

Moteurs et commandes pour le véhicule électrique

INSA de Toulouse
département Génie Électrique et Informatique
5ème année ESPE Année 2018-2019

Plan :

Chapitre 1 : théorie des champs tournants

- I. Introduction
- II. Notions d'électromagnétisme
- III. Force magnétomotrice d'entrefer
- IV. Bilan / classification des principaux types de machines
- V. Bibliographie

Chapitre 2 : les machines synchrones

- I. Généralités sur les machines synchrones
- II. Machine synchrone en fonctionnement génératrice (alternateur)
- III. Machine synchrone en fonctionnement moteur

Bibliographie

Chapitre 1

Théorie des champs tournants

I) Introduction / Objectif de ce chapitre :

Tout moteur électrique est composé d'un stator (partie fixe) et d'un rotor (partie mobile en rotation par rapport à un axe longitudinal). Entre le stator et le rotor, se trouve une zone étroite, appelée l'entrefer.

Pour faire tourner un moteur électrique, il est nécessaire de créer une interaction entre deux ondes de champ magnétiques :

- Une onde de champ statorique (créée par les bobines situées sur le stator),
- Une onde de champ rotorique (créée par les aimants permanents ou les enroulements du rotor).

L'objectif de ce chapitre est de montrer comment il est possible de créer une onde de champ magnétique tournant dans l'entrefer de la machine électrique.

I) Introduction / Objectif de ce chapitre :

Définitions :

Avant de commencer ce cours, un petit rappel de vocabulaire s'impose :

- **Spire** : portion élémentaire de fil électrique (généralement en cuivre) qui réalise un tour complet dans une structure hélicoïdale. La spire est l'élément de base de tout bobinage.
- **Bobine** (ou enroulement) : ensemble de n spires connectées en série et souvent jointives, constituant un bobinage. « Une bobine est constituée d'un enroulement de fil conducteur éventuellement autour d'un noyau en matériau ferromagnétique qui peut être un assemblage de feuilles de tôle ou un bloc de ferrite. » (définition Wikipédia)
- **Phase** : ensemble de p bobines connectées en série et décalées angulairement de $2\pi/(3p)$ (cas d'une machine à p paires de pôles). Dans ce cours, nous étudierons majoritairement le cas des machines *triphases*, qui possèdent 3 phases, et sont donc conçues pour être alimentées par un système triphasé de courants sinusoïdaux.

Ainsi, pour récapituler :

- 1 spire = 1 tour,
- 1 bobine = n tours,
- 1 phase = $n \cdot p$ tours.

II) Notions d'électromagnétisme

II.1) Définitions :

$\vec{B}(M, t)$: champ magnétique en un point M de l'espace et à un instant t.

$\vec{H}(M, t)$: excitation magnétique en un point M de l'espace et à un instant t.

Relation entre les grandeurs vectorielles $\vec{B}(M, t)$ et $\vec{H}(M, t)$:

$$\vec{B}(M, t) = \mu \cdot \vec{H}(M, t)$$

μ = perméabilité magnétique du matériau rencontré au point M.

Remarque :

La seule grandeur physiquement présente est le champ B. H n'est qu'un artifice de calcul qui permet de trouver en tout point de l'espace le champ B.

