

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
Université Mohamed Khider de Biskra

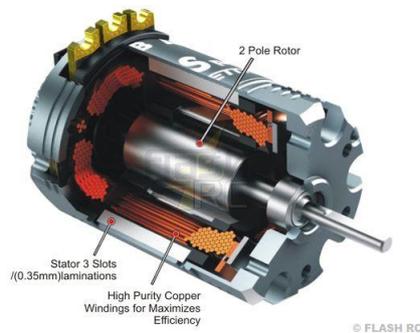


Faculté des Sciences et de la  
Technologie Département De Génie  
Electrique

Filière : Electromécanique

Matière : *Machines Spéciales*

*Partie 4 : Le moteur « Brushless »  
Moteur sans balais*



1<sup>er</sup> Année Master Electromécanique

*2019\_2020*

## **Module: Machines spéciales**

### Avant propre

Au terme de cette l'étudiant(e) sera en mesure d'acquérir une connaissance approfondie du fonctionnement des moteurs brushless (sans balais) à cage tournante sont les moteurs les plus utilisés en modélisme.

Ce cours traite les principes de fonctionnement du moteurs brushless, Leur niveau de performance peut désormais dépasser celui des moteurs thermiques. Ils procurent un fort couple leur permettant d'entraîner de grandes hélices qui auront un meilleur rendement que des hélices plus petites. Economiques, puissants, fiables et légers ils présentent bien souvent le meilleur compromis et leurs domaines d'utilisation

## IV.1. INTRODUCTION.

Le moteur « brushless », moteur sans balais, tire son nom par opposition au moteur à courant continu qui dispose de bobinages sur le rotor et nécessite un collecteur pour alimenter ces bobinages. Ce collecteur est un point faible du moteur à courant continu : pertes énergétiques (mécaniques et électriques), usure, étincelles, etc.

Historiquement, le moteur à courant continu est prisé pour les applications nécessitant un réglage de la vitesse ou du couple, tandis que les moteurs asynchrones sont utilisés pour les applications à forte puissance, vitesse constante et nécessitant des moteurs robustes. Les champs d'applications des différents moteurs s'élargissent progressivement grâce aux innovations sur l'électronique de puissance et les puissances de calcul, qui permettent de contrôler le courant de façon très flexible. La machine synchrone, incapable de démarrer seule sur une source de courant alternative, est depuis longtemps utilisée uniquement comme génératrice. Avec l'apparition d'onduleurs à fréquence variable, elle est désormais utilisée comme moteur. Sa proximité de comportement et de fonctionnement (en remplaçant la commutation par collecteur par une commutation électronique) avec le moteur à courant continu conduisent à l'appeler « moteur à courant continu sans balais » : Brushless.

Les moteurs brushless ont beaucoup d'avantages par rapport au moteur à courant continu : l'absence de balais conduit à de meilleures performances énergétiques et une meilleure fiabilité. Les bobinages étant sur le stator, l'évacuation de la chaleur est plus facile et l'inertie est réduite (les bobinages de cuivre sur le rotor des moteurs à courant continus sont très lourds), ce qui améliore encore les performances énergétiques dans les applications nécessitant des accélérations et décélérations. Le rapport poids/puissance est meilleur et le coût des commandes électroniques triphasées est désormais inférieur au coût d'un collecteur. Pour les applications pointues, la commande de machine synchrone permet de contrôler précisément le champ magnétique dans la machine, et ainsi le couple généré, bien mieux que sur un moteur à courant continu. Aussi, le moteur brushless remplace progressivement le moteur à courant continu dans certains champs d'application, en particulier lorsque la masse ou la vitesse de rotation sont des critères importants.

La réalité technologique ne doit cependant pas être ignorée : les applications modernes mettent en œuvre des moteurs brushless et il sera de plus en plus difficile d'en faire abstraction. Cette technologie. Il est fort probable que ces notions d'électrotechnique se généralisent dans les cours, ainsi que dans les travaux pratiques. Quelle que soit la spécialité d'origine, les professeurs de sciences et

techniques industrielles ont tout intérêt à rester en veille technologique et à s'approprier les connaissances utiles à propos des moteurs brushless.

