

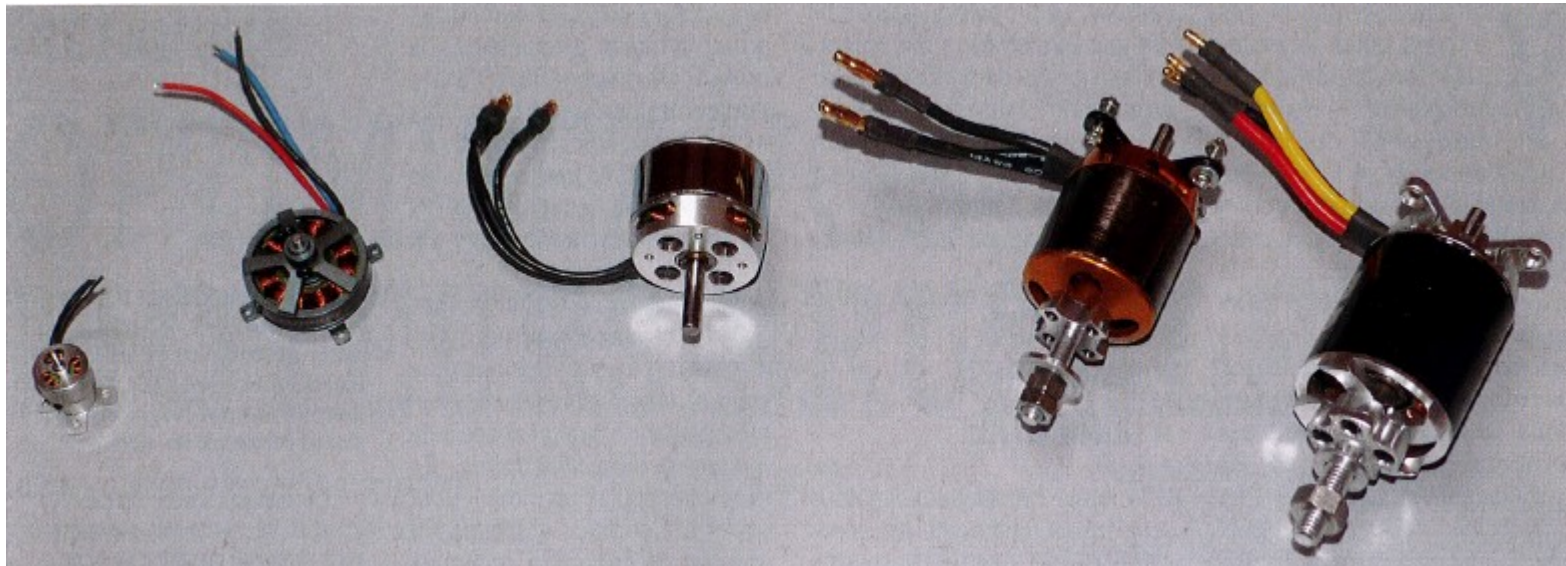
MOTEURS BRUSHLESS

4ème année AE-SE Année 2020-2021

Plan : les moteurs brushless

- I] Généralités sur les moteurs brushless*
- II] Fonctionnement d'un moteur brushless*
- III] Dimensionnement d'une motorisation brushless*
- IV] Conclusion*
- V] Bibliographie*

Les moteurs brushless



(source [8])

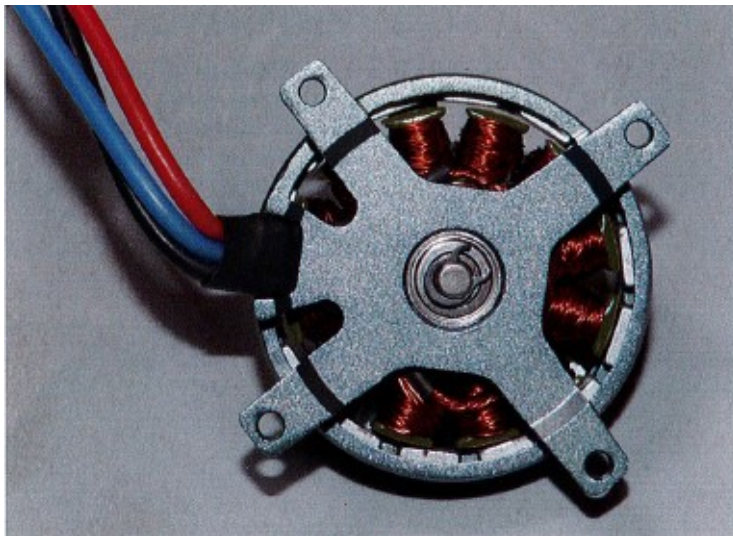
I] Généralités sur les moteurs Brushless

