

**Anthony Juton, Xavier Rain, Valérie Sauvant-Moynot,
François Orsini, Christelle Saber, Seddik Bacha,
Olivier Bethoux, Éric Labouré**

TECHNOLOGIES DES VOITURES ÉLECTRIQUES

**Motorisations, batteries, hydrogène,
recharge et interactions réseau**

Préfaces de Patrick Bastard, directeur
de la recherche, Groupe Renault
et Carla Gohin, vice-présidente
Recherche et Innovation, Stellantis

DUNOD

Direction artistique : Nicolas Wiel

Conception graphique de la couverture : Élisabeth Riba

Illustration de couverture : jasrim/shutterstock.com (ciel) puis, de gauche à droite, chesky/shutterstock.com (borne), groupe Renault, Peugeot, Toyota, Alexandre-Kirch/shutterstock.com (borne),

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, 2021

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-081806-8

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Remerciements

L'ensemble des auteurs tient à remercier pour leurs conseils ou leur relecture attentive Issam Baghdadi, Julien Bernard, Fabien Boudjemaa, Didier Deruy, Emmanuelle Lancelle-Beltran, Mohamed Gabsi, Emmanuel Hoang, Christian Maugy, Frédéric Mazaleyra, Cédric Nouillant, Javier Ojeda, Masato Origuchi, Olivier Ploix et Bernard Sahut.

Liste des abréviations

- AC : Courant alternatif (*Alternative Current*)
- ACV : Analyse du Cycle de Vie
- AME : Association Membrane Électrode
- BEV : Voiture électrique à batterie (*Battery Electric Vehicle*)
- BMS : Système de contrôle de la batterie (*Battery Management System*)
- BT : Basse Tension
- CEM : Compatibilité Électro-Magnétique
- DC : Courant continu (*Direct Current*)
- DWPT : Système de charge inductive dynamique (*Dynamic Wireless Power Transfert*)
- EnR : Énergies Renouvelables
- EREV : Voiture électrique à prolongateur d'autonomie (*Extended Range Electric Vehicle*)
- FCEV : Voiture électrique à pile à combustible (*Fuel Cell Electric Vehicle*)
- GaN : Nitrure de Gallium (*Gallium Nitride*)
- GRD : Gestionnaire de Réseau de Distribution
- GRT : Gestionnaire de Réseau de Transport
- HEMT : Transistor à haute mobilité électronique (*High Electron Mobility Transistor*)
- HEV : Voiture hybride (*Hybrid Electric Vehicle*)
- ICE : Voiture à moteur thermique essence ou diesel (*Internal Combustion Engine*)
- IGBT : Transistor bipolaire à grille isolée (*Insulated Gate Bipolar Transistor*)
- IRVE : Infrastructure de Recharge de Véhicules Électriques
- kT : Kilotonne (10^6 kg)
- LFP : Lithium, Fer, Phosphate (type de batterie dont l'électrode positive est constituée de ces matériaux)
- MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion (équivalent de PWM)
- MOSFET : Transistor à effet de champ à grille métal-oxyde (*Metal Oxyde Semiconductor Field Effect Transistor*)
- MT : Mégatonne (10^9 kg)
- NCA : Nickel, Cobalt, Aluminium (matériau actif de l'électrode positive de batteries au lithium, constitué de ces 3 éléments)
- NMC : Nickel, Manganèse, Cobalt (matériau actif de l'électrode positive de batteries au lithium, constitué de ces 3 éléments)
- PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur
- PCS : Pouvoir Calorifique Supérieur

Liste des abréviations

- PHEV : Voiture hybride rechargeable (*Plug-in Hybrid Electric Vehicle*)
- PPE : Politique Publique de l'Énergie
- PWM : Pulse Width Modulation (équivalent de MLI)
- RMS : Valeur efficace (*Root Mean Square*)
- RPD : Réseau Public de Distribution
- S&S : Voiture avec altesno-démarreur (*Stop and Start*)
- SEI : Couche de protection de l'électrode négative (*Solid Electrolyte Interface*)
- Si : Silicium (*Silicon*)
- SiC : Carbone de silicium (*Silicon Carbide*)
- Smart Grid : Réseau regroupant de manière optimisée des producteurs et consommateurs d'énergie
- TBT : Très Basse Tension
- V2G : Technologies d'interaction entre la voiture et le réseau électrique (*Vehicle To Grid*)
- VE : Voitures Électrifiées (voitures hybrides et voitures électriques à batterie)
- VER : Voitures Électrifiées Rechargeables (voitures hybrides rechargeables et voitures électriques à batterie)
- WLTC : Cycle de test normalisé utilisé par la procédure WLTP
- WLTP : Procédure de test normalisée des voitures (*Worldwide Harmonized Light vehicles Test Procedure*)

Préfaces

L'électricité et l'automobile ont pris leur essor conjointement vers la fin du XIX^e siècle. L'une et l'autre ont été sans nul doute les deux inventions qui ont le plus façonné nos sociétés industrielles. Et pourtant, malgré de timides fiançailles au cours des années 1880-1890, que le moteur à explosion et l'expansion de l'industrie pétrolière n'auront pas tardé à réduire à néant, il aura fallu plus de cent ans pour que ces deux industries se retrouvent et remettent en selle un mariage qui cette fois tiendra ses promesses.

Ainsi, la voiture électrique est maintenant sortie du statut de niche auquel elle était cantonnée lors des multiples expérimentations qui ont débouché sur des prototypes, voire de toutes petites séries au cours du XX^e siècle. Depuis quelques années, la très forte croissance du marché des véhicules électriques, mais aussi – et c'est lié – l'offre commerciale désormais au catalogue de la plupart des constructeurs automobiles sont les signes évidents d'un changement de paradigme.

Car le passage du moteur à combustion interne au moteur électrique n'est pas qu'une affaire de technologie. C'est tout un écosystème qu'il faut repenser. Il ne s'agit pas « simplement » de substituer un moteur électrique à un moteur à explosion, une batterie à un réservoir, un onduleur à un système d'injection... la voiture électrique, c'est aussi toute une infrastructure de charge à développer ; et de façon plus inattendue, c'est également une incroyable opportunité « systémique » à saisir puisque le développement des énergies renouvelables et le développement de la mobilité électrique peuvent se compléter en permettant conjointement de réduire l'empreinte carbone de la production d'électricité et celle des transports terrestres. La clé de voûte commune à ces deux transformations majeures de nos sociétés (la mobilité électrique et les énergies renouvelables), c'est le stockage d'énergie. En cela, il est clair que les technologies de batteries sont d'ores et déjà au cœur de très nombreux travaux académiques, mais représentent aussi des enjeux industriels colossaux dont l'Europe a bien compris qu'elle ne pouvait plus laisser le leadership aux pays d'Asie. C'est là un énorme défi pour nos ingénieurs et chercheurs, mais plus encore pour nos entreprises car il s'agit bien de passer de la recherche à la production de masse.

Au-delà de l'écosystème global, l'électrification des voitures repose aussi sur la maîtrise de technologies qui ne sont pas historiquement automobiles : machines électriques et électronique de puissance sont désormais le terrain de jeu des ingénieurs motoristes. Et c'est là une vraie révolution pour une industrie automobile qui a été nourrie au pétrole pendant plus de cent ans ! Là encore, il est clair que la mutation technologique est un véritable défi pour les constructeurs automobiles et les équipementiers. Et pourtant, il n'y a pas d'autre choix que de basculer très vite car chacun sait que les périodes de rupture technologique offrent des opportunités inespérées aux nouveaux acteurs alors qu'elles fragilisent les acteurs historiques, qui doivent gérer la transformation de leurs actifs et la reconversion de leurs équipes. Là aussi, l'Europe se doit d'être volontariste pour éviter que le tissu industriel gravitant autour des motorisations automobiles ne

fasse les frais de cette transformation majeure. Nous avons des atouts et la transformation est déjà bien engagée, mais la concurrence sera rude !

