

Les moteurs électriques, à la réalisation industrielle

FRANCK LE GALL ^[1]

Si tous les moteurs électriques se ressemblent, les choix de technologies et d'architectures de conception conduisent à des différences notables en fonction de l'application envisagée. De plus, les critères de coût de fabrication et de fiabilité ont un impact fort sur les solutions développées par les constructeurs automobiles.

Déjà reconnus depuis plus d'un siècle pour leur très bon rendement et pour leur réversibilité énergétique, les machines électriques tournantes possèdent une autre propriété très intéressante pour l'application à la traction automobile : la facilité de maîtrise de leur couple sur une très large plage de vitesses. En effet, dans le domaine de la traction automobile, que la motorisation soit thermique, électrique ou hybride, on souhaite disposer à basse vitesse d'un couple maximal, puis au-delà du point de fonctionnement nominal, on doit pouvoir augmenter le régime, tout en gardant la puissance constante **1**.

Alors que ces propriétés, et particulièrement la première à basse vitesse, sont très contraignantes pour un moteur thermique, elles apparaissent comme presque « naturelles » pour les moteurs électriques. Pour comprendre cet « avantage concurrentiel », il est primordial de savoir comment on génère un couple moteur à partir de l'énergie électrique.

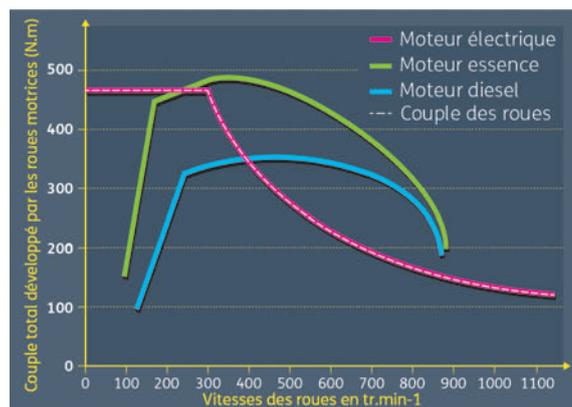
La machine à courant continu

La première approche est basée sur la découverte de Pierre Simon de Laplace (1749-1827) concernant la production d'une force mécanique par interaction entre un courant électrique et un champ magnétique **2**. Cette force de Laplace permet de comprendre le fonctionnement des machines à courant continu (MCC).

Les MCC sont constituées d'un stator portant le circuit inducteur (un bobinage parcouru par un courant ou un aimant permanent) qui génère le champ magnétique constant, d'un rotor sur lequel est bobiné le circuit induit parcouru par le courant et d'un système balais-collecteur permettant l'inversion du courant **3**. L'effet du champ magnétique sur chacune des spires

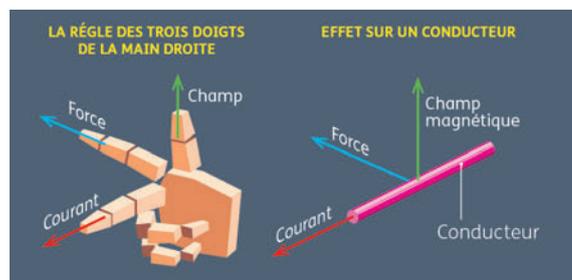
mots-clés

électrotechnique, puissance, efficacité énergétique



1 Le besoin de couple des roues d'un véhicule

On peut donner au moteur électrique une courbe couple/vitesse qui corresponde exactement au besoin de la propulsion des véhicules automobiles, ce qui n'est pas le cas pour les moteurs thermiques (essence et diesel), mais ce sont les capacités de stockage embarqué de son énergie qui en limitent pour le moment l'usage.