I.1] Classification des moteurs brushless

Les moteurs brushless sont des machines synchrones à aimants permanents

- Brushless $\Leftrightarrow$ sans balais
- De faible puissance ($P \leq$ quelques centaines de W)

Modèles à cage tournante « outrunner » :
Le rotor est autour du stator



(source [8])

Modèles à rotor interne « inrunner » :
Le rotor est à l'intérieur du stator



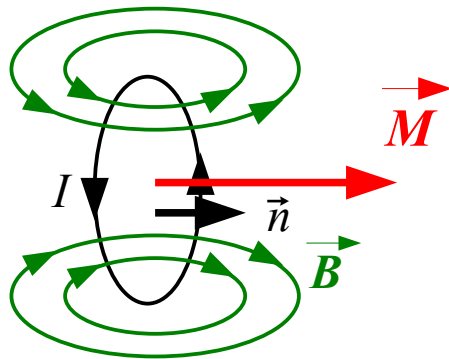
(source [8])

I] Généralités sur les moteurs Brushless

I.2] Quelques principes physiques

Notion de moment magnétique

Cas d'une bobine

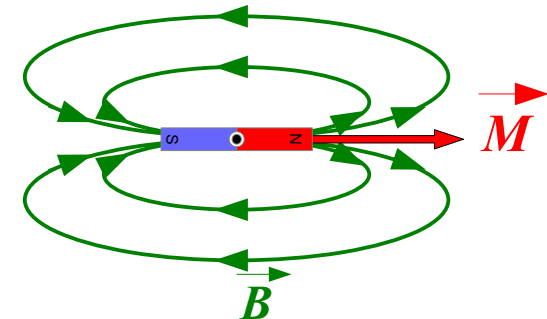


Cas général :
$$\vec{M} = I \cdot \iint_S \vec{n} d^2 S$$

Cas d'une bobine plane de surface S :
$$\vec{M} = I \cdot S \cdot \vec{n}$$

$\vec{n}$ = vecteur unitaire normal au plan de la spire et orienté selon la règle du tire-bouchon

Cas d'un aimant permanent



Rappel : les lignes de champ B entrent par le pôle sud et sortent par le pôle nord.

$\vec{M}$ est orienté dans le même sens que les lignes de champ créées par l'aimant.

$\vec{M}$ = moment magnétique du dipôle

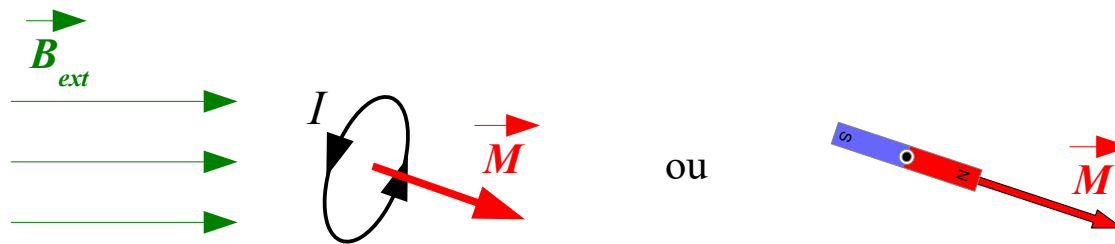
= grandeur vectorielle qui permet de caractériser l'orientation et l'intensité d'une source magnétique

I] Généralités sur les moteurs Brushless

I.2] Quelques principes physiques

Action d'un champ magnétique extérieur sur un dipôle magnétique

On soumet le dipôle (de moment magnétique M) à un champ B extérieur constant.



Énergie potentielle d'interaction magnétique : $E_{pm} = -\vec{M} \cdot \vec{B}_{ext}$

==> Le système tend à évoluer vers un état d'équilibre stable, pour lequel l'énergie potentielle d'interaction magnétique est minimale.

==> Naturellement, le moment magnétique M va avoir tendance à s'aligner avec le champ B_{ext} auquel il est soumis.