Si l'industrie automobile se transforme à marche forcée en électrifiant ses voitures, si tout un écosystème se développe autour des véhicules électriques, ne perdons jamais de vue l'objectif qui, à lui seul, justifie une telle révolution et, disons-le aussi, une telle prise de risque : contribuer à la maîtrise du changement climatique. Car, au-delà des émissions de polluants que les réglementations relatives aux motorisations thermiques ont considérablement diminuées, c'est bien la réduction des émissions de CO₂ qui reste notre cible commune, celle qui permettra à l'industrie automobile de prendre sa part dans l'un des plus colossaux défis que l'Humanité aura dû relever au cours de son histoire : rendre compatibles développement économique et inversement de la courbe des émissions de gaz à effet de serre pour éviter qu'un désastre climatique ne balaie des siècles de progrès. Il est donc indispensable qu'électrification rime avec protection – protection de l'environnement bien sûr. Et pour cela, il faut que les solutions technologiques envisagées soient toujours regardées par le prisme de l'analyse du cycle de vie (ACV). Des matières premières au recyclage, en passant par toutes les phases de vie des voitures électriques et, c'est important, de leurs batteries, il est nécessaire que soient bien évalués les impacts réels de l'électrification sur l'environnement. À ce stade, soyons clairs : la balance en termes d'émissions de CO₂ sur l'ensemble du cycle de vie est déjà très largement en faveur de la voiture électrique, comparée à des voitures équivalentes à motorisation thermique, quand on considère un mix énergétique européen et une voiture de gabarit intermédiaire. Partant de là, il faut encore améliorer ce bilan carbone, afin de tenir les cibles définies par l'ambitieuse vision du « Green Deal » européen. Si l'objectif est bien de réduire drastiquement les émissions de CO₂, mais aussi de garantir un cycle de vie vertueux au-delà du seul CO₂, sans nul doute l'effort devra-t-il passer par de nombreuses innovations technologiques, mais pas seulement : il faudra aussi que nous construisions tout un écosystème de la mobilité plus vertueux, associant tous les acteurs privés et publics, et enfin... que nous apprenions à changer nos habitudes. C'est là un autre sujet, mais il est important tant les clés pour maîtriser le changement climatique sont aussi dans les mains des consommateurs que nous sommes tous !

À lire ces lignes, on pourrait donc croire que les plus grands défis qui attendent l'industrie automobile sont de maîtriser de nouvelles technologies, d'innover, de transformer ses usines, de trouver sa place dans un nouvel écosystème, de réduire encore et encore l'impact environnemental de la mobilité... mais en réalité le premier des défis est ailleurs. Ou plutôt il est en dénominateur commun de tout cela. Le premier des défis pour développer l'électrification qui reste la seule et unique voie à court et moyen terme pour une mobilité raisonnée et vertueuse, c'est la formation et le développement des compétences. En somme, et comme toujours, le premier des défis est éminemment humain ! Car si des générations entières d'ingénieurs ont été formées pour concevoir des moteurs à combustion interne, il faut désormais prendre un virage sur l'aile et intensifier la dynamique de reconversion en cours afin de revoir les programmes de formation initiale dans nos écoles d'ingénieurs et universités, former les équipes en place dans les entreprises et même... développer auprès du grand public une culture de la mobilité électrique et des enjeux sociétaux associés, afin de sortir des débats partisans et revenir aux faits objectifs et aux données établies.

Dans ce contexte de profonde transformation, cet ouvrage à plusieurs voix arrive à point nommé pour apporter sa pierre à l'édifice de connaissances qu'il nous faut désormais rénover puis étendre !

Patrick Bastard
directeur de la Recherche, Groupe Renault

*
* *

Depuis Cugnot en 1769 avec son fardier, l'automobile n'a cessé de connaître des évolutions et des révolutions, tant dans ses technologies que dans les façons de la fabriquer ou de l'utiliser.

Au départ objet principalement de curiosité, de luxe puis de loisirs, il est très vite devenu un objet fondamental dans le développement de nos sociétés industrielles, un objet permettant la liberté de mouvement des personnes et des biens. Mais il est aussi devenu ces dernières années un objet central dans les légitimes préoccupations énergétiques et environnementales.

Ainsi, cet ouvrage paraît à la fin d'un cycle lié aux moteurs thermiques, et probablement au tournant d'une nouvelle révolution : les voitures électriques et les technologies qu'elles embarquent sont à l'aube d'un développement important. Cette nouvelle automobile va transformer profondément nos vies et nos habitudes de mobilité, nos économies, nos industries, nos systèmes énergétiques, notre environnement.

L'ampleur de ces transformations va générer de la complexité pour l'ensemble des parties prenantes : constructeurs automobiles, opérateurs de mobilité, opérateurs d'infrastructure routière, énergéticiens, décideurs politiques, clients, citoyens...

- ▶ Complexité des enjeux énergétiques : aura-t-on suffisamment d'électricité, de sources d'énergie renouvelables, nos réseaux seront-ils résilients ? Comment vont évoluer les mix énergétiques et les filières de production ? Comment vont cohabiter électricité et hydrogène ?
- ▶ Complexité des enjeux environnementaux : les promesses de « propreté » de la voiture électrique sont-elles tenables quand on considère l'ensemble de son cycle de vie (du berceau à la tombe) ?
- ▶ Complexité des enjeux de ressources naturelles : aura-t-on les matériaux en quantités suffisantes ? Saura-t-on extraire et utiliser ces ressources de manière propre, durable et responsable ?
- ▶ Complexité dans l'aménagement des territoires : quels doivent être les choix de transformation de l'espace public, des domiciles particuliers ou collectifs pour assurer la recharge électrique ou la distribution d'hydrogène ?
- ▶ Complexités des modèles économiques : le coût des technologies d'électrification va-t-il remettre en cause le modèle de possession individuelle au profit des transports en commun ou partagés ? Comment va évoluer le coût d'usage, dans un

contexte à la fois de déploiement des énergies renouvelable et de propositions de solutions de charge intelligente (smartgrids) ?

- Complexité enfin dans les choix technologiques : quelles sont les technologies de demain dans le domaine des batteries, des piles à combustible, des réservoirs d'hydrogène, des moteurs électriques, des électroniques de puissance et de commande, des algorithmes de contrôle, de la gestion de l'énergie, des matériaux ?

Cet ouvrage, vision croisée de scientifiques académiques et d'ingénieurs de l'automobile, constitue un état de l'art très complet des technologies des voitures électriques. Au-delà des pures connaissances techniques, il donnera à chacun des clés pour appréhender les différentes problématiques évoquées.