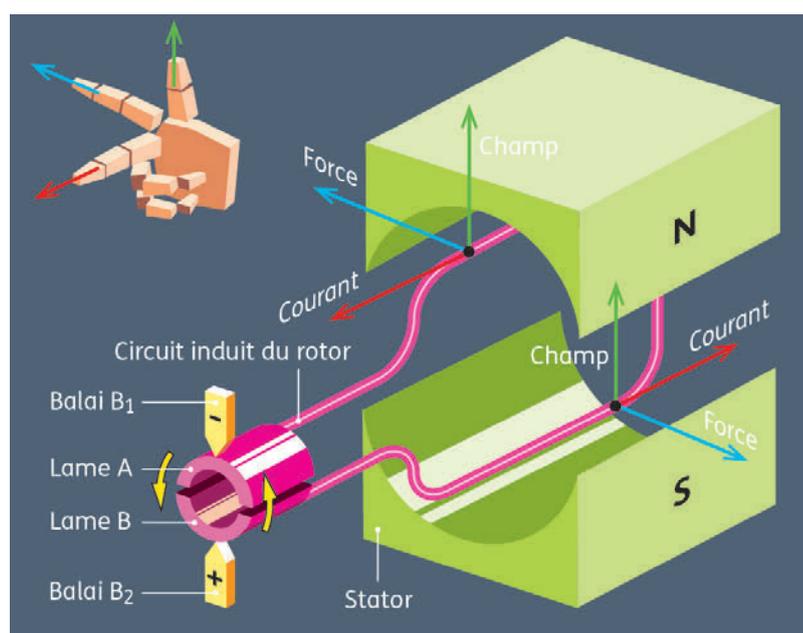
2 La loi de Laplace

Tout conducteur parcouru par un courant électrique placé dans un champ magnétique est soumis à une force électromagnétique tendant à le déplacer. Un moyen mnémotechnique pour s'en rappeler est « la règle des trois doigts de la main droite ». Cette force est dite force de Laplace s'exprime par la formule $F = i \mathbf{l} \wedge \mathbf{B}$. C'est cette force qui est à la base du couple des moteurs électriques.

de l'induit crée des couples de forces entraînant sa rotation. C'est la somme des moments des couples de forces qui constitue le moment du couple électromagnétique (C_e) de la MCC. Celui-ci s'exprime par la formule $C_e = K \Phi i$ où : K est un coefficient de proportionnalité qui dépend du nombre de paires de pôles magnétiques, du nombre de conducteurs et du nombre de voies d'enroulement ; Φ est le flux magnétique créé par l'inducteur, il est donc constant lorsque

[1] Docteur et agrégé de sciences physiques, enseignants en STS électrotechnique et à l'ESAE. Article extrait de la revue *Industrie technologie*, n° 984, février 2016.

de la physique



3 Le fonctionnement du moteur à courant continu

Le courant passe, via le balai B2 et la lame B, au travers du circuit induit porté par le rotor pour ensuite revenir par l'intermédiaire de la lame A et du balai B1. L'interaction du champ magnétique et du courant traversant les portions axiales du circuit induit produit un couple de forces responsable de la rotation du rotor dans le sens anti-horaire. Lorsque le rotor a fait un demi-tour, le courant entre par la lame A et ressort par la B, mais la position de la spire ayant été inversée le couple de forces produit entraîne toujours le rotor dans le sens anti-horaire.

l'inducteur est à aimant permanent et dépend du courant d'excitation lorsque l'inducteur est bobiné ; i est l'intensité du courant traversant l'induit. Une seconde relation, $E = K\Phi\Omega$, permet de manière symétrique de lier la force électromotrice (tension à vide) E à la vitesse de rotation angulaire du rotor Ω . Ces deux relations permettent de comprendre pourquoi les moteurs électriques conviennent pour décrire la caractéristique de traction idéale. En effet, pour obtenir le fonctionnement à basse vitesse (voire nulle), il « suffit » de maîtriser le champ magnétique inducteur d'une part (et donc le flux) et l'intensité du courant induit d'autre part pour obtenir le couple voulu, et ceci indépendamment de la vitesse du rotor qui est pilotée par la tension d'alimentation. En haute vitesse, on peut aussi travailler à puissance constante en diminuant le flux inducteur. En effet, si E est maintenu constant, une diminution du flux

Ce qu'il faut retenir

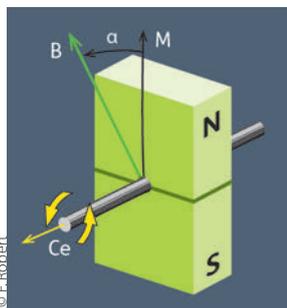
- Les motorisations automobiles actuelles font appel aux machines synchrones, performantes, et asynchrones, économiques et robustes.
- Outre les caractéristiques électro-mécaniques, le prix de revient et la fiabilité sont des critères déterminants pour le choix d'une technologie de moteur.
- Les constructeurs automobiles conçoivent simultanément le moteur, son électronique de commande et d'interconnexion avec la batterie, ainsi que le réducteur associé, formant le groupe motopropulseur.

Φ entraîne une augmentation de la vitesse angulaire Ω . On parle alors de défluxage.

