale en 1930. La dépendance aux énergies fossiles a relancé les recherches autour des énergies alternatives et est l'explication principale du retour des recherches sur les véhicules électriques en 1960 [Hol 10].

Dans la littérature, il y a chevauchement dans l'appellation des véhicules électriques et hybrides. Par exemple, selon Shen et al [She 11], les véhicules électriques se divisent en



FIGURE 1.1 – La voiture électrique "Jamais contente".

trois types : véhicule purement électrique (généralement deux sources d'énergie embarquées 'sans comburant'), véhicule hybride et électrique (moteur à combustion comburant fossile avec un système de stockage électrique) et véhicule à pile à combustible (comburant hydrogène et stockage électrique). La caractéristique en commun entre ces véhicules est qu'il y a une possibilité de récupération de l'énergie de freinage. Par contre Chan [Cha 07] considère que la dénomination 'véhicule électrique' n'est adéquate que pour la voiture purement électrique qui fonctionne avec batterie/super-capacité, alors que les véhicules hybrides et électriques (à moteur à combustion ou à pile à combustible) sont de type différent. Cette dernière définition est largement répandue dans la littérature [Ove 12] [Sye 11] [Liu 10] [Map 09] [Dom 09] et donc nous allons nous appuyer sur cette définition pour faire les classements ci-dessous.

**Véhicule hybride et électrique :** (*Hybrid Electric Vehicle (HEV)*), c'est une voiture constituée de deux technologies différentes que sont : le moteur à combustion interne et le moteur électrique. Nous pouvons voir cela comme la combinaison de deux véhicules : un véhicule électrique et un véhicule à moteur à combustion. La première voiture de ce type a été développée par l'allemand Ferdinand Porsche en 1898. Le moteur à combustion fait tourner un générateur qui alimente un moteur électrique qui lui, fait avancer la voiture et une batterie est ajoutée comme seconde source et à partir de la batterie seule la voiture peut rouler jusqu'à 40 km [Cha 07] [Mom 09] [Ehs 07] [Cha 02b] [Lo 09] [Ema 05].

**Véhicule hybride à pile à combustible :** (*Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV)* ou *Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle (FCHEV)*), c'est une voiture hybride puisqu'elle utilise deux sources d'énergie : un réservoir d'hydrogène relié directement à une Pile A Combustible (PAC) et une batterie ou des super-capacités selon les architectures (*design*). La PAC a été utilisée en 1950 dans la station spatiale Apollo. Elle n'est utilisée dans les



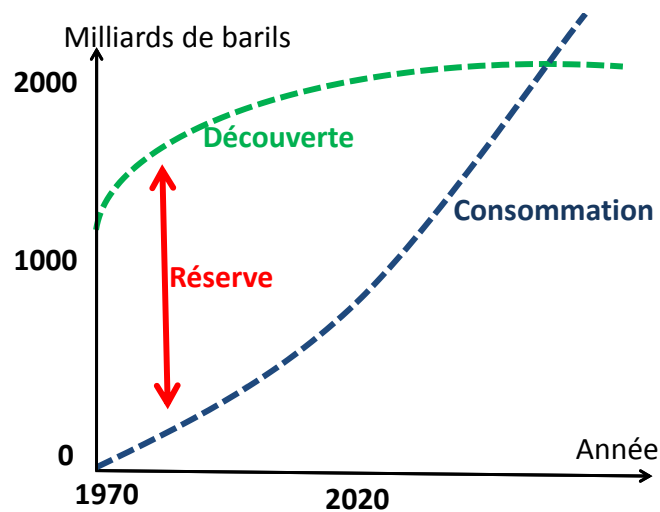


FIGURE 1.2 – Découverte de réserves de pétrole et consommation cumulée dans le monde [Ehs 09].

véhicules pour produire l'électricité qu'au milieu du siècle dernier. Nous allons détailler la description de ce véhicule dans la section 1.5.

## 1.3 Définitions et contexte de l'hybridation

### 1.3.1 Crise énergétique

Les découvertes de ressources pétrolières dans le monde ne cessent d'augmenter avec l'accroissement de la demande mondiale en énergie fossile (figure 1.2). Des modèles basés sur l'estimation et la prédiction des réserves pétrolières montrent que si le niveau de découverte des énergies fossiles reste le même qu'aujourd'hui sachant que la demande énergétique sera doublée d'ici à 2050, alors une crise énergétique est prévue au cours de ce siècle. Sachant que depuis 1985 la production annuelle est supérieure à la découverte annuelle [Sor 10] [Rho 10]. Selon [Ehs 09] l'année prévue pour épuiser toutes les ressources pétrolières est 2038, selon [Kja 09] ces ressources ne permettront pas de dépasser l'an 2028. D'autres études optimistes basées sur les nouvelles technologies d'extraction montrent que les réserves ne peuvent pas être épuisées avant 2050 [Lah 06] [Sha 09]. D'autres modèles basés sur les énergies renouvelables et récemment, sur le développement des technologies d'extraction de gaz de schiste et le gaz de houille, prévoient le repoussement de la date d'épuisement des puits de pétrole. Ce qui est sûr c'est que toutes ces données sont basées sur des modèles où l'incertitude est un facteur important, que les évolutions technologiques sont permanentes, mais qu'une gestion de l'énergie notamment dans les transports est incontournable.

### 1.3.2 Crise économique liée à la crise énergétique

Depuis 1973, la crise économique provoquée par la crise pétrolière a forcé les constructeurs automobiles à trouver des procédures et/ou des énergies alternatives afin de réduire la dépendance croissante aux pays producteurs de pétrole brut. Cette dépendance constitue un danger pour la croissance économique pour les états importateurs de pétrole dont la France. Depuis ce choc pétrolier, il n'y a plus de doute que l'économie mondiale est entrée dans une grave stagnation (Taux de croissance en France nul ou quasiment en 2012 et 2013 selon l'INSEE, crise aux origines multiples mais pour laquelle l'énergie est au centre du problème). Récemment, la crise économique mondiale a été déclenchée par la crise financière, qui a débuté mi-2007 aux Etats-Unis d'Amérique. Le secteur de l'énergie, comme tous les autres secteurs économiques, est profondément touché par l'état des affaires financières. Par conséquent, l'investissement global dans l'approvisionnement en énergie fossile, a été substantiellement réduit sur les dernières décennies [Owe 10]. L'impact de la crise en France a frappé directement le prix du carburant qui a été augmenté de 50 % pendant 3 ans. Par exemple, mi-2009 le litre de gasoil était en France de l'ordre de 0.9 euro, après 3 ans, le prix du litre a atteint 1.5 euros.

Actuellement, il y a une énorme incertitude sur les perspectives économiques, fortement liée aux découvertes énergétiques. Pour faire face, l'Union Européenne a mis en place plusieurs politiques (telle que "stratégie Europe 2020") et de nombreuses législations, afin de réduire la consommation en énergie fossile.

### 1.3.3 La croissance économique et la mobilité

Pour bien comprendre l'évolution du marché des véhicules, il est nécessaire de la comparer à l'augmentation de la population mondiale. Nous commençons par l'enquête sur la croissance de la population mondiale. En 2000, la population mondiale compte 6 milliards d'individus avec 700 millions de voitures. En revanche, en 2050, la population sera de 10 milliards avec 2.5 milliards de véhicules [Cha 02a] (figure 1.3). Par contre les climatologues conseillent une diminution des émissions de gaz à effet de serre de 60 % par rapport au niveau actuel d'ici à 2050 pour éviter un changement climatique dramatique [Cag 11]. Ces deux scénarios sont totalement contradictoires : une augmentation importante du nombre des véhicules engendre une grosse demande jour après jour, d'énergie fossile, essentiellement venue du pétrole, ce qui va à l'encontre des contraintes environnementales de diminution drastique des émissions de gaz à effet de serre.

Donc le dilemme à résoudre est : comment diminuer la pollution à travers les émissions toxiques conjuguée à une augmentation importante du nombre des véhicules ?

### 1.3.4 Contexte environnemental

La combustion dans les véhicules classiques peut être complète ou incomplète. Dans le cas où tout le carburant se transforme en dioxyde de carbone  $CO_2$  et en eau  $H_2O$

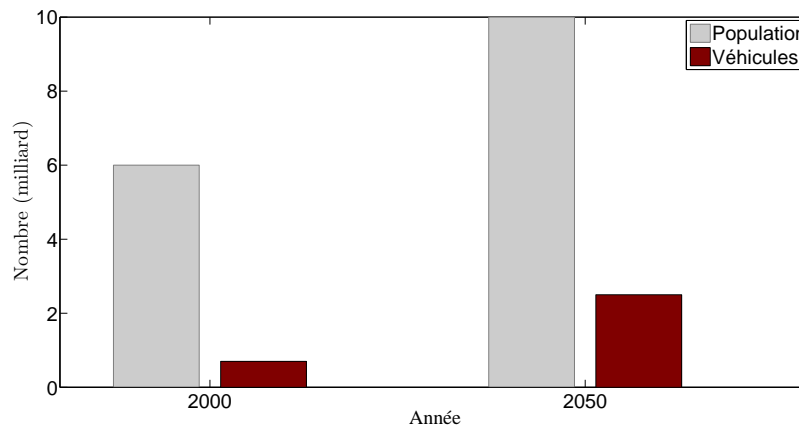


FIGURE 1.3 – Évolution de la population mondiale et nombre de véhicule

en réaction avec l'oxygène de l'air, alors la combustion est complète (stoechiométrie=1). La combustion est incomplète si une portion du combustible n'a pas été transformée. Dans ce cas, des résidus et des émissions sont produits sous forme : de monoxyde de carbone  $CO$ , hydrocarbure  $HC$  et oxyde d'azote  $NO_x$  qui sont très dangereux pour la santé (responsables de plusieurs cancers) et sont des poisons pour l'être humain et pour l'environnement. La combustion incomplète se fait principalement quand il y a défaut ou excès d'oxygène (contrôle d'injection) dans la chambre de combustion pour le cas d'un moteur à explosion.

