

possible le contrôle des moteurs avec une vitesse et une précision inédites.

Comme dans le cas des moteurs à explosion, il existe des variantes très différentes de moteurs électriques. Elles sont toutes fondées sur des mises en œuvre particulières des forces magnétiques (voir l'encadré page suivante), mais on distingue deux grands principes: d'une part les moteurs à courant continu et champ magnétique fixe, d'autre part les moteurs triphasés à champ magnétique tournant.

MOTEURS À COURANT CONTINU

Dans les moteurs à courant continu, des balais injectent dans un collecteur rotatif un courant qui alimente des bobinages faisant partie d'une pièce tournante, le rotor. Par construction, la polarité des champs magnétiques induits par le courant dans ces bobines s'inverse une fois par tour, de telle façon qu'elle soit toujours opposée à celle du champ des bobines du stator, l'élément fixe entourant le rotor. Un couple en résulte, qui fait tourner le rotor.

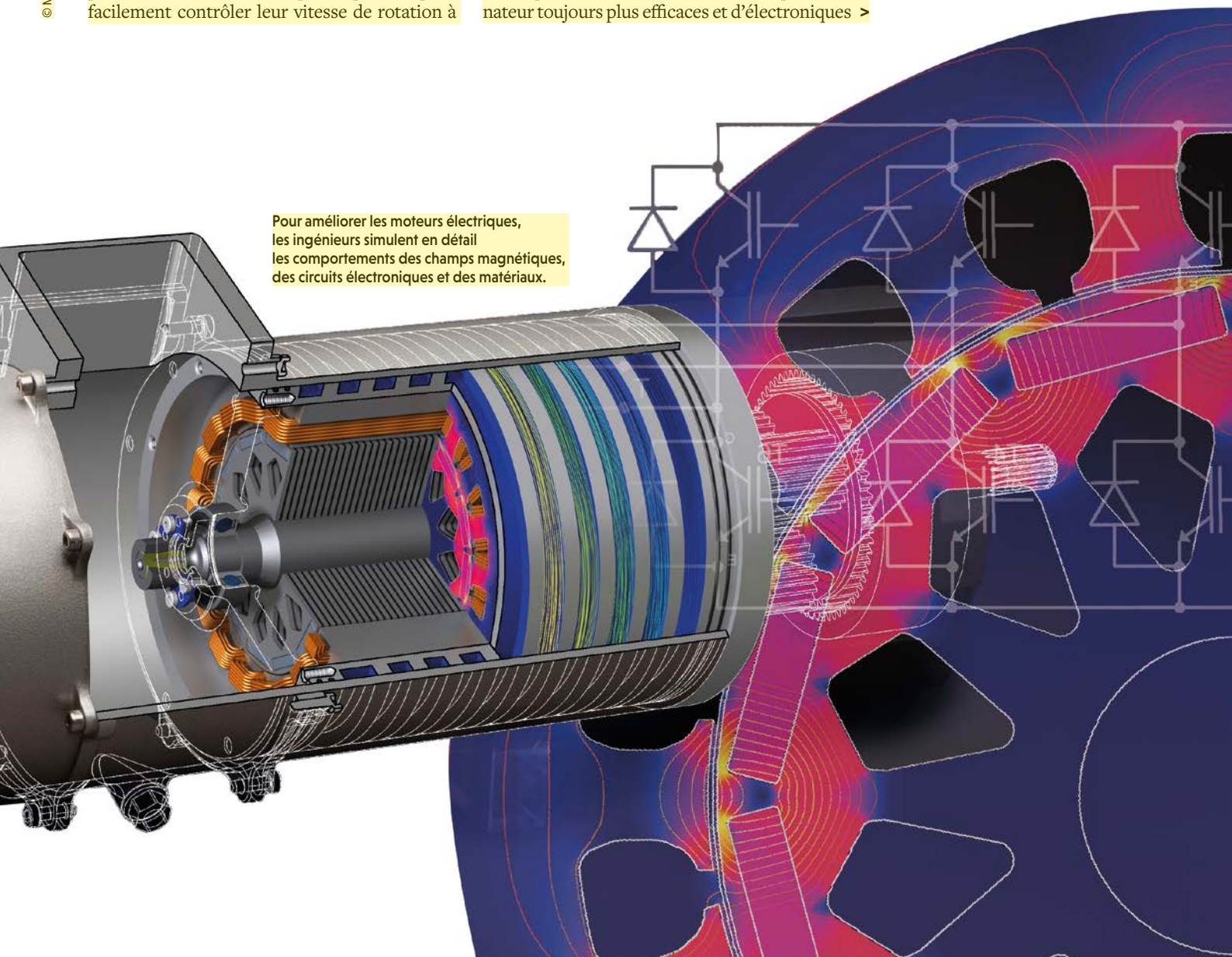
On produit des moteurs à courant continu par millions, notamment parce que l'on peut facilement contrôler leur vitesse de rotation à

l'aide d'une tension électrique. Une voiture de luxe peut ainsi en contenir une centaine, pour régler les sièges, lever les vitres, actionner les essuie-glaces et diverses pompes, ventilateurs et autres compresseurs. Les moteurs à courant continu ne sont cependant adaptés qu'aux faibles puissances: pour les puissances élevées, la structure compliquée du rotor, avec son collecteur et ses balais, les rend onéreux et implique des frottements qui limitent leur durée de vie.