La simplicité du pilotage de la vitesse des MCC a naturellement été exploitée dans les premières applications industrielles de traction électrique (automobile, ferroviaires...). Toutefois, deux handicaps majeurs ont rendu cette technologie obsolète. Tout d'abord, le système balais-collecteur est le siège d'arcs électriques d'autant plus importants que la puissance de la machine augmente. Il est par ailleurs fragile et limite la vitesse de fonctionnement de ces moteurs. De plus, la puissance de ces machines étant principalement liée à l'intensité des courants d'induit, une augmentation de la puissance implique un accroissement de la masse de cuivre et donc du poids du rotor. La puissance massique de la MCC est donc beaucoup plus faible que celle de ses concurrentes directes, à savoir, les machines synchrones (MS) et asynchrones (MAS).

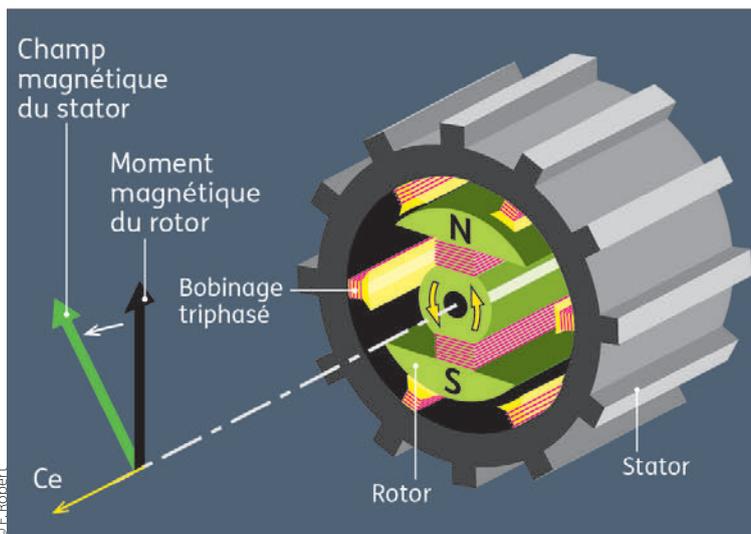
Les machines à courant alternatif

Les machines synchrones et asynchrones triphasées sont les plus fréquemment utilisées dans les applications de traction électrique modernes que ce soit en mode tout électrique (Twizy, Zoé, Leaf, e-Golf...) ou hybrides (Prius, BMW i8, Mercedes-Benz S500 Plug-In Hybrid...). Le couple électromagnétique est obtenu par l'interaction d'un champ inducteur généré dans le stator par un système de courants triphasés et d'un champ magnétique porté par le rotor, qui peut être soit constant (machine synchrone à rotor bobiné ou à aimant permanent), soit induit (machine asynchrone).



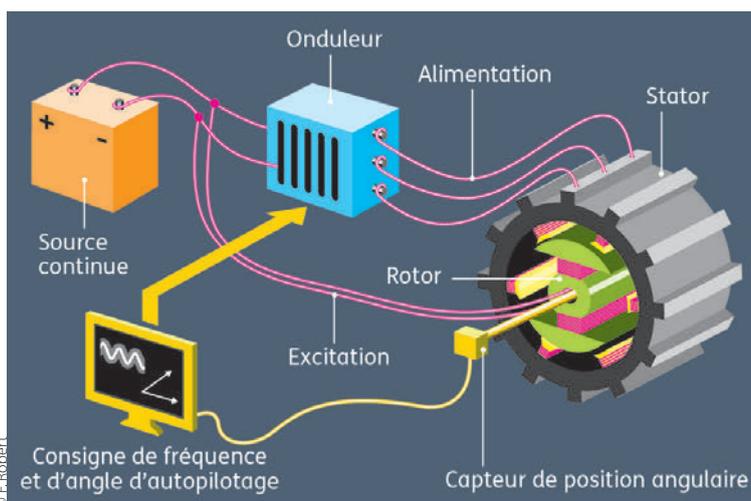
4 Le principe d'un moteur synchrone

Le moment magnétique M de l'aimant placé dans un champ magnétique uniforme B est soumis à un couple électromagnétique dont le moment est $Ce = M \wedge B$. C'est le moment magnétique tournant qui entraîne l'aimant en rotation. Pour conserver le couple constant, il faut que l'angle α soit constant, autrement dit que l'aimant et le champ tournant tournent à la même vitesse. D'où le nom de machine synchrone.



5 Le principe d'un moteur synchrone

Le rotor a un moment magnétique représenté en noir, le stator porte des bobinages triphasés qui créent un champ tournant représenté en vert dans l'entrefer de la machine. La vitesse de rotation dépend de la fréquence des courants statoriques et du nombre de paires de pôles magnétiques de la machine.



