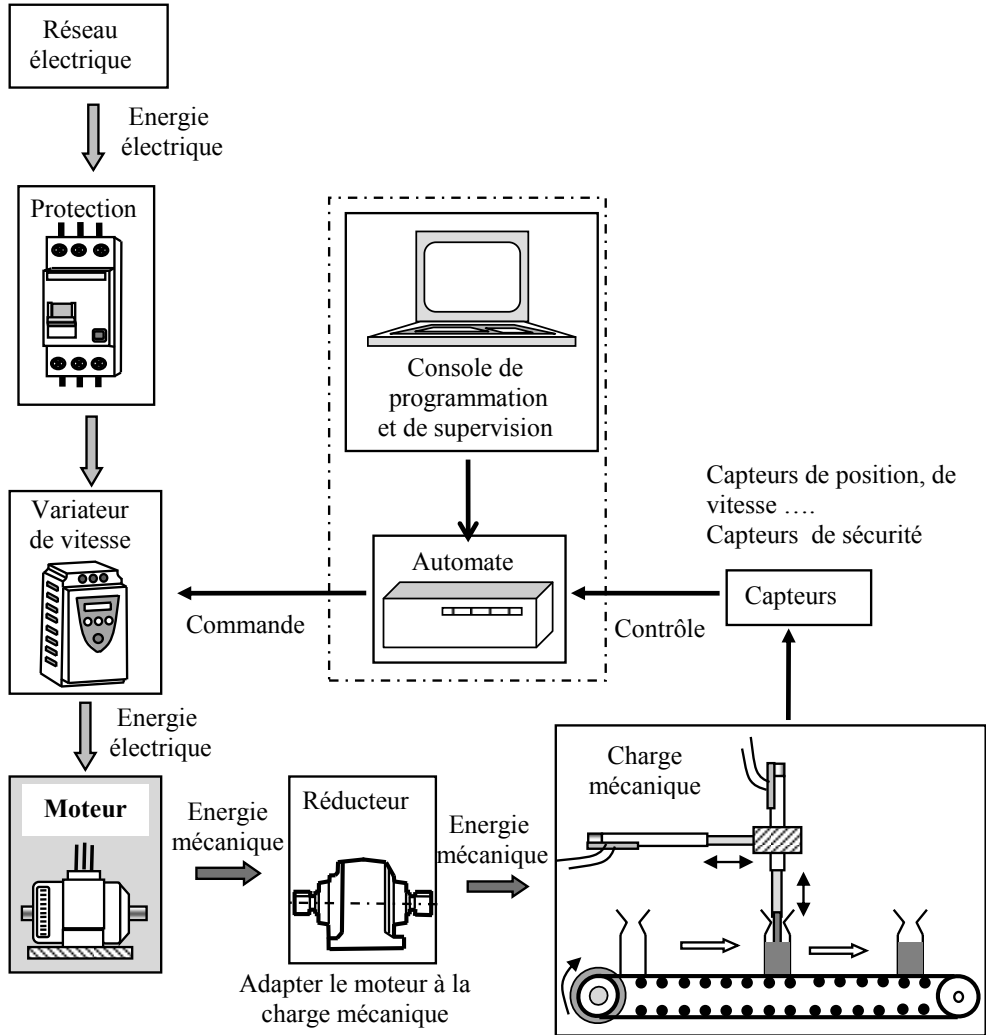
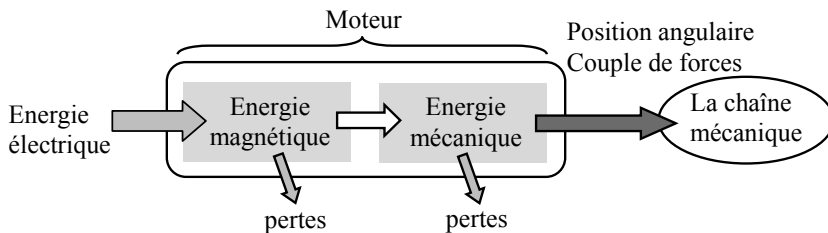


Avant-propos

Le moteur est le cœur d'une chaîne électromécanique.