Carla Gohin
vice-présidente Recherche et Innovation de Stellantis

Table des matières

Introduction	1
Le véhicule électrifié, une solution d'avenir pour l'automobile ?	1
Anthony Juton, Fabrice Le Berr	
I.1 Véhicules électrifiés : hybride, électrique, hydrogène...	2
I.1.1 Micro-hybridation par altesno-démarrereur (S&S)	2
I.1.2 Hybridation légère (<i>mild hybrid</i>) (MHEV)	3
I.1.3 Hybridation complète (HEV)	4
I.1.4 Voiture hybride rechargeable (PHEV)	7
I.1.5 Voiture électrique à batterie et prolongateur d'autonomie (EREV)	7
I.1.6 Voiture électrique à batterie (BEV)	9
I.1.7 Voiture électrique à pile à combustible (FCEV)	9
I.2 Le marché du véhicule électrique en 2020	10
I.3 L'impact environnemental du véhicule électrique est-il réellement positif ?	12
I.3.1 Véhicules urbains	13
I.3.2 Véhicules cœur de gamme et haut de gamme	14
I.3.3 Bus	15
I.3.4 Utilitaires – Camions	16
I.4 Le véhicule électrique est-il économiquement viable ?	16
I.4.1 Véhicules urbains	16
I.4.2 Véhicules cœur de gamme et haut de gamme	17
I.4.3 Bus	18
I.4.4 Utilitaires – Camions	18
I.5 Les ressources en matières premières sont-elles suffisantes pour un développement massif des véhicules électrifiés ?	19
I.5.1 Le cuivre	19
I.5.2 Le lithium	19
I.5.3 Le cobalt	20
I.5.4 Les terres rares	21
I.6 Conclusion	22

Partie 1	25
État de l'art et perspectives des motorisations pour voitures électriques	25
Xavier Rain, Sid-Ali Randi, Antoine Cizeron, Éric Gimet, Fabrice Le Berr	
1 Caractéristiques requises pour un moteur électrique de traction	26
2 Les solutions actuelles de motorisations pour voitures électriques	30
2.1 Moteur synchrone à aimants permanents	30
2.2 Moteur à induction	36
2.3 Moteur synchrone à rotor bobiné	44
2.4 Conclusion	48
3. État de l'art et perspectives des technologies de motorisations pour voitures électriques	50
3.1 Les matériaux magnétiques	50
3.1.1 Introduction	50
3.1.2 Les matériaux ferromagnétiques doux	50
3.1.3 Les matériaux ferromagnétiques durs : les aimants permanents	53
3.2 Le bobinage des machines à courant alternatif	54
3.2.1 Introduction	54
3.2.2 Bobinage distribué dans des encoches	54
3.2.3 Bobinages dentaires	58
3.3 Techniques de refroidissement des machines	60
3.3.1 Introduction	60
3.3.2 Refroidissement par air des machines ouvertes	61
3.3.3 Refroidissement par eau des machines fermées	65
3.3.4 Refroidissement par fluide diélectrique (huile)	67
3.3.5 Comparaison de l'efficacité du refroidissement des machines selon les architectures et les fluides	68
3.4 Typologies non conventionnelles de machines : les machines synchrones à double excitation et les machines à flux axial	70
3.4.1 Les machines synchrones à double excitation	70
3.4.2 Les machines à flux axial	72
3.5 Conclusion	72
4 L'électronique de puissance et ses perspectives	74
4.1 Précisions sur l'onduleur de tension	74

4.1.1	Fonction	74
4.1.2	Structures usuelles et grandeurs déterminantes	77
4.1.3	Décomposition du coût	78
4.2	Limites des solutions actuelles pour l'intégration	80
4.2.1	Réduction des connectiques et perturbations électromagnétiques	81
4.2.2	Vieillessement des isolants et des roulements	82
4.2.3	Niveaux de tension employés	84
4.2.4	Perspectives en termes de fractionnement	85
4.3	Semi-conducteurs à large bande interdite	85
4.3.1	Comparaison des propriétés physiques des différents semi-conducteurs d'électronique de puissance	86
4.3.2	Axes de recherche pour l'intégration des composants « grand gap » au sein des machines	89
4.4	Conclusion	90
Partie 2		93
État de l'art et perspectives des batteries de voitures électriques		93
Valérie Sauvant-Moynot, François Orsini, Anthony Juton		
5	Principe et caractéristiques d'une cellule Li-ion	94
5.1	Principe général des batteries	94
5.2	Énergie et puissance	97
5.3	Historique des batteries au lithium	97
5.4	Principe de fonctionnement du système Li-ion	98
5.5	Choix des électrodes	100
5.6	Le séparateur et l'électrolyte	102
6	Fabrication d'une batterie Li-ion	104
6.1	Fabrication des électrodes	104
6.2	Assemblage de la cellule	105
6.3	Finition/Formation	106
6.4	Assemblage d'un pack batterie	107
6.5	Compromis puissance/énergie	107
6.6	BMS	108
6.7	Recyclage et émissions de CO ₂	109
7	Caractéristiques actuelles des batteries	111
7.1	Performances	111
7.2	Vieillessement/Durée de vie	112

7.3 Sécurité	113
7.4 Recharge	114
7.5 Coût	116
7.6 Les fabricants de batteries (cellules)	117
8 Innovations et perspectives	119
8.1 Les tendances technologiques futures	119
8.2 Perspectives autour des batteries Li-ion	120
8.3 Les batteries Li tout solide	122
8.3.1 Matériaux	122
8.3.2 Mise en œuvre	124
8.4 Les batteries Li-S	126
8.5 Les batteries Li-air	127
Conclusion	130
Partie 3	131
État de l'art et perspectives des chargeurs de voitures électriques	131
Christelle Saber, Éric Labouré, Anthony Juton, Mimoun Asker, Larbi Bendani, Damien-Pierre Sainflou, Najib Rouhana	
9 Infrastructure et bornes de recharge	133
9.1 Présentation d'une chaîne de recharge conductive	133
9.2 Infrastructures de recharge	137
9.2.1 Point de recharge normale (AC, de 1,8 kW à 22 kW)	137
9.2.2 Point de recharge rapide (AC 43 kW – DC 50 kW → 350 kW)	140
9.2.3 Station de recharge rapide	142
9.3 Les connecteurs et communications véhicule – chargeur	145
9.3.1 CCS Combo 2	146
9.3.2 CHAdeMO	149
9.3.3 Autres formats	150
10 État de l'art des chargeurs de batteries conductifs pour voitures électriques	153
10.1 Types de chargeurs	154
10.2 Compatibilité électromagnétique et sécurité des chargeurs	157
10.3 Exemples de chargeurs de batteries embarqués	162
10.3.1 Nissan Leaf : chargeur embarqué autonome et isolé du réseau	162
10.3.2 Renault ZOE : chargeur embarqué, non réversible, intégré à la chaîne de traction et non isolé du réseau	164

10.3.3 SOFRACI : chargeur embarqué, réversible, intégré à la chaîne de traction et non isolé du réseau	164
10.4 Les bornes de charge rapide DC haute puissance	167
10.4.1 Topologie du chargeur	167
10.4.2 Utilisation d'une électronique de puissance modulaire	170
10.4.3 Câbles de charge refroidis par liquide	171
10.4.4 Bus continu ou bus alternatif	172
11 Perspectives et technologies futures	174
11.1 Technologies émergentes	174
11.1.1 Semi-conducteurs Grand Gap	174
11.1.2 Charge des batteries en 800 V	175
11.1.3 Meilleure prise en compte des perturbations CEM	176
11.2 Perspectives d'évolution des chargeurs	176
11.2.1 ChaoJi, évolution des standards CHAdeMO et GB/T	176
11.2.2 La charge automatique	177
11.2.3 Charge sans contact	178
11.2.4 Plug and Charge	178
11.2.5 V2G/communication avec l'infrastructure	179
12 Recharge sans contact des véhicules électriques	180
12.1 Quelques exemples de réalisation	181
12.1.1 Recharge statique	181
12.1.2 Recharge dynamique	181
12.2 Normes relatives aux infrastructures de recharge	183
12.3 Principe physique du transfert d'énergie par induction	185
12.3.1 Cas d'une bobine unique	185
12.3.2 Cas de plusieurs bobines en interaction magnétique	186
12.4 Principe physique du transfert d'énergie par induction	186
12.5 Systèmes de transfert d'énergie électrique par induction	188
12.5.1 Architecture globale d'un système de transfert d'énergie	188
12.5.2 Structure électrique du dispositif de recharge et formes d'onde caractéristiques	189
12.5.3 Mise en équations et impédances	190
12.5.4 Réalisation du coupleur	191
12.5.5 Facteur de dimensionnement de l'électronique de puissance et pertes dans les convertisseurs	191
12.5.6 Efficacité énergétique du transfert d'énergie	192