6 L'autopilotage d'une machine synchrone

Le stator est alimenté en courant alternatif par l'intermédiaire d'un onduleur (convertisseur continu-alternatif). Le rotor est alimenté directement en courant continu (excitation). Le capteur de position permet de connaître la position instantanée du champ rotorique. La consigne de fréquence permet d'imposer la vitesse de la MS. La boucle d'autopilotage constituée du capteur de position et de la commande de l'onduleur assure un angle d'autopilotage α ou ψ constant nécessaire pour la maîtrise du couple électromagnétique.

Obtention du couple dans une machine synchrone

La génération du couple dans une machine synchrone peut se comprendre simplement. Plaçons un aimant de moment magnétique M , libre de tourner autour d'un axe, dans un champ magnétique uniforme B . Le moment magnétique est alors soumis à un couple électromagnétique dont le moment est $Ce = M \wedge B$ 4.

On peut alors déduire aisément que : le moment du couple électromagnétique est maximal pour $\alpha = \pi/2$, le champ magnétique est alors perpendiculaire à l'axe magnétique de l'aimant ; si la direction de B est fixe, l'aimant s'aligne sur la direction de B et le mouvement s'arrête ; pour entraîner l'aimant en rotation continue, il faudra produire un champ magnétique tournant. Si de plus on veut conserver le couple constant, il faudra conserver l'angle α constant, autrement dit : l'aimant et le champ tournant doivent tourner à la même vitesse.

Dans un moteur synchrone 5, le rotor porte des aimants permanents (MSAP) ou un inducteur bobiné (MSRB) et tient le rôle de l'aimant dans l'expérience précédente. Le stator porte trois bobines décalées de $2\pi/3$ dans l'espace et alimentées par trois courants triphasés équilibrés qui créent un champ tournant dans l'entrefer de la machine. Ce champ tourne à la vitesse n_s (en tr.min^{-1}) imposée par la fréquence des courants statoriques f et dépendant de p , nombre de paires de pôles magnétiques de la machine ($f = p.n_s/60$).

En régime permanent, l'expression du moment du couple électromagnétique (Ce) est alors très proche de celle donnée précédemment pour une MCC : $Ce = K\Phi I \cos\psi$. Le coefficient K dépend des caractéristiques de la machine (nombre de paires de pôles magnétiques) ; Φ représente le flux magnétique produit par l'inducteur. Il est proportionnel à l'aimantation M de l'expérience précédente ; I correspond à la valeur efficace en régime permanent du courant dans une phase du stator. I permet de modifier l'amplitude du champ magnétique tournant au stator ; ψ est relié à l'angle α précédent par la relation $\psi = \pi/2 - \alpha$.

Un couple souhaité est alors obtenu, comme pour la MCC, en fixant : la valeur du champ magnétique créé par la roue polaire grâce au courant qui traverse son enroulement (dans le cas d'aimants, cette valeur n'est pas réglable) ; la valeur du courant dans les enroulements statoriques ; la valeur de l'angle entre le rotor et le champ magnétique tournant (α ou ψ). La réalisation de cette dernière condition est confiée à l'autopilotage 6. Un capteur de position est placé sur le stator pour repérer la position du rotor et provoquer l'alimentation des bobines qui convient afin de conserver le champ tournant statorique à la même distance angulaire du champ rotorique. Ce modèle d'autopilotage est limité au fonctionnement en régime permanent ou lentement variable. Pour piloter la MS dans les régimes transitoires, il faut adopter un formalisme plus complexe mettant en jeu les transformations de Park.

Obtention du couple dans une machine asynchrone

Le stator d'une machine asynchrone a la même structure que celui d'une machine synchrone. Les grandeurs statoriques sont alternatives, soit sinusoïdales, soit en forme de créneaux (alimentation par convertisseur). Lorsque les trois courants sont sinusoïdaux, ils créent un champ tournant à la vitesse n_s (en tr.min⁻¹), avec $n_s = f.60/p$ où f est la fréquence des courants statoriques et p le nombre de paires de pôles. Le rotor peut être à cage **7** ou bobiné. Il est constitué d'un circuit de conducteurs en aluminium ou en cuivre court-circuités sur eux-mêmes et d'un circuit magnétique réalisé par un empilement de tôles magnétiques. Le champ tournant statorique crée des courants induits dans les conducteurs du rotor. Ces courants interagissent avec le champ statorique pour créer un couple qui tend à s'opposer à la cause qui lui a donné naissance (loi de Lenz). Le rotor est donc entraîné à la poursuite du champ statorique.