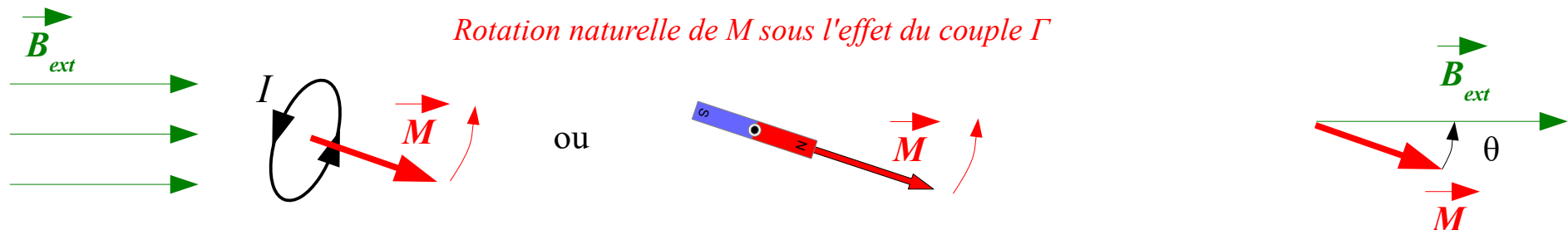
I] Généralités sur les moteurs Brushless

I.2] Quelques principes physiques

Action d'un champ magnétique extérieur sur un dipôle magnétique

Couple exercé par le champ B_{ext} sur le dipôle magnétique : $\vec{\Gamma} = \vec{M} \wedge \vec{B}_{ext}$

↑
Produit vectoriel



=> Le couple exercé par le champ B_{ext} sur le dipôle magnétique tend à aligner le vecteur M avec le champ B_{ext} .

Remarque: $|\vec{\Gamma}| = |\vec{M}| \cdot |\vec{B}_{ext}| \cdot |\sin(\theta)|$ $\Leftrightarrow$ le couple Γ est maximum lorsque M et B_{ext} sont orthogonaux : $\theta = \pm \frac{\pi}{2}$

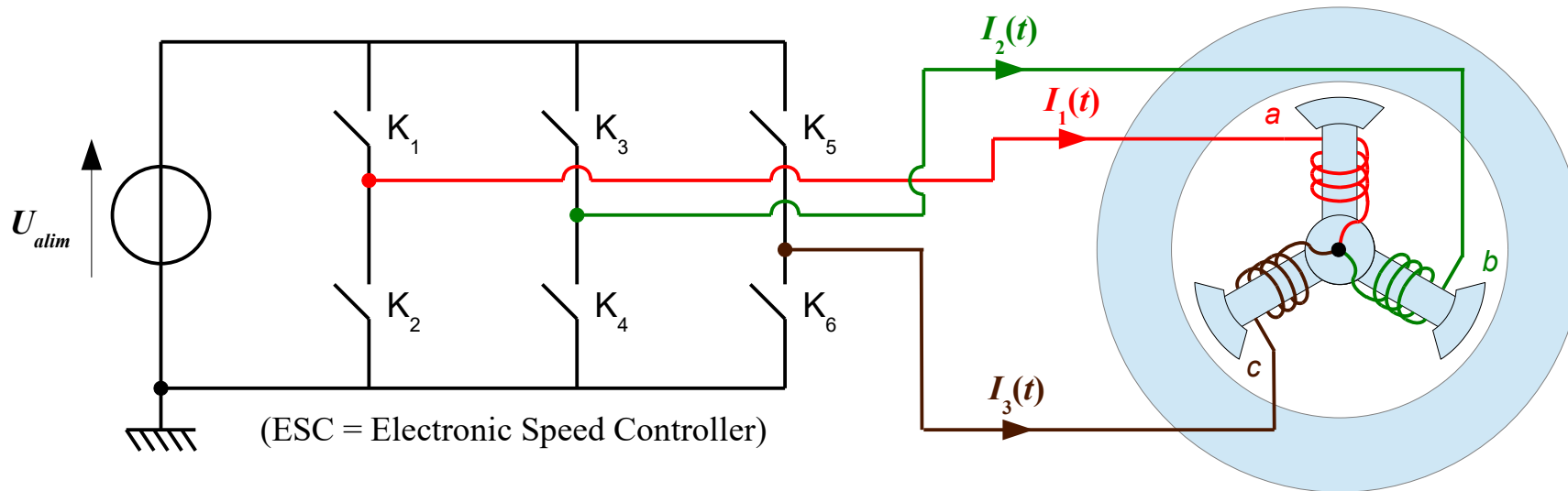
II] Fonctionnement d'un moteur brushless

Les moteurs brushless ne sont pas des machines synchrones conventionnelles :

- Si p est le nombre de paire de pôles du rotor (p pôles nord et p pôles sud intercalés) alors, le nombre de bobinages au stator n'est pas obligatoirement égal à $3 \cdot p$.
 - Les moteurs brushless sont alimentés par un onduleur triphasé de tension qui commute de manière séquentielle (pas de PWM) : chacune des 3 phases statoriques est déconnectée à tour de rôle.
(ESC = Electronic Speed Controller = contrôleur brushless)
- ==> le champ B statorique tourne par à coups dans l'entrefer.