Dans le moteur, l'énergie électrique est transformée en énergie magnétique avec quelques pertes. Puis l'énergie magnétique est transformée en énergie mécanique toujours avec quelques pertes.



L'utilisateur d'un moteur a besoin de connaître ses caractéristiques. Comme il va devoir le brancher sur une source d'énergie, il faut aussi qu'il connaisse ses propriétés électriques. Enfin, pour choisir le plus judicieusement le moteur en vue de son utilisation afin de le piloter de la manière la plus précise possible, il faut qu'il connaisse son mode de fonctionnement.

Dans cet ouvrage, on aborde le principe de fonctionnement des moteurs les plus couramment utilisés : les moteurs synchrones, DC et AC Brushless, le moteur asynchrone. On présente aussi quelques autres moteurs comme le moteur à courant continu, le moteur universel, le moteur asynchrone monophasé et le moteur pas à pas. Ces présentations ne comportent aucun développement mathématique compliqué.

Le livre comprend cinq chapitres :

Le chapitre 1 présente une approche simple du fonctionnement d'un moteur et permet de déterminer ses principales caractéristiques.

Le chapitre 2 propose une approche un peu plus abstraite du fonctionnement. Elle est basée sur les notions d'énergie et de co-énergie magnétiques.

Les chapitres 3 et 4 traitent des moteurs synchrones et asynchrones.

Le chapitre 5 présente les autres types de moteurs utilisés.

Le niveau requis est seulement celui de la classe de terminale en mécanique, électricité et magnétisme.

Ceux qui n'auraient pas ces connaissances peuvent consulter deux premiers ouvrages que je propose à cet effet :

Etude mécanique élémentaire des charges entraînées
Notions de base en électricité et magnétisme.

Tous trois sont destinés aux étudiants de BTS, de DUT, de 1^o et 2^o année de faculté, ainsi qu'à tous ceux qui désirent acquérir des connaissances générales simples dans le domaine de la motorisation électrique.

Ces ouvrages ont pour origine les cours que je dispense à mes étudiants de BTS électrotechnique au Lycée Louis Couffignal à Strasbourg.

Les projets industriels auxquels ils participent au cours de leurs études ont très souvent pour objet la réalisation d'un ensemble mécanique ou sa modification ou encore son amélioration. Il leur faut donc, dans pratiquement tous les cas, choisir un ou plusieurs moteurs électriques d'entraînement, ou bien modifier la motorisation de la chaîne mécanique c'est-à-dire remplacer un ancien moteur trop énergivore ou qui ne répond plus aux besoins ou aux normes en vigueur.

J'espère que le lecteur pourra tirer un grand profit de cet ouvrage et qu'il sera notamment en mesure de présenter à un auditoire les caractéristiques d'un des moteurs sans trop de calculs.

Table des matières

CHAPITRE 1 : APPROCHE DU FONCTIONNEMENT D'UN MOTEUR..... 3

1. Fonctionnement d'un moteur alternatif.....	3
1.1. L'interaction entre deux champs magnétiques	3
1.2. Production d'un champ magnétique radial sinusoïdal	5
1.3. Equivalence entre un champ radial sinusoïdal et un champ uniforme	10
1.4. Moment du couple de forces entre les deux champs	12
1.5. Moteur-génératrice	15
2. Champ magnétique statorique tournant de manière continue	16
2.1. Champ magnétique tournant à répartition spatiale sinusoïdale.....	16
2.2. Comment produire un champ magnétique tournant ?	18
2.3. Action d'un champ tournant devant des bobinages.....	24
3. Moteurs synchrone et asynchrone : principe de fonctionnement	26
3.1. La constitution du stator et du rotor des moteurs	26
3.2. Les deux types de moteur synchrone	26
3.3. Le principe de fonctionnement du moteur asynchrone	31
3.4. Etude du moment du couple moteur d'un moteur asynchrone.....	36
3.5. Les différences entre les moteurs synchrone et asynchrone	43
4. Fonctionnement d'un moteur à courant continu	46
4.1. Observation.....	46
4.2. Le moment du couple moteur	46