## IV.2. UTILISATION

Les moteurs brushless sont largement utilisés dans l'industrie, en particulier dans les **servo-mécanismes** des machines-outils et en robotique, où ils ont fait disparaître les machines à courant continu. On trouve de tels moteurs pour des couples de quelques newtons mètres jusqu'à plusieurs centaines de Nm et des puissances de quelques centaines de watts jusqu'à des centaines de kilowatts.

Ils équipent en particulier les disques durs et les graveurs de DVD.

Une forme simplifiée et populaire de ces technologies est utilisée dans les ventilateurs assurant le refroidissement de systèmes électroniques, dont les micro-ordinateurs. Dans ce cas, le stator (bobiné) est à l'intérieur et le rotor (comportant les aimants) à l'extérieur.

Ces moteurs sont utilisés depuis les années 1990 pour les systèmes de ventilation/climatisation automobiles du fait de leur silence de fonctionnement. Aujourd'hui, on les retrouve dans la plupart des motos, scooters et voitures électriques, des véhicules hybrides, des vélos à assistance électrique, mais aussi dans les roues de certains modèles de trottinettes électriques.

Ils sont aussi très utilisés en modélisme pour faire se mouvoir des modèles réduits d'avions, d'hélicoptères (aéromodélisme) ainsi que de petits drones. Ils sont moins bruyants que les moteurs avec balais et leur rapport poids/puissance est très favorable à leur utilisation dans ce domaine.

On les retrouve également dans les motorisations d'antennes paraboliques.

## IV.3. BRUSHLESS

Les moteurs brushless réduisent certains problèmes liés aux moteurs à balais les plus courants (durée de vie limitée pour des applications à usage intensif) et leur conception mécanique est beaucoup plus simple (sans balais). Le contrôleur de moteur utilise des capteurs à effet Hall pour détecter la position des rotors, et le contrôleur peut ainsi commander le moteur de façon précise via le courant dans les bobines du rotor pour réguler la vitesse. Les avantages de cette technologie sont une longue durée de vie, peu d'entretien et un haut rendement (85-90 %), tandis que les inconvénients sont des coûts élevés et des contrôleurs plus compliqués. Ces types de moteurs sont généralement utilisés dans le contrôle de positionnement et de vitesse avec des applications telles que les ventilateurs, pompes et compresseurs, qui nécessitent fiabilité et robustesse.

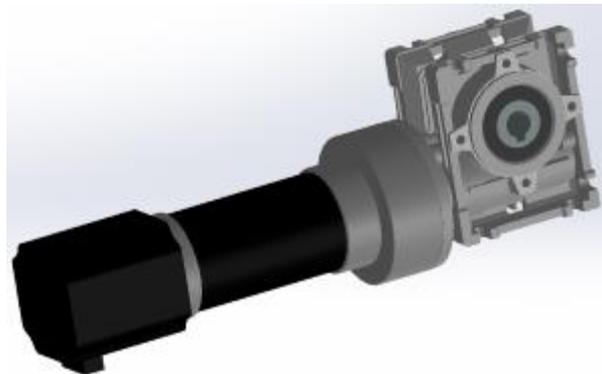
Les Moteurs pas à pas font partie de la catégorie des moteurs brushless. Ils sont principalement utilisés dans le contrôle de position en boucle ouverte, avec des utilisations allant des imprimantes jusqu'à des applications industrielles telles que les équipements de placement à grande vitesse..



**Figure IV.1.** Moteurs pas à pas

#### IV.4. QUELS SONT LES AVANTAGES D'UN MOTEUR BRUSHLESS ?

Le moteur brushless, dans sa généralité, présente plusieurs avantages :



**Figure IV.2.** Le moteur brushless

1. **Une durée de vie allongée** : Une utilisation optimisée du moteur permettra d'accroître de manière importante la durée de vie de vos équipements.
2. **Confort d'utilisation** : Le moteur étant plus petit et permettant un encombrement moins important qu'un moteur asynchrone, le moteur brushless s'adaptera très bien sur vos lignes.

