

MANIFESTATION À NEW YORK CONTRE LE « STOP AND FRISK »

Attaqué en justice dès 2008 pour discrimination, le programme de contrôle policier « stop and frisk » (arrêt et fouille) mis en place à New York a rassemblé de nombreux protestataires dans les rues, comme ici en 2012. En 2013, la justice fédérale américaine statua que cette pratique violait les droits constitutionnels des minorités de la ville.



Matteo Tiratelli et ses collègues voulaient déterminer si les contrôles dissuadent les délinquants en augmentant leur perception du risque d'être arrêtés ou en perturbant leur activité habituelle. Aussi ont-ils analysé, à partir des registres de la police, le nombre de contrôles réalisés sur différentes périodes et dans chacun des 31 quartiers, et celui de divers types de délits enregistrés dans les mêmes quartiers. L'idée était de rechercher, d'une période à l'autre, une possible influence d'une augmentation des contrôles sur les comportements délinquants. Cet éventuel effet n'étant probablement pas immédiat, les chercheurs ont par ailleurs supposé qu'il fallait qu'un délinquant soit exposé un certain temps au risque supplémentaire de contrôle pour qu'il modifie son comportement.

Résultat : pour l'ensemble des délits de rue considérés, 10% de contrôles supplémentaires ont produit une diminution de la fréquence des infractions à hauteur de 0,14% après une semaine, et de 0,3 % après un mois (de 0,08 et 0,04% pour les vols de voiture, et de 0,03 et 0,13% pour les vols avec violence). Sur les crimes violents, 10% de contrôles en plus ont réduit les infractions de 0,01% après une semaine et de 0% après un mois. Les chercheurs concluent que, même s'il peut exister des cas où les contrôles rendent service et permettent de détecter une infraction, au total, une politique d'augmentation des contrôles a, au mieux, très peu d'effet. Les études similaires conduites à New York et à Chicago présentent des résultats comparables.

LE MYSTÈRE DE LA PRÉFÉRENCE FRANÇAISE POUR LE CONTRÔLE

Ainsi, le panorama qui se dégage des recherches est que les contrôles de police montrent une forte disparité selon l'ethnicité et peuvent être discriminatoires : pour une bonne part, les contrôles sont déclenchés à

partir de l'apparence ethnique des personnes, souvent parce qu'elle est considérée comme un indicateur de la propension à commettre des délits. C'est notamment le cas en France. Cependant, celui de l'Allemagne montre que l'on peut faire moins de contrôles, et autrement, sans cibler autant qu'en France les minorités (pour les adultes) et même pas plus que la majorité (pour les adolescents).

Ce ne sont pas les agents de terrain qui décident des politiques de contrôle, mais le gouvernement et les hauts dirigeants policiers : on le déduit aisément des variations rapides des pratiques à New York ou à Londres, ou des différences entre la France et l'Allemagne. Politiques policières, formation, contrôle des pratiques des agents dépendent des responsables politiques. C'est un point essentiel dans le débat, qui se focalise trop sur les « bons » ou « mauvais » comportements des agents de terrain.

Les conséquences des politiques de contrôle fréquent sont très discutables. Ces politiques ne permettent pas de détecter beaucoup d'infractions et n'influent pas nettement sur les diverses formes de délinquance de rue. De surcroît, parce qu'elles sont souvent discriminatoires, elles augmentent la méfiance et créent un sentiment d'injustice, de dévalorisation de la loi. Enfin, elles coûtent très cher et consomment les moyens humains de la police : un équipage de trois agents fait entre 1 et 1,25 contrôle par heure. Aussi comprend-on qu'il serait utile de modifier ces politiques. Mais il semble que cela s'oppose aux croyances des policiers, dont certains continuent à prêter aux contrôles des vertus qu'ils n'ont pas. Et à celles des responsables politiques qui, pour la plupart, confondent nombre d'agents dans la rue et efficacité sans s'interroger sur ce qu'ils y font. Comment, autrement, expliquer l'usage immodéré des contrôles ? ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Tiratelli et al., **Does stop and search deter crime? Evidence from ten years of London-wide data**, *Brit. J. Criminol.*, vol. 58(5), pp. 1212-1231, 2018.