II) Notions d'électromagnétisme

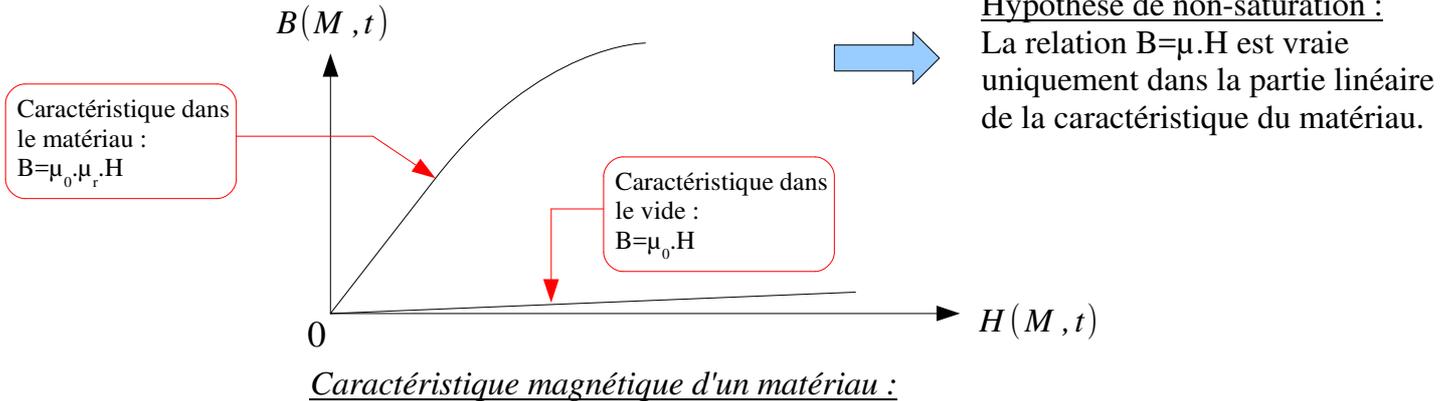
II.2) Caractéristique magnétique d'un matériau :

La perméabilité magnétique varie en fonction des matériaux.

- Dans le vide : $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (perméabilité magnétique du vide)
- Dans un milieu matériel : $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$
(μ_r = perméabilité relative du matériau par rapport au vide)

Cas des moteurs électriques :

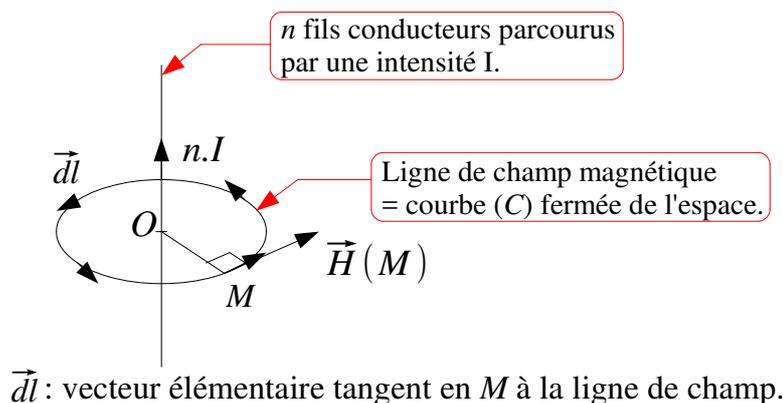
le rotor et le stator sont le plus souvent constitués d'un empilement de tôles métalliques (afin de limiter les courants de Foucault).



II) Notions d'électromagnétisme

II.3) Théorème d'Ampère

- Ce théorème découle de l'une des 4 équations de Maxwell. ($\text{rot}(\vec{H}) = \vec{j}$)
- Il établit la relation entre la circulation du champ H le long d'une ligne de champ et la présence d'un ou plusieurs fils électriques parcourus par un courant d'intensité I.



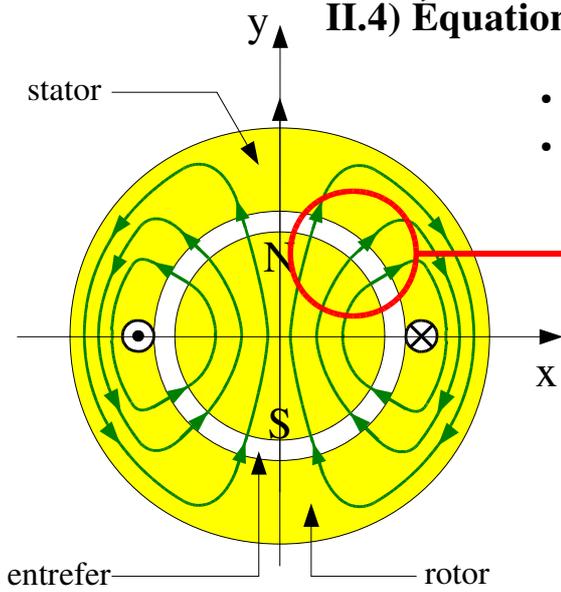
Énoncé du théorème d'Ampère :