3. **Gestion de la vitesse** : Le moteur brushless permet une plage de réglages importante en conservant un couple quasi constant.
4. **Faible consommation d'énergie** : consommation d'énergie divisée par 10 à 15
5. **Utilisation simplifiée** : Réglage électronique des paramètres moteur (accélération, vitesse, ralentissement)

#### IV.5. PRINCIPE DES MOTEURS BRUSHLESS.

Un moteur Brushless entre dans la catégorie des machines alternatives synchrones. La figure 1 montre une classification des machines électriques. Le premier niveau distingue la machine à courant continu (bien connue des professeurs de CPGE...) et les machines alternatives. Le moteur universel est un cas particulier de moteur fonctionnant aussi bien (ou aussi mal pourrait-on dire) sur courant continu que sur courant alternatif.

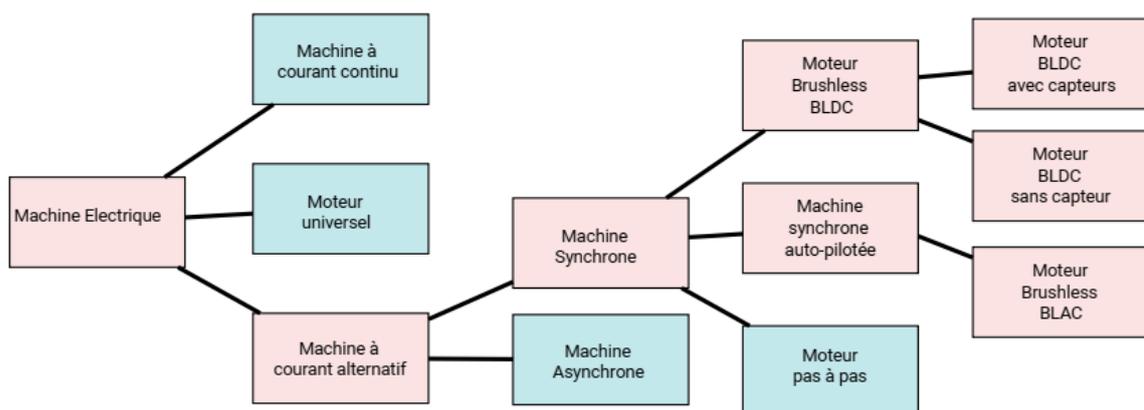


Figure IV.3. Classification des moteurs électriques

Parmi les machines alternatives, le second niveau distingue les machines synchrones et asynchrones. Parmi les machines synchrones, la machine synchrone auto-pilotée correspond au moteur brushless à commande sinusoïdale (BLAC, Brushless Alternative Current), tandis que le moteur BLDC (BrushLess Direct Current) correspond à un moteur brushless à commande en créneau.

Dans le cas du BLCD, la commutation peut être commandée à partir d'une mesure par capteurs à effet Hall à 6 points par tour, ou encore à partir d'une mesure de force contre-électromotrice (moteurs dits sans capteurs : « sensorless »). Dans le cas du BLAC, il est nécessaire d'avoir une bien meilleure résolution (de l'ordre de 4000 pts par tour, par un synchro-résolveur), ce qui implique un coût et une complexité supplémentaire.

## IV.6. LES DIFFERENTS TYPES DE MOTEUR BRUSHLESS

Selon les applications, il existe une grande variété de moteurs brushless avec des caractéristiques de couples, vitesses, inertie différentes en fonction de leurs constitutions.

### IV.6.1. MOTEURS BRUSHLESS OUTRUNNER

**On appelle « outrunner » les moteurs brushless dont le rotor est autour du stator.**

Cette configuration est intéressante en termes de couple moteur, car les aimants sont disposés sur un diamètre important, ce qui crée un bras de levier très intéressant. De plus, cette disposition permet de placer facilement plusieurs séries d'aimants (jusqu'à 32 pôles sur certains moteurs brushless outrunners) et de bobines.

Leur fréquence de rotation est donc plus faible mais le couple très élevé.

Ces moteurs brushless outrunners sont souvent utilisés dans des applications qui nécessitent un fort couple, car ils peuvent être reliés à la charge sans nécessiter de dispositif de réduction Leur coefficient Kv est relativement faible par rapport aux autres types de moteurs brushless.



**Figure IV.4.**Rotor et stator d'un moteur brushless outrunner

Moteur Industrie

#### IV.6.5. MOTEURS BRUSHLESS INRUNNER

**Contrairement au type précédent, les moteurs brushless inrunners ont le rotor à l'intérieur du stator.**

Ils n'ont généralement qu'une seule paire de pôles sur le rotor, et 3 bobines au stator. L'inertie du rotor est beaucoup plus faible que pour un moteur outrunner, et les vitesses atteintes par ce type de moteur sont beaucoup plus élevées (Kv jusqu'à 7700tr/min/V).