12.5.7	Caractéristiques globales d'un système de transmission d'énergie par induction	193
12.6	Conclusion	196
Partie 4		197
Véhicule électrique et réseau électrique		197
Seddik Bacha, Régis Le Drezen, Cédric Léonard, Damien-Pierre Sainflou		
13	Une consommation électrique nouvelle	198
13.1	Préambule	198
13.2	Un sujet nouveau et multi-acteurs	199
13.3	Description du contenu	200
13.4	Définitions	200
13.4.1	Intégration intelligente de la recharge à une maison/un bâtiment : V2H/B	200
13.4.2	Fonctionnement en groupe électrogène temporaire : V2-Home off grid	201
13.4.3	Alimentation de consommateur nomade, fonctionnement en groupe électrogène autonome : V2-Load	201
13.4.4	Recharge entre véhicule : V2-Vehicle	201
14	Enjeux pour le système électrique	202
14.1	Introduction	202
14.2	Enjeux pour l'équilibre entre l'offre et la demande d'électricité	204
14.2.1	La consommation d'électricité des véhicules électriques	204
14.2.2	Les appels de puissance au niveau du système électrique	206
14.2.3	Les enjeux du pilotage de la recharge pour l'intégration des véhicules électriques et les énergies renouvelables	207
14.2.4	Les enjeux sur la dynamique du système électrique et l'équilibrage court terme	209
14.3	Enjeux pour le réseau de transport	210
14.4	Intégration de la mobilité électrique dans le réseau de distribution	211
14.4.1	Les points de charge lorsqu'ils s'insèrent dans une installation existante	212
14.4.2	Les points de charge qui nécessitent la création d'une nouvelle connexion au réseau public de distribution	215
14.4.3	Les points de charge pour les longues distances	217
14.4.4	Le développement de l'infrastructure de recharge est intégré au réseau électrique à l'échelle locale	218

14.4.5 L'impact financier de l'intégration de la mobilité électrique	220
14.5 Réseaux insulaires	221
14.6 Un écosystème innovant et en voie d'industrialisation	222
15 Les opportunités et les mises en œuvre	223
15.1 Introduction	223
15.2 La technologie VER est-elle mature ?	224
15.3 Accompagnement de l'intégration du renouvelable à large échelle	225
15.3.1 L'échelle d'un site, l'autoconsommation	225
15.3.2 À l'échelle locale	226
15.3.3 À l'échelle du système électrique	227
15.4 Fourniture de services au réseau	227
15.4.1 Une vue générale	227
15.4.2 Au niveau national – Réseau de transport	228
15.4.3 Au niveau local – Réseau de distribution	229
15.4.4 Au niveau local – Autres fonctionnalités	230
15.5 Mise en œuvre des solutions	231
15.5.1 Rappel des diverses solutions à mettre en œuvre	231
15.5.2 Quels rôles pour les acteurs ?	232
15.5.3 Les différents acteurs nécessaires à la réalisation d'un service réseau coordonné	232
15.5.4 Quelques aspects normatifs	234
15.6 Conclusion	236
 Partie 5	 237
État de l'art et perspectives des véhicules routiers fondés sur la pile à combustible	237
Olivier Béthoux	
16 Principe et éléments du système pile à combustible	241
16.1 La pile à combustible pour l'application traction	241
16.1.1 Cahier des charges	241
16.1.2. Principe de fonctionnement et implications	242
16.2 Constituants de la pile à combustible	248
16.2.1 La membrane	249
16.2.2 La couche active de l'électrode	250
16.2.3 La couche de diffusion de l'électrode	252
16.2.4 Plaques bipolaires	252

16.3 Système pile à combustible	254
16.3.1 La ligne d'air	255
16.3.2 La ligne de dihydrogène	256
16.3.3 La ligne électrique	260
16.3.4 La ligne thermique	265
16.3.5 Rendement système	266
17 Perspectives pour la pile à combustible et l'infrastructure hydrogène dans le transport routier	268
17.1 Quelles perspectives pour les véhicules hydrogène ?	268
17.1.1 Véhicules hydrogène : projets de démonstration en cours	268
17.1.2 Véhicules hydrogène : niveau de maturité des briques technologiques et tendances associées	272
17.2. Développement d'une infrastructure	277
17.2.1 Production de dihydrogène	278
17.2.2 Stockage de dihydrogène	284
17.2.3 Transport du dihydrogène	285
17.2.4 Distribution au plus près du besoin	287
17.2.5 Sécurité	287
Conclusion et perspectives : réflexion globale sur la place du dihydrogène dans la mobilité électrique	290
Annexes	293
Annexe 1 – Les machines électriques pour voitures électriques	294
Xavier Rain	
A1.1 Les lois fondamentales de l'électromagnétisme	294
A1.1.1 Notion de champ – champ électrique	294
A1.1.2 Conduction – Résistance électrique – Courant électrique – Loi d'Ohm	296
A1.1.3 Champ magnétique – Induction magnétique	298
A1.1.4 Matériaux ferromagnétiques – Notion de saturation	300
A1.1.5 Phénomènes d'induction – Loi de Lenz-Faraday	302
A1.2 Principe général de la création du couple et classification des différentes machines électriques	302
A1.2.1 Introduction	302
A1.2.2 Mécanismes de création du couple électromagnétique	303
A1.2.3 Classification des machines électriques	305

A1.3 Création du champ tournant statorique dans les machines à courant alternatif	306
A1.3.1 Introduction	306
A1.3.2 Principe de création du champ tournant statorique	307
A1.4 Les machines synchrones non excitées	315
A1.4.1 Introduction	315
A1.4.2 Principe de fonctionnement de la machine synchrone à réluctance variable	315
A1.4.3 Modélisation en régime permanent sinusoïdal de la machine synchrone à réluctance variable	318
A1.4.4 Stratégies de commande et tracé de caractéristiques des machines synchrones à réluctance variable	320
A1.5 Les machines synchrones excitées	322
A1.5.1 Introduction	322
A1.5.2 Principe de fonctionnement des machines synchrones excitées à pôles lisses	322
A1.5.3 Modélisation des machines synchrones excitées à pôles lisses en régime permanent sinusoïdal	324
A1.5.4 Stratégies de commande et tracé de caractéristiques des machines synchrones excitées à pôles lisses	327
A1.5.5 Les machines excitées pour la traction	330
A1.6 Les machines asynchrones	332
A1.6.1 Introduction	332
A1.6.2 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone : action d'un champ tournant sur un circuit électrique fermé	333
A1.6.3 Modélisation en régime permanent sinusoïdal	336
A1.6.4 Stratégies de commande de la machine asynchrone et tracés de caractéristiques	340
A1.7 Introduction à la commande des machines électriques dédiées à la traction	343
Annexe 2 – Introduction à l'électronique de puissance	347
Éric Labouré	
A2.1 Principes fondamentaux de la conversion électronique de l'énergie	348
A2.1.1 Moduler l'énergie	348
A2.1.2 La contrainte du rendement énergétique	349
A2.1.3 La modulation en électronique de puissance	350
A2.1.4 Principe général d'un convertisseur électronique de puissance	350