II] Fonctionnement d'un moteur brushless

II.1] Étude de la propagation du champ B statorique dans l'entrefer



Le champ B statorique « saute » d'une position vers une autre :

K_1	K_1	--	K_2	K_2	--
K_4	--	K_3	K_3	--	K_4
--	K_6	K_6	--	K_5	K_5

II] Fonctionnement d'un moteur brushless

II.1] Étude de la propagation du champ B statorique dans l'entrefer

vidéo d'animation expliquant les séquences de fonctionnement du moteur brushless [5].

<https://www.youtube.com/watch?v=dwTVihcA2C8>

Pour retrouver cette vidéo sur internet :

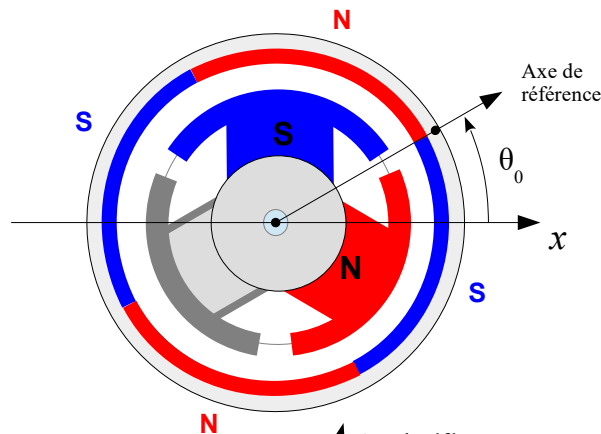
Moteur de recherche → Block commutation of a brushless maxon EC-motor

II] Fonctionnement d'un moteur brushless

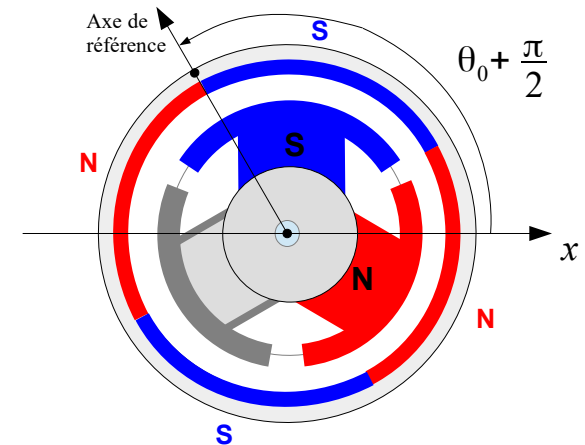
II.2] Couple exercé par le champ statorique sur le rotor

On considère la première phase de fonctionnement : K_1 et K_4 passants.

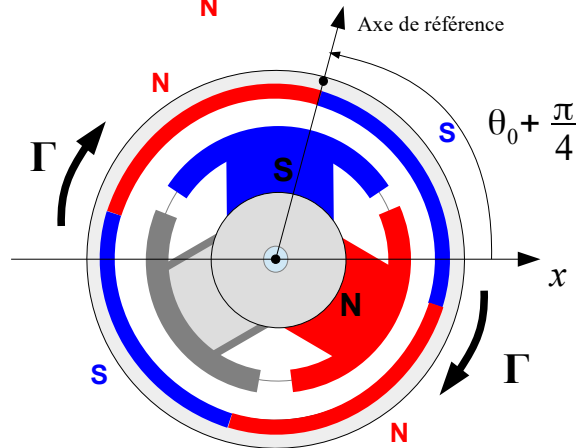
1) Position d'équilibre stable : couple nul



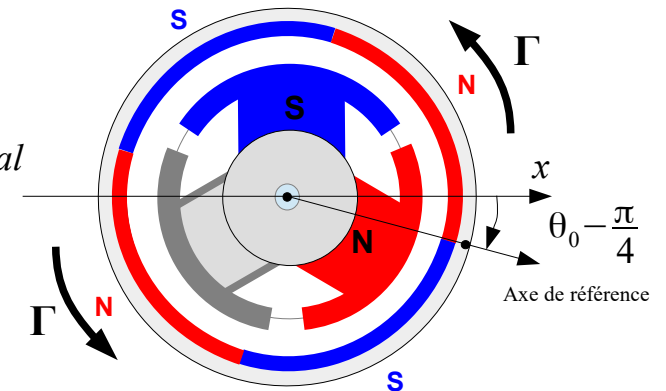
2) Position d'équilibre instable : couple nul



3) Position de déséquilibre : couple maximal négatif



4) Position de déséquilibre : couple maximal positif



II] Fonctionnement d'un moteur brushless

II.3] Principe de l'auto-pilotage

Pour entretenir sa rotation, il faut maintenir le rotor dans un état de déséquilibre permanent (cas n°3 ou 4).