La circulation du champ H le long de la ligne de champ (C) est égale à la somme des intensités de tous les courants enlacés par cette ligne de champ.

$$\oint_C \vec{H}(M) \cdot \vec{dl}(M) = n \cdot I$$

II) Notions d'électromagnétisme

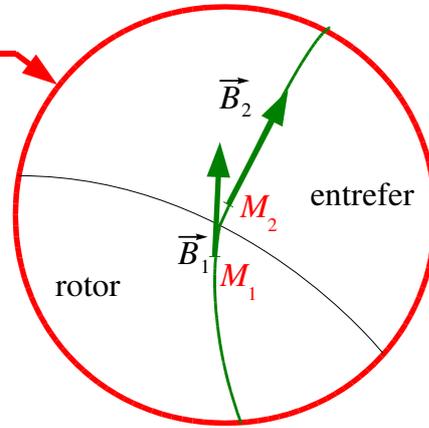
II.4) Équations de passage à l'interface air/fer



A) *Vue en coupe d'une machine à une paire de pôles : Les lignes de champ B se referment sur elles-mêmes.*

- Le rotor et le stator sont métalliques => perméabilité $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$
- L'entrefer est constitué d'air => perméabilité $\mu = \mu_0$

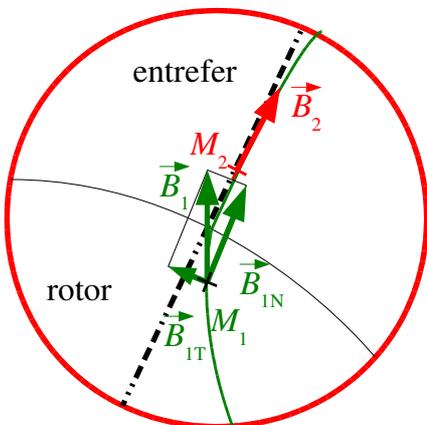
zoom



B) *La ligne de champ subit une cassure de pente lors de la traversée de l'interface fer/air.*

II) Notions d'électromagnétisme

II.4) Équations de passage à l'interface air/fer



Hypothèse :

L'entrefer est d'épaisseur constante, et très faible devant le rayon du rotor ($e \ll R$).

- Le rotor et le stator sont métalliques => perméabilité $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$
- L'entrefer est constitué d'air => perméabilité $\mu = \mu_0$

Lors de la traversée de l'interface air/fer :

- La composante normale du champ B se conserve.
- La composante tangentielle du champ H se conserve.

$$\begin{cases} B_{1N} = B_{2N} \\ H_{1T} = H_{2T} \end{cases} \Rightarrow \frac{B_{1T}}{\mu_0 \cdot \mu_r} = \frac{B_{2T}}{\mu_0}$$

$$\text{Donc } B_{2T} = \frac{B_{1T}}{\mu_r}$$

Comme μ_r est gigantesque ($\mu_r \approx 1000$), la composante tangentielle B_{2T} est quasi nulle.