CHAPITRE 2 : ENERGIE MAGNETIQUE ET MOTEURS..... 51

1. Le principe de la conversion électromécanique.....	51
1.1. Introduction	51
1.2. Les exemples d'étude	52
1.3. Bobine à noyau de fer sans partie mobile	58
1.4. Bobine à noyau de fer dont une partie est mobile	60
1.5. Applications.....	63
2. Application aux moteurs industriels.....	67
2.1. Deux bobines couplées par un matériau ferromagnétique	67
2.2. Le principe de fonctionnement des moteurs.....	70
2.3. Conclusion.....	76

CHAPITRE 3 : LES MOTEURS SYNCHRONES	77
1. Les deux types de moteurs synchrones à aimant permanent	77
1.1. Description simplifiée	77
1.2. Modèle électrique d'un moteur synchrone.....	78
1.3. Moment du couple moteur, puissance.....	80
2. Le moteur DC Brushless.....	82
2.1. Description	82
2.2. Principe de fonctionnement dans le cas d'un rotor à 4 paires de pôles	84
2.3. Les moteurs DC Brushless à structure inversée.....	87
2.4. Propriétés électromécaniques.....	87
2.5. Les moteurs DC Brushless sans capteur.....	91
2.6. Mise en œuvre du moteur DC Brushless sous tension constante	93
2.7. Une comparaison	98
2.8. Le pilotage du moteur DC Brushless	99
3. Le moteur AC Brushless ou moteur synchrone à fcm sinusoïdales.....	104
3.1. Généralités.....	104
3.2. Les propriétés du moteur	104
3.3. L'autopilotage du moteur	111
3.4. Autres caractéristiques nécessaires pour mettre en œuvre un moteur	115
3.5. Application	120
3.6. Le capteur de position du rotor d'un moteur AC Brushless	125
3.7. La structure détaillée d'un variateur de fréquence à commande scalaire.....	133
CHAPITRE 4 : LE MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASE.....	135
1. Le moteur fonctionnant en tout ou rien sur le réseau triphasé.....	135
1.1. Le branchement du moteur sur le réseau	135
1.2. Formulaire d'un moteur branché sur le réseau.....	138
1.3. Le démarrage direct du moteur.....	143
1.4. Le schéma électrique du démarrage direct (notion)	146
1.5. L'utilisation d'un démarreur électronique.....	151
1.6. Fonctionnement en moteur, fonctionnement en génératrice	153
1.7. Le freinage.....	156
2. Modèles électriques d'un moteur asynchrone en régime permanent.....	160
Introduction	160
2.1. Régime transitoire = succession de régimes permanents	160
2.2. Flux statorique et flux rotorique	160
2.3. Modélisation : première approche	165
2.4. Nouveau modèle électrique du moteur	167
2.5. Les deux modèles électriques couramment utilisés.....	172
3. Modèle avec fuites magnétiques ramenées au rotor	177
3.1. Bilan des puissances.....	177
3.2. Détermination des éléments du modèle électrique du moteur.....	181
3.3. Expression du moment du couple moteur.....	187