A2.1.5 Cas particulier de la conversion dc-dc	352
A2.1.6 Structure de base de l'électronique de puissance : la cellule de commutation	352
A2.1.7 Vers un fonctionnement bipolaire	359
A2.2 Les pertes dans les convertisseurs électroniques de puissance	367
A2.2.1 Les pertes par conduction	367
A2.2.2 Les pertes par commutation	368
A2.2.3 Conséquence sur la zone de fonctionnement courant/ fréquence accessible à un composant	369
A2.3 Les convertisseurs électronique de puissance dans le véhicule électrique	371
A2.3.1 Onduleur de traction et onduleur du compresseur de la pompe à chaleur	371
A2.3.2 Convertisseur dc-dc réversible pour l'adaptation du niveau de tension batterie	372
A2.3.3 Chargeur embarqué	372
A2.3.4 Convertisseur dc-dc du réseau haute tension vers le réseau basse tension du véhicule	374
Bibliographie	375
Index	391

Introduction

Le véhicule électrifié, une solution d'avenir pour l'automobile ?

De janvier à octobre 2020, les immatriculations de véhicules particuliers électriques et hybrides rechargeables représentent près de 10 % des immatriculations en France, soit près de quatre fois plus que sur la même période l'année passée. La tendance est la même en Europe, aux États-Unis et en Chine [21].

Quelques jours avant que la capitalisation boursière de Tesla ne dépasse celle de Volkswagen, le journal *Le Monde* titrait « Il ne faudrait pas que Tesla soit à Volkswagen ce qu'Apple a été à Nokia » [14], un article sur les transformations en cours dans l'automobile. Fin novembre 2020, Tesla est la première capitalisation boursière automobile avec 460 Mds \$, 2 fois plus que la seconde, Toyota, qui vend pourtant 20 fois plus de voitures.

L'électrification des véhicules particuliers, ainsi que les fonctions d'autonomie partielle ou complète, sont l'objet de la majorité des nombreuses innovations des constructeurs automobiles. Rarement l'histoire aura vu une filière industrielle effectuer une mutation aussi rapide, d'une prédominance mécanique et thermique à une importance majeure donnée au génie électrique et à l'informatique embarquée.

Accompagnant cette mutation des compétences nécessaires dans l'industrie automobile, cet ouvrage présente un état de l'art des technologies des véhicules électrifiés et des innovations à venir successivement dans les domaines des motorisations, des batteries, des chargeurs, des interactions avec le réseau électrique, et de l'hydrogène.

Écrit par des universitaires et des industriels français, il s'adresse autant à des techniciens et ingénieurs du génie électrique qu'à des ingénieurs mécaniciens souhaitant mieux comprendre ces technologies nouvelles dans l'automobile. Les 2 annexes en fin d'ouvrage sont une bonne introduction aux machines et à l'électronique de puissance, à lire par les néophytes avant d'aborder le reste du livre. Deux annexes numériques sont de plus disponibles en ligne pour approfondir (à télécharger sur dunod.com, sur la page de l'ouvrage). Les remarques des lecteurs, en vue d'une potentielle seconde édition notamment, sont les bienvenues à l'adresse livrevoitureelec@anthony-juton.fr.

Avant d'aborder la présentation technique des différents éléments de l'écosystème véhicule électrique dans les parties suivantes, ce premier chapitre ouvre le thème sur le contexte général de la mutation actuelle de l'industrie automobile en l'ancrant dans une perspective économique et écologique s'appuyant sur des études scientifiques solides. Les auteurs font le point sur les avantages et les inconvénients des différents types de

véhicules électrifiés (électriques ou hybrides, voitures ou bus...) et sur l'optimisation de leurs usages en ville ou en parcours extra-urbains dans le contexte des problèmes liés au réchauffement climatique et à la pollution locale des agglomérations.

L'aspect social (possession/location du véhicule, auto-partage, rejet urbain de l'automobile au profit des mobilités douces), bien qu'intéressant, n'est pas traité ici car hors du champ de compétences des auteurs.

I.1 Véhicules électrifiés : hybride, électrique, hydrogène...

On nomme véhicule électrifié tout véhicule dont une partie de la propulsion est assurée par un moteur électrique. Les normes sur les émissions de CO₂ obligent les constructeurs à réduire les émissions des véhicules routiers thermiques, ce qui, sur les véhicules plus lourds, passe au minimum par une hybridation légère.

Nous présentons ici les différentes structures de voitures électrifiées, avec les dénominations que nous utiliserons dans le reste de l'ouvrage.

La figure I.1 classe les types de voitures selon leur degré d'hybridation, en prenant à chaque fois l'exemple de voitures de taille moyenne.

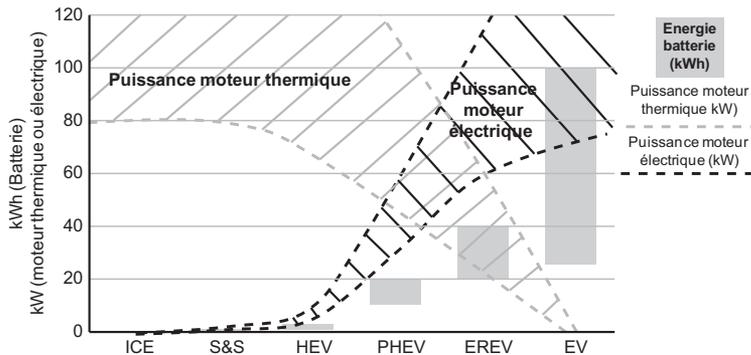


Figure I.1 – Puissance et énergie des véhicules électrifiés

Notons que l'hybridation a été pour certains constructeurs le chemin vers le véhicule tout électrique en permettant de réaliser la conception, l'industrialisation et le retour d'expérience sur une électrification de plus en plus importante, dans la décennie précédente où les batteries étaient insuffisamment performantes.

I.1.1 Micro-hybridation par alterno-démarrreur (S&S)

Répandu à partir des années 2000, par Citroën notamment sur ses C3 et C4, l'alterno-démarrreur est une machine réversible et suffisamment puissante pour démarrer le moteur à chaque redémarrage en ville. Les constructeurs annoncent une économie jusqu'à 8 % de carburant en ville. L'alterno-démarrreur est monté à la place de l'alternateur traditionnel et utilise la courroie pour démarrer le moteur thermique à l'arrêt ou recharger la batterie en fonctionnement. La batterie reste une batterie plomb 12V, renforcée pour

tenir les nombreux démarrages, et le moteur thermique n'est que peu modifié. La voiture ne peut pas rouler moteur thermique éteint, ce qui explique qu'on ne la classe pas dans les véhicules électrifiés.

On parle parfois de micro-hybridation ou plus fréquemment de système Stop & Start (S&S).