Défenseur des droits, **Relations police-population : le cas des contrôles d'identité**, vol. 1, **Enquête sur l'accès aux droits**, 2017. <https://bit.ly/2LUSvGF>

S. Roché, **De la police en démocratie**, Grasset, 2016.

Fundamental Rights Agency, **Contrôles de police et minorités**, 4^e rapport « données en bref » de l'enquête EU-Midis, 2010. <https://bit.ly/2oMjv1M>

J. B. Kadane et J. Lamberth, **Are Blacks egregious speeding violators at extraordinary rates in New Jersey ?**, *Law, Probability and Risk*, vol. 8(2), pp. 139-152, 2009.

L'ESSENTIEL

> Les moteurs électriques triphasés, utilisés dans l'industrie depuis le XIX^e siècle, sont robustes et ont un bon rendement.

> Pour les adapter aux voitures électriques, il a fallu augmenter leur puissance, à poids égal.

> Pour ce faire, les ingénieurs ont joué sur plusieurs

tableaux : vitesse de rotation plus élevée, refroidissement plus efficace, aimants plus puissants, meilleurs systèmes d'électronique et de commande par ordinateur.

> Les prototypes et les moteurs de compétition surpassent déjà les meilleurs moteurs à explosion. Reste le défi de la production en série.

L'AUTEUR



MARTIN DOPPELBAUER
professeur à l'Institut
électrotechnique
de l'université
de Karlsruhe,
en Allemagne

De meilleurs moteurs pour voitures électriques

L'essor des véhicules électriques dépend aussi du développement de leurs moteurs. Lesquels ont connu beaucoup de progrès récents, grâce notamment à de nouveaux matériaux magnétiques. Et ce n'est pas fini : les moteurs de demain seront encore plus performants et légers.

Des machines électriques, qui exploitent le champ magnétique créé par un courant, existent depuis presque deux cents ans, même si le premier système dépassant le stade du démonstrateur n'a été construit qu'en 1834 à Königsberg (Kaliningrad) par l'ingénieur Moritz von Jacobi. Après tant de temps, que peut-il rester à améliorer ?

En fait, bien des progrès ont été réalisés ces vingt dernières années. Ils sont dus à des matériaux magnétiques modernes à base de terres rares, qui donnent des aimants puissants, ainsi qu'à de meilleurs composants électroniques et à des calculateurs puissants, qui ont rendu



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.