Environ le quart des émissions mondiales en  $CO_2$  est généré par les moyens de transport tous types confondus. 75% de ce quart est généré par les moyens du transport routiers (voitures, bus et camions). Entre 1990 et 2000, les émissions globales de  $CO_2$  ont augmenté de 13%, alors que les émissions produites par le transport aérien et routier ont augmenté de 25% [Bal 06]. En 2050, La demande en énergie pour le domaine du transport pourrait être doublée, selon les statistiques [Iea 09], alors que la stratégie mondiale vise à réduire les émissions à 50 % [But 08]. L'agence internationale de l'énergie prévoit en 2050, une augmentation de 70 % de la demande en pétrole et 130 % d'augmentation du taux de  $CO_2$  [Gre 11] [The 09] [Fug 08].

La création des législations sur les émissions de gaz à effet de serre a obligé les gouvernements à promouvoir les développements des véhicules hybrides et électriques. Le protocole de Kyoto est l'une des principales législations qui oblige la majorité des pays industriels (37 pays) à diminuer les émissions de gaz à effet de serre [Pro 97].

### 1.3.5 Problème de comparaison - sujet tabou

Les énergies renouvelables et les solutions alternatives bénéficient de l'engouement médiatique en nous faisant oublier des informations économiques et techniques importantes [Har 09]. L'utilisation des hydrocarbures et leurs émissions de gaz à effet de serre sont bien connus et rend possible le calcul de leurs impacts sur l'environnement, alors que ce n'est pas le cas pour les solutions alternatives, que ce soit pour les véhicules hybrides

à pile à combustible ou les véhicules à batterie. Le coût est basé sur des estimations et des prévisions et ignore complètement les coûts de développement et d'investissement pour produire l'hydrogène par exemple (idem pour la production des panneaux photovoltaïques) et l'acheminer jusqu'aux stations-services ou les bornes d'alimentation électrique. Par ailleurs, la quantité d'électricité nécessaire pour charger tous ces véhicules électriques par exemple et les questions de sécurité (stabilité du réseau de distribution électrique), si tous les véhicules se connectent ou se déconnectent du réseau en même temps (chute de tension voire instabilité), sont mal connus.

Il est vrai que le véhicule à batterie et le véhicule à pile à combustible sont appelés véhicule à zéro-émission par contre la production d'hydrogène est polluante. Le plomb utilisé dans les batteries au plomb est toxique et polluant, la fabrication des batteries au nickel nécessite du cadmium qui est polluant aussi et n'oublions pas la durée de vie de ces éléments et leurs coûts de fabrication et de recyclage encore mal maîtrisés. Tout cela montre que le bilan en  $CO_2$  et en gaz à effet de serre est partiel et en tout cas mal calculé.

Dans la sous-section 1.3.2, nous avons évoqué le prix de litre du carburant, sachant que ce prix englobe une grande partie des taxes, alors que pour l'hydrogène et l'électricité, jusqu'à aujourd'hui, il n'y a pas de taxes équivalentes (la majorité de l'électricité en France est produite par l'uranium et le gouvernement prévoit de supprimer plusieurs centrales nucléaires ce qui reviendrait à utiliser le pétrole pour produire l'énergie électrique). Les technologies récemment développées pour les moteurs à combustion telle que le *downsizing* (réduire la cylindrée du moteur à combustion afin de réduire la consommation du carburant tout en gardant les mêmes performances du système, autrement dit : obtenir plus de performance avec moins de carburant consommé), le principe *start & stop*, l'utilisation des matériaux plus légers permettent aux véhicules classiques d'être encore majoritaires d'ici à 2030 selon les prévisions actuelles [Syr 08].

## 1.4 Les architectures hybrides

La définition la plus large et la plus générale qui peut inclure les futures sources d'énergies est celle du comité technique 69 (véhicules routiers électriques) de la Commission Electrotechnique Internationale : Un véhicule hybride et électrique, est un véhicule où l'énergie de propulsion est fournie à partir de deux ou plusieurs sortes ou types de réserves différentes (moteur à explosion, PAC...) à l'aide d'une conversion d'énergie (arbre à came, réducteur épicycloïdale, convertisseurs statiques), et au moins une d'entre elles peut fournir de l'énergie électrique [Wou 95]. Cette définition n'est pas adoptée par les scientifiques, car il y a toujours confusion pour le grand public sur le fait qu'un véhicule hybride puisse fonctionner avec un moteur à combustion interne et un moteur électrique [Cha 02b].

Dans la littérature, se trouvent beaucoup de définitions considérant le véhicule hybride et électrique comme un véhicule électrique tout simplement [Par 10]. Selon Westbrook, un véhicule 'hybride' désigne tout véhicule qui a plus qu'une source d'alimen-

tation [Wes 01]. Un véhicule 'électrique et hybride' désigne un véhicule avec au moins une source d'énergie, un stockage ou un convertisseur, qui peut fournir de l'énergie électrique [Hus 10]. Un véhicule hybride et électrique est un véhicule combinant deux sources de puissances énergétiques [Fuh 08]. Ceci inclut alors toutes ces combinaisons : moteur à combustion interne/batterie, pile à combustible/batterie, moteur à combustion interne/super-capacité, pile à combustible/super-capacité, super-capacité/batterie.

Le principal défi des véhicules hybrides est : comment gérer les sources d'énergie existantes dans le véhicule, ce qui dépend notamment du programme de gestion d'énergie, mais également de la constitution mécanique liant les sources de puissance au groupe moto-propulseur pour la traction.

### 1.4.1 Classification des architectures hybrides selon la disposition mécanique

La distinction des architectures des véhicules hybrides selon la composition mécanique, ne concerne que les véhicules hybrides à moteur à combustion (base de construction industrielle des véhicules actuels).

Traditionnellement, les véhicules hybrides et électriques ont été divisés en deux grandes catégories : hybride-série et hybride-parallèle. Les véhicules hybrides à pile à combustible sont considérés comme hybride-série [Cha 07]. Avec le développement des convertisseurs statiques (électronique de puissance) et la technologie d'hybridation, la catégorie hybride série-parallèle a été ajoutée au classement. Les nouveaux véhicules hybrides sur le marché ont une architecture spécifique et ne peuvent plus entrer dans les trois catégories connues. Alors tout véhicule n'ayant pas une architecture claire et simple est un véhicule de type 'hybride complexe'.

La confusion dans la distinction des architectures existe depuis la mise en place de la combinaison de l'architecture série-parallèle : pour certains chercheurs, toute architecture qui n'est ni série ni parallèle, est une architecture complexe [Mag 00] [She 11] [Hus 10] et pour d'autres, une architecture complexe est une quatrième catégorie autre que le série, parallèle et le série-parallèle [Ehs 09] [Cha 02a] [Mi 11].

#### 1.4.1.1 Principe d'un véhicule de type hybride série

La figure 1.4 montre la configuration la plus simple : hybride-série. La source principale dans ce système est le Moteur à Combustion Interne (MCI). Ce moteur transforme l'énergie fossile en énergie mécanique, puis cette énergie mécanique sera convertie en énergie électrique par le générateur. Le flot d'énergie électrique fournie par le générateur a deux choix de passage seulement : soit passer vers le moteur électrique pour propulser la voiture, soit être stocké dans la batterie pour une utilisation ultérieure. Alors le moteur électrique responsable de la transmission peut être alimenté, soit par le moteur à

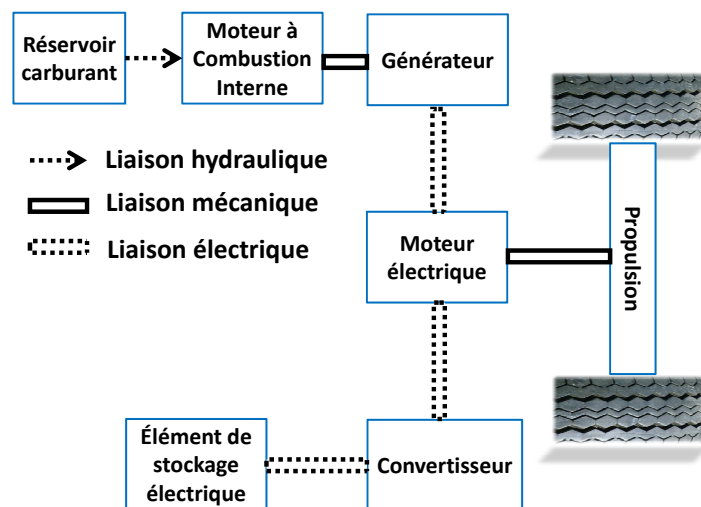


FIGURE 1.4 – Hybride série.

combustion interne, soit par le système de stockage, soit par les deux en même temps.