==> L'auto-pilotage consiste à commuter l'onduleur au moment adéquat, de manière à maintenir à tout instant le couple le plus élevé possible.

==> Nécessité de connaître la position angulaire du rotor grâce à des capteurs.

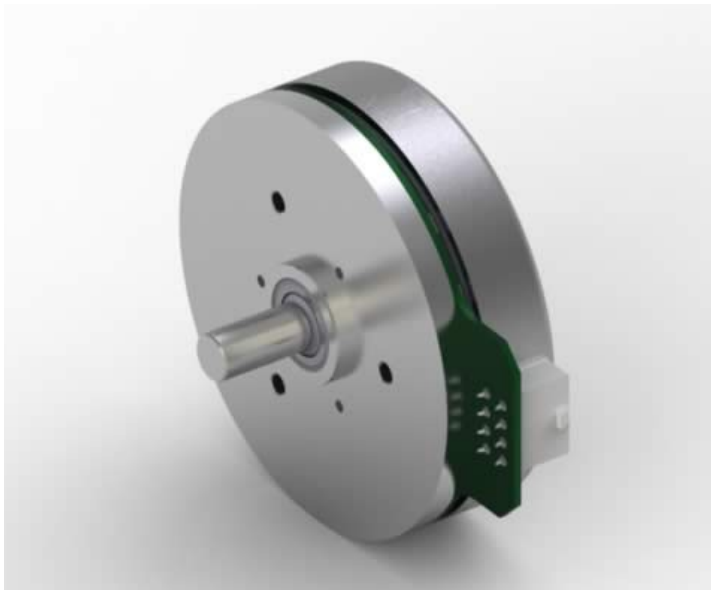
Les deux types de capteurs les plus courants :

- Capteurs optiques,
- Capteurs à effet Hall.

II] Fonctionnement d'un moteur brushless

II.4] Stratégie de commande

Étudions le cas du moteur EC-90 FLAT (Maxon)



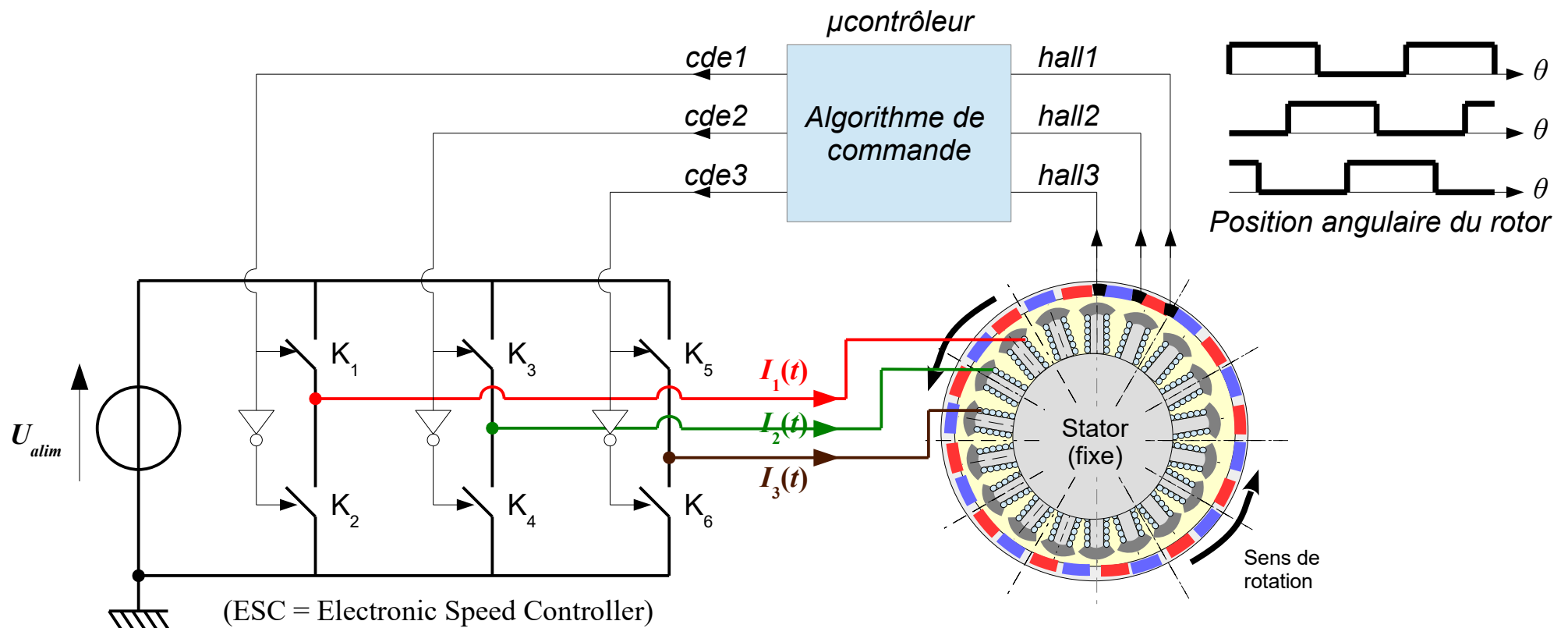
(source [3])