3.4. Moment du couple moteur en fonction du glissement (exercice)	192
3.5. Variation de la vitesse d'un moteur asynchrone en boucle ouverte	196
4. Modèle électrique avec fuites magnétiques ramenées au stator	204
4.1. Détermination des éléments du modèle équivalent	204
4.2. Propriétés du moment du couple moteur	207
4.3. Application du modèle : autopilotage d'un moteur asynchrone	209
5. Pilotage en boucle fermée du couple moteur par commande scalaire	215
5.1. Contrôle scalaire du moteur	215
5.2. Le but recherché : action sur le couple moteur	215
5.3. Les grandeurs permettant de contrôler le moment du couple moteur	216
5.4. Les lois de commande	218
6. Pilotage moderne du couple moteur (notion)	220
6.1. Le contrôle vectoriel de flux	220
6.2. Contrôle du couple moteur sans capteur : la technologie DTC (notion)	226
6.3. Comparaison des performances des trois types de technologie	229
7. Comparaison qualitative des moteurs synchrone et asynchrone	231
CHAPITRE 5 : AUTRES MOTEURS COURAMMENT UTILISES	233
1. Le moteur à courant continu	233
1.1. Le principe du moteur à courant continu	233
1.2. Quelques défauts rencontrés	238
1.3. Moteur à courant continu en boucle ouverte et en régime permanent	241
1.4. Applications	244
1.5. Moteur à courant continu en boucle ouverte et en régime transitoire	247
2. Le moteur universel	252
2.1. Principe de fonctionnement	252
2.2. Les relations caractérisant le moteur	253
2.3. Défauts et qualités du moteur universel	254
3. Le moteur asynchrone monophasé	256
3.1. Principe de fonctionnement	256
3.2. Caractéristiques du moteur monophasé	258
4. Le moteur pas à pas	261
4.1. Introduction	261
4.2. Etude élémentaire des propriétés d'un moteur pas à pas	262
4.3. Description des différents types de moteurs	269

CHAPITRE 1

APPROCHE DU FONCTIONNEMENT D'UN MOTEUR

1. Fonctionnement d'un moteur alternatif

Un moteur est constitué d'un stator, partie fixe et d'un rotor qui doit tourner pour entraîner une charge mécanique. Sur quel principe physique le rotor tourne-t-il ?

1.1. L'interaction entre deux champs magnétiques

- Champ magnétique statorique, champ magnétique rotorique

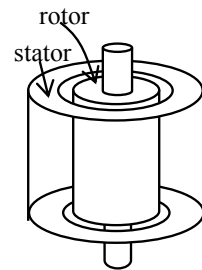
La présence de deux champs magnétiques

Tous les moteurs fonctionnent sur le même principe : l'interaction entre deux champs magnétiques, l'un créé par le stator, partie fixe du moteur, l'autre produit par le rotor, la partie mobile.

Chaque champ magnétique est caractérisé par ses pôles magnétiques qu'il soit produit :

par des aimants permanents ou induit dans des matériaux ferromagnétiques.

par des courants électriques traversant des bobines.



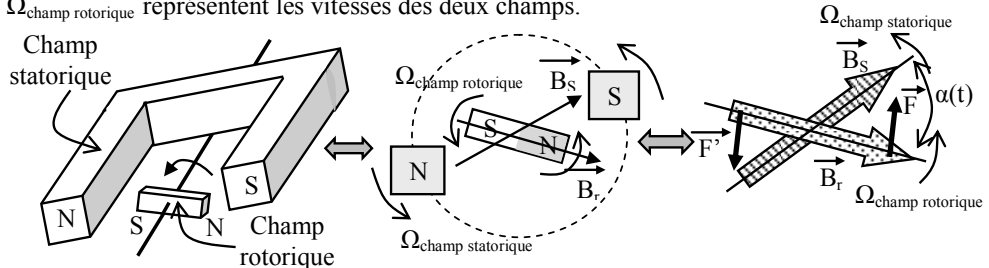
L'interaction entre deux champs

L'interaction entre les champs est matérialisée par l'attraction entre pôles de natures différentes et la répulsion entre pôles de même nature.