### Avantages

1. Dans une zone urbaine, la vitesse de roulement est faible et si le système de stockage électrique est bien chargé, alors le moteur à combustion est arrêté et la voiture est en mode 100 % électrique avec un bon rendement énergétique.
2. Le conducteur peut choisir le mode de fonctionnement du moteur à combustion : faible ou forte puissance, mais aussi un mode réduit (par exemple : quatre cylindres en fonction, alors que le moteur dispose de huit cylindres).
3. Bonne maîtrise de conduite, puisque la traction se fait par un moteur électrique plus facile à piloter avec les lois de commandes actuelles.
4. L'optimisation de la répartition des puissances fournies par les deux sources en un noeud électrique est moins difficile, comparée aux autres architectures.
5. Quand la puissance demandée en zone urbaine est faible et le système de stockage est déchargé, le mode tout électrique n'est pas faisable. Le mode 'biberonnage' est la solution d'optimisation : le moteur à combustion fait fonction de propulsion mais, pour amener son point de fonctionnement à un meilleur rendement, une partie de l'excès de production sera dispatchée vers le système de stockage pour le charger.
6. Le système de stockage peut être chargé soit en arrêt soit à partir de l'énergie de freinage : alors au total, trois choix sont possibles pour charger l'élément de

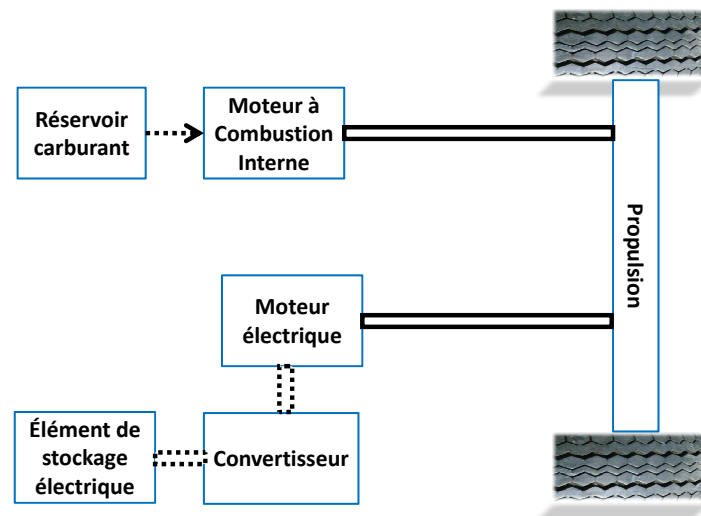


FIGURE 1.5 – Architecture hybride parallèle.

stockage : en arrêt (par moteur interne sans traction ou recharge sur bornes fixes ou boucles à induction), freinage et biberonnage.

### Inconvénients

1. Sur autoroute, la puissance demandée par le conducteur est assez élevée, le système de stockage est en décharge continue ou épuisé, dans ce cas le moteur à combustion fonctionne à haute puissance, donc à bas rendement (pas de boîte de vitesse).
2. Pas de liaison directe entre le moteur à combustion interne et la transmission : l'énergie mécanique produite par le moteur à combustion se transforme en énergie électrique, puis en énergie mécanique encore une fois. Cette double transformation, ainsi que le faible rendement du générateur et du moteur à combustion, génèrent des pertes significatives et cela engendre un faible rendement énergétique global de la chaîne de traction.
3. Le générateur électrique contribue à augmenter la masse totale de la voiture, ce qui induit un sur-coût de production et à un impact sur la puissance de traction pour suivre la demande du conducteur.

Comparés aux autres architectures hybrides, les véhicules à hybridation série sont rares : Renault Kangoo Elect'Road modèle 2003, Chevrolet Volt (2010) et Opel Flex-treme, Opel Ampera (2011).

#### 1.4.1.2 Hybride parallèle

L'architecture présentée par la figure 1.5 est celle du véhicule hybride parallèle. Comparée à l'hybride série, la propulsion se fait par une liaison électrique au niveau du moteur électrique, par contre, dans cette architecture, la propulsion peut se faire par le moteur à combustion ou le moteur électrique ou les deux ensemble, via une liaison/couplage mécanique au niveau de la transmission. Ainsi, dans ce système, il existe une seule machine électrique, alors que dans l'hybride série, il en existe deux. Ces avantages permettent à l'hybride parallèle de bien se positionner sur le marché des véhicules hybrides (du fait que l'on y retrouve les bases de construction commercialisées aujourd'hui).

Si la puissance demandée par le conducteur est plus élevée que la puissance du moteur à combustion, alors le moteur électrique intervient pour aider le moteur à combustion afin de satisfaire la demande. Dans le cas contraire, le moteur électrique se transforme en générateur, afin d'absorber la différence de puissance. Tout simplement, cette architecture peut être vue comme une assistance électrique du moteur à combustion interne, afin de le laisser fonctionner à un rendement maximal pour minimiser la consommation du combustible.

##### Avantages

1. L'hybride parallèle peut fonctionner avec le moteur à combustion seul ou à partir du moteur électrique seul.
2. Le mode 100 % thermique est possible dans cette architecture.
3. Le moteur lié au système de stockage se transforme en générateur et charge le système de stockage électrique que se soit en freinage ou en biberonnage.

##### Inconvénients

1. Couplage mécanique complexe : la conception mécanique d'un point d'accouplement entre trois couples mécaniques (deux couples d'entrées, dont un d'entre eux est bidirectionnel, et un couple de sortie vers l'arbre des roues bidirectionnel), est assez difficile en comparaison d'un point électrique d'accouplement pour l'hybride série.
2. Gestion d'énergie difficile du fait des rendements à caractériser.

Plusieurs modèles vendus dans le monde ont ce type d'architecture. La Honda Insight modèle 1999 est la première hybride parallèle produite à grande échelle, puis Honda Civic en 2001, Ford Escape hybrid-parallel modèle 2005 et enfin Lexus Hybrid SUV (modèle RX400h) [Bat 09].

#### 1.4.1.3 Architecture hybride série-parallèle

Avec l'ajout d'un générateur entre le moteur à combustion et le convertisseur dans l'architecture hybride parallèle, nous obtenons l'architecture hybride-série-parallèle montrée dans la figure 1.6. Cette configuration permet au système de fonctionner, soit en hybride-série, soit en hybride-parallèle, soit les deux modes en même temps. Avec cette



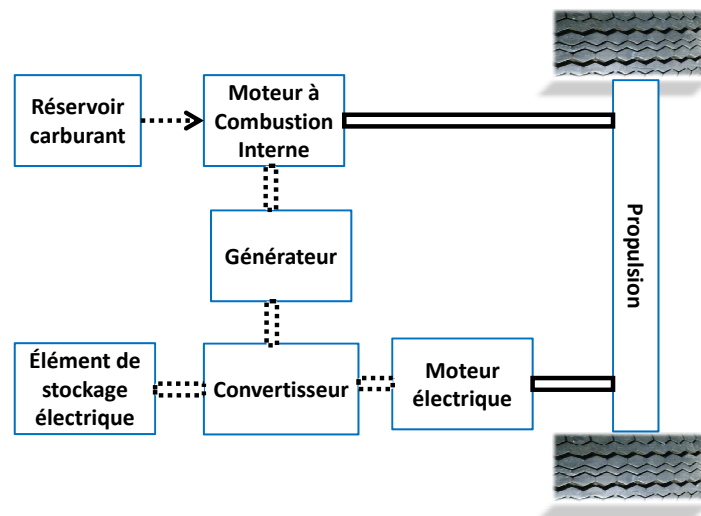


FIGURE 1.6 – Hybride série-parallèle.

architecture, le véhicule peut avoir un très bon rendement énergétique et une excellente flexibilité de conduite. Autre avantage de cette configuration : tous les modes sont envisageables (mode 100% électrique, 100 % thermique, biberonnage...). L'inconvénient majeur de l'hybride série-parallèle est sa complexité mécanique et par la suite une bonne gestion de l'énergie est un défi pour les chercheurs, du fait de la multiplicité des chemins possibles du flot d'énergie, ce qui rend le véhicule possédant cette architecture plus cher que tout autre type. Le moteur à combustion fonctionne à son rendement maximum et par la suite les émissions sont réduites jusqu'à 80% ; à titre d'exemple, la voiture la plus populaire et la plus vendue dans le monde en terme d'hybridation toutes architectures confondues, est la Toyota Prius modèle 2004-2009 (100 000 unités vendues aux Etats Unis en 2005 uniquement) [Cha 07] ainsi elle représente 74% des ventes des véhicules hybrides de Toyota [Fla 11] [Cip 12] [Wu 09] [Che 11] [Bur 11] [Aye 04] [Eff 06] [Liu 06] [Liu 08].

#### 1.4.1.4 Hybride complexe

Comme le montre la figure 1.7, cette architecture ne peut pas être classée parmi les trois configurations standards. Dans ce type de configuration, plusieurs moteurs électriques sont connectés et notamment dans le cas où la propulsion se fait par les quatre roues 4x4 (deux moteurs électriques responsables de la traction de 4 roues). C'est une combinaison entre l'architecture série et parallèle pour augmenter la performance de la voiture. Le nombre de chemins de transfert de l'énergie, donne un nombre de combinaisons possibles élevé et peut être très important en ajoutant un autre moteur électrique. Les voitures portant cette configuration peuvent avoir un rendement élevé, mais un coût d'achat relativement important dû à la complexité du système ainsi qu'au nombre de machines électriques utilisées [Jon 02] [Wal 04].

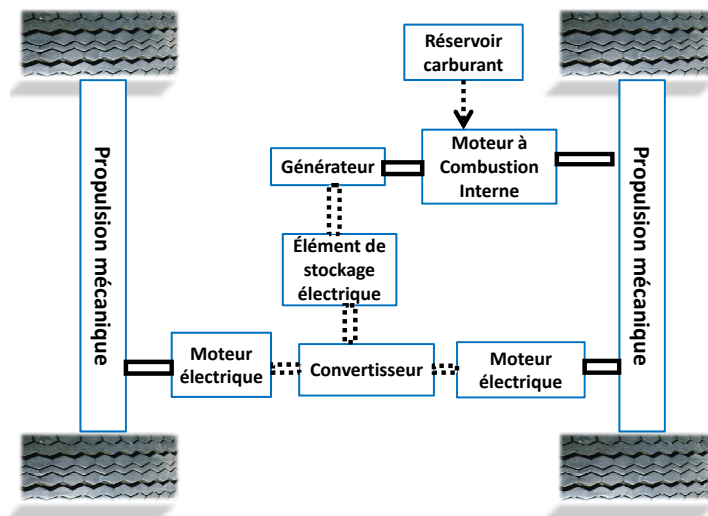


FIGURE 1.7 – Architecture hybride complexe.

## 1.4.2 Classification des architectures hybrides selon le niveau d'hybridation

Le taux d'hybridation est le principal sous-critère de classement des véhicules hybrides. Le degré (taux ou niveau) d'hybridation est le pourcentage de participation du système de stockage électrique dans la propulsion totale demandée par le conducteur. Dans la littérature, il existe quatre classes de véhicules hybrides : micro-hybride (*micro-hybrid*), légère-hybride (*mild-hybrid*), hybride-complète (*full-hybrid*) et hybride rechargeable (*plug-in-hybrid*). Le tableau 1.1 récapitule les différentes options que peut avoir un véhicule hybride et électrique.