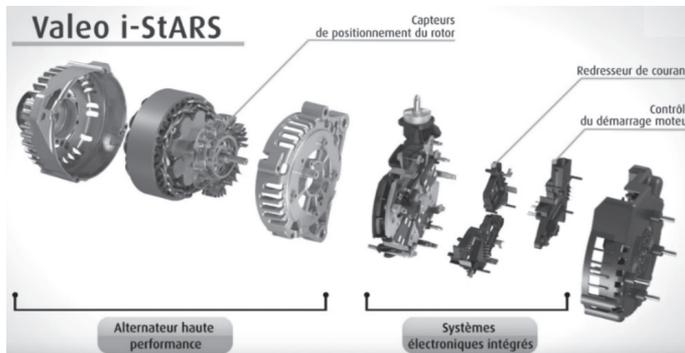


Figure 1.2 – Vue éclatée du démarreur réversible haute performance Valeo i-StARS [17]

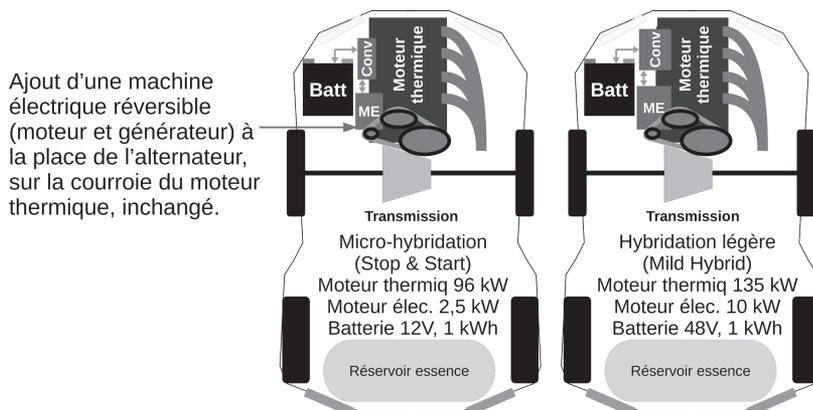


Figure 1.3 – Architectures micro-hybridation et hybridation légère, données du Citroën C4 SpaceTourer S&S et de la Mercedes Classe C EQ Boost. ME : machine électrique ; conv : convertisseur (onduleur réversible ici)

1.1.2 Hybridation légère (*mild hybrid*) (MHEV)

On parle d'hybridation légère lorsque le moteur électrique n'a pas la puissance nécessaire pour entraîner la voiture raisonnablement sur la route. Seuls des parcours à faible vitesse très courts (parking par exemple) sont autorisés en mode zéro-émission. Le passage à 48 V permet d'augmenter la densité de puissance de la chaîne batterie-onduleur-moteur.

Le moteur électrique, fixé simplement au moteur thermique et entraînant la courroie, fournit les suppléments de couple nécessaires aux accélérations, évite au moteur thermique les plages de fonctionnement à faible rendement et permet de récupérer de l'énergie lors des freinages. Les gains en consommation sont meilleurs qu'avec un

simple système Start & Stop pour un surcoût toujours raisonnable (moteur, batterie et électronique 48V, puissance de l'ordre de 10 kW). Suzuki annonce par exemple 20 % de gains en consommation. La consommation WLTP de la Mercedes C200 avec un moteur essence et un moteur électrique de 10 kW est de 6,6 L/100 km contre 7 L/100 km pour la C180 à moteur essence classique, soit 6 % d'économie.

Certains prévoient l'apparition sur toutes les voitures thermiques de ce système bon marché permettant des économies de carburant. Mercedes proposait déjà 8 modèles équipés de son système Mild Hybrid EQ Boost en 2020, notamment pour tenter de respecter les normes européennes d'émission de CO₂.

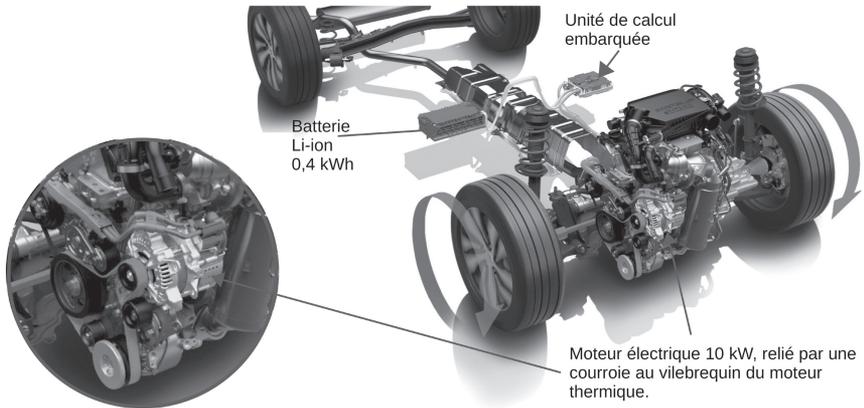


Figure I.4 – Intégration du moteur électrique sur le système *mild hybrid* SHVS 48V de Suzuki [15]

I.1.3 Hybridation complète (HEV)

Une voiture hybride, parfois nommée *full hybrid* pour la distinguer des voitures *mild hybrid* présentées ci-dessus, dispose à la fois d'un moteur thermique et d'un moteur électrique suffisants, seuls, pour entraîner la voiture, au moins en environnement urbain ou à vitesse stabilisée.

La Toyota Prius, modèle ayant répandu cette technologie depuis la fin des années 90 (les premiers modèles entraient dans la catégorie *mild hybrid*), a été suivie depuis par de nombreux modèles, soit pour proposer des véhicules plus économes en carburant, soit pour proposer des véhicules haut de gamme ou sportifs ajoutant la puissance et le couple du moteur électrique à la puissance du moteur thermique. Chez certains constructeurs, l'ajout de moteurs électriques sur l'essieu arrière d'un véhicule SUV à traction permet d'annoncer à moindre coût une architecture 4 roues motrices.

La batterie est rechargée par le moteur thermique et par freinage récupératif. Le moteur thermique n'est sollicité que dans une plage de fonctionnement à bon rendement. Renault annonce jusqu'à 40 % d'économie de carburant sur un cycle urbain WLTP pour sa Cléo e-Tech (67 kW essence, 36 kW électrique, 1,2 kWh de capacité pour la batterie 230 V) par rapport à son équivalent thermique non électrifié.

Plusieurs architectures (parallèle, série, dérivation de puissance) existent. On parle de dérivation parallèle lorsque le nœud de puissance est mécanique et de dérivation série lorsque le nœud de puissance est électrique.

Notons que si la majorité des constructeurs proposent des voitures *full hybrid* avec des batteries et moteurs 230 à 400V, Continental propose un moteur 48V de 30 kW pour des véhicules *full hybrid* [18].

Hybridation parallèle

Dans un véhicule à hybridation parallèle, le moteur électrique fournit du couple qui s'ajoute au couple du moteur thermique (le plus souvent à essence). Le moteur électrique peut être placé entre le moteur thermique et la transmission (hybridation pré-transmission), entre la transmission et les roues (hybridation post-transmission) ou alors sur les roues arrière pour une traction (hybridation « par la route » ou « *through the road* »), ce qui permet d'afficher un mode 4 roues motrices sans passer par un volumineux et coûteux arbre de transmission traversant la voiture.