En fonctionnement le rotor tourne à une vitesse $n < n_s$. Si on entraîne le rotor de la machine asynchrone à la vitesse n_s , il n'y a plus de courants induits rotoriques et donc plus de couple. La machine asynchrone est à induction. Son couple moteur ne peut exister que si $n \neq n_s$. On définit alors son glissement comme l'écart relatif des vitesses $g = (n_s - n)/n_s$. Il est de l'ordre de quelques pourcent dans les machines de traction automobiles. L'existence du glissement et le fait que la MAS ne soit alimentée que par le stator compliquent son pilotage en vitesse et en couple. Toutefois, en utilisant le formalisme de Park comme dans le cas de la MS, et moyennant une mesure directe ou indirecte de la vitesse, on arrive à piloter le fonctionnement de la MAS en régime transitoire. Comme précédemment, il est possible de décrire le plan couple-vitesse optimal.

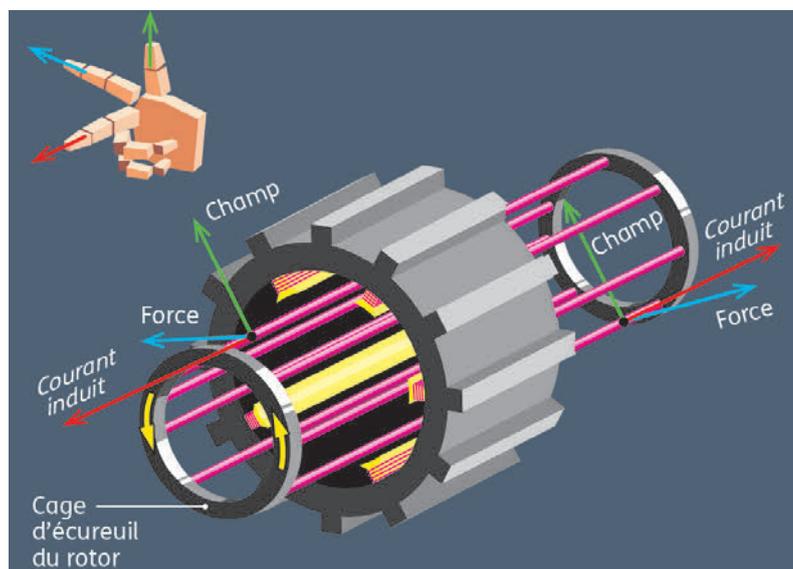
Analyse des limites et optimisation du rendement

Les pertes dans les machines

En régime permanent, les rendements des moteurs électriques sont généralement très bons (supérieurs à 80 % pour les puissances supérieures à quelques dizaines de kW utilisées dans la traction automobile). Un effort constant est tout de même mené pour continuer à améliorer ces rendements dans toutes les phases de fonctionnement en diminuant les sources de pertes et en optimisant le refroidissement **8**. Les pertes dans les machines sont de trois natures : pertes par effet Joule provoquées par la circulation des courants dans le stator et/ou le rotor ; pertes magnétiques qui sont dues aux courants de Foucault (induit) et au phénomène d'hystérésis ; pertes mécaniques dues aux frottements.

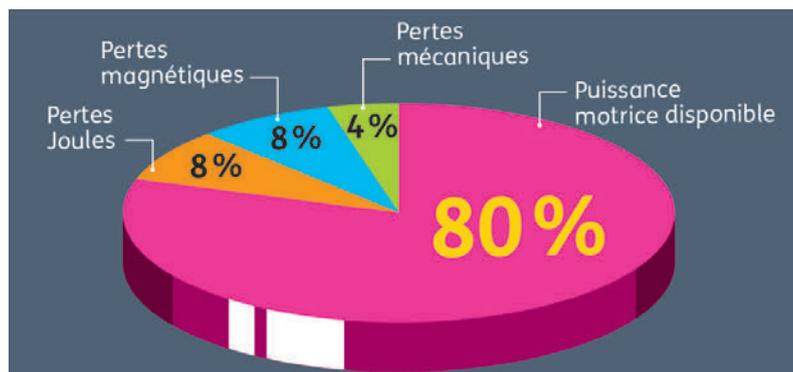
Pertes Joule

Les pertes Joule dans les conducteurs électriques dépendent de la densité surfacique de courant, de la



7 Le moteur asynchrone à cage d'écureuil

Le champ magnétique tournant créé par les bobinages du stator induit un courant dans les conducteurs de la cage d'écureuil du rotor. Ceux-ci sont alors soumis à des forces créant le couple moteur. Le rotor est entraîné à la poursuite du champ du stator avec un certain glissement. D'où le nom de machine asynchrone.



