Sous la direction
d'Anthony Juton
Préface de Patrick Bastard, directeur des technologies Renault

INTRODUCTION AUX VÉHICULES ÉLECTRIQUES

PRINCIPES, TECHNOLOGIES, PERSPECTIVES

DUNOD

© Dunod, 2026
11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-090286-6

Préface

Réduire drastiquement les émissions de gaz à effet de serre n'est plus une option : c'est une nécessité à l'échelle de la planète. Les évènements climatiques extrêmes qui se succèdent désormais sont malheureusement là pour nous le rappeler : canicules, déficit hydrique, feux de forêt, tornades, inondations, etc.

Certes, le réchauffement climatique n'a pas créé ces évènements extrêmes mais il en augmente la fréquence et la sévérité.

Au-delà des scénarios prévisionnels et des alertes émises régulièrement et depuis longtemps par la communauté scientifique, la succession tangible de ces catastrophes climatiques un peu partout dans le monde devrait désormais nous conduire à actionner sans tergiverser tous les leviers permettant de réduire nos émissions de gaz à effet de serre.

Ces leviers sont de nature différente : certains sont technologiques, d'autres liés à nos comportements individuels, d'autres encore politiques. Ne les opposons pas : tous ces leviers sont complémentaires et tous seront nécessaires.

Au chapitre des technologies et des usages, l'électrification est un levier d'une redoutable efficacité pour réduire nos émissions de CO_2. Il faut pour cela conjuguer deux étapes : électrifier les usages et décarboner la production d'électricité. C'est ainsi que nous pourrons réduire massivement notre dépendance aux énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz) qui, ne l'oublions pas, sont à l'origine de la majeure partie des émissions de CO_2 liées à l'activité humaine.

Électrifier les voitures relève exactement de cette stratégie, engagée par l'industrie automobile depuis plusieurs décennies. C'est ainsi qu'une analyse complète sur tout le cycle de vie (fabrication, usage, fin de vie) montre qu'une voiture électrique de taille moyenne fabriquée en Europe réduit considérablement ses émissions de CO_2 par rapport à une voiture équivalente à essence lorsqu'elle est utilisée en France où l'électricité est très décarbonée (jusqu'à 75 % de réduction voire plus selon les hypothèses sur le kilométrage total, la taille de la batterie, etc.). Si on prend en compte le mix européen de production d'électricité, cette réduction de l'empreinte carbone est moins spectaculaire mais elle reste importante. Et encore cette réduction va-t-elle s'amplifier dans les années à venir car la production d'électricité est de plus en plus vertueuse, année après année, et cela dans tous les pays d'Europe.

Électrifier les voitures se heurte néanmoins à certaines difficultés qu'il ne faut pas occulter, comme par exemple l'extraction et le raffinage des matières critiques, y compris sous l'angle des enjeux géopolitiques, des impacts environnementaux, etc. Là aussi, l'innovation technologique (conception optimisée des batteries, des moteurs électriques, de l'électronique de puissance, process de fabrication, recyclage…),

associée à une réelle stratégie politique et industrielle à l'échelle européenne, est incontournable pour accélérer cette transition.

Cela dit, soyons lucides : la technologie ne saura pas à elle seule apporter des solutions efficaces et dans les bons délais à tous les problèmes environnementaux ; nous ne ferons pas l'économie d'une réflexion en profondeur sur nos modes de vie qui, dans le domaine des transports, doit nous conduire aussi à repenser la mobilité dans son ensemble. Mais pour autant, et c'est tout à fait complémentaire, nous devons rester ambitieux et volontaristes pour accélérer l'émergence des innovations technologiques qui amélioreront encore l'efficacité environnementale et économique de la voiture électrique.

Et comme il ne saurait y avoir d'ambition en termes d'innovation sans un solide corpus de connaissances, je souhaite à cet excellent ouvrage le succès qu'il mérite, à la fois dans le monde académique bien sûr, mais aussi dans celui de l'industrie automobile qui, sans relâche, a déjà formé en France et en Europe des dizaines de milliers d'ingénieurs et techniciens au cours des vingt dernières années pour engager ce qui restera comme l'une des révolutions majeures de son histoire : concevoir, fabriquer, vendre, réparer et recycler des voitures électriques dont le succès témoigne désormais d'une adoption de plus en plus enthousiaste.

C'est un fait : la voiture électrique s'est installée dans le paysage automobile. Véhicule de niche pendant plus d'un siècle, elle a conquis son marché au cours des quinze dernières années pour être désormais une alternative crédible pour la plupart des automobilistes à l'heure du renouvellement de leur voiture ou de la première acquisition, que ce soit en achat ou en location.

