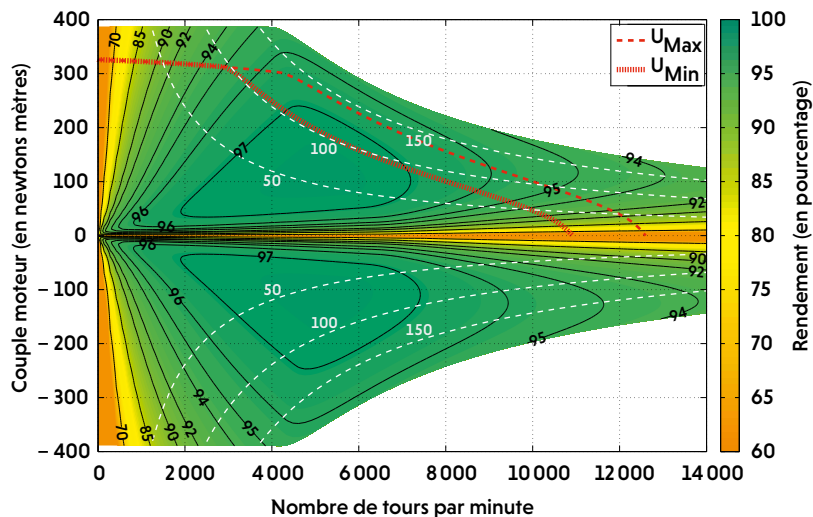




Le couple d'un moteur électrique dépend du nombre de tours par minute et de la tension de la batterie. Cette simulation du fonctionnement d'une machine synchrone à aimants permanents montre que, d'abord constant dans la plage des basses vitesses, le couple décroît après que la tension maximale de la batterie a été atteinte. Cela se produit plus vite si la batterie est déchargée (courbe  $U_{Min}$  en petits pointillés rouges) que si elle est chargée (courbe  $U_{Max}$  en plus gros pointillés rouges). Les lignes blanches indiquent la puissance disponible en kilowatts et les couleurs le rendement en pourcents. On constate que le rendement est en général supérieur à 90%, tant lorsque la machine synchrone fonctionne en moteur que lorsqu'elle fonctionne en générateur, pendant un freinage par exemple.

L'essentiel de l'acier allié à du silicium et à de l'aluminium. Ce matériau a une faible réluctance, de sorte qu'un faible courant dans la bobine suffit pour que le flux magnétique dans le noyau de fer doux soit élevé. La perméabilité magnétique relative (sa capacité à conduire les lignes de champ) du fer doux d'un moteur est, en fonction de son couple et de sa vitesse, environ 100 fois supérieure à celle de l'air. Cela signifie qu'à courant constant, la densité de flux magnétique (flux magnétique par unité de surface) y est quelque 100 fois supérieure à ce qu'elle est dans l'air. La tôle magnétique a malheureusement un défaut : au-dessus d'un certain courant d'induction, le flux magnétique n'y augmente plus.

C'est le flux magnétique, créé par la circulation du courant dans les bobines, qui engendre la force entraînant le moteur. Le couple créé résulte du produit de cette force par le bras de levier, ici la moitié du diamètre du rotor. Le produit du couple par la vitesse de rotation donne finalement la puissance mécanique fournie par le moteur.

### DES RENDEMENTS DE 90 %

Toutes les machines électriques tournantes peuvent fonctionner dans les deux sens, donc autant comme moteur électrique que comme générateur d'électricité. Cette inversion permet de recharger la batterie du véhicule pendant les descentes et les phases de freinage qui précèdent l'arrivée devant un feu ou un bouchon. C'est pourquoi le rendement d'un moteur électrique bien conçu peut atteindre 90% et plus (voir le diagramme ci-dessus), alors que celui des moteurs à explosion ne dépasse pas 30%.

Comme les entraînements électriques convertissent déjà très bien l'énergie électrique en énergie mécanique, la recherche actuelle se concentre sur l'optimisation du rapport puissance/poids. Plus un moteur est léger, moins il

prend de place et moins il faut d'énergie pour accélérer la masse du véhicule.

Par exemple, le moteur électrique de la BMW i3 pèse environ 50 kilogrammes. Pour une puissance fournie en continu de 75 kilowatts, son rapport poids/puissance est de 0,67 kilogramme par kilowatt. Un prototype de haute performance développé à l'Institut de technologie de Karlsruhe pour propulser une voiture Audi A1 convertie ne pèse, lui, qu'environ 13 kilogrammes pour une puissance continue de 70 kilowatts. Son rapport poids/puissance n'est donc que de 0,19 kilogramme par kilowatt.

### AUGMENTER LE FLUX MAGNÉTIQUE, LE COURANT OU LA VITESSE DE ROTATION

Trois voies s'offrent pour atteindre ces puissances élevées sans faire grossir le moteur : augmenter la densité de flux magnétique, alimenter les bobines avec des courants plus intenses ou faire tourner le moteur plus vite.

Comme nous l'avons déjà mentionné, la densité du flux magnétique est limitée par la saturation de la tôle magnétique. Les meilleurs types de tôles ne sont disponibles qu'en petites quantités et à des prix élevés. Il s'agit d'alliages d'acier contenant du cobalt. On les utilise dans les compétitions automobiles, mais ils sont bien trop chers pour convenir aux voitures de série.

Quant à la solution consistant à augmenter le courant, elle a l'inconvénient de présenter des pertes par effet Joule, puisque les bobines sont en fils de cuivre, qui ont une résistance électrique. Il existe d'autres sources de pertes, en particulier dans la tôle magnétique qui est sans cesse magnétisée dans des directions opposées et où circulent des courants de Foucault. Mais dans les moteurs

> d'aujourd'hui, ce sont les pertes par effet Joule qui prédominent.