8 Les pertes dans un moteur électrique

Le rendement d'un moteur électrique est le ratio de la puissance électrique absorbée diminuée des différentes pertes sur la puissance électrique absorbée. Les valeurs absolues et relatives des différentes pertes varient avec la nature des moteurs et leur taux de charge.

résistivité du conducteur considéré (cuivre ou aluminium), mais aussi de la géométrie de la section du conducteur.

Lorsqu'on souhaite augmenter la puissance d'une machine, on en vient rapidement à augmenter l'intensité du courant qui traverse ses bobinages. Il devient alors très intéressant d'optimiser la densité de courant admissible dans chaque conducteur.

Dans le cas des machines synchrones et asynchrones, la chaleur produite par effet Joule dans les conducteurs du stator se transfère essentiellement par convection et rayonnement au travers de la surface de l'entrefer et dans une moindre mesure par conduction au travers des matériaux constituant le stator. Au niveau du rotor, le transfert de chaleur se fera lui aussi par l'entrefer ou par conduction au travers de l'arbre moteur. L'augmentation de la densité de courant admissible dans

les conducteurs sera directement liée à la capacité à évacuer efficacement l'énergie produite au travers de l'entrefer ou par conduction à l'intérieur des matériaux.

La forme du conducteur est plus au moins propice à l'augmentation de la densité de courant admissible. En effet, plus la surface d'évacuation sera importante, plus le refroidissement sera aisé. Ainsi, si l'on souhaite augmenter le courant dans un conducteur cylindrique, il est préférable d'utiliser un grand nombre de petits conducteurs qu'un seul conducteur de section plus importante. Ce choix est conforté si l'on doit tenir compte de l'effet de peau qui apparaît lorsque la fréquence des courants atteint quelques kHz (automobile). Par ailleurs, on montre que la densité de courant atteignable dans des conducteurs de section rectangulaire très aplatie (circuits imprimés) est beaucoup plus importante que pour les conducteurs à section cylindrique. La diminution des pertes par effet Joule passe aussi par l'optimisation de la longueur active des bobines. Une bonne géométrie des pôles du rotor de la MS augmente le rapport entre longueur active et totale du conducteur. On définit le coefficient global de remplissage des encoches par le rapport de la surface de cuivre (surface active) sur la surface de l'encoche (classiquement 40 à 50%). L'augmentation de la valeur du coefficient de remplissage a deux effets. D'une part, les pertes Joule augmentent car la concentration du bobinage n'est pas optimale; d'autre part, l'évacuation de la chaleur est plus difficile. Enfin, les propriétés thermiques des isolants électriques présents dans les encoches joueront un rôle important dans l'évacuation des pertes par effet Joule.

Pertes magnétiques

Les pertes magnétiques regroupent les pertes par courants de Foucault qui résultent de la circulation de courants induits dans le matériau magnétique et les pertes par hystérésis dues à l'effet mémoire du matériau magnétique qui entraîne des pertes énergétiques lors des cycles magnétiques. Les premières sont directement liées à la variation temporelle du champ magnétique, c'est-à-dire au phénomène d'induction. Un feuilletage des tôles magnétiques limite la circulation des courants induits. L'épaisseur de ces tôles est très importante car elle intervient au carré dans l'expression des pertes. Les pertes par hystérésis sont elles aussi dépendantes de la fréquence et de la variation d'amplitude du champ magnétique. À titre d'exemple, pour des tôles usuelles de Fe-Si à 3% à grains non orientés et une épaisseur de tôle de 0,5 mm, on obtient sous une amplitude maximum de 1,5 tesla, à 50 Hz, des pertes fer de $6,5 \text{ W.kg}^{-1}$. Par comparaison, des tôles de Fe-Ni (50-50) de 0,1 mm d'épaisseur limiteront dans les mêmes conditions ces pertes à $0,84 \text{ W.kg}^{-1}$. On notera aussi que, ces pertes dépendant de la fréquence, l'utilisation de la ferrite, caractérisée par une forte résistivité à haute fréquence, limite ces pertes que l'on retrouve aussi dans les aimants permanents.

Pertes mécaniques

Les frottements mécaniques dans les machines tournantes sont principalement causés par les points de contacts mécaniques localisés au niveau des systèmes collecteur-balais, bagues-balais ou des paliers.