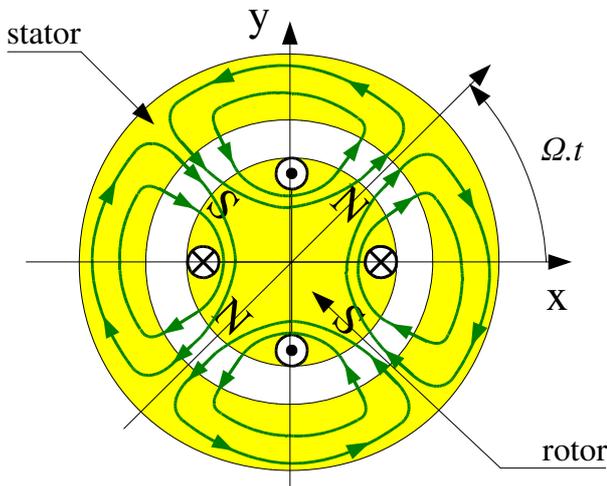
=> Le champ B est radial dans l'entrefer de la machine électrique.

II) Notions d'électromagnétisme

II.5) Cas des moteurs électriques à entrefer constant :

Récapitulatif :

- Les carcasses métalliques du stator et du rotor servent à canaliser les lignes de champ magnétique,
- Les lignes de champ B se referment toutes sur elles-mêmes,
- Par convention, elles sortent par le pôle Nord et entrent par le pôle Sud,
- Si la machine est à pôles lisses (entrefer d'épaisseur constante), alors le champ B est radial dans l'entrefer.

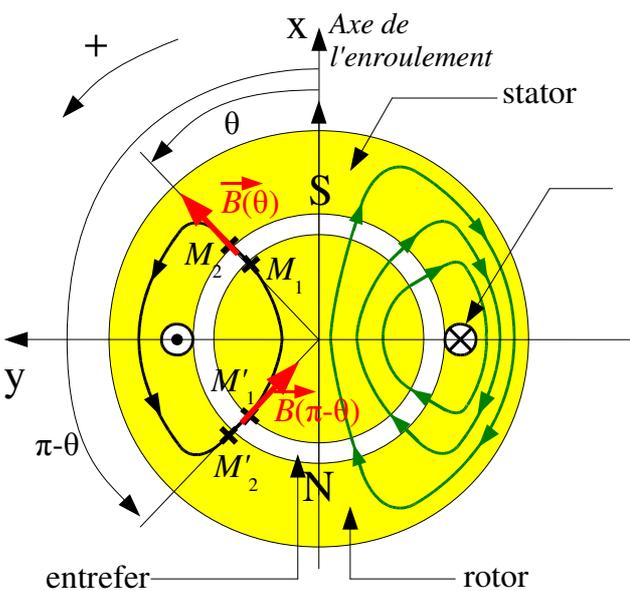


Exemple :

Vue en coupe d'une machine à courant alternatif : lignes de champ créées par le rotor. (Cas d'une machine synchrone à deux paires de pôles)

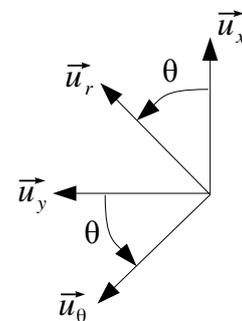
III) Force magnétomotrice d'entrefer

III.1) Champ B créé par un enroulement parcouru par un courant d'intensité fixe :



NB : Pour une meilleure compréhension de la figure, une seule ligne de champ a été représentée sur la partie de gauche.

Enroulement de n spires parcourues par un courant d'intensité I.



Machine composée d'un seul enroulement :
Représentation des lignes de champ B.

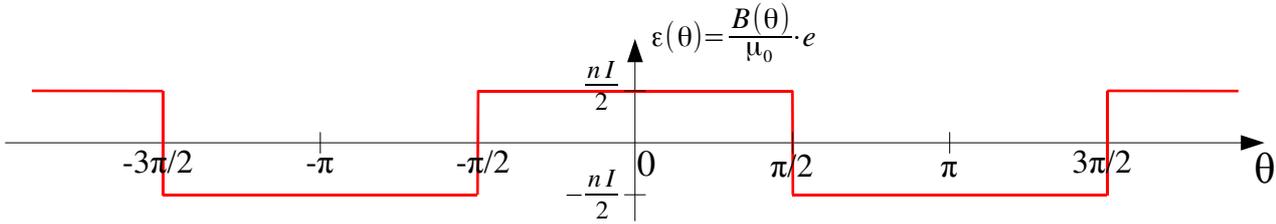


Appliquer le théorème d'Ampère le long de la ligne de champ qui passe par les points M_1, M_2, M'_1 et M'_2 .