### 1.4.2.1 Hybridation micro

Un véhicule micro-hybride utilise la technologie *start & stop*. Il est équipé d'un démarreur/générateur (alternateur/démarrageur), le moteur à combustion s'arrête complètement si la voiture est stoppée (feu rouge, congestion ...) et il fonctionne quand le conducteur appuie sur la pédale d'accélération. Ce type de voiture est propulsé grâce au moteur à combustion seulement. Il intègre ainsi un petit moteur électrique relié à une batterie qui a pour rôle principal le démarrage de la voiture et la récupération de l'énergie du freinage. La consommation d'une voiture micro-hybride peut être réduite jusqu'à 10% comparée à une voiture classique (non hybride) dans une zone urbaine, mais moins dans une zone roulante ou sur autoroute [Rom 06]. General Motors est le premier à introduire cette technologie dans ses véhicules, les autres marques les plus populaires de ce type sont : SMAT, Fiat 500, Ford Transit, Citroen C3, Mercedes-Benz A-class, GM Saturn et Toyota Crown.

### 1.4.2.2 Hybridation légère

La conception est la même qu'une micro-hybride, sauf que le moteur électrique utilisé est plus puissant et aide le moteur à combustion pendant une forte accélération. Le moteur électrique est utilisé aussi comme générateur pour récupérer l'énergie du freinage (bidirectionnel). Le moteur à combustion interne s'arrête lorsque la voiture est au point mort, est inutilisé en phase de freinage ou à l'arrêt complet, mais jamais la propulsion ne se fait en mode 100% électrique. Une voiture à hybridation légère peut économiser jusqu'à 35 % du carburant par rapport à une voiture non hybride. Les véhicules avec une hybridation légère les plus populaires sont Chevrolet Silverado, GMC Sierra et Honda (Accord, Civic et Insight).

### 1.4.2.3 Hybridation complète - intégrale

Le niveau d'hybridation d'un véhicule est complet, lorsqu'il peut se propulser, soit uniquement par la batterie, soit uniquement par le moteur à combustion, soit la combinaison des deux. La puissance moyenne du moteur électrique équipant ce type de véhicule est plus importante que celle du véhicule *mild-hybrid* et est généralement comprise entre 50 kW et 75 kW [Mi 11]. Le système de stockage électrique dans cette catégorie est généralement une batterie de grande capacité énergétique. En utilisant une voiture avec une hybridation complète, nous pouvons économiser jusqu'à 45 % de la consommation du carburant et dans le cas de la Toyota Prius, la réduction peut même atteindre 60 % ou plus [Joh 00]. La différence par rapport à une hybridation légère est que le moteur à combustion interne est plus petit et de ce fait, le système de gestion de la répartition des puissances est plus complexe.

### 1.4.2.4 Hybridation rechargeable

Un véhicule hybride rechargeable (véhicule hybride et électrique rechargeable), est caractérisé par son moteur électrique puissant (à peu près de même puissance que le moteur à combustion interne) et une batterie avec une capacité énergétique importante rechargeable en la connectant sur le réseau électrique. Ce type de véhicule a les mêmes performances qu'une voiture à hybridation complète et il peut être hybride série ou parallèle, avec une option de rechargement sur le réseau électrique. Généralement, le moteur à combustion est en arrêt et ne se déclenche que si la batterie est épuisée ou au-delà d'une vitesse bien déterminée (vitesse correspondant à la puissance maximale du moteur électrique). L'architecture hybride rechargeable peut réduire jusqu'à 70 % la consommation de carburant nécessaire sur un parcours donné.

La voiture rechargeable la plus populaire est BYD F3DM du constructeur chinois BYD Auto, dont la batterie a une capacité de 16 kWh, cette voiture peut rouler jusqu'à 100 km en mode 100 % électrique.

TABLE 1.1 – Comparaison entre les différents types de véhicules hybrides et électriques

	Start/Stop	Assistance mot. élect.	mode électrique
Hybridation micro	✓		
Hybridation légère	✓	✓	
Hybridation complète	✓	✓	✓
Hybride rechargeable	✓	✓	✓
Véhicule électrique			✓

### 1.4.3 Stratégie de gestion de la source électrique selon le mode de fonctionnement

Ce classement concerne essentiellement les véhicules hybrides rechargeables (*Plug-in hybrids electric vehicles* (PHEVS)). Rappelons que les hybrides rechargeables sont similaires aux véhicules hybrides en ce qui concerne les structures : moteur à combustion interne/batteries ou à pile à combustible/batteries. La seule différence est que ce type de véhicule peut être branché sur le réseau électrique pour charger la source de stockage électrique ; de plus, son moteur électrique est suffisamment puissant pour faire avancer la voiture [Iea 09].

#### 1.4.3.1 Appauvrissement de l'état de charge

Ce mode consiste simplement à éteindre la source principale de propulsion (moteur à combustion interne ou pile à combustible) et utiliser uniquement la source secondaire de stockage électrique (batteries ou supercondensateur) pour faire fonctionner la voiture [Bel 11]. Ce mode est conseillé pour les véhicules qui font l'aller-retour travail-maison (cycle de fonctionnement avec phase d'arrêt) et qui peuvent être rechargés pendant la nuit ou pendant les heures de travail, car l'élément de stockage est vide à l'arrivée (*Charge-depleting mode*). C'est le mode qui est mentionné dans les caractéristiques par *PHEVs – X*, où *X* représente le nombre de kilomètres que la voiture peut effectuer avec ce mode. Exemple : *PHEVs – 50* : cette voiture peut rouler 50 kilomètres en mode d'appauvrissement d'état de charge.

#### 1.4.3.2 Maintien de l'état de charge

Après l'épuisement de la batterie dans le mode appauvrissement de l'état de charge, la voiture change de mode de fonctionnement en imposant l'état de charge à un niveau donné (*Charge-sustaining mode*). Par conséquent, le moteur à combustion reprend la main et la voiture fonctionne en mode hybride. La figure 1.8 montre la succession des deux modes. Généralement la connaissance du trajet et les stratégies de gestion de l'énergie par seuils implantées dans le système de gestion des puissances, est capable de déterminer quel mode est le plus intéressant.

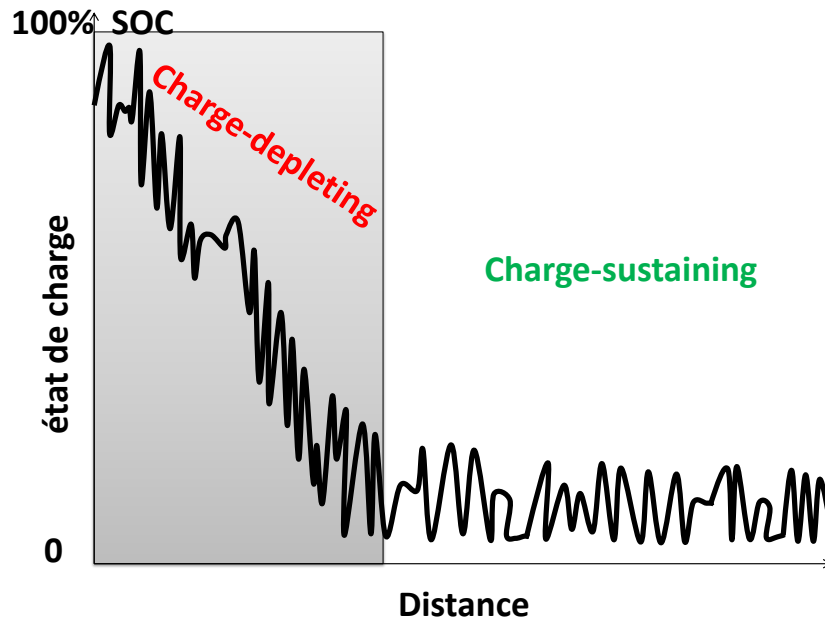


FIGURE 1.8 – Les modes de fonctionnement d'un véhicule hybride rechargeable.

### 1.4.3.3 Mode combiné

Sur un profil de mission, l'état de charge du système de stockage d'énergie peut avoir plusieurs diminutions et plusieurs augmentations, mais à la fin du cycle, l'état de charge final doit être égal à celui du début [Mar 06]. C'est la combinaison la plus complexe pour gérer les flots d'énergie des sources, afin de maintenir l'état de charge à un niveau donné en tenant compte de l'ensemble des demandes sur un parcours donné, répétitif, que l'on se doit de répéter en cycle.

## 1.4.4 Classification des architectures hybrides selon le carburant utilisé

De nos jours, comparées aux voitures classiques, les véhicules hybrides en général, peuvent réduire à la fois la consommation en carburant et les émissions de gaz à effet de serre jusqu'à 47% actuellement et jusqu'à 65% prévu en 2020 [Wei 03].

Tout dépend de l'architecture hybride, des caractéristiques des éléments constituant la voiture hybride, du profil de mission et essentiellement de la méthode de gestion de l'énergie utilisée, mais nous gagnons toujours avec l'hybridation. Sur des profils standards, la réduction de la consommation varie entre 20% et 30 % [Ahl 05] [Wan 01] [Man 07] et peut même atteindre jusqu'à 60% [Fon 08]. Pour des profils autoroutiers, pour lesquels il y a peu de freinage, le gain en carburant est nettement moindre par rapport aux missions urbaines. La pollution causée par les véhicules et la forte baisse des énergies fossiles exigent de nouveaux véhicules avec de nouveaux carburants et une gestion intelligente optimisée des ressources embarquées.