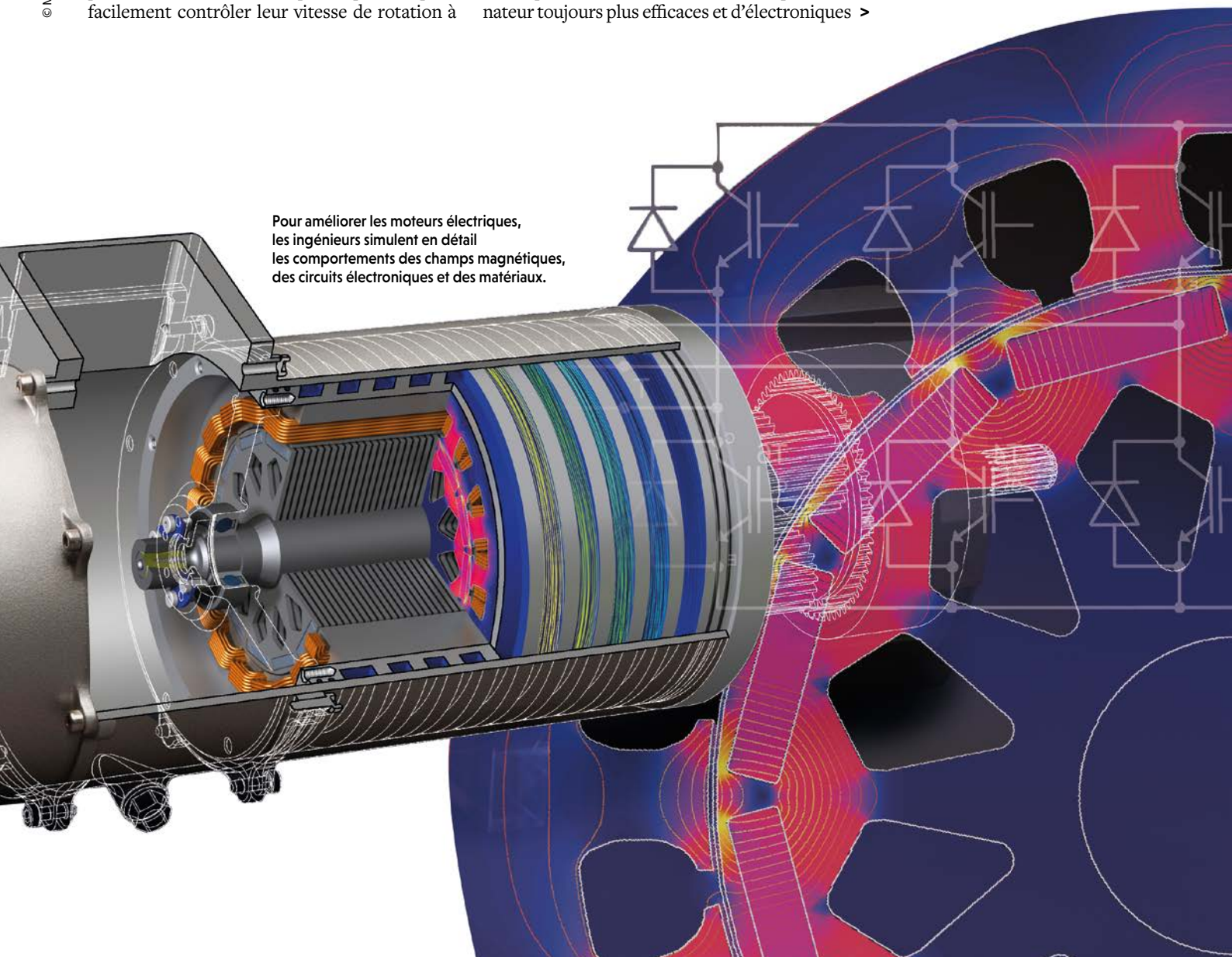
On produit des moteurs à courant continu par millions, notamment parce que l'on peut facilement contrôler leur vitesse de rotation à

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).

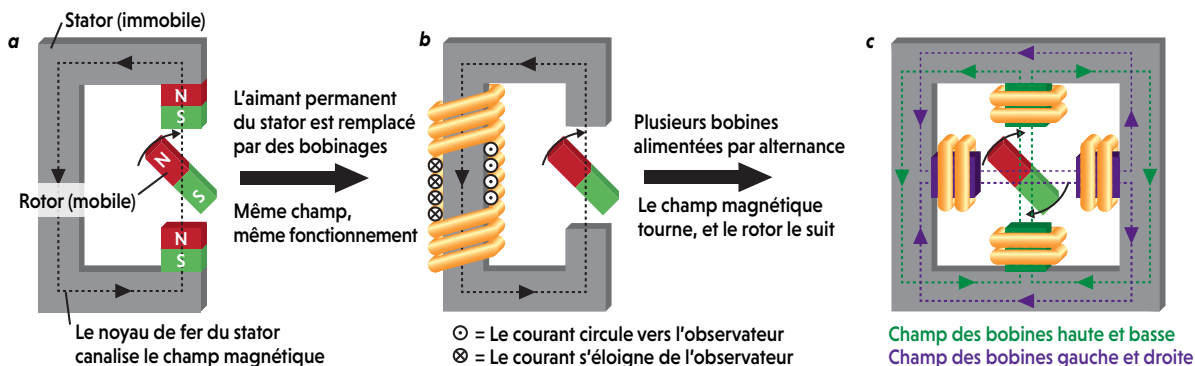
UN STATOR À CHAMP MAGNÉTIQUE TOURNANT

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



pour chaque phase non pas une bobine, mais un groupe de deux ou trois bobines. De plus, les groupes ne sont pas déphasés de 120 degrés, mais plutôt de 90, voire de 60 degrés. Toute la circonférence du stator se retrouve alors occupée par des groupes de bobines, ce qui augmente le nombre de pôles magnétiques. On construit ainsi des machines asynchrones à deux paires de pôles (deux pôles nord et deux pôles sud) et des machines synchrones à trois ou quatre paires de pôles.