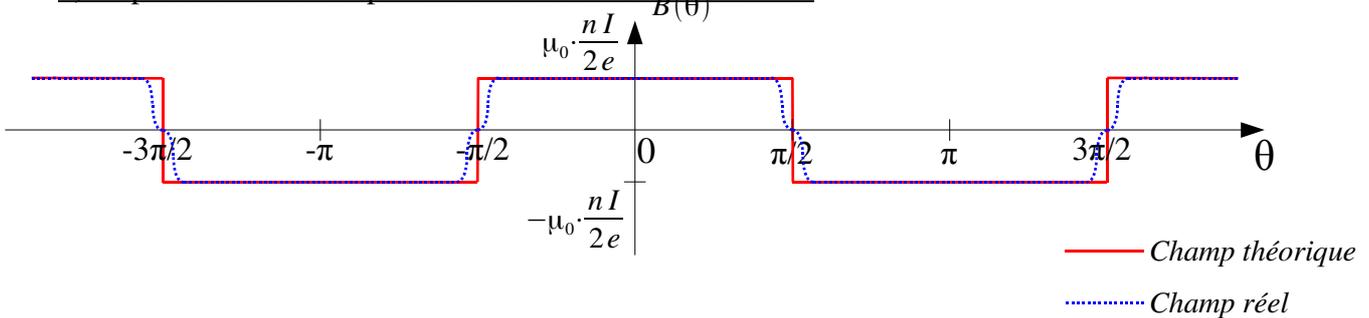
III) Force magnétomotrice d'entrefer

III.1) Champ B créé par un enroulement parcouru par un courant d'intensité fixe :

1) Répartition de la fmm dans l'entrefer de la machine :



2) Répartition du champ B dans l'entrefer de la machine :



III) Force magnétomotrice d'entrefer

III.1) Champ B créé par un enroulement parcouru par un courant d'intensité fixe :

Conséquence :

Si on se contente d'un simple bobinage à n spires situé en $\theta = \pi/2$ et $\theta = -\pi/2$,
Alors le champ $B(\theta)$ créé dans l'entrefer est de forme carrée.



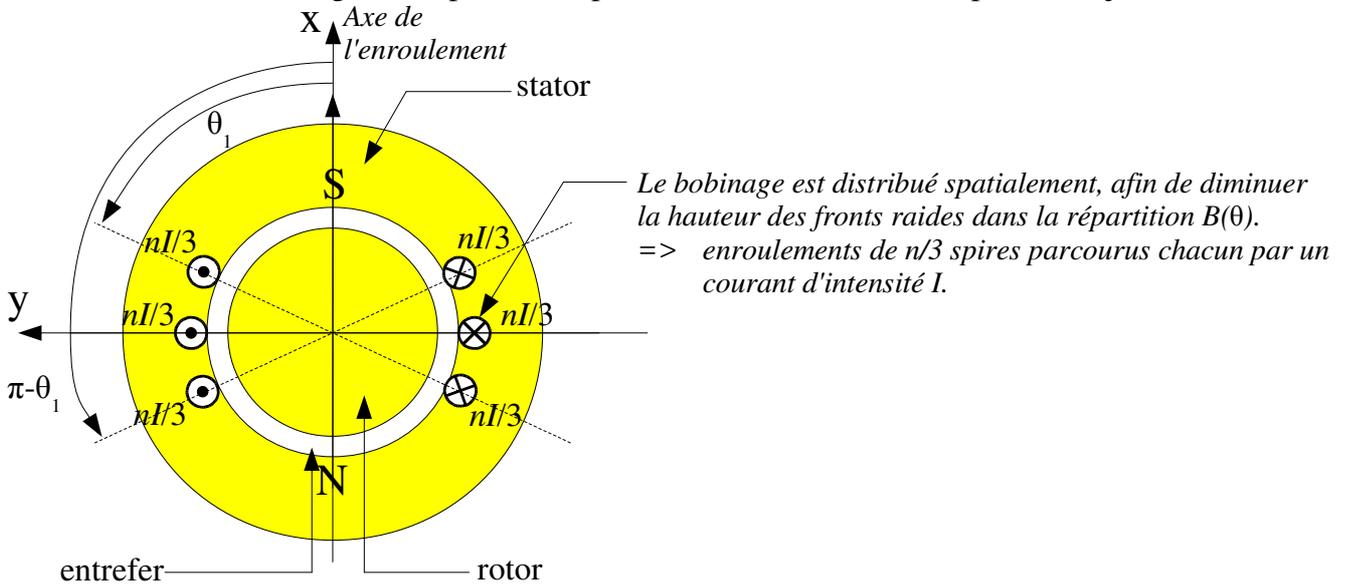
Comment faire pour obtenir un champ $B(\theta)$ à répartition sinusoïdale dans l'entrefer ?