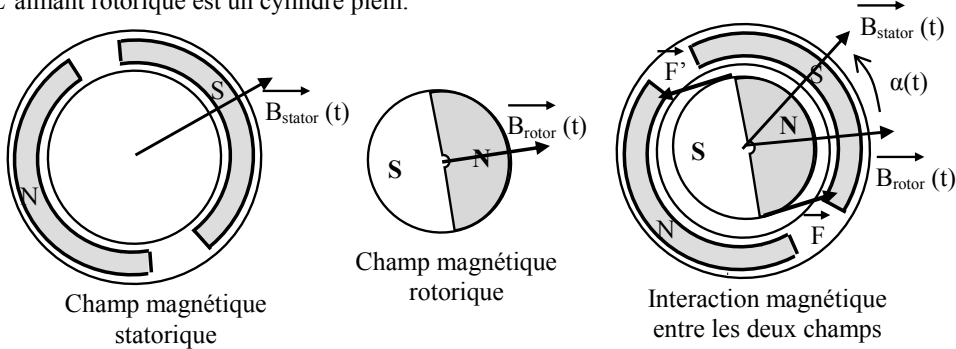
Comme le but est de faire tourner le rotor autour de son axe, il faut que le stator produise un champ magnétique qui doit être en rotation pour pouvoir entraîner, à sa suite, celui créé par le rotor. Mais il faut aussi que le champ magnétique produit par le rotor entraîne le rotor lui-même, en rotation, dans son sillage. C'est ce qui se passe dans les moteurs à courants alternatifs.

Visualisation simplifiée des deux champs magnétiques

On a matérialisé les deux champs magnétiques par deux aimants bipolaires. $\Omega_{\text{champ statorique}}$ et $\Omega_{\text{champ rotorique}}$ représentent les vitesses des deux champs.



Dans un moteur, les deux aimants sont des cylindres coaxiaux. L'aimant statorique est creux. L'aimant rotorique est un cylindre plein.

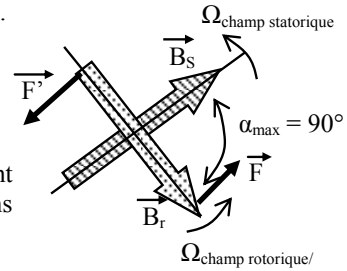


La condition pour que le champ statorique puisse entraîner le champ rotorique

Pour que l'attraction puisse se faire, il faut que les deux champs magnétiques tournent à la même vitesse. En effet si le rotor tourne moins vite, chacun de ses pôles voit rapidement défilé devant lui alternativement le pôle Nord puis le pôle Sud du champ statorique tournant. Donc chaque pôle du rotor est alternativement attiré puis repoussé par chacun des pôles du champ statorique. L'effet magnétique global est nul. A cause des frottements et de la charge mécanique qu'il entraîne, le rotor ralentit et finit pas s'arrêter.

Pour que le champ statorique puisse entraîner en rotation le champ rotorique, il faut que les deux champs tournent à la même vitesse.

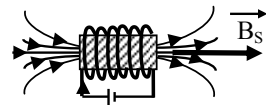
On peut tolérer provisoirement une différence de vitesse tant que l'angle α entre les deux champs ne dépasse pas 90° dans le cas où ils sont bipolaires.



• **Production élémentaire d'un champ magnétique tournant statorique**

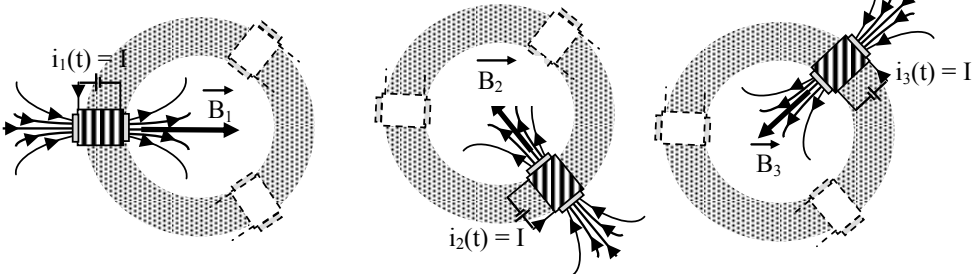
Utilisation de trois bobines élémentaires

La manière la plus simple est de positionner, dans l'espace, trois bobines à 120° l'une de l'autre et de les alimenter à tour de rôle.



On a représenté le champ produit par le courant traversant une bobine.

En les alimentant à tour de rôle, on observe que l'on a créé un champ magnétique qui tourne de manière saccadée par saut d'angle de 120° .



Production d'un champ magnétique plus uniforme.

Pour avoir un champ magnétique spatialement plus uniforme, chacune des bobines est décomposée en deux demi-bobines diamétralement opposées.