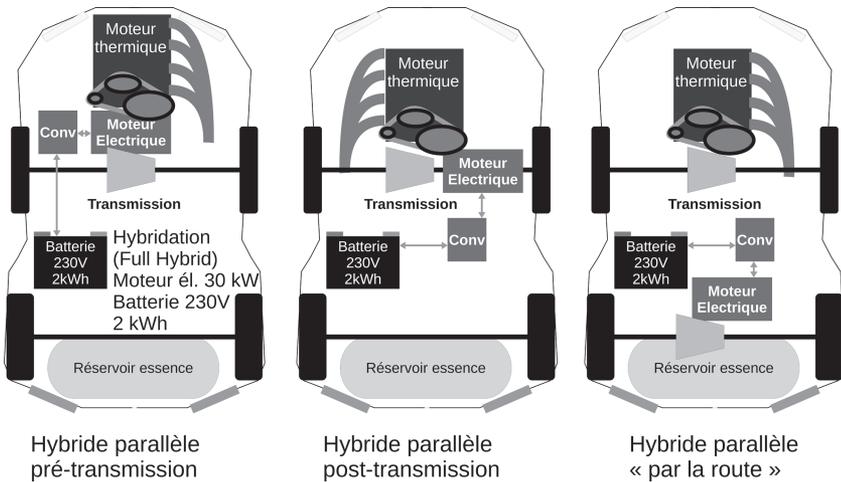


Figure I.5 – Architectures de type hybride parallèle

Les DS5 Hybrid 4 et Peugeot 508 Hybrid 4 étaient des hybrides parallèles par la route, avec un moteur électrique de 27 kW monté sur l'essieu arrière. Les nouvelles Peugeot 3008 Hybrid 4 allient un moteur électrique monté dans la transmission avant et un moteur électrique sur l'essieu arrière.

Sur une voiture hybride parallèle, la puissance maximale est le résultat de l'addition des puissances des moteurs thermique et électrique, ce qui pour des véhicules économes permet de dimensionner un moteur thermique de cylindrée plus faible que sur une voiture thermique de puissance équivalente.

Hybride série

Sur une hybride série, le moteur thermique ne sert qu'à entraîner la génératrice chargeant la batterie. Celle-ci, en phase de roulage, alimente le moteur électrique et recharge la batterie. Le moteur thermique, complètement indépendant de l'arbre de transmission, fonctionne dans une zone proche de son rendement optimal, sans boîte de vitesse. Cela suppose d'avoir un moteur électrique ayant la puissance maximale de la voiture, et un moteur thermique et un alternateur dimensionnés pour la puissance nominale du véhicule (puissance nécessaire pour aborder une longue rampe sur autoroute). C'est pourquoi on trouve peu de voitures particulières hybride série. Nissan propose

au Japon la Note et le Serena e-power en hybride série (un moteur thermique et une génératrice de 58 kW (78 ch), et un moteur électrique de traction de 80 kW pour une consommation annoncée de 2,94 L/100 km).

Cette technologie ayant pour intérêt de faire fonctionner le moteur thermique à son rendement maximum quel que soit le type de trajet, c'est sur des bus urbains que cet avantage est exploité au mieux. Le bus Serie E de BAE Systems, utilise notamment ce système d'hybridation série.

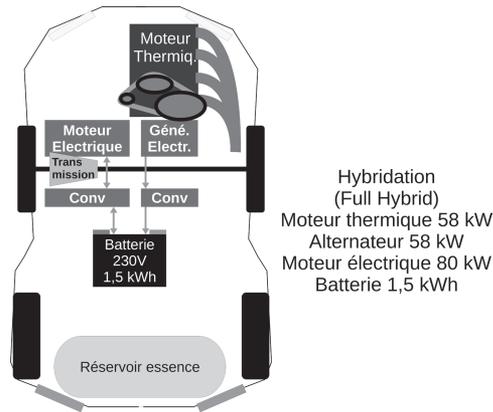


Figure I.6 – Architecture hybride série, données de la Nissan Note e-Power

Hybride à dérivation de puissance

L'hybridation parallèle permet d'ajouter les puissances des moteurs thermique et électrique et l'hybridation série permet de faire fonctionner le moteur thermique à son rendement maximum, même à l'arrêt du véhicule. L'intégration de moteurs électriques dans des boîtes de vitesses complexes permet de coupler les 2 avantages pour des technologies nommées dérivation de puissance ou série/parallèles. Le moteur électrique peut être d'une puissance inférieure à la puissance nominale du véhicule et l'alternateur d'une puissance nettement inférieure.

C'est notamment la solution retenue pour la Renault Clio ou différentes Toyota hybrides. La figure I.7 est une représentation parmi les nombreuses variantes de l'hybride à dérivation de puissance modernes.

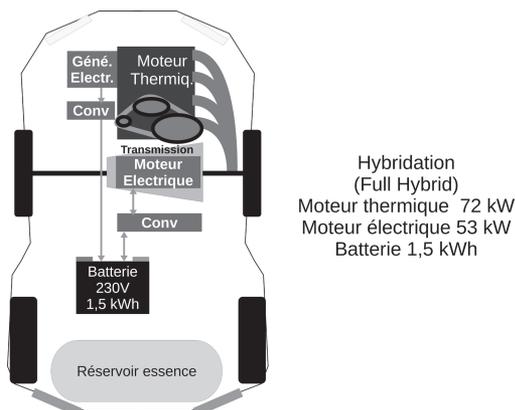


Figure I.7 – Architecture hybride série/parallèle, données de la Toyota Prius 4

I.1.4 Voiture hybride rechargeable (PHEV)

On retrouve sur les voitures hybrides rechargeables (PHEV : *Plug-in Hybrid Electric Vehicle*) les mêmes architectures que pour les voitures hybrides, mais avec une batterie de taille plus conséquente, rechargeable sur le secteur, permettant une autonomie en tout électrique suffisante pour les trajets urbains ou péri-urbains du quotidien (entre 40 et 60 km pour la plupart des modèles récents).

Le Renault Captur e-Tech, avec un moteur hybride proche de celui de la Clio et une batterie de 9,8 kWh, annonce 50 km d'autonomie en cycle mixte WLTP.

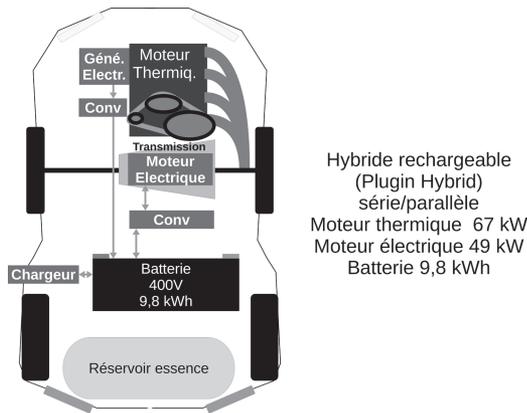


Figure 1.8 – Architecture hybride rechargeable, données du Renault Captur

Une hybride rechargeable « chargée » bénéficiant de la propulsion électrique sur une part importante de son cycle, les consommations WLTP annoncées sont très faibles (2,2 L/100 km pour un lourd DS7). Evidemment, si le propriétaire ne rechargeait pas sa batterie, la consommation serait celle du véhicule thermique équivalent et même la dépasserait à cause du surpoids dû à la batterie. La consommation est donc très dépendante de l'utilisation de l'utilisateur, qui se doit de recharger régulièrement son véhicule pour bénéficier de la faible consommation.

I.1.5 Voiture électrique à batterie et prolongateur d'autonomie (EREV)

Similaire à l'hybridation série, la voiture électrique à batterie et prolongateur d'autonomie (EREV : *Extended Range Electric Vehicle*) ne s'en distingue que par la petite taille du moteur thermique.

Le développement important des hybrides rechargeables d'une part, et les forts progrès des batteries d'autre part, ont fait disparaître cette option peu courante (Opel Ampera, BMW i3). Par ailleurs, l'ajout d'un moteur thermique, son bruit et ses vibrations altéreraient les prestations attendues par le client d'un véhicule électrique.