Les pertes aérodynamiques sont, elles, dues à la rotation du rotor. Pour fixer les idées, on peut en estimer l'importance dans le cas de l'air avec un entrefer de 5 mm. Alors que pour une vitesse périphérique de 100 m/s on trouve des pertes aérodynamiques de 660 W.m^{-2} d'entrefer, pour une vitesse trois fois plus élevée, ces mêmes pertes atteignent $13,7 \text{ kW.m}^{-2}$. Les pertes aérodynamiques, à très grande vitesse, peuvent donc être responsables d'échauffements très importants. La saillance éventuelle du rotor accroît bien entendu ce type de pertes. On peut diminuer ces pertes aérodynamiques en remplaçant l'air par un fluide caloporteur mono ou multiphasique.

Évacuation des pertes

Les pertes Joule et magnétiques sont à l'origine d'échauffements à l'intérieur même des matériaux composant les moteurs. Pour un même matériau, les petits systèmes auront une plus grande capacité à accepter une plus forte densité de pertes. En effet, si par exemple on soumet un matériau magnétique (fer silicium) à un échauffement de 5 K entre le cœur et la surface extérieure, il sera capable d'évacuer un flux thermique de 2 kW.m^{-2} si la distance cœur-surface est de 20 mm, alors que ce transfert ne sera que de 90 W.m^{-2} pour une distance 5 fois plus grande. Cette limitation de la capacité à accepter des pertes volumiques importantes entraînera une limitation de la dimension de la machine ou la nécessité de modifier les conditions de refroidissement en surface.

Limites en vitesses

La vitesse de rotation des moteurs est limitée par leur vitesse périphérique maximale qui dépend principalement de la géométrie et de la nature des matériaux utilisées (cuivre, aluminium, acier...). On peut calculer les ordres de grandeur des vitesses périphériques maximales pour les principaux constituants des machines classiques. Ainsi, on trouve que le collecteur des MCC possède la vitesse périphérique la plus faible (80 m/s), que les MS à aimants permanents voient cette vitesse beaucoup varier en fonction du mode de pose des aimants sur le rotor (de 100 m/s pour des aimants tuiles collés à 230 m/s pour des aimants frettés collés en surface), et les vitesses périphériques maximales (300 m/s) sont atteintes avec des MAS à cage d'écureuil à encoches fermées et des machines à reluctance variable à rotor massif.

Cette frontière de la vitesse périphérique maximale limitera d'autant plus la vitesse de rotation du moteur que le diamètre du rotor sera grand.

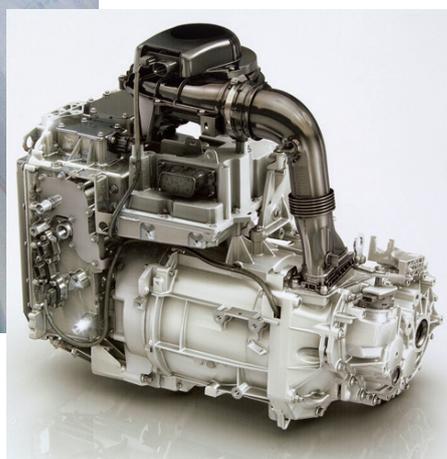
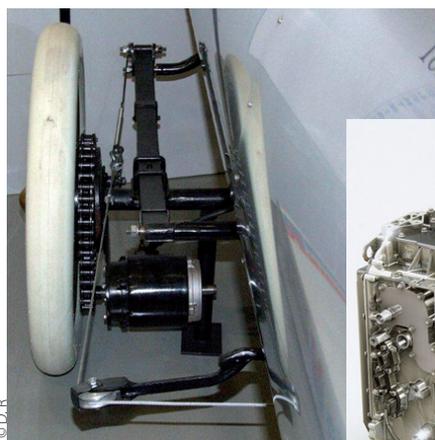
Les différentes technologies

Des problèmes de vibrations rédhibitoires

Une comparaison des performances relatives des différentes technologies de moteur peut être synthétisée dans le plan couple-vitesse issu de la thèse d'Aïman Nouh (UTBM, 26 mars 2008) ⁹. Il apparaît que, du point de vue des rendements, la machine synchrone à aimants permanents (MSAP) est la plus performante en basses et moyennes vitesses. Elle atteint ses limites pour les hautes vitesses car son défluxage est délicat. À l'inverse, du fait de la facilité de défluxage, la machine synchrone à rotor bobiné (MSRB) est, elle, plus performante à haut régime. En comparaison, la MAS obtient des performances moins intéressantes sur tous les régimes. Elle reste tout de même très appréciée par les industriels car c'est la moins chère et la plus robuste des machines.