- Moteur de type outrunner,
- $p = 12$ paires de pôles au rotor (12 pôles Nord et 12 pôles Sud intercalés),
- 18 enroulements au stator (=6 enroulements par phase),
- Moteur équipé de 3 capteurs à effet hall, qui renseignent sur la position angulaire du rotor

II] Fonctionnement d'un moteur brushless

II.4] Stratégie de commande

Mise en œuvre de l'auto-pilotage :

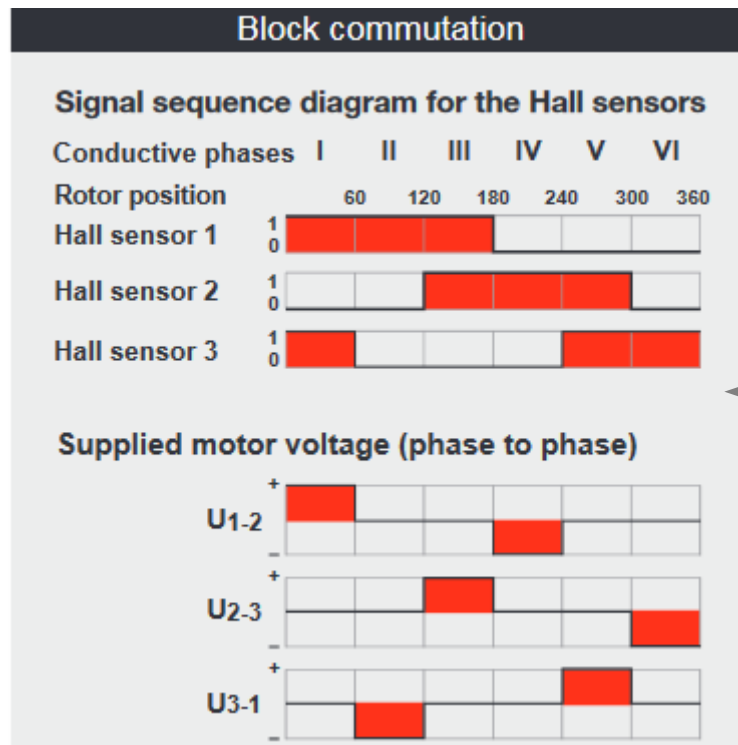


$\Rightarrow$ L'algorithme de commande génère les ordres de commande $cde1$, $cde2$ et $cde3$ en fonction des retours capteurs $hall1$, $hall2$ et $hall3$.

II] Fonctionnement d'un moteur brushless

II.4] Stratégie de commande

Mise en œuvre de l'auto-pilotage :



Note d'application :

Le constructeur indique quels bras de l'onduleur on doit activer en fonction des valeurs des signaux renvoyés par les 3 capteurs de position.

(source [4])

II] Fonctionnement d'un moteur brushless

II.4] Stratégie de commande

Mise en œuvre de l'auto-pilotage :

vidéo d'animation expliquant les séquences de fonctionnement du moteur brushless multipolaire [6] :