Dans les dernières décennies, nous trouvons aussi, plusieurs études comparatives sur le choix du carburant pour la pile à combustible, sachant qu'il y en a trois importants : l'hydrogène qui est le gaz le plus abondant dans l'univers, le méthanol et l'essence. Ces études sont plutôt axées sur les technologies et sur le dimensionnement, mais peu sur la commande et l'optimisation des flux d'énergie [Tho 00] [Wan 05] [Ogd 99] [Mer 02] [Wan 02]. Dans le reste de la thèse, nous ne nous intéresserons qu'au véhicule à réservoir d'hydrogène puisque le prototype de notre voiture est un véhicule à pile à combustible fonctionnant à partir de ce gaz.

#### 1.4.4.1 Véhicule hybride à moteur à combustion

Les constructeurs automobiles ont introduit des batteries dans les véhicules à moteur à combustion interne essentiellement pour améliorer le rendement et compenser les pertes générées en faible charge du moteur. Ce type de véhicule combine un moteur à combustion interne et un moteur électrique reliés à une batterie. Le moteur à combustion interne dans ce type de véhicule a une petite dimension (jusqu'à 50% de volume en moins selon [Kat 07]), il est moins puissant, comporte moins de pistons (*downsizing*) que son équivalent dans une voiture conventionnelle [Ahl 05].

Cette hybridation permet au moteur à combustion de fonctionner près de sa puissance nominale puisque les accélérations sont assistées par le moteur électrique et, à bas régime, un biberonnage vers le stockage est permis. Dans la voiture conventionnelle, pour stopper la voiture nous utilisons les freins mécaniques et, par la suite, l'énergie de freinage est dissipée en frottement (chaleur). Dans les véhicules hybrides, cette énergie est récupérée par le moteur électrique pour une réutilisation ultérieure. Il est à noter qu'en diminuant la consommation du carburant cela revient aussi à diminuer les émissions de  $CO_2$  ce qui va dans le sens recherché.

#### 1.4.4.2 Véhicule hybride à pile à combustible

La voiture à pile à combustible de marque Daimler Chrysler "NECAR 4" est une voiture non hybride mais électrique, qui utilise une pile à combustible de puissance maximale égale à  $70kW$  composée de 160 cellules élémentaires. Le rendement de cette source à hydrogène est de 37.7%, alors que classiquement, un moteur à combustion interne n'a que 22-24 % pour le diesel et ne dépasse pas le 18 % pour l'essence [Fri 01]).

Le rendement important d'un système PAC est l'avantage majeur de son utilisation [Van 12]. De plus, l'absence d'émission de gaz à effet de serre et l'absence de bruit et de vibrations et enfin, l'abondance de l'hydrogène dans la nature, en font une source intéressante pour les transports. L'ajout à la PAC d'un autre élément électrique réversible a plusieurs avantages notamment sur la réduction de la consommation. Le principe d'hybridation est alors le même qu'une voiture hybride à moteur à combustion, sauf que dans ce type de véhicule l'architecture est unique : la pile à combustible et la batterie/supercapacité ajoutent leur courant sur un noeud électrique un forme une structure série

[Cha 07].

Une comparaison entre un véhicule à pile à combustible seule et un véhicule hybride à PAC sur un profil standard est faite et a montré que la voiture hybride est la plus performante des deux [Jeo 02] du fait de l'utilisation du stockage réversible.

## 1.5 Véhicule hybride à pile à combustible

La substitution d'un moteur à combustion interne par la pile à combustible dans un groupe motopropulseur pour un véhicule hybride résulte en un processus assez complexe [Neh 09]. Afin de pouvoir être utilisée dans un véhicule, la PAC doit être intégrée avec d'autres composants, pour former un Système Pile à Combustible (SPAC), capable de propulser la voiture. Le SPAC est constitué principalement d'un réservoir de stockage d'énergie (hydrogène), d'un compresseur s'il utilise l'air ambiant, des convertisseurs électriques et divers composants auxiliaires dans six circuits (figure 1.9) :

- 1 : circuit d'alimentation d'hydrogène, qui relie le réservoir et l'anode de chaque cellule de la PAC
- 2 : système d'alimentation en air, reliant le compresseur et la cathode de chaque cellule de la PAC
- 3 : la gestion de la circulation en eau, l'eau déminéralisée servant de liquide de refroidissement dans le canal de refroidissement de la pile,
- 4 : circuit d'humidification, pour humidifier l'hydrogène et l'air à l'entrée de la pile.
- 5 : circuit de récupération de l'eau de la sortie de la pile à combustible.
- 6 : circuit électrique entre le SPAC, le système de stockage d'énergie et le moteur responsable de la propulsion. D'où la nécessité d'implanter un système de gestion de puissance gérant la répartition.

Le fonctionnement sous pression améliore considérablement la vitesse de la réaction chimique et donc de l'efficacité des cellules de la PAC, qui donnent une plus grande densité de puissance [App 88] [Kin 88]. Un compresseur est nécessaire pour comprimer l'air à un niveau de pression désiré. L'air sort avec une température élevée, alors un refroidisseur et un humidificateur sont nécessaires pour réduire la température et à la fois humidifier l'air (pour éviter la déshydratation de la membrane) avant son entrée dans la pile. Selon [Gou 09], il est très important de veiller à ce que toutes les cellules de la pile soient suffisamment hydratées, si une telle déshydratation se produit, la durée de vie de la membrane sera affectée. Pour l'autre entrée de la pile, l'alimentation est continue en hydrogène pur sous pression (qui peut atteindre jusqu'à 400 bar) ou sous forme liquide. Dans le cas où l'hydrogène est à l'état gazeux, un humidificateur est installé pour assurer l'humidification et la pression est ajustée par un détendeur. Le contrôle de l'air et de l'hydrogène est assuré par deux vannes installées juste avant l'humidificateur. La température de la pile à combustible ne doit pas dépasser les 100°C afin que la membrane soit bien humidifiée [Zha 11a]. Un circuit d'eau déminéralisée (ou un fluide de

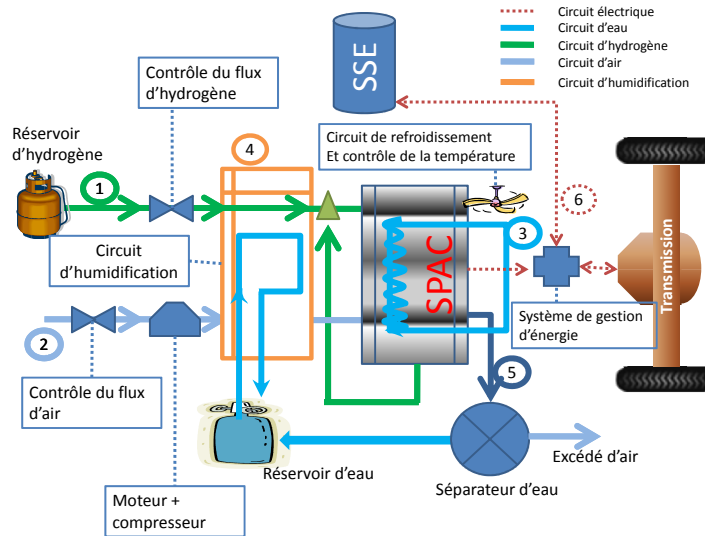


FIGURE 1.9 – Schéma détaillé du SPAC avec ses auxiliaires et le raccordement avec SSE et la chaîne de traction

refroidissement en général) circule entre les cellules de la PAC pour extraire la chaleur dégagée par la réaction chimique. L'eau chaude sortant de la pile passe par un système de refroidissement (radiateur symbolisé par une hélice dans la figure). Pour un détail de ces éléments internes à la PAC nous pouvons renvoyer le lecteur à : [Bar 12] [And 10b] [Jun 07] [Rga 11] [Kam 12].

Côté sortie de la pile, l'air sortant ramène avec lui la vapeur produite dans la pile à combustible (après la réaction chimique), d'où un séparateur d'eau qui est installé afin de récupérer l'eau pour une réutilisation d'humidification. La puissance fournie par la pile est très variable et dépend fortement des paramètres de ce système complexe (débits de l'eau et de l'air, pression d'air, température, pression globale, humidité de la membrane...), donc un système de gestion des courants et des tensions est nécessaire pour commander et contrôler la puissance fournie par la pile. Ses points de fonctionnements contrôlés, permettent de stabiliser le comportement du SPAC et de ne considérer qu'un seul comportement en fonction de la puissance demandée fournie (une seule courbe de rendement). Ce comportement sera donc une donnée d'entrée pour la gestion globale d'énergie en le combinant avec les caractéristiques des autres sources du véhicule.

### 1.5.1 Système à Pile à Combustible (SPAC)

Un SPAC fonctionne comme une batterie en convertissant l'énergie chimique en électricité à partir de réactifs. Le fonctionnement d'un SPAC peut être modélisé par une boîte noire comme le montre la figure 4.7.



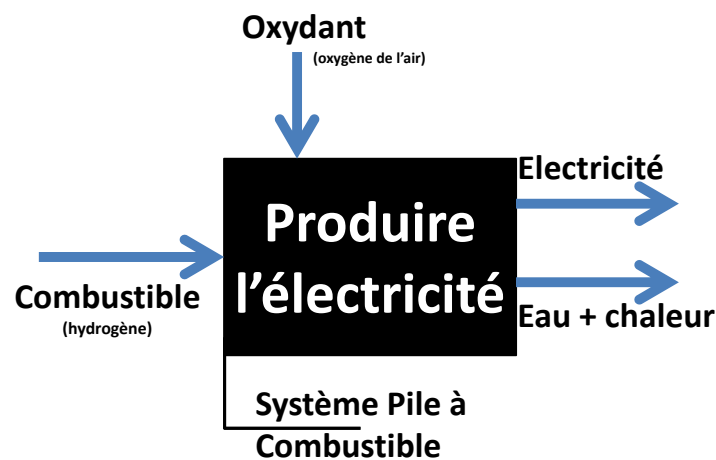


FIGURE 1.10 – Modèle général du SPAC

### 1.5.1.1 Aperçu historique

La première pile à combustible a été inventée par Sir William Grove en 1839 et a été parmi les premiers outils de conversion d'énergie. L'utilisation massive de l'électricité au début du vingtième siècle augmente le besoin de ces outils de conversion. Sa première utilisation a été réellement faite en 1950 par la NASA dans les programmes spatiaux Apollo comme source idéale pour produire de l'électricité et de l'eau potable pour les astronautes. De nos jours, elle est utilisée dans les avions 'plus électrique', pour les mêmes raisons avec en plus l'exploitation possible de la chaleur dégagée lors de la réaction chimique pour le dégivrage des ailes. Ces aspects de co-génération ne seront pas pris en compte dans ces travaux uniquement axés sur la fonction de traction.