La force et, par conséquent, le couple et la puissance produits résultent du jeu qui s'établit entre le champ du stator et celui du rotor, qui constitue le «champ d'excitation». C'est par l'intermédiaire de ce dernier que sont transmises les forces qui se développent. Une métaphore éclaire cette transmission: tout se passe comme lorsqu'un véhicule en tracte un autre tombé en panne à l'aide d'une corde. Ce lien, qui équivaut au champ d'excitation, doit avoir une grande résistance, laquelle équivaut à la densité d'énergie de ce champ. C'est pourquoi les trois types de moteurs à champ tournant se distinguent les uns des autres par la façon dont le champ d'excitation est engendré. Dans un moteur synchrone à aimants permanents, le champ d'excitation est créé par des aimants... permanents; dans un moteur synchrone à excitation bobinée, il est créé par des... bobines.

Il existe aussi ce que l'on nomme des moteurs électriques asynchrones à cage d'écureuil. Leur rotor n'est pas fait de spires enroulées, mais plutôt d'une cage cylindrique dont les barres de cuivre, disposées entre deux anneaux qui les court-circuitent, sont

«torsadées» (voir l'encadré page suivante). Lorsque ce dispositif est plongé dans le champ tournant (donc variable) du stator, des courants sont induits dans la masse conductrice des barres (ce que l'on nomme des courants de Foucault), de telle façon à créer un flux magnétique s'opposant au flux du stator; et comme ce flux tourne, la cage suit ce mouvement. Ce fonctionnement explique pourquoi les moteurs asynchrones sont aussi nommés moteurs à induction.

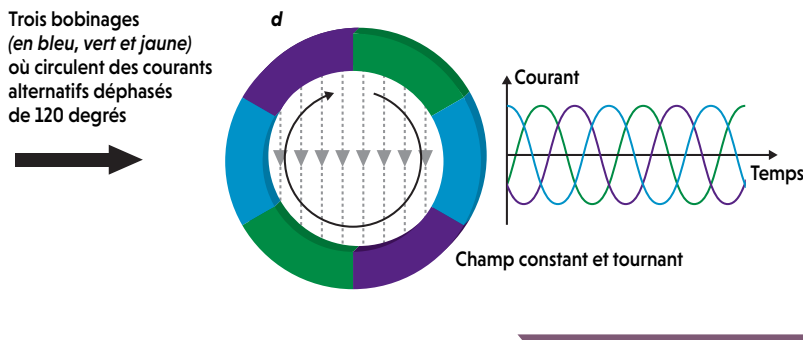
DES AIMANTS PERMANENTS DE PLUS EN PLUS PUISSANTS, À BASE DE TERRES RARES

Le développement des moteurs synchrones à aimants permanents n'a été possible que parce qu'au cours du siècle dernier, les chercheurs ont mis au point des matériaux à l'origine d'aimants permanents toujours plus performants. Le premier d'entre eux était l'alliage aluminium-nickel-cobalt (AlNiCo). Dès les années 1940, on lui faisait atteindre des densités d'énergie magnétique de 150 kilojoules par mètre cube. Cependant, en raison de sa faible coercitivité, c'est-à-dire du faible champ magnétique nécessaire pour annuler son aimantation, l'aluminium-nickel-cobalt ne convient pas à la construction de moteurs électriques. Arrivée dans les années 1960, la ferrite a une densité d'énergie quelque trois fois plus faible, mais sa coercitivité élevée la rend utilisable dans les moteurs électriques. Elle a aussi l'avantage d'être peu coûteuse, de sorte qu'on l'emploie souvent dans les moteurs synchrones à aimants permanents simples et dans les moteurs à courant continu.