La gestion électronique de la commutation est par contre plus simple car le rotor tourne à la même fréquence que le champ magnétique.

Le couple des moteurs brushless inrunners est plus faible que pour un outrunner car les aimants sont sur un diamètre plus petit à taille de moteur égale.

Ce type de moteur brushless est très utilisé dans l'industrie car il se rapproche beaucoup d'un moteur à courant continu à balais et collecteur.



Figure IV.5. Moteurs brushless inrunner

Moteur Industrie

#### IV.7. FONCTIONNEMENT

Les bobines sont alimentées de façon séquentielle. Cela crée un champ magnétique tournant à la même fréquence que les tensions d'alimentation.

L'aimant permanent du rotor cherche à chaque instant à s'orienter dans le sens du champ.

Pour que le moteur brushless tourne les tensions d'alimentation doivent être adaptées continuellement pour que le champ reste en avance sur la position du rotor, et ainsi créer un couple moteur.

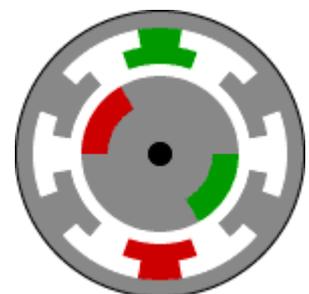


Figure IV.6. Fonctionnement du moteur brushless|

L'animation ci-contre montre le principe du champ tournant.

Vu de l'extérieur, il fonctionne en courant continu.

Des capteurs (à *effet hall*) sont utilisés pour connaître à tout moment la position du rotor et adapter en conséquence l'alimentation des bobines et le champ magnétique.

Le capteur va détecter le passage d'un pôle magnétique et à partir cette information le circuit de commande électronique assurera la commutation des bobines.



Figure IV.7. Moteur Brushless industriel

Le moteur brushless fonctionne à partir de trois sources de tensions variables, fournies par un onduleur, et permettant de générer un champ magnétique tournant. Le rotor, généralement équipé d'un aimant permanent, tend à suivre le champ magnétique tournant. La figure 2 montre l'architecture du moteur et de son onduleur.