### 1.5.1.2 Les différents types de piles à combustible

Les applications des piles à combustible varient en fonction du type de PAC utilisé. Les piles à combustible sont capables de produire de l'électricité n'importe où et avec une gamme importante de puissance (de 1 W à 100 MW souvent en mettant en série plusieurs SPAC pour atteindre de telles puissances). Pratiquement elles peuvent être utilisées dans n'importe quelles applications qui nécessitent une alimentation électrique [Val 06]. Leurs utilisations vont des téléphones cellulaires, aux ordinateurs et tout autre type d'équipement électronique personnel pour les petites puissances. Pour les puissances de 1kW à 100kW, leurs applications principales sont dédiées à des véhicules et des moyens de transport en général. Au-delà de 100 kW, un SPAC est considéré comme centre de production d'électricité stationnaire (habitat) et raccordée à un réseau électrique (privé ou publique) [Ray 03] [Dye 02][Li 06].

Il existe différents types de PAC, qui se distinguent principalement par le type d'élec-

trolyte utilisé. Les différences dans les caractéristiques des cellules élémentaires, telles que le matériau utilisé, la température de fonctionnement et le type de comburant, font que chaque type de pile à combustible, à une utilisation privilégiée pour des applications spécifiques. Sept catégories existent sur le marché, mais d'autres sont encore en phase de développement et de prototypage [Var 07]. Dans le tableau 1.2, ces piles sont classifiées et comparées entre elles :

Sur le marché des transports, les piles à combustible de type PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) sont adaptées aux applications automobiles. Les PEMFC ont plusieurs avantages :

- une forte densité de puissance,
- la membrane solide électrolyte polymère utilisée, est un excellent conducteur d'ions d'hydrogène et résiste aux vibrations, présente une
- faible corrosion et donc une longue durée de vie. La PAC-PEM
- permet des démarrages rapides (permet de délivrer un courant après arrêt) et fonctionne à une température ambiante (
- de 50 à 100 °C), sans réel besoin d'isolation thermique.

Dans le reste du travail, nous nous intéressons à la pile de type PEMFC, puisque c'est la source principale d'énergie dans la voiture hybride à pile à combustible étudiée.

### 1.5.1.3 Pile à combustible à membrane échangeuse de protons

En général, une pile à combustible est un dispositif de conversion de l'énergie électrochimique, qui convertit l'hydrogène et l'oxygène en électricité et en eau, en dégageant de la chaleur. Mais le gaz naturel et les alcools peuvent être aussi utilisés à la place de l'hydrogène [Hoo 02] dans les PAC.

La pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) est composée de plusieurs cellules élémentaires (la tension de base étant inférieure au volt, une association de cellules permet de monter le niveau de tension en distribuant l'air et l'hydrogène par construction interne à des cellules en série). Chaque cellule comporte deux compartiments principaux : électrode positive (Anode) et une électrode négative (Cathode). Entre les deux, se trouve un matériau qui laisse passer les ions (électrolyte) (voir figure 1.11), la charge électrique est présente entre la cathode et l'électrode où circulent les électrons négatifs.

L'hydrogène est stocké dans un réservoir à haute pression (jusqu'à 400 bar). L'hydrogène est transportée sur l'anode afin d'être oxydée dès le premier contact avec un catalyseur (généralement le platine disposé sur l'anode). L'oxydation se produit très vite et avec une densité bien définie. Comme le montre l'équation (1.1), cette réaction libère des électrons  $e^-$  et des ions  $H^+$ .

TABLE 1.2 – Comparaison entre les différents types de piles à combustible

Nom	PAC alcaline (AFC)	PAC à membrane échangeuse de protons (PEMFC)	PAC à méthanol direct (DMFC)	PAC à acide phosphorique (PAFC)	PAC à carbonate fondu (MCFC)	PAC à oxyde solide (SOFC)
électrolyte	KOH	Polymère (Nafion-PBI)	Polymère	$H_3PO_4$	Carbonate fondu	Céramique
Puiss (kW)	10 -100	0.1-500	0.001-100	100-10000	300-100 000	jusqu'au 100 MW
Tempér°C	60-90	60-220	60-130	150-200	600-700	700-1100
Ion	$OH^-$	$H^+$	$H^+$	$H^+$	$CO_3^{2-}$	$O^{2-}$
Avantages	Pas de platine utilisé - bon rendement 60-70%	Démarrage rapide/ dynamique importante	Fonctionne directement à partir du méthanol (pas de stockage haute pression)	Moins sensible aux impuretés	Bon rendement (40 à 50%)/ Plusieurs catalyseurs possibles	Bon rendement (50 à 60%)/plusieurs types de céramique peuvent être utilisées
Inconvénients	uniquement hydrogène pur, sensible au $CO_2$	Métal noble/sensible aux impuretés	Métal noble / faible rendement (20 à 30%)	Métal noble /long démarrage/	Température élevée/ faible densité/ Long démarrage	dégradation des composants (température)/ long démarrage
Domaines	Aviation, militaire, station spatiale	Excellent pour les transports / téléphonie ..	micro électronique / station spatiale	Transport /industrie	Industrie/ production électrique	production électrique principalement
Dens $W.cm^{-2}$	0.1-0.3	>0.7	<0.25	0.14	0.1-0.12	0.15-0.7



Les électrons vont passer par l'anode vers la charge électrique puisqu'ils ne peuvent pas passer dans l'électrolyte, puis ils vont être transportés vers la cathode par un autre circuit afin de rencontrer les protons  $H^+$  qui sont passés par l'électrolyte. De l'autre côté, se trouve en permanence l'oxygène de l'air pour réagir avec les électrons et les protons d'hydrogène comme le montre l'équation (1.2)



La réaction dans la cathode est exothermique. La température dégagée est fortement liée au point de rendement de la pile, ainsi que la tension libérée. La réaction globale d'une cellule de pile à combustible peut être mise sous l'équation (1.3).

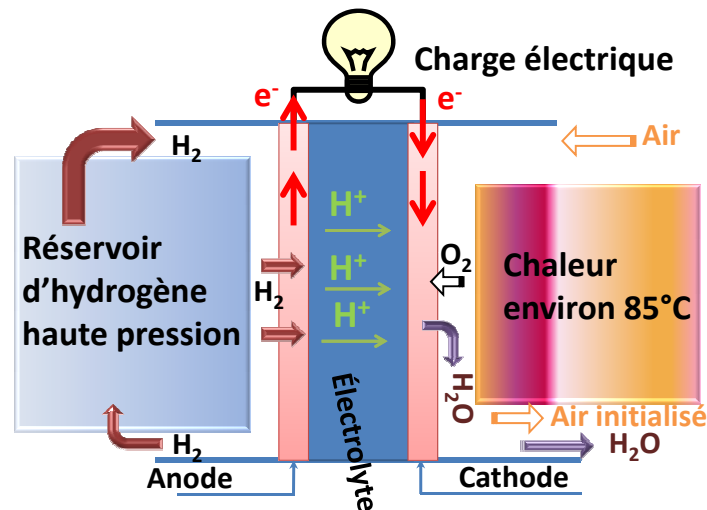
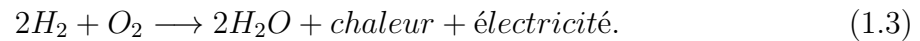


FIGURE 1.11 – Modèle et principe de fonctionnement d'une cellule de pile à combustible à hydrogène du type PEMFC

### 1.5.2 Système de Stockage Electrique (SSE)

La technologie du stockage électrique pour les véhicules hybrides a été depuis toujours un vrai problème. Au cours de ces dernières années, le développement des nouveaux matériaux a permis aux chimistes de fabriquer des systèmes plus performants et plus efficaces, qui répondent de plus en plus aux besoins délicats des industriels automobiles. Selon l'architecture et les convertisseurs utilisés, les batteries et les supercondensateurs sont les deux technologies de stockage d'énergie électrique actuellement utilisés dans

les véhicules hybrides à pile à combustible [Zha 11c]. L'implantation d'un système de gestion d'énergie électrique exige l'existence d'un système de stockage réversible avec de bonnes caractéristiques, telles que : une longue autonomie, une meilleure énergie et une meilleure puissance spécifique, un bon rendement...(nous ne prendrons pas en compte les volants d'inertie).