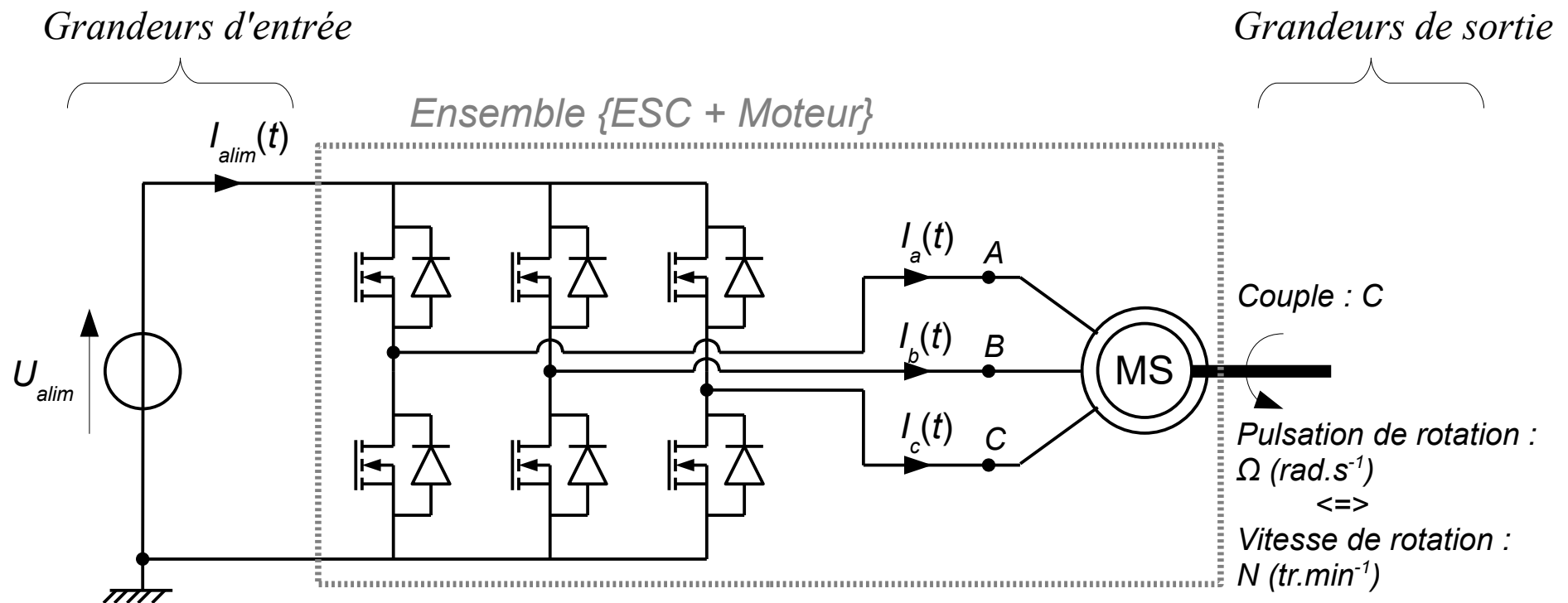
https://www.youtube.com/watch?v=Z7sdU_ybhqc

Pour retrouver cette vidéo :

Moteur de recherche → Commutation multi-pole maxon EC-motor

III] Dimensionnement d'une motorisation brushless

III.1) notion de K_v :