Sur le chemin de cette transition, il est important que le monde académique (enseignement, recherche) travaille main dans la main avec le monde de l'industrie automobile, en France et en Europe, afin de développer les technologies d'électrification qui auront du sens, à la fois pour les automobilistes, mais aussi au regard des enjeux environnementaux et sociétaux.

Puisse cet excellent ouvrage, rédigé par une équipe de chercheurs universitaires et d'ingénieurs industriels, y contribuer !

Patrick Bastard
Expert Fellow, directeur des technologies et de la réglementation
Renault Group

Avant-propos

En juillet 2026, 35 % des véhicules particuliers vendus en France étaient 100 % électriques. La transition est en cours, rapide et nécessaire. Les batteries, les machines électriques et l'électronique de puissance s'invitent désormais dans la culture automobile, aux côtés de la mécanique et de la thermique.

Le journaliste spécialisé ou le vendeur, qui hier encore dissertaient sur l'intérêt de l'injection directe pour réduire la consommation du moteur essence, s'intéressent aujourd'hui à celui du carbure de silicium pour accroître l'autonomie d'un véhicule électrique. L'ingénieur et le technicien chargés de la conception ou de la maintenance des circuits de refroidissement doivent désormais prendre en compte les différentes sources de pertes des machines électriques et des semi-conducteurs afin de mieux les évacuer. Les responsables des achats ajoutent à leur liste de courses les cellules lithium-ion achetées auprès d'acteurs nouveaux pour l'instant très majoritairement asiatiques et dominants sur ce marché.

Se former aux véhicules électriques est donc devenu incontournable pour participer à l'aventure industrielle de l'automobile. Universitaires, chercheurs de l'IFPEN et ingénieurs de Renault, Stellantis et Valeo avons mis en commun nos connaissances et expériences complémentaires pour réunir, dans cet ouvrage, les concepts clés, les technologies actuelles et les perspectives d'évolution des véhicules électriques. Nous avons souhaité proposer une synthèse pédagogique et accessible sans autre prérequis qu'une culture scientifique de niveau lycée.

Pourquoi un livre à l'heure des réseaux sociaux, des vidéos courtes et de l'intelligence artificielle ? Nous participons nous-mêmes à d'autres formats pour la diffusion des connaissances, à l'université comme dans l'industrie. Il nous a pourtant semblé que le livre restait un support particulièrement adapté à un contenu délimité, structuré, cohérent et exigeant. Sa déconnexion des sollicitations permanentes du numérique favorise la concentration et permet une compréhension plus approfondie. Un soin particulier a été apporté aux schémas pour faciliter la compréhension des principes ainsi qu'aux illustrations industrielles, pour présenter les technologies et leurs applications. Des exemples chiffrés viennent compléter ces explications. Nous avons également cherché à élargir notre propos aux quadricycles à moteurs et aux camions, afin de donner une vision aussi large que possible de l'électrification des transports routiers.

La partie 1 commence par quantifier le besoin de transport terrestre. Elle compare ensuite les réponses apportées par les chaînes de traction thermiques, hybrides et électriques avant d'aborder les enjeux environnementaux, géopolitiques et économiques associés à leur développement.

Une fois le besoin défini et les principales contraintes posées, la partie 2 est consacrée à l'étude du groupe motopropulseur. Elle présente les principes des trois grandes familles de moteurs utilisées dans les véhicules électriques ainsi que ceux de leur onduleur et de leur commande. Elle décrit ensuite les technologies retenues aujourd'hui et se termine par un chapitre consacré aux évolutions possibles des machines et des onduleurs.

Organe clé du véhicule électrique, la batterie est l'objet de la partie 3. Après une explication du principe de fonctionnement d'une cellule, celle-ci détaille les différentes chimies, leurs performances et leurs limites. Elle présente ensuite les technologies mises en œuvre au sein du pack batterie et se conclut par un aperçu des perspectives, encore très prometteuses dans ce domaine.

Enfin, la partie 4 s'intéresse aux interactions entre le véhicule et le réseau électrique. Elle commence par montrer comment le véhicule peut s'intégrer au réseau de manière acceptable, voire bénéfique, avant de présenter les différents systèmes de recharge : chargeurs embarqués, recharge haute puissance et recharge sans fil. Pour chacun, nous revenons sur les principes de fonctionnement, les technologies retenues et leurs perspectives d'évolution.

Nous espérons que cet ouvrage permettra à chacun, qu'il soit étudiant, ingénieur, technicien, enseignant, professionnel de l'automobile ou simplement curieux, de mieux comprendre les technologies qui transforment aujourd'hui le véhicule et, plus largement, notre façon de nous déplacer.

Bonne lecture.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier, pour le partage de leur expérience, Romain Beaume et Nadim Sakr (Watt and Well), Alain Costa (Alpitronic), Jérôme Lachaize (Schaeffler), Baptiste Sohier et Renaud Laperrière (Renault Trucks) et Tanguy Phulpin (GeePs).