### 1.5.2.1 La batterie

Plusieurs conditions sont nécessaires pour qu'un système de stockage électrique puisse être associé à une autre source dans une application hybride. Premièrement, l'élément doit avoir une capacité énergétique suffisante (Wh/kg) pour récupérer le maximum d'énergie du freinage, deuxièmement une densité de puissance acceptable (W/kg), afin de répondre aux pics de puissance demandés lors des accélérations et ainsi participer à l'échange d'énergie quelle que soit les phases du système (demande de puissance faible, forte, positive ou négative). De nos jours, plusieurs technologies de batteries ont été utilisées principalement dans des véhicules purement électriques et d'autres sont en cours de développement. Ci-dessous une liste non-exhaustive des batteries les plus intéressantes du marché de l'automobile :

1. *batterie Pb-acide* : La batterie plomb-acide a été inventée par le physicien français Gaston Planté (1858), et elle est actuellement une technologie mature. La batterie au plomb a été longtemps le meilleur choix pour les véhicules électriques [Cau 00]. Un coût relativement faible et la disponibilité de la matière première (Plomb principalement) ont permis aux batteries plomb-acide de dominer le marché des batteries pendant le siècle dernier. Une infrastructure de recyclage est en place pour elles, près de 98 % des batteries sont recyclées ce qui permet une certaine minimisation de son impact sur l'environnement [Can 11]. Dans les années 1980, plus de 100 millions de batteries plomb-acide ont été produites chaque année. Cependant, une faible énergie spécifique, une mauvaise performance à basse température, une vie courte et un nombre de cycles ne dépassant pas 800, sont parmi les obstacles à leur utilisation dans les véhicules électriques et hybrides. GM EV1 (figure 1.12) et Toyota RAV4 sont les deux voitures purement électriques les plus populaires qui fonctionnent à partir de *packs* de batteries au plomb.
2. *Batterie Lithium-ion (Li-ion)* : Elle est fabriquée à grande échelle depuis 1991, principalement pour les téléphones portables et les ordinateurs portables. En 1998, le véhicule électrique de marque Nissan Altra (figure 1.13) utilise pour la première fois une batterie de ce type dans le domaine des véhicules. Jusqu'à aujourd'hui, plusieurs marques ont leurs voitures hybrides et électriques avec le même type de batterie telles que : Toyota Vitz CVT 4 et Mercedes-Benz s400 blue hybrid modèle 2009. Les ions de lithium transportent les électrons de la cathode vers l'anode pendant le chargement de la batterie et de l'anode vers la cathode lors du déchargement [IJE 00]. Avec une bonne densité énergétique (trois fois plus que la batterie nickel-hydrure métallique 1.3) et une faible auto-décharge, la batterie Li-ion est utilisée dans plusieurs domaines tels que : le spatial, le militaire et pénètre de plus



FIGURE 1.12 – Véhicule General Motors EV1 avec une batterie Pb-acide.

en plus le marché de l'électro-domestique.

3. *Batterie Nickel-Hydrure Métallique ou NiMH* : Elle est similaire aux batteries NiCd car elles utilisent toutes les deux le même type d'électrode positive : l'oxyhydroxyde de nickel ( $\text{NiOOH}$ ), mais du côté de l'anode il est utilisé ici, de l'hydrure métallique au lieu du cadmium. Ce type de batterie est actuellement utilisé dans tous les types de véhicule de type hybridation rechargeable et hybridation complète [Kar 07] puisque son coût a été réduit de moitié dans les dix dernières années, nous trouvons la Toyota Prius et la Honda EV Plus (figure 1.14). (Pour plus d'information sur les batteries NiMH, voir [Kop 04])
  
4. *Batterie Li-Polymère (Li-Po)* : c'est le résultat de l'évolution des électrolytes solides et des batteries Li-ion avec des électrolytes en solvant organique. La différence majeure par rapport aux batteries Li-ion est que le lithium sous forme de sel organique est remplacé par un polymère solide. L'électrolyte de type polymère le plus utilisé est l'oxyde de polyéthylène et polyacrylonitrile. Les batteries de type Li-Po ont la meilleure densité énergétique et une meilleure densité de puissance avec une bonne fonctionnalité à des températures supérieures à  $60^\circ\text{C}$  [Hus 10]. En utilisant ce type de batterie, beaucoup de problèmes de sécurité sont évités, par exemple, lors d'un accident de la route car il y a moins de possibilité d'inflammabilité contrairement aux batteries Li-ion. Depuis la première utilisation de cette batterie destinée essentiellement aux véhicules hybrides en 1995, l'Audi2 version octobre 2010, est l'hybride rechargeable la plus répandue, avec une autonomie d'environ 500 km avec un seul plein électrique. Sur la figure 1.15 est présenté la photo d'un véhicule de la marque KIA qui utilise ce type de batterie.



FIGURE 1.13 – Véhicule Nissan Altra avec une batterie Lithium-ion.



FIGURE 1.14 – Véhicule Honda EVplus avec une batterie NiMH.



FIGURE 1.15 – Véhicule Kia avec une batterie li-polymère.

#### 5. Batterie Lithium-Fer-Phosphate :

Traditionnellement, le nickel-cadmium (NiCd) a remplacé les batteries au plomb-acide, mais l'industrie des batteries s'éloigne de cette technologie vu son impact environnemental et les nouvelles technologies qui sont développées. Que ce soit pour le marché de l'électronique portable ou pour les véhicules hybrides et électriques, les batteries lithium-ion (Li-ion) ont remplacé les batteries NiCd. De nos jours, la nouvelle technologie phosphate de lithium-fer (Li-FePO), est devenue un principal concurrent pour la prochaine génération de batterie pour les véhicules hybrides par rapport aux batteries existantes telles que Ni-MH ou autres. Comparé aux autres batteries, le lithium-fer phosphate a un bon nombre de cycles et une vie durable (> 10 années) ainsi qu'une importante densité énergétique. Le véhicule BYD F3DM modèle 2009 (figure 1.16), représente la première hybride rechargeable avec une batterie de ce type.

### 1.5.2.2 Le supercondensateur

Les supercondensateurs sont des dérivés des condensateurs classiques, où la densité d'énergie a été augmentée avec une détérioration de la densité de puissance pour faire fonctionner les engins gourmands en énergie. Donc c'est une technologie qui se situe entre les batteries (forte densité énergétique et faible densité en puissance) et les condensateurs (faible densité d'énergie et forte densité en puissance). Le supercondensateur est un dispositif de stockage d'énergie électrique avec une bonne densité énergétique et une forte puissance spécifique par comparaison avec d'autres types de stockage d'énergie électrique [Flo 12]. Comme le montre la figure 1.17, il est constitué de deux électrodes (anode et cathode) séparées par une membrane isolante qui permet le passage des électrons seulement et un électrolyte qui est généralement une solution  $H_2SO_4$  [Zha 11b].





FIGURE 1.16 – Véhicule BYD-F3DM avec une batterie Li-Fe-Po.

La pile à combustible peut être une solution alternative dans les véhicules hybrides en remplacement de la source principale (le moteur à combustion), alors le supercondensateur est vu également comme la technologie alternative aux batteries intégrées dans les véhicules hybrides à moteur à combustion classiques. Il faut noter que l'utilisation d'une batterie ou de supercondensateurs dépend énormément de l'application, du cahier des charges, de l'architecture et de la technologie utilisée. L'hybridation pile à combustible / supercondensateur crée une réponse dynamique importante. La pile est assistée par le supercondensateur notamment durant les fortes variations de la demande de puissance et par conséquent, cette association permet de réduire le stress sur la PAC, ce qui la rend bien adaptée aux applications automobiles. Généralement la possibilité de réduction de la consommation du carburant est meilleure avec un stockage de type supercondensateur

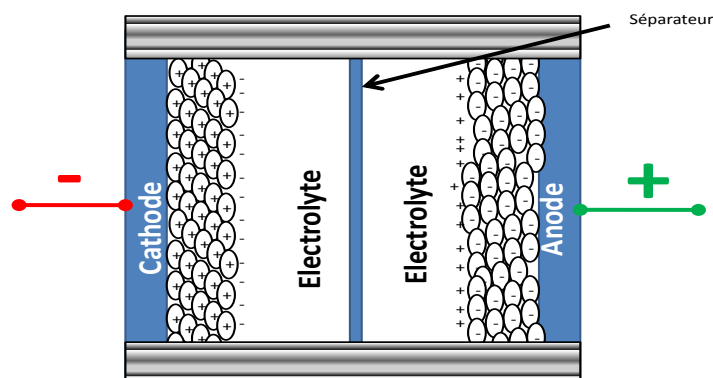


FIGURE 1.17 – Structure d'un supercondensateur.

plutôt qu'avec une batterie et contribue cette hybridation contribue à l'augmentation de la durée de vie de la pile à combustible [Zha 10]. [Tho 09], [Bau 08] et [Gao 05] font des comparaisons intéressantes entre l'hybridation des véhicules à pile à combustible, soit avec une batterie, soit avec un supercondensateur.

Il est à noter que tous ces éléments peuvent impacter la gestion d'énergie finale à bord du véhicule. Pour notre travail axé sur la formulation et la résolution du problème d'optimisation de l'énergie, nous partons du dimensionnement des sources embarquées fait dans les travaux d'Hankache, l'architecture série PAC/SC sera donc la structure retenue.

### 1.5.2.3 La différence entre une batterie et un supercondensateur

La densité énergétique et la densité de puissance sont des critères suffisants pour choisir entre une batterie et un supercondensateur pour une utilisation automobile [Bur 07]. Le diagramme de Ragone (figure 1.18) représenté sur une échelle logarithmique montre la comparaison entre les différentes technologies de stockage d'énergie électrique. Les critères de comparaison sont essentiellement, la densité en puissance en abscisse, la densité énergétique en axe des ordonnées et sur l'axe incliné est notée l'autonomie cyclique (temps nécessaire pour charger ou décharger le dispositif).

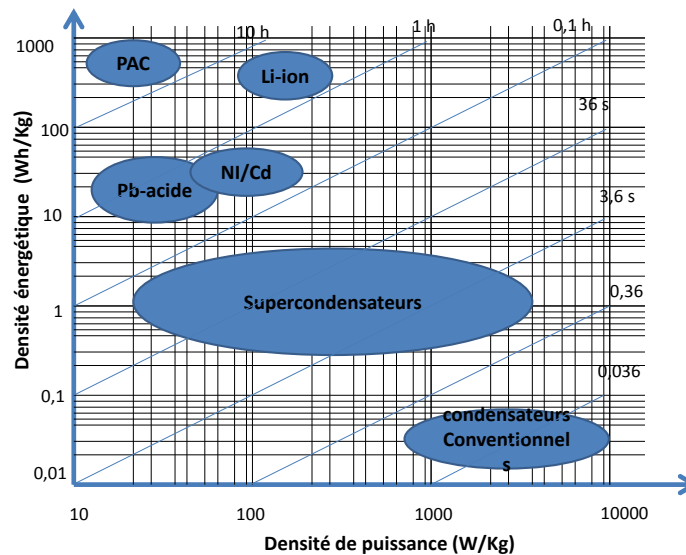


FIGURE 1.18 – Diagramme de Ragone.