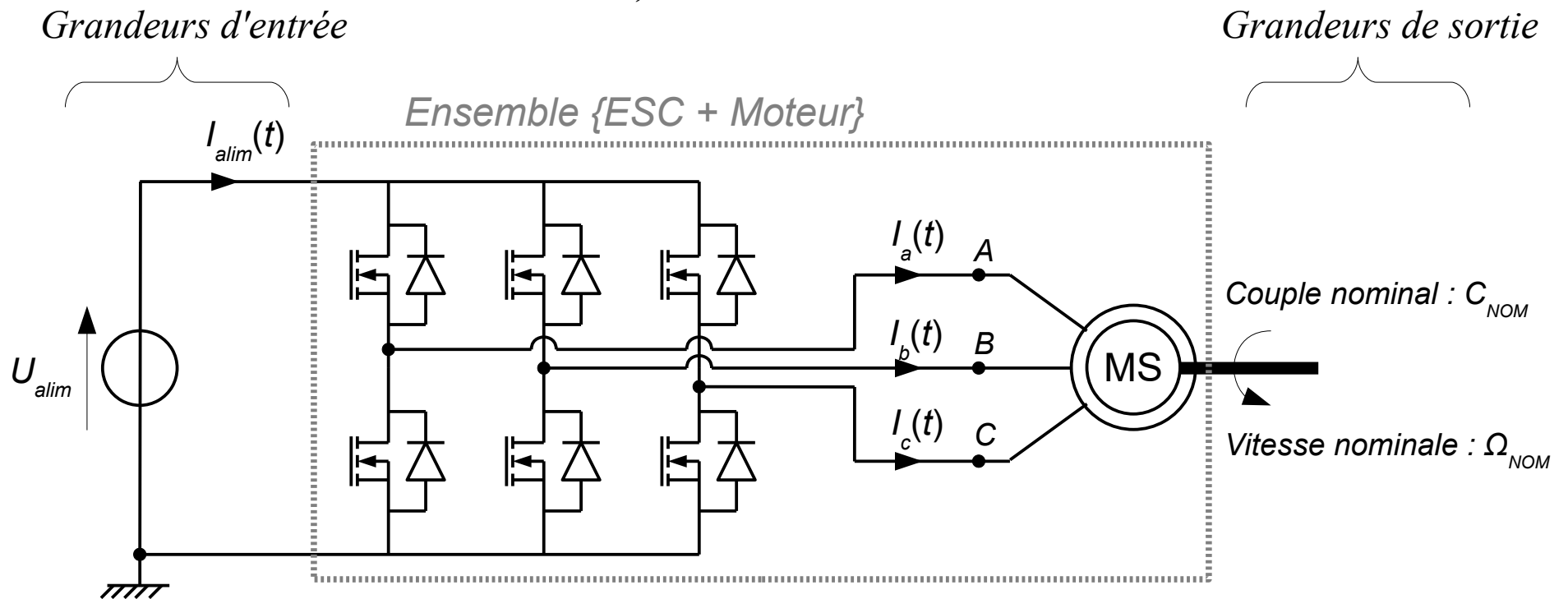


K_v = coefficient de vitesse à vide, exprimé en $(tr.min^{-1}.V^{-1})$
$$K_v = \frac{N}{U_{alim}} = \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{\Omega}{U_{alim}}$$

==> Le choix d'un moteur brushless s'effectue sur la base de son coefficient K_v .

III] Dimensionnement d'une motorisation brushless

III.2) notion de rendement :



Rendement nominal de l'ensemble (ESC+Moteur brushless) :

$$\eta = \eta_{mot} \cdot \eta_{ESC} = \frac{C_{NOM} \cdot \Omega_{NOM}}{U_{alim} \cdot I_{alimNOM}}$$

=> le rendement des meilleurs moteurs se situe entre 80% et 90%, celui de l'ESC vaut environ 90%.

III] Dimensionnement d'une motorisation brushless

III.3] Procédure de dimensionnement

Un moteur brushless associé à son ESC se dimensionne comme s'il s'agissait d'un moteur à courant continu :

- 1) Déterminer les besoins en termes de couple et de vitesse nominaux :

$$C_{NOM} = ? \quad \Omega_{NOM} = ?$$

- 2) Déterminer les contraintes en terme de tension d'alimentation :

$$\text{Exemple : batterie LIPO 3S} \Rightarrow U_{alim} = 3 \cdot 3,7 = 11,1 \text{ V}$$

- 3) En déduire le K_v du moteur brushless :

$$K_v = N_{NOM} / U_{alim} \text{ (tr.min}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}) \Rightarrow \text{Choix du moteur.}$$

- 4) Déterminer le courant nominal absorbé par l'ESC :

$$I_{alimNOM} = \frac{C_{NOM} \cdot \Omega_{NOM}}{U_{alim} \cdot \eta}$$

Multiplier par un coefficient de sécurité (par exemple $k_s = 1,5$ ou 2) :

$$\Rightarrow \text{Choix de l'ESC : } 1,5 \cdot I_{NOM}, \text{ voire } 2 \cdot I_{NOM}.$$

IV] Conclusion :

Avantages de la motorisation brushless :

- Pratique,
- Robuste et fiable,
- Performante en terme de rendement énergétique,
- Auto-pilotage relativement simple.



Une solution incontournable pour les applications de traction de faible puissance (de quelques Watts à quelques centaines de Watts).

Exemples d'applications :

- Moteurs de modélisme (drones, avions, motoplaneurs),
- Skates et trottinettes électriques,
- Vélos à assistance électrique.

V] Bibliographie

Sites internet :

- [1] <http://physagreg.fr/electromagnetisme-16-dipole-magnetique.php>
- [2] Math. Sup. PCSI Lycée Carnot Dijon : « **MAGNETOSTATIQUE** », disponible sur :
http://physiquesup4.blog.free.fr/public/polys_electromagnetisme/intro_magnetostatique.pdf
- [3] **MAXON** : « *EC 90 flat Ø 90 mm, brushless, 90 Watt* », Documentation constructeur disponible sur :
https://www.maxonmotor.fr/medias/sys_master/root/8825435389982/17-EN-271.pdf
- [4] **MAXON** : « **maxon EC motor iron-cored winding Technology – short and to the point** », Documentation constructeur disponible sur :
http://www.maxonmotor.com/medias/sys_master/root/8815461662750/EC-Technologysshort-and-to-the-point-14-EN-32-35.pdf?attachment=true
- [5] <https://www.youtube.com/watch?v=dwTVihcA2C8>
→ vidéo d'animation expliquant les séquences de fonctionnement du moteur brushless.
- [6] https://www.youtube.com/watch?v=Z7sdU_ybhqc
→ vidéo d'animation expliquant les séquences de fonctionnement du moteur brushless multipolaire.

Autres ouvrages :

- [7] « Moteur Brushless, principe de fonctionnement » (Th. Rocacher) (disponible sur <https://moodle.insa-toulouse.fr/>)
- [8] « Modèle magazine » n°797 (Février 2018) : dossier technique p.60 « optimisez vos moteurs brushless »