Depuis les années 1970, les aimants à base de terres rares sont devenus de plus en plus puissants. On a d'abord utilisé des alliages samarium-cobalt (SmCo), qui atteignent une densité d'énergie de 300 kilojoules par mètre cube, puis, à partir de 1990, du néodyme-fer-bore (NdFeB), dont la densité d'énergie magnétique peut aller jusqu'à 450 kilojoules par mètre cube. La stabilité en température des aimants au néodyme oblige à utiliser aussi un autre élément, également une terre rare, le dysprosium, qui est environ dix fois plus cher que le néodyme. En raison du monopole de la Chine, qui est de loin le plus gros producteur mondial de terres rares, le prix du dysprosium a connu dans le passé de brusques embardées. C'est pourquoi de nombreux grands constructeurs automobiles se préparent à introduire des moteurs électriques sans aimant permanent, c'est-à-dire des machines synchrones à excitation bobinée ou à cage d'écureuil.

Une autre caractéristique critique des aimants au néodyme est leur teneur élevée en fer (60%), et l'oxygène atmosphérique peut donc les oxyder. Une fois les aimants produits, ➤

magnétique tournant, mais d'amplitude constante (c). Soumis à ce champ, le stator tourne pour rester aligné avec lui. Pour ce faire, on utilise trois bobines réparties dans le stator et alimentées par des courants sinusoïdaux déphasés de 120 degrés (d).

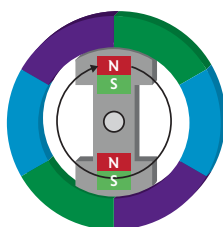


LES TROIS ARCHITECTURES DES MOTEURS ÉLECTRIQUES

Les moteurs le plus souvent montés dans les véhicules électriques présentent diverses architectures. Mais dans tous les cas, un champ magnétique tournant fait tourner le rotor, dont le champ magnétique est créé de diverses façons.

Dans les moteurs synchrones à aimants permanents, le champ magnétique du rotor est créé par des aimants permanents (les représentations ci-dessous sont schématiques : les moteurs réels ont bien plus de paires de pôles magnétiques).

MACHINE SYNCHRONE À AIMANTS PERMANENTS

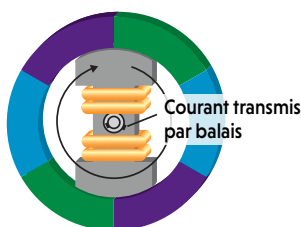


Le rotor comporte des aimants permanents.

Dans les moteurs synchrones à excitation bobinée, le champ du rotor est produit par des bobines intégrées au rotor. Le courant d'alimentation nécessaire parvient aux bobines par l'intermédiaire de contacts coulissants, des « balais ».

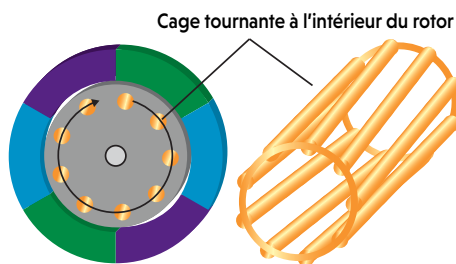
Dans les machines asynchrones, le champ du rotor est engendré par les courants qui circulent dans la masse des tiges métalliques dont est constitué le rotor. Le champ statorique tournant y crée une tension électrique, qui est court-circuitée par les anneaux constituant les extrémités de cette « cage d'écureuil ». Les courants qui la traversent engendrent le champ magnétique rotorique, dont le flux tend à s'opposer au champ statorique tournant. Il en résulte un couple de forces qui fait tourner la cage.

MACHINE SYNCHRONE À EXCITATION BOBINÉE



Le rotor intègre des bobines.

MACHINE ASYNCHRONE



Le champ tournant du stator induit des courants dans le rotor, qui induisent son champ magnétique.

> leur surface doit donc être soigneusement scellée, par exemple par une couche d'aluminium. Si ce revêtement est endommagé lors de l'installation du moteur, une panne prématurée de celui-ci peut survenir.