Pour plus de précision nous définissons les termes :

- énergie spécifique ou densité énergétique, ou encore dénommée énergie massique : ces termes désignent la quantité d'énergie électrique contenue dans une masse de matière  $Wh/kg$ .
- énergie spécifique ou puissance massique ou encore appelée densité de puissance : ces termes représentent la dynamique du dispositif. C'est la quantité de puissance électrique qu'il peut fournir par unité de masse  $W/kg$ .

- autonomie cyclique ou temps de décharge : cette notion désigne le temps nécessaire pour charger ou décharger le dispositif, elle est exprimée en secondes.

D'autres caractéristiques néanmoins importantes mais pas souvent représentées sur le diagramme sont : le rendement cyclique (le rendement pendant la décharge ou la charge du dispositif), la durée du vie (année, mois ...), le coût de fabrication, l'impact sur l'environnement, la sécurité, la maintenance, le poids et les dimensions...

TABLE 1.3 – Tableau comparatif des caractéristiques des batteries et supercondensateurs

Dispositif		Tension nominale (V)	Densité énergétique (Wh/kg)	densité en Puissance (kW/kg)	Nombre de cycles
Batteries	Pb-acid	2	30-40	0.18	<800
	NI-Mh	1.2	55-80	0.4-1.2	<1000
	Li-Ion	3.6	80-170	0.8-2	<1200
	Li-Po	3.7	130-200	1-2.8	<1000
	Li-Ion Phosphate	3.2-3.3	80-115	1.3-3.5	<2000
Super-condensateur		2.5-2.7	0-30	4-10	> 1 million

Le tableau 1.3 [Cao 12], montre une comparaison entre les deux principales technologies utilisées dans les véhicules hybrides. Le choix est entre une densité énergétique élevée (batterie) ou une excellente densité de puissance et une faible densité énergétique (supercondensateur). La différence nette entre les deux technologies est le nombre de cycles qu'elles peuvent faire chacune (plus d'un millions de cycles pour les supercondensateurs contre 2 000 au maximum pour les batteries).

### 1.5.3 Traction des véhicules hybrides à pile à combustible

La chaîne de traction d'un véhicule hybride à pile à combustible (VHPAC) se décompose principalement en deux éléments : (i) un Système à Pile A Combustible (SPAC) qui représente la source principale de propulsion. (ii) un Système de Stockage d'énergie (SSE) qui, lui, représente la source secondaire et peut être une batterie ou un supercondensateur.

La modélisation et la gestion d'énergie sont représentées par la figure 1.19. Nous y voyons :  $P_{SPAC}(t)$  la puissance fournie par le SPAC (puissance toujours positive, flux unidirectionnel),  $P_{SSE}$  est la puissance produite/stockée par l'élément de stockage électrique (puissance positive/négative, c'est un flux de puissance bidirectionnel), enfin  $P_d$  c'est la puissance demandée par le moteur électrique (flux de puissance bidirectionnel, accélération/freinage récupératif) qui correspond à la puissance demandée par le conducteur pour assurer la mission.

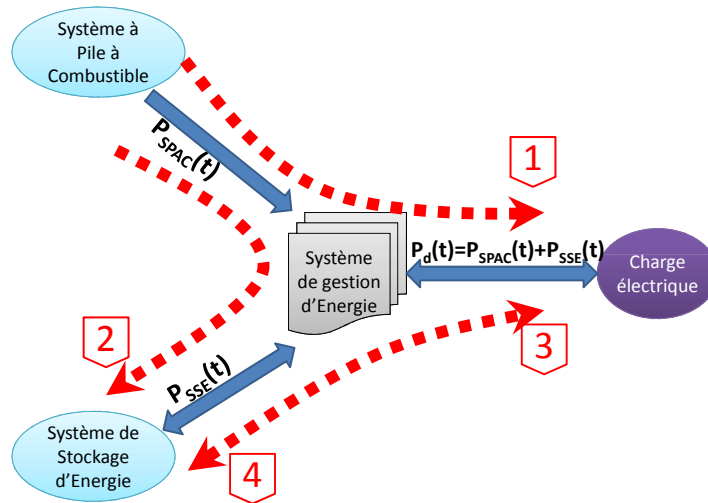


FIGURE 1.19 – Modèle d'un VHPAC avec les flux énergétiques.

Un VHPAC fonctionne pour une grande partie avec les puissances  $P_{SPAC}$  délivrées par le SPAC et le reste par le  $P_{SSE}$  délivrée par le SSE afin que la somme satisfasse la puissance demandée par le moteur électrique  $P_d$  responsable de la traction. Généralement la distribution des puissances est gouvernée par la loi suivante (équation (1.4)) :

$$P_{SPAC} + P_{SSE} = P_d \quad (1.4)$$

Nous verrons dans les prochains chapitres que cette égalité peut être changée dans certains cas, afin de minimiser la consommation d'hydrogène. Les numéros sur la figure 1.19 représentent :

1. Le SPAC comme source principale d'énergie, fournit directement de la puissance vers le moteur électrique
2. Le SPAC charge le SSE en cas d'arrêt de la voiture, pour un biberonnage ou s'il est épuisé.
3. Lors d'une forte accélération, le SSE intervient et fournit une partie de la puissance demandée afin d'aider le SPAC à satisfaire  $P_d$ . Ces puissances sont déjà récupérées précédemment lors du freinage.
4. Lors d'un freinage, les puissances demandées sont considérées comme négatives, il est possible et préférable de les récupérer pour charger le SSE.

#### 1.5.4 Avantages des véhicules à pile à combustible

La réaction chimique produite dans la PAC est exothermique et produit uniquement de l'électricité et de l'eau [Car 01]. Le premier avantage est que cette transformation ne dégage pas de gaz à effet de serre (pas de pollution, zéro émission). L'électricité produite

par la PAC est plus efficace pour la propulsion qu'un autre type d'énergie. La réaction chimique traitée dans la PAC est silencieuse, avec une PAC, la voiture ne dispose pas de pistons faisant du bruit comme les véhicules classiques avec moteur à explosion, la PAC rend la conduite plus confortable en pilotant un groupe moto-propulseur lui aussi électrique. La pile à combustible contrôlée pas ses auxiliaires, fournit l'électricité continuellement et sans changement d'état, contrairement aux batteries pour lesquelles les éléments chimiques se dégradent avec le temps. Plusieurs autres avantages sont : son rendement élevé (deux fois plus performant en comparaison à un moteur à combustion), bonne alternative de ce carburant pour remplacer les énergies fossiles, installation facile, coût peu élevé en production de masse.

### 1.5.5 Inconvénients des véhicules à pile à combustible

En ce moment, l'hydrogène n'a aucun avenir comme source d'énergie principale pour les véhicules à PAC, puisque l'hydrogène n'est pas une source d'énergie première et généralement, il est produit par électrolyse de l'eau [Lar 03] [OHa 06], utilisant de fait, l'électricité produite par le nucléaire pour le cas de la France aujourd'hui. Les perspectives actuelles sur son utilisation sont peu réalistes à cause de la quantité d'électricité nécessaire pour obtenir l'hydrogène lequel sera transformé en électricité par la PAC. Il serait préférable de l'utiliser directement sous sa forme initiale. La logistique et le stockage de l'hydrogène soulèvent de nombreux problèmes de sécurité (reformer, stockage hydrure...). La quantité d'hydrogène qui peut être stockée dans un véhicule hybride à pile à combustible ne permet pas une autonomie raisonnable comparé à une voiture conventionnelle. Les enjeux économiques et techniques sont considérables vu que les composants des PAC sont assez chers et rares car non encore produits en masse. Les stockages de l'hydrogène sous forme de liquide ou solide à une température ambiante sont peu favorables en ce moment.

Enfin les moteurs à combustion interne sont encore en plein développement et ont encore un avenir avantageux du fait des avancées de la technologie mécanique. Ces investissements restent moins coûteux que les enjeux de la logistique de la filière hydrogène qui reste à développer. La durée de vie et le nombre de cycles des batteries utilisées dans les voitures sont améliorées chaque année et les nouvelles technologies restent à fiabiliser ce qui freine le développement de nouveaux véhicules en rupture technologique.

## 1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit brièvement l'univers des véhicules hybrides. Nous avons vu ainsi qu'un véhicule hybride à pile à combustible a la même architecture qu'une voiture conventionnelle où le Système Pile à Combustible a pris la place du moteur à combustion et du générateur électrique. Le SPAC est considéré comme la source principale de la propulsion. L'ajout d'une source secondaire à but d'hybridation a des effets directs sur le coût de fabrication mais aussi sur la possibilité d'optimisation de la

répartition de l'énergie entre les sources. L'impact économique est le paramètre le plus important parmi les facteurs 3E (économique, énergétique, environnemental) associés au véhicule pour faire la comparaison entre n'importe quel type de véhicule. Pour faire face au prix d'achat élevé des véhicules hybrides, la réduction de la consommation du carburant et des émissions de gaz nocifs sont un vrai déficit. Nous nous intéressons dans notre travail à l'aide à la décision, à l'optimisation sur ordinateur de bord, pour la gestion des puissances électriques. C'est-à-dire, définir l'organe logiciel devant fournir à chaque instant de temps, une référence de puissance à chacune des sources, cette décision devra résoudre le déficit en trouvant une combinaison optimale de la répartition de la puissance demandée sur les deux sources sur la globalité d'un trajet. Dans le chapitre suivant nous devons tout d'abord modéliser le système moto-propulseur et les caractéristiques des sources en présence. De plus, nous présenterons les méthodes et outils d'optimisation appliqués dans la littérature sur le problème de gestion de l'énergie multi-sources.

Lire la deuxième partie de la thèse