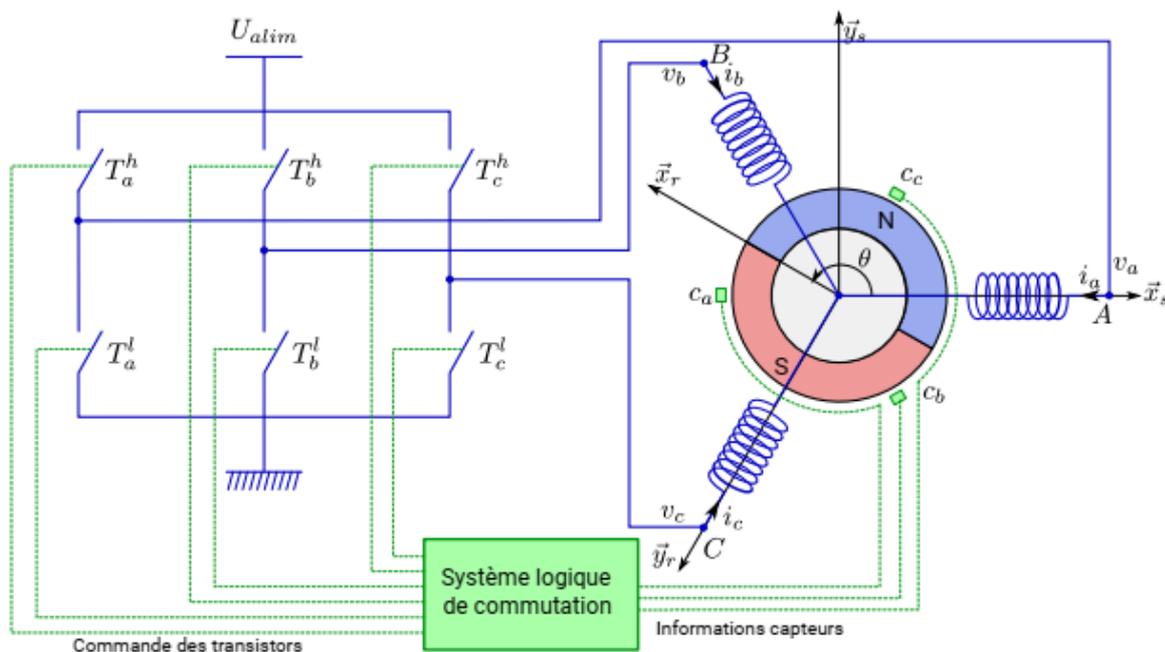


Figure IV.8. Fonctionnement de l'onduleur et du moteur brushless

Dans le cas simple du moteur BLDC, à chaque commutation, deux phases sont reliées respectivement à la tension d'alimentation et à la masse, et une phase n'est pas connectée. Prenons l'exemple de la figure 3, la phase A n'est pas reliée, la phase B est reliée à la tension d'alimentation et la phase C est reliée à la masse. Un courant parcourt les bobines de B vers C et génère un champ magnétique statorique  $\vec{B}$  dans le moteur dirigé suivant  $\vec{y}_s$ . Le rotor supporte un aimant dont le moment magnétique  $\vec{m}$ , orienté du sud vers le nord, tend à s'aligner avec le champ magnétique statorique en tournant dans le sens trigonométrique.

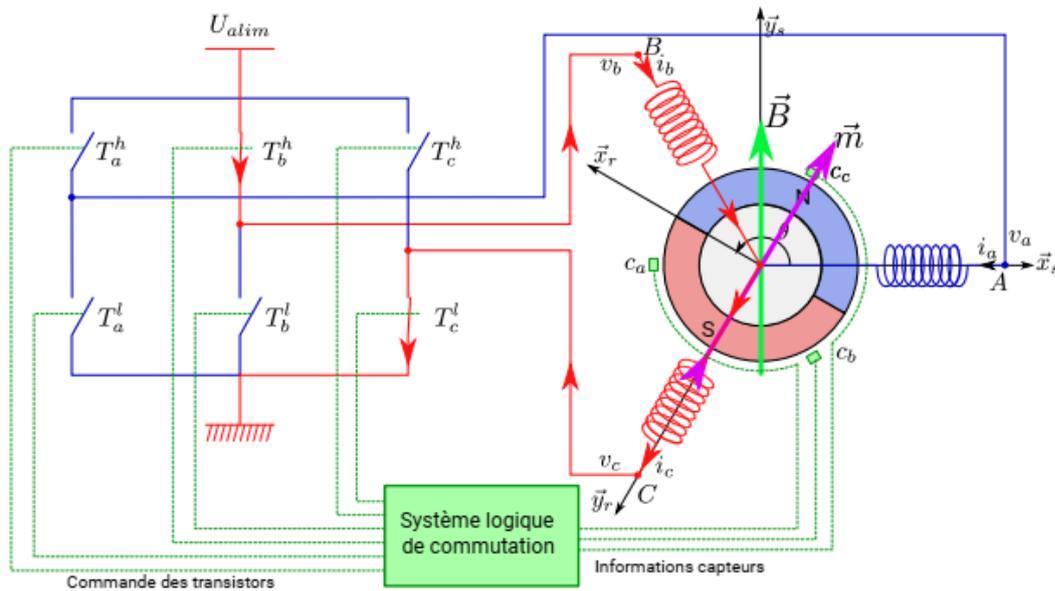


Figure IV.9. Exemple de situation de commutation

Dès que le rotor s'approchera d'  $\vec{y}_s$  la commutation sera modifiée pour faire circuler le courant de B vers A, le champ magnétique statorique  $B$  tourne de  $\Rightarrow$  6. de façon à attirer le rotor et poursuivre la rotation dans le sens trigonométrique. L'angle entre  $m$  et  $B$  conduit à un couple magnétique  $C_m = m \wedge B$ .