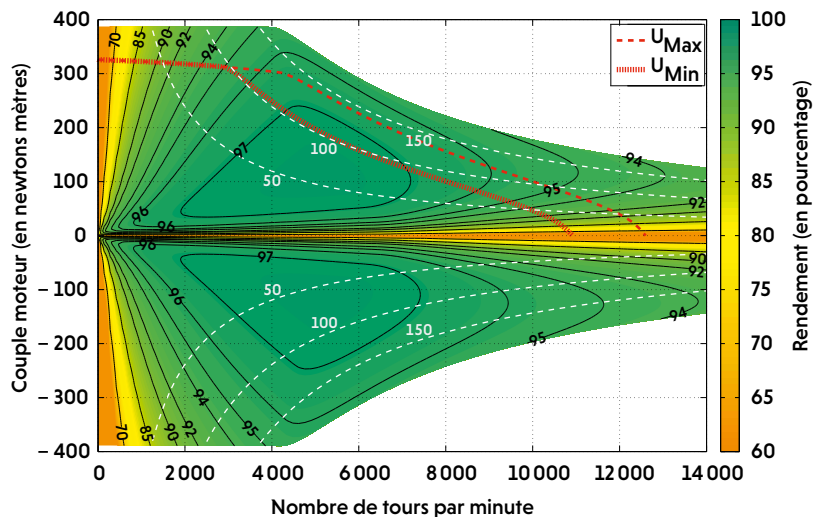
Un indicateur important de l'efficacité d'un moteur électrique est son rapport puissance/poids, déterminé par le poids nécessaire pour fournir une certaine puissance mécanique. Les moteurs industriels classiques – par exemple ceux des escaliers mécaniques, des ascenseurs, des systèmes de refroidissement et des compresseurs – pèsent environ 10 kilogrammes par kilowatt de puissance mécanique continue. Particulièrement robustes, ces moteurs peuvent fonctionner plusieurs décennies sans entretien, mais ils sont trop lourds pour motoriser des véhicules. De fait, dans les voitures ou les trains électriques actuels, les rapports poids/puissance des moteurs sont inférieurs à 1 kilogramme par kilowatt, valeurs comparables à celles des moteurs à explosion.

DES MOTEURS PLUS PUISSANTS QUE CEUX DE LA FORMULE 1

Des progrès ont cependant été réalisés, puisque des rapports poids/puissance de 0,1 kilogramme par kilowatt sont désormais possibles. De tels moteurs électriques sont plus puissants que les meilleurs moteurs à combustion interne utilisés en Formule 1. Outre les voitures, on prévoit qu'ils équiperont un jour les avions. Les ingénieurs n'envisagent pas seulement de petits appareils, mais aussi de petits porteurs de 50 à 100 passagers capables de couvrir jusqu'à 1 000 kilomètres. L'énergie électrique ne proviendra pas nécessairement de batteries, mais pourrait être produite par des générateurs, qui ont l'avantage d'avoir un rendement élevé dans la plage optimale des vitesses de rotation des moteurs.

L'entraînement fourni par un moteur électrique résulte non seulement de la force de Lorentz (la force qu'exerce un champ magnétique sur une charge en mouvement), mais aussi de la force de réluctance, qui mesure la résistance d'un circuit magnétique (un conducteur de champ magnétique refermé sur lui-même) à être traversé par un champ magnétique. Cette dernière joue un rôle dans les matériaux ferromagnétiques doux, ceux qui s'aimantent facilement quand on les plonge dans un champ magnétique extérieur. Ce type de matériau conduit bien les champs magnétiques et permet, à taille égale, de transférer davantage de puissance. C'est pourquoi, en général, un électroaimant ne comporte pas seulement une bobine engendrant un champ magnétique, mais aussi un noyau de matériau ferromagnétique qui canalise le champ et l'amplifie.

À cette fin, on utilise ce qu'on appelle le fer doux ou une « tôle magnétique », qui est pour



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.

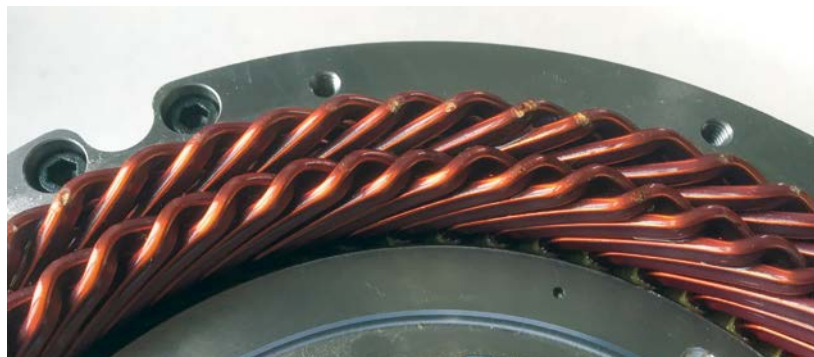
Dans les derniers systèmes en développement, on tente d'améliorer encore l'évacuation de la chaleur en amenant le liquide de refroidissement directement sur les conducteurs de cuivre, en la faisant passer par les interstices qui séparent les plaques dont est formé le stator. L'utilisation de fils conducteurs 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.