Le refroidissement joue donc un rôle crucial quant à l'intensité du courant électrique qui peut faire fonctionner un moteur sur une longue durée. Dans les moteurs actuels, le stator est à l'intérieur d'un boîtier dont les parois, creuses, sont traversées par de l'eau de refroidissement. Dans ceux que l'on développe, l'intérieur de l'arbre est aussi traversé par un liquide de refroidissement; ou un nuage de gouttelettes d'huile est pulvérisé sur les bobines à l'intérieur du moteur.

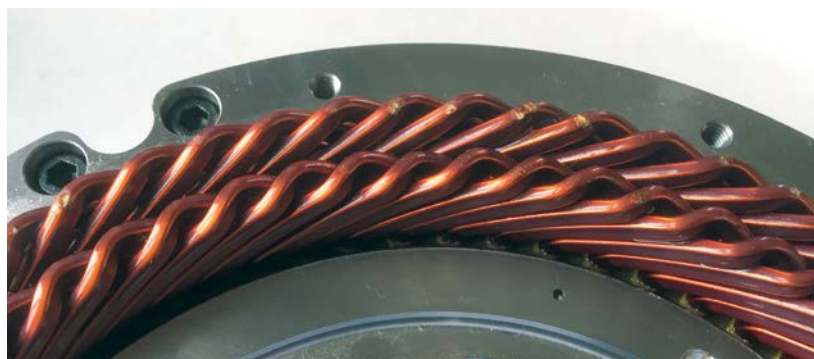
Dans les derniers systèmes en développement, on tente d'améliorer encore l'évacuation de la chaleur en amenant le liquide de refroidissement directement sur les conducteurs de cuivre, en la faisant passer par les interstices qui séparent les plaques dont est formé le stator. L'utilisation de fils conducteurs à section rectangulaire plutôt que ronde améliore aussi la compacité, c'est-à-dire qu'elle permet de disposer plus de cuivre par unité de surface (voir les photographies ci-contre). Toutes ces modifications posent des défis de conception et de production. Des prototypes existent déjà, mais on est encore loin d'une production en série.

## ÉVACUER LA CHALEUR

Quelle que soit la solution technique adoptée, on ne peut évacuer qu'une certaine quantité maximale de chaleur. Ce maximum détermine la charge linéique, en d'autres termes la somme de tous les courants divisés par la circonférence du rotor. Les moteurs électriques modernes fonctionnent en régime continu avec des charges linéiques comprises entre 50 000 et 100 000 ampères par centimètre. S'agissant des pointes de charge linéique, celles qui se produisent pendant une accélération, on peut atteindre des valeurs de 200 000 ampères par centimètre. Lors des accélérations, la quantité de chaleur produite est stockée temporairement dans la pile de plaques statoriques, puis refroidie.

La troisième voie pour augmenter la puissance sans faire grossir le moteur consiste à augmenter la vitesse de rotation. Les moteurs industriels tournent, typiquement, jusqu'à 3 000 tours par minute. Les commandes de robots atteignent 6 000 tours par minute. Les moteurs des premières voitures électriques en phase de production fonctionnaient déjà à des vitesses deux fois plus élevées. Dans les systèmes développés actuellement, les vitesses sont plutôt de 20 000 tours par minute pour les moteurs produits en série, et vont jusqu'à 30 000 tours par minute pour certains prototypes.

Pour commander des moteurs à rotation aussi rapide, il faut disposer de tensions alternatives de fréquence élevée. La fréquence atteinte est actuellement de 1 kilohertz,



parfois plus. Ces valeurs sont obtenues en faisant hacher la tension continue, issue de la batterie, par des interrupteurs électroniques de puissance, dispositifs nommés onduleurs ou convertisseurs continu-alternatif. En pratique, on rencontre aujourd'hui couramment des fréquences d'horloge bien au-dessus des 10 kilohertz. Le contrôle n'est précis que si chaque impulsion de commutation est calculée avec précision par un ordinateur puissant, ce qui n'est devenu possible que depuis quelques années.

Il est peu probable que les vitesses dépasseront les 30 000 tours par minute. Tout d'abord, cette vitesse doit être ramenée, par des transmissions, aux quelque 1 500 tours par minute qui sont appliqués à la roue à la vitesse maximale. Par ailleurs, la structure du rotor doit résister à la force centrifuge. Selon les conceptions de rotor – à base d'aimants ou de cage d'écureuil – et les dimensions usuelles d'un moteur électrique (le noyau en tôles magnétiques du stator fait 20 à 30 centimètres de diamètre extérieur), la périphérie du rotor peut atteindre des vitesses de 100 à 150 mètres par seconde. De plus, les pertes dues à la remagnétisation constante du noyau de fer augmentent avec la vitesse, ce qui limite l'amélioration des performances.

Contrairement aux moteurs à combustion, les moteurs électriques créent à l'arrêt un couple puissant, qui suffit pour obtenir les nombres de tours par minute les plus élevés. Par conséquent, aucun embrayage ou boîte de vitesses à multiples rapports n'est nécessaire.

Les bobinages constituant le stator sont soit répartis (comme en haut), soit concentrés (comme en bas). Les bobinages répartis sont mieux adaptés aux machines tournant à grande vitesse. Presque tous les moteurs électriques puissants sont à bobinages répartis. Ceux qui sont particulièrement compacts mettent en œuvre des fils conducteurs à section carrée (en haut), forme qui permet de mieux occuper l'espace.