

**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),

© Dunod, 2021

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-083036-7

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 Mazaleyrat, Cédric Nouillant, Javier Ojeda, Masato Origuchi, Olivier Ploix et Bernard Sahut.

Liste des abréviations

AC	: Courant alternatif (<i>Alternative Current</i>)
ACV	: Analyse du Cycle de Vie
AME	: Association Membrane Électrode
BEV	: Voiture électrique à batterie (<i>Battery Electric Vehicle</i>)
BMS	: Système de contrôle de la batterie (<i>Battery Management System</i>)
BT	: Basse Tension
CEM	: Compatibilité Électro-Magnétique
DC	: Courant continu (<i>Direct Current</i>)
DWPT	: Système de charge inductive dynamique (<i>Dynamic Wireless Power Transfert</i>)
EnR	: Énergies Renouvelables
EREV	: Voiture électrique à prolongateur d'autonomie (<i>Extended Range Electric Vehicle</i>)
FCEV	: Voiture électrique à pile à combustible (<i>Fuel Cell Electric Vehicle</i>)
GaN	: Nitrure de Gallium (<i>Gallium Nitride</i>)
GRD	: Gestionnaire de Réseau de Distribution
GRT	: Gestionnaire de Réseau de Transport
HEMT	: Transistor à haute mobilité électronique (<i>High Electron Mobility Transistor</i>)
HEV	: Voiture hybride (<i>Hybrid Electric Vehicle</i>)
ICE	: Voiture à moteur thermique essence ou diesel (<i>Internal Combustion Engine</i>)
IGBT	: Transistor bipolaire à grille isolée (<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>)
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 (<i>Metal Oxyde Semiconductor Field Effect Transistor</i>)
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 alerno-démarrreur (*Stop and Start*)

SEI : Couche de protection de l'électrode négative (*Solid Electrolyte Interface*)

Si : Silicium (*Silicon*)

SiC : Carbure 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 (*Vehicule 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 alterno-démarrreur (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 Vieillissement 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 Vieillissement/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