Cependant, la rotation de l'arbre moteur doit être ajustée, par un réducteur, à celle des roues. Cela se fait en général par des systèmes à deux étages de roues dentées. Compacts et moins volumineux que le moteur, ces réducteurs atteignent des rendements de plus de 90% grâce au petit nombre de pièces qui les composent.

On pourrait aussi construire des moteurs à rotation lente, entraînant directement les roues, mais ils auraient l'inconvénient d'une faible densité de puissance. À performances comparables, de tels entraînements directs devraient être plus volumineux, plus lourds et plus coûteux que des entraînements centraux à grande vitesse. Les grandes tailles de leurs composants auraient aussi l'inconvénient de réduire le rendement moteur à mesure que l'usure et le frottement augmenteraient. C'est pourquoi toutes les voitures électriques produites aujourd'hui fonctionnent avec des moteurs électriques rapides et une petite boîte de vitesses.

DES ENGRENAGES FIXES EN GÉNÉRAL

Certaines voitures électriques sont dotées de modificateurs de régimes, c'est-à-dire de plusieurs vitesses. C'est intéressant lorsqu'on souhaite combiner dans le même véhicule un couple de démarrage élevé avec une vitesse maximale élevée, ce qui est par exemple nécessaire dans les compétitions automobiles. Les engrenages nécessaires occupent trop de place et sont trop lourds, sans parler des pertes de puissance qu'ils occasionnent. Même le modèle S de Tesla, qui passe de 0 à 100 kilomètres par heure en 4,4 secondes et atteint une vitesse maximale de 225 kilomètres par heure, est livré avec des engrenages fixes.

Malgré les différences techniques entre les moteurs asynchrones, les moteurs synchrones à aimants permanents et les moteurs synchrones à excitation bobinée, les fonctionnements de tous ces dispositifs de propulsion électrique sont assez similaires.

Dans la plage des faibles nombres de tours par minute, donc des basses vitesses, les moteurs fonctionnent à flux magnétique constant, mais il faut ajouter de l'électronique pour le garantir. Dans le même temps, la quantité de chaleur évacuable et la puissance maximale du système de refroidissement limitent l'alimentation électrique totale possible. Le courant d'alimentation maximal et le flux magnétique sont donc constants dans la plage des basses vitesses, ainsi que le couple maximum atteignable (voir le diagramme page 71).

La puissance du moteur est égale au produit du couple par la vitesse de rotation. La puissance disponible augmente donc dans la plage des basses vitesses de 0 (à l'arrêt) jusqu'à un maximum, atteint pour la vitesse de

rotation maximale. La plupart du temps, elle correspond à des vitesses du véhicule comprises entre 40 et 60 kilomètres par heure, selon le type de moteur.

Au-delà de la vitesse maximale, on entre dans la plage des faibles champs. Le variateur – le composant qui dicte à chaque instant au moteur la fréquence de la tension alternative appropriée, exploite désormais toute la tension disponible aux bornes de la batterie. La fréquence augmente encore proportionnellement à la vitesse. Cependant, comme le flux magnétique varie comme le rapport tension/fréquence, il tend à diminuer. Le courant continu thermiquement admissible reste le même. Pour ces raisons, le couple diminue en raison inverse du nombre de tours par minute, tandis que la puissance mécanique disponible – produit du couple par la vitesse de rotation – reste constante.