#### IV.8. ARCHITECTURE ET REPRESENTATION.

Selon les critères de puissance, d'encombrement, ou de qualité, les bobinages des moteurs sont différents. Deux architectures se trouvent couramment : l'organisation des bobinages répartis sur plusieurs encoches (figure 4, photo de gauche, sur les moteurs relativement puissants) ou au contraire des bobines isolées sur une encoche (photo de droite, sur les petits moteurs à bas coût). La représentation figure 2 s'approche de la photo de droite



Figure IV.10. Bobinages de différents moteurs

Les électrotechniciens utilisent cependant d'autres modes de représentation, plus conforme à l'organisation de la photo de gauche, où les bobinages apparaissent dans le plan sous la forme de deux conducteurs normaux au plan. Ainsi sur la figure 5, le bobinage A d'axe horizontal suivant  $\vec{x}_s$  est représenté par un conducteur en haut, orienté par une normale sortante, et un conducteur en bas, orienté par une normale rentrante, le tout formant une boucle de normale  $\vec{x}_s$  autour du rotor.

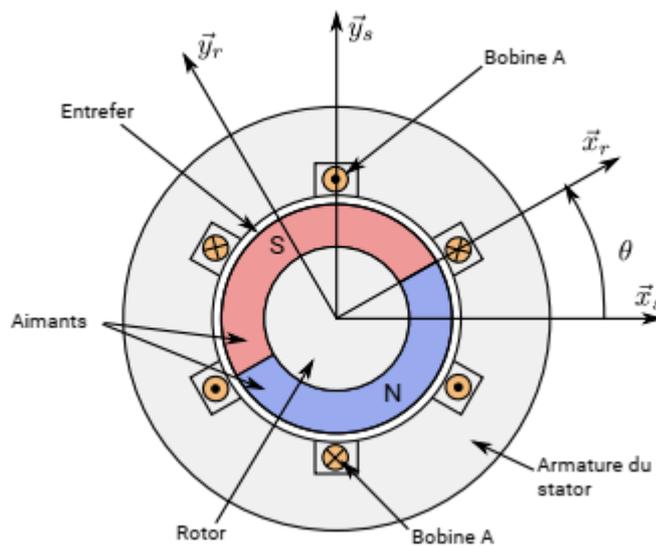


Figure IV.11.Représentation des bobinages par les conducteurs

Sur les moteurs brushless, les bobinages sont toujours sur le stator. Le rotor est en général constitué d'un aimant permanent, mais il peut aussi prendre la forme d'un électro-aimant, alimenté en courant continu, qui nécessite alors des balais pour être alimenté.



Ce type de moteur électrique élimine tous les inconvénients du moteur à courant continu classique : problèmes de commutation au niveau du collecteur, défretage, inertie, refroidissement (les pertes joules étant situées au stator elles sont plus faciles à évacuer), puissance massique nettement plus grande, géométrie, durée de vie ; en particulier l'indice de protection (IP) peut être augmenté par rapport aux machines à courant continu du fait de l'absence de balais.

À performances égales, son rendement est toujours meilleur, ceci étant dû en partie à l'absence de pertes mécaniques et électriques liées aux balais (surtout lors de faibles charges). Mais aussi la plupart du temps à son inertie notablement réduite — en particulier pour les modèles utilisant des aimants samarium-cobalt ou néodyme-fer-bore — par rapport à une machine équivalente à courant continu, ce paramètre étant prépondérant dans de nombreuses applications, en particulier dans les phases d'accélération.

Toujours à performances égales, le moteur sans balais est d'un prix de revient inférieur à celui de la machine à courant continu du fait du remplacement du collecteur et des balais par un capteur électronique d'un coût très réduit. Pour les petites puissances, ce capteur assure les deux fonctions de détection de la position rotorique et de commutation du courant. Dans ce cas, le fonctionnement est identique, vu de l'extérieur, à une machine à courant continu : il suffit de faire varier la tension d'alimentation pour faire varier la vitesse de rotation et dans de nombreuses utilisations ceci ne nécessite pas le recours à un variateur électronique de vitesse (petits ventilateurs par exemple, les capteurs à effet Hall incorporés au stator assurant également la commutation des phases).

## IV.10. CONCLUSION

Pour la grande majorité des applications nécessitant une commande et une régulation électronique du couple, de la vitesse et/ou de la position, les avantages du moteur sans balais sont tels qu'il a complètement remplacé la machine à courant continu et, en liaison avec les progrès de l'électronique de puissance (par exemple les IGBT), le prix de revient de ces solutions s'en est trouvé réduit dans le même temps que leurs performances ont été notablement améliorées.