En plus de Renault, Stellantis et l'IFPEN, les auteurs remercient pour les autorisations d'utiliser leurs illustrations Alpitronic, Audi, BorgWarner, Mercedes, Phoenix Contact, Protean, Renault Trucks, Siemens, ZF, en soulignant spécifiquement la richesse technique des illustrations que partage Audi.

Enfin, les auteurs remercient le média Automobile Propre pour la qualité de sa retransmission de l'actualité automobile et Auto-Innovations (en particulier Yvonnick Gazeau) pour ses synthèses techniques très bien documentées.

Table des matières

Préface III

Avant-propos V

Remerciements VII

Partie 1 ● Le véhicule électrique et les problématiques de transport 1

1 ● Se déplacer, quel besoin en puissance et en énergie ? 3

1.1 Bilan des forces s'exerçant sur le véhicule 3

1.2 Énergie et puissance 8

1.3 Dimensionnement en puissance et énergie d'un véhicule 12

1.4 Synthèse des besoins en puissance et en énergie 14

2 ● Différentes solutions de motorisation 16

2.1 Moteur électrique / moteur thermique 16

2.2 Les différents types d'hybridation 24

2.3 La chaîne de puissance de la voiture électrique 27

3 ● Impacts écologiques, géopolitiques et économiques 28

3.1 Impact environnemental 28

3.2 Criticité et approvisionnement 32

3.3 Impact économique 36

3.4 Conclusion 36

Partie 2 ● Groupe motopropulseur 39

4 ● Historique du moteur de traction pour véhicules électriques 41

4.1 Les fondements de l'électromagnétisme (1820–1850) 41

4.2 Industrialisation et progrès (1850–1880) 42

4.3 La traction ferroviaire à moteur à courant continu (1870–1985) 42
4.4 La traction automobile à moteur à courant continu (1890–1995) 43
4.5 La traction automobile à moteur à courant alternatif 46
4.6 Conclusion 47

5 ● Du champ magnétique au couple électromagnétique 48
5.1 Le champ magnétique 48
5.2 Création d'un champ magnétique tournant 51
5.3 Force d'attraction entre deux champs magnétiques tournants 52
5.4 Création d'un champ tournant à partir de bobines fixes alimentées par des courants alternatifs 52
5.5 Création du couple électromagnétique dans les machines électriques alternatives 56
5.6 Paires de pôles 58
5.7 Conclusion 60

6 ● Technologies des stators de moteurs de véhicules électriques 61
6.1 Rôles du stator et du rotor 61
6.2 Éléments constitutifs du stator 63
6.3 Conclusion 71

7 ● Technologies des moteurs synchrones à aimants permanents 72
7.1 Parts de marché des technologies de moteurs 72
7.2 Les aimants en terres rares 73
7.3 Étude de cas : le moteur à aimants permanents de la Tesla Model 3 78
7.4 Conclusion 85

8 ● Technologies des moteurs synchrones à rotor bobiné 86
8.1 Principe du moteur synchrone à rotor bobiné 87
8.2 Caractéristiques du moteur synchrone à rotor bobiné 89
8.3 Avantages et inconvénients du moteur synchrone à rotor bobiné 91
8.4 Conclusion 92

9 ● Technologies et principe des moteurs asynchrones 93
9.1 Intérêts du moteur asynchrone pour l'automobile 93
9.2 Constitution du rotor d'un moteur asynchrone 94

9.3 Principe de fonctionnement du moteur asynchrone 96
9.4 Conclusion 100

10 ● Refroidissement des moteurs pour véhicules électriques 101

10.1 Types de pertes dans un moteur électrique 101
10.2 Limites thermiques et précautions 104
10.3 Localisation des pertes en fonction du point de fonctionnement du moteur 105
10.4 Conséquences des pertes sur le fonctionnement 105
10.5 Comparaison des différents types de refroidissement 106
10.6 Notions de puissance continue et de puissance maximale 109
10.7 Conclusion 110

11 ● Transmission mécanique des voitures électriques 111

11.1 Besoins en couple et puissance à la roue 111
11.2 Entraînement direct 113
11.3 Entraînement démultiplié avec un réducteur mono-rapport 114
11.4 Entraînement démultiplié avec boîte de vitesses 117
11.5 Conclusion 119

12 ● Synthèse et choix des moteurs pour véhicules électriques 120

12.1 Critères de comparaison 120
12.2 Conclusion 124

13 ● Principe de l'onduleur 125

13.1 Fonction de l'onduleur 125
13.2 Principe de fonctionnement de l'onduleur 127
13.3 Caractéristiques de l'onduleur de traction 130
13.4 Conclusion 133