Par ailleurs, la tension de la batterie diminue au fur et à mesure qu'elle se décharge. Les batteries typiques des véhicules produits en série aujourd'hui fournissent un maximum de 360 volts à pleine charge. La tension chute à 320 volts ou même à 300 volts lorsque la batterie est presque vide. Cela a un impact important sur le comportement du moteur. À tension plus basse, la plage de vitesses de base se termine à des vitesses plus basses, et la plage d'affaiblissement du champ commence plus tôt. La puissance maximale disponible diminue alors avec la tension disponible. Cette puissance disponible à plein régime s'affiche sur les tableaux de bord de certains véhicules électriques, telle la ZOE de Renault.

Au cours des deux dernières décennies, les ingénieurs ont exploité toutes ces possibilités de réglage du fonctionnement des systèmes de propulsion électrique afin de rendre les moteurs électriques suffisamment efficaces – en tout cas par rapport à leurs prédécesseurs industriels – pour être utilisés dans les voitures particulières. Des vitesses plus élevées, de meilleures solutions de refroidissement, des aimants plus puissants, une électronique moderne et la commande par ordinateur ont permis d'améliorer le rapport puissance/poids d'un facteur 10.

Les systèmes actuellement à l'essai dans les laboratoires et ceux développés pour la compétition suggèrent qu'une amélioration d'un autre ordre de grandeur sera possible. Par exemple, les semi-conducteurs en carbure de silicium devraient apporter bientôt de grandes améliorations aux électroniques de puissance, car ils résistent à des températures plus élevées, présentent de plus faibles pertes ainsi que des temps de commutation plus courts. À n'en pas douter, les systèmes de propulsion électrique de demain seront encore plus compacts et plus puissants. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Dopplebauer et P. Winzer, **A lighter motor for tomorrow's electric car**, *IEEE Spectrum*, vol. 54(7), pp. 26-31, 2017.

A. Hughes et B. Drury, **Electric Motors and Drives**, Newnes, 4^e édition, 2013.

R.-P. Bouchard et G. Olivier, **Conception de moteurs asynchrones triphasés**, Presses internationales Polytechnique, 1999.

J.-D. Chatelain, **Machines électriques**, Bordas, 1993.

Des chercheurs pris dans la guerre biologique

Que feriez-vous si le gouvernement vous demandait d'effectuer des recherches visant à défendre les populations contre des épidémies intentionnelles?

Au cours du xx^e siècle, nombre de chimistes et biologistes civils, confrontés à cette question, ont accepté de collaborer secrètement, même si cela signifiait souvent aussi développer et produire les armes biologiques à combattre.

En janvier dernier, le virologue David Evans et son équipe de l'université d'Alberta, au Canada, indiquaient, dans la revue *PLoS One*, qu'ils avaient réussi à produire, à petit budget, une variante du virus de la variole. Conçue sur la base de séquences d'ADN trouvées sur Internet – qui provenaient du virus responsable de la forme chevaline de la variole –, l'initiative visait à produire un vaccin plus efficace contre cette maladie. Six mois plus tôt, la revue *Science* mettait déjà en garde contre cette recherche, alors en cours, qui pouvait donner l'occasion à des terroristes de produire à peu de frais des armes biologiques.

De fait, depuis que la période de l'après-Guerre froide a sonné le glas de la bipolarité politique du monde, ce que l'on nomme aujourd'hui le bioterrorisme préoccupe les États, particulièrement depuis l'épisode dit des «lettres à l'anthrax», au cours duquel, en octobre 2001,

diverses institutions, dont des rédactions de journaux, avaient reçu des lettres contenant des bacilles de la maladie du charbon.

Certes, dès les premières décennies du xx^e siècle, les États qui en avaient les capacités s'étaient lancés dans une course aux armements biologique et chimique, mais de nos jours, un nouvel aspect est venu renforcer l'inquiétude des dirigeants à ce sujet : la crainte de voir émerger des capacités de destruction sortant du cadre étatique. Le très grand nombre de canulars et les tentatives avérées de bioterrorisme des trente dernières années – dont celles des sectes Rajneesh à The Dalles, dans l'Oregon, en 1984 et Aum à Kameido, au Japon, en 1993 –, conjointement avec la fin de la Guerre froide et l'avènement d'Internet, laissent penser que l'arme biologique, l'arme atomique du pauvre comme la surnomment souvent les militaires, représenterait une menace sans précédent.

Le fait qu'une revue scientifique alerte sur les risques bioterroristes liés à une étude montre