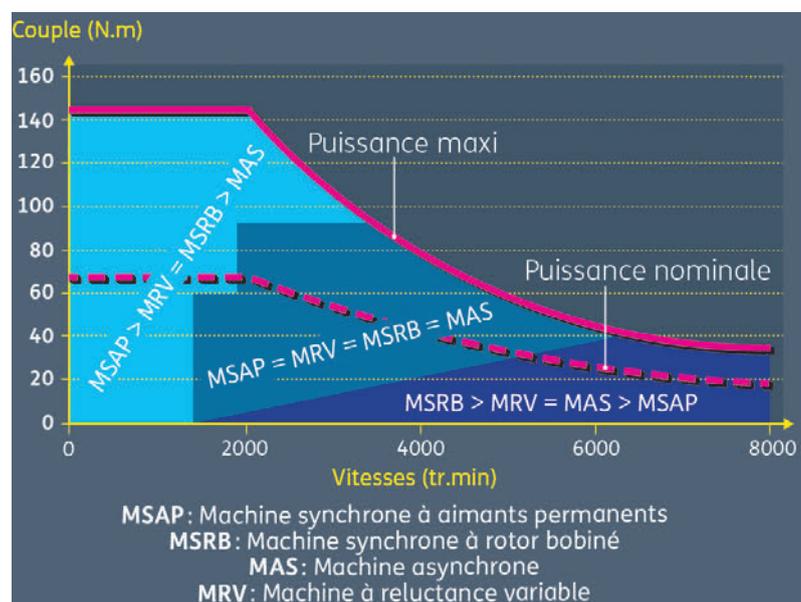
Seule la machine à réluctance variable (MRV) semble réunir toutes les qualités pour convaincre les industriels. Elle allie la robustesse et le faible coût de la MAS aux bonnes performances de la MS. Toutefois, les recherches se heurtent à des problèmes de vibrations trop importants qui sont rédhibitoires pour en faire le moteur des voitures électriques modernes.

Mais la vraie limitation de la traction tout électrique pour l'automobile réside aujourd'hui dans la faible autonomie liée aux technologies actuelles des batteries. Et dans le cas des motorisations hybrides, les contraintes de dimensionnement sont encore plus sévères d'un point de vue thermique et de la compacité, car ces moteurs doivent fonctionner dans l'environnement proche d'un moteur thermique. ■



L'évolution du moteur de traction

115 ans d'évolution séparent les deux moteurs Postel-Vinay de 25 kW (à gauche) qui ont permis à la Jamais contente de Camille Jenatzy d'être la première voiture électrique à dépasser les 100 km/h en 1899 et le groupe motopropulseur R240 de 65 kW qui équipe la Renault Zoé.



9 Les différentes technologies de moteurs électriques de traction

Suivant le type de prestations que l'on attend du moteur de traction, il faut adapter le type de technologies retenu, notamment dans les zones extrêmes d'utilisation.

Vocabulaire

• Flux magnétique

Exprimé en webers et souvent noté Φ , c'est une grandeur physique mesurable liée à l'intensité et à la répartition spatiale du champ magnétique. Ce flux est par définition le produit scalaire du champ magnétique par le vecteur surface qu'il traverse.

• Régime moteur

Nombre de rotations effectuées par un moteur par unité de temps. C'est donc la vitesse de rotation du moteur exprimée en $\text{tour} \cdot \text{min}^{-1}$.

• Moteur à réluctance variable

Moteur dont le rotor se positionne dans la direction de plus faible réluctance, c'est-à-dire d'inductance la plus élevée. Il se rapproche de la machine synchrone par le mode de pilotage et de la machine asynchrone par ses qualités de robustesse.

• Défluxage

Le défluxage d'une machine tournante consiste à diminuer le flux inducteur pour augmenter sa vitesse au-delà de sa valeur nominale sans augmenter la tension d'alimentation. Le couple maximal de la machine s'abaisse donc, mais le fonctionnement à isopuissance reste possible.

• Groupe motopropulseur électrique (GMPE)

Le GMPE est le regroupement dans une unité compacte du moteur électrique et du réducteur associé, ainsi que de l'électronique de commande et de puissance gérant à la fois le fonctionnement du moteur, son interconnexion avec la batterie et la recharge de celle-ci, via le moteur agissant en frein ou le secteur.