14 ● Interrupteurs réels et pertes dans les onduleurs 134

14.1 Interrupteurs de l'onduleur 134
14.2 Technologie des interrupteurs 138
14.3 Pertes dans un module de puissance d'onduleur 144
14.4 Conclusion 148

15 ● Commande des machines synchrones 149

15.1 Introduction 149

15.2 Commande des machines synchrones à aimants permanents 149

15.3 Commande des machines synchrones à rotor bobiné 155

15.4 Conclusion 156

16 ● Perspectives technologiques pour les groupes motopropulseurs de véhicules électriques 157

16.1 Critères d'amélioration pour le moteur électrique de demain 157

16.2 Moteurs synchrones : une trajectoire technologique privilégiée 159

16.3 Innovations et évolutions attendues pour l'optimisation des machines synchrones 161

16.4 Nouvelles typologies ou architectures pour la mobilité 163

16.5 Innovations et évolutions sur les onduleurs 165

16.6 Conclusion 167

Partie 3 ● État de l'art et perspectives des batteries de véhicules électriques 169

17 ● Batteries et véhicules routiers 171

17.1 Stockage de l'énergie 171

17.2 Principe général des batteries 173

17.3 Énergie et puissance 177

17.4 Coût 178

17.5 Fabricants de batteries 179

17.6 Conclusion 180

18 ● Principe et caractéristiques d'une cellule Li-ion 181

18.1 Principe de fonctionnement d'une cellule Li-ion 181

18.2 Choix des électrodes 183

18.3 Électrolyte et séparateur 185

18.4 Densités massique et volumique des cellules Li-ion 187

18.5 Conclusion 188

19 ● Cellules réelles 189

19.1 Caractéristiques d'une cellule 189
19.2 Modèle équivalent 193
19.3 Conditions anormales et sécurité 195
19.4 Fabrication d'une cellule Li-ion 196
19.5 Formats de cellule 200
19.6 Conclusion 202

20 ● De la cellule à la batterie 203

20.1 Associations des cellules 203
20.2 Composition du pack batterie 206
20.3 Gestion électronique de la batterie 209
20.4 Recharge 212
20.5 Gestion thermique 214
20.6 Sécurité 216
20.7 Conclusion 218

21 ● Innovations et perspectives 219

21.1 Avenir des batteries Li-ion à électrolyte liquide 219
21.2 Batterie Sodium-ion (Na-ion) 220
21.3 Maturité des technologies de rupture 221
21.4 Évolution des packs batterie 222
21.5 Conclusion 225

Partie 4 ● Interactions réseau et recharge 227

22 ● Infrastructures et bornes de recharge 229

22.1 Enjeux et problématiques de la recharge 229
22.2 Infrastructures de recharge 232
22.3 Conclusion 239

23 ● Le véhicule électrique, acteur de flexibilité 240

23.1 Le besoin de flexibilité du réseau électrique 240
23.2 Le véhicule électrique dans l'écosystème du réseau électrique 248

23.3 Mise en œuvre des échanges *Vehicle-to-Grid* V2G 250
23.4 Conclusion 255

24 ● Architecture électrique type d'un chargeur 256
24.1 Architecture électrique type d'un chargeur 256
24.2 Conclusion 268

25 ● Chargeurs embarqués 269
25.1 Enjeux et problématiques 269
25.2 Performances et limitations des chargeurs embarqués 272
25.3 Topologies des chargeurs embarqués 280
25.4 Communication du chargeur avec la borne 286
25.5 Contraintes normatives et cybersécurité 287
25.6 Conclusion 288

26 ● Chargeurs DC haute puissance 289
26.1 Problématique des chargeurs DC haute puissance 290
26.2 Architectures de conversion 291
26.3 Contraintes thermiques et rendement 295
26.4 Protocoles numériques de contrôle du chargeur rapide 298
26.5 Quelques exemples de produits industrialisés 300
26.6 Conclusion 304

27 ● Recharge sans contact 305
27.1 Principe de la recharge sans contact 305
27.2 Problématiques principales et solutions 306
27.3 Quelques réalisations industrielles et projets 309
27.4 Conclusion 311

28 ● Perspectives et innovations dans le domaine de la recharge 312
28.1 Chargeurs embarqués simple étage 312
28.2 Batterie électronique ou batterie commutée 313
28.3 Dispositifs de recharge alternatifs 318
28.4 Conclusion 318

Index 319

Partie 1

Le véhicule électrique et les problématiques de transport

Chapitre 1 ■ Se déplacer, quel besoin en puissance et en énergie ? 3

Chapitre 2 ■ Différentes solutions de motorisation 16

Chapitre 3 ■ Impacts écologiques, géopolitiques et économiques 28