Introduction : Le véhicule électrifié, une solution d'avenir pour l'automobile ?



Renault Captur e-tech Hybrid rechargeable et sa batterie 400V 9,8 kWh



Renault Clio e-tech Hybrid et sa batterie 230V 1,2 kWh

Le moteur électrique est implanté après la boîte de vitesse et le démarreur/générateur est intégré sur la courroie.

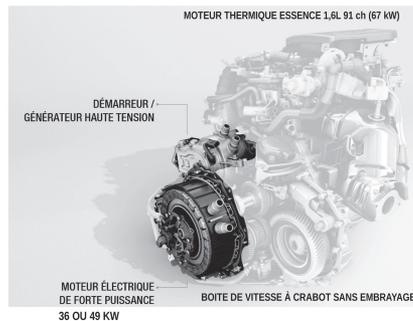
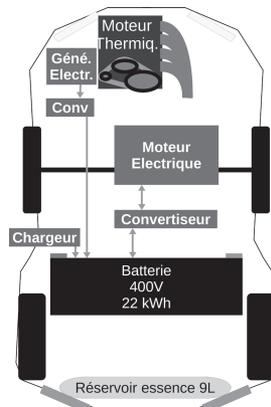


Figure I.9 – Un exemple d'hybridation série/parallèle post-transmission rechargeable ou non (source : Renault)

Renault proposait en 2020 des Kangoo et Master à prolongateur d'autonomie, avec une pile à combustible.



Véhicule électrique avec prolongateur d'autonomie (Range Extender)
 Moteur thermique 25 kW
 Moteur électrique 125 kW
 Batterie 22 kWh

Figure I.10 – Architecture électrique avec prolongateur d'autonomie. Données de la BMW i3 REX

I.1.6 Voiture électrique à batterie (BEV)

La voiture électrique, parfois également nommée voiture à batterie (BEV : *Battery Electrical Vehicle*), dispose d'une architecture plus simple : une batterie rechargeable sur secteur, un convertisseur et un moteur électrique.

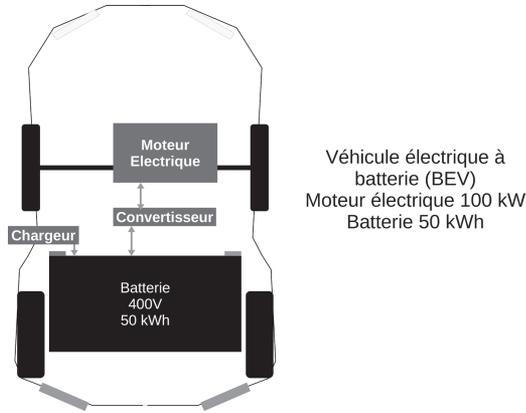


Figure I.11 – Véhicule électrique à batterie, données de la Peugeot e-208

Cette simplification de l'architecture entraîne aussi une simplification de la maintenance par rapport à une voiture thermique ou hybride. Le prix et les performances des batteries, principal poste de coût et de surpoids du véhicule électrique, continueront d'être optimisés, tout comme l'environnement autour (recharge, interactions réseaux). Si l'on ajoute les contraintes réglementaires très strictes (interdiction annoncée de la vente de véhicules thermiques et hybrides en 2035 au Royaume-Uni [22]), cette architecture semble donc promise à un avenir prometteur, ce que confirment les performances en bourse de Tesla ou l'étude Deloitte de juillet 2020 annonçant 25 % de voitures électriques à batterie dans les ventes de véhicules particuliers en 2030 [21].

Ce sera l'objet principal de cet ouvrage.

I.1.7 Voiture électrique à pile à combustible (FCEV)

La voiture électrique à pile à combustible (*Fuel Cell Electrical Vehicle*), parfois nommée véhicule à hydrogène, est un véhicule électrique doté d'une pile à combustible produisant de l'électricité, associée à une batterie de faible capacité. Début 2021, la Toyota Mirai et la Hyundai Nexo sont les deux seuls véhicules à hydrogène présents sur le marché. La technologie est encore très coûteuse et en développement, mais prometteuse pour les véhicules ayant besoin d'autonomie importante (poids lourds notamment). Ce sera le sujet de la Partie 5 de l'ouvrage.

On retrouve l'architecture du véhicule électrique à prolongateur d'autonomie, mais avec une pile à combustible à la place de l'association moteur thermique/génératrice. C'est d'ailleurs en tant que prolongateur d'autonomie que des piles à combustible à hydrogène sont proposées sur des Renault Kangoo et Master électriques. Sur la voiture FCEV cependant, la pile à combustible est la principale source d'énergie électrique.

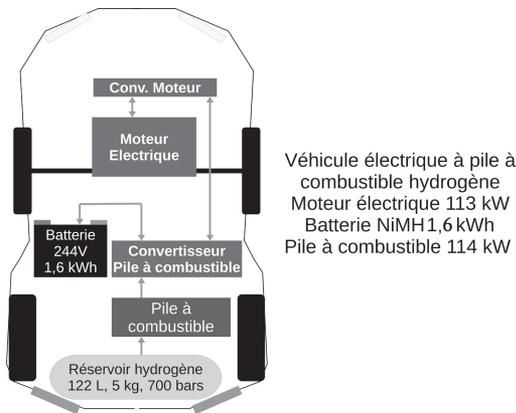


Figure I.12 – Véhicule électrique à pile à combustible, données de la Toyota Mirai

1.2 Le marché du véhicule électrique en 2020

Sur différents marchés mondiaux (France, Europe, Chine, États-Unis), plusieurs facteurs influencent le marché des véhicules électriques :

- ▶ La réglementation dans le centre des grandes agglomérations. Parmi de nombreux exemples, notons « Copenhague zéro émission en 2030 » ou Paris « interdite au diesel en 2024 » et dès aujourd'hui autorisée sans condition d'immatriculation uniquement aux véhicules zéro émission les jours de forte pollution.
- ▶ Les aides publiques à l'achat de véhicules, mais aussi à l'installation de bornes de recharge, et à l'inverse, les pénalités pour les véhicules fortement émetteurs de CO_2 .
- ▶ La possibilité de disposer d'une prise pour les recharges quotidiennes (installation d'un chargeur dans les habitats collectifs ou dans les entreprises, présence de chargeurs urbains pour les personnes ne disposant pas de parking...).
- ▶ L'évolution de l'image associée à la voiture, devenue pour certains un objet de service de mobilité. Les critères d'achat historiques (puissance, vitesse, taille) sont actuellement remis en cause.
- ▶ L'acceptation d'une évolution de l'usage : temps de charge augmenté pour les longs trajets exceptionnels et adaptation du moment de la charge quotidienne à la disponibilité du réseau.
- ▶ Les cibles de réduction des émissions de CO_2 appliquées aux constructeurs automobiles : moins de $95 \text{ g CO}_2/\text{km}$ en moyenne sur les véhicules vendus en Europe en 2020 puis 15 % et 37,5 % de réduction supplémentaires à l'horizon 2025 et 2030.
- ▶ Interdiction prévue de la vente de véhicules à moteur thermique en 2040 en France, annonce par le Royaume-Uni de l'interdiction de la vente de véhicules thermiques et hybrides en 2030 [22]. D'autres pays (Chine, États-Unis) sont sur des trajectoires similaires.
- ▶ Les évolutions techniques (capacité et coût des batteries notamment, durée de la charge) et logistiques (densité de chargeurs normaux et rapides sur le territoire).
- ▶ L'offre proposée (véhicules attractifs, adaptés aux usages et abordables).