C'est pourquoi les moteurs des voitures électriques sont des moteurs triphasés. Dans un moteur triphasé typique, le stator comporte trois bobines orientées à 120 degrés les unes des autres, et alimentées en courant alternatif avec des phases décalées de 120 degrés. L'ensemble induit un champ magnétique tournant. Il en résulte une variation du flux du champ magnétique à travers les bobines du rotor. Ces dernières se positionnent de façon à s'y opposer (loi de Lenz). Comme la direction du flux magnétique induit par les bobines du stator tourne sans cesse autour de l'axe du rotor, ce dernier tourne aussi.

Depuis l'avènement de contrôles par ordinateur toujours plus efficaces et d'électroniques >

Pour améliorer les moteurs électriques, les ingénieurs simulent en détail les comportements des champs magnétiques, des circuits électroniques et des matériaux.



> de puissance à faible coût, les ingénieurs ont obtenu avec ces moteurs plutôt simples et robustes des réactions à la commande meilleures encore que celles obtenues avec des moteurs à courant continu.

Le premier moteur triphasé construit était la « machine synchrone à excitation bobinée » que l'Allemand Friedrich August Haselwander développa en 1888 en modifiant un moteur à courant continu. Il ne nécessite pas d'aimants permanents coûteux, mais un rotor relativement complexe (voir l'encadré page 70). Un tel moteur équipe aujourd'hui par exemple la ZOE et la Kangoo Z.E., véhicules électriques de la marque Renault.

À peu près à la même époque a été inventé le premier moteur asynchrone. Son nom traduit un autre principe de fonctionnement : alors qu'une machine synchrone fonctionne à la fréquence de son champ magnétique tournant, un moteur asynchrone est construit de telle façon qu'il ne développe de couple que si son rotor tourne à une vitesse différente de celle du champ tournant du stator. C'est l'Italien Galileo Ferraris qui introduisit ce concept, lors d'un exposé très remarqué en mars 1888, à Turin. Quelques mois plus tard, à New York, le Croate Nikola Tesla annonçait des principes similaires et fit fonctionner deux prototypes simples. Finalement, c'est le Russe Mikhaïl Dolivo-Dobrowolsky qui, à partir de 1889, développa au sein de la société allemande AEG le moteur asynchrone sous la forme que nous lui connaissons.

Aujourd'hui, presque tous les systèmes ferroviaires et les industries exploitent des

moteurs asynchrones. Le modèle S de la marque Tesla est aussi motorisé avec une machine asynchrone.

Le principe de moteur électrique le plus récent sur le plan historique est la machine synchrone à aimant permanent, qui n'a été pleinement développée qu'à la fin du siècle dernier, lorsque de puissants aimants à base de terres rares sont devenus disponibles. À poids égal, les moteurs à aimants permanents ont les meilleures performances, ce qui explique qu'ils motorisent aujourd'hui la plupart des voitures électriques. Ils sont particulièrement adaptés aux vitesses basses et moyennes, tandis que les moteurs asynchrones sont plus avantageux aux vitesses élevées. Un bon compromis entre les deux est offert par les moteurs synchrones à excitation bobinée déjà mentionnés, bien qu'ils soient un peu plus complexes à construire (leur rotor doit intégrer des bobines et deux bagues collectrices).

UN STATOR À CHAMP MAGNÉTIQUE TOURNANT

Dans les moteurs triphasés, des courants alternatifs sinusoïdaux alimentent les bobines du stator. Typiquement, trois courants déphasés de 120 degrés alimentent trois bobines réparties autour de la circonférence du stator. La superposition des trois champs magnétiques associés produit un champ magnétique d'amplitude constante tournant de façon uniforme autour de l'axe du rotor. Comme celui qui traverse un aimant, ce champ résultant présente un pôle nord et un pôle sud. Afin de le rendre plus uniforme, on utilise souvent

LE PRINCIPE DU MOTEUR ÉLECTRIQUE MULTIPHASÉ

Les moteurs électriques exploitent les forces magnétiques pour transformer de l'énergie électrique, puis magnétique, en énergie mécanique. Soumis au champ magnétique d'un aimant permanent intégré au stator, un aimant permanent mobile (rotor) s'aligne avec ce champ (a). Le champ statorique peut aussi être créé par un électroaimant,

un bobinage où circule un courant continu et qui entoure un noyau de fer, lequel canalise le champ (b). Toutefois, dans ces deux configurations, le rotor s'immobilise une fois que les pôles se sont alignés. Pour le faire tourner, on peut placer sur le noyau une série de bobines alimentées par des courants alternatifs, déphasés de façon à créer un champ