III) Force magnétomotrice d'entrefer

III.1) Champ B créé par un enroulement parcouru par un courant d'intensité fixe :

Réponse :

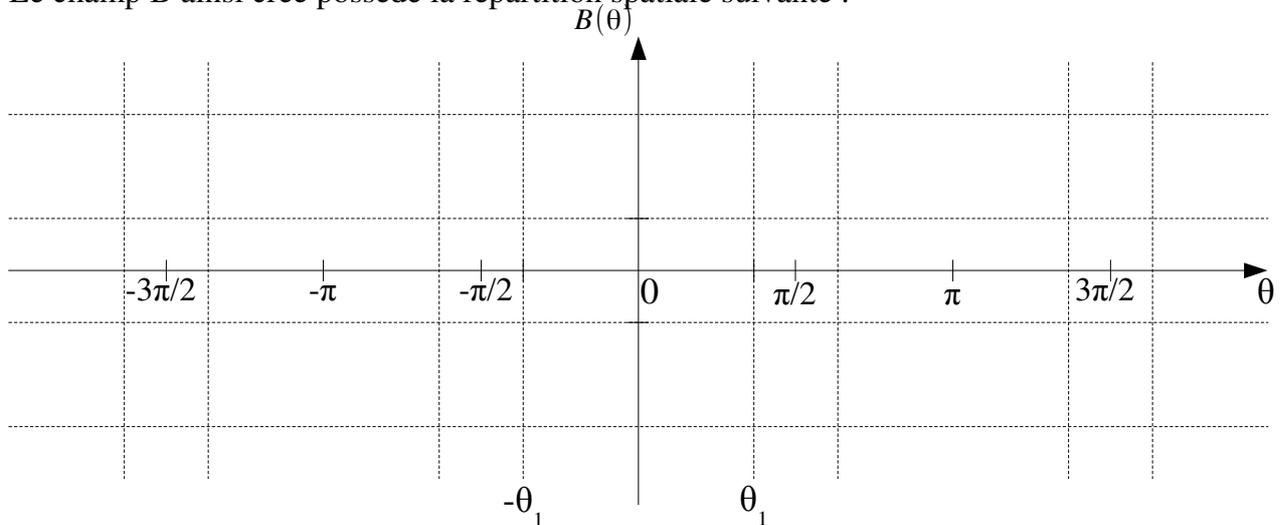
Il suffit de distribuer le bobinage de n spires dans plusieurs encoches, en les répartissant judicieusement.



III) Force magnétomotrice d'entrefer

III.1) Champ B créé par un enroulement parcouru par un courant d'intensité fixe :

Le champ B ainsi créé possède la répartition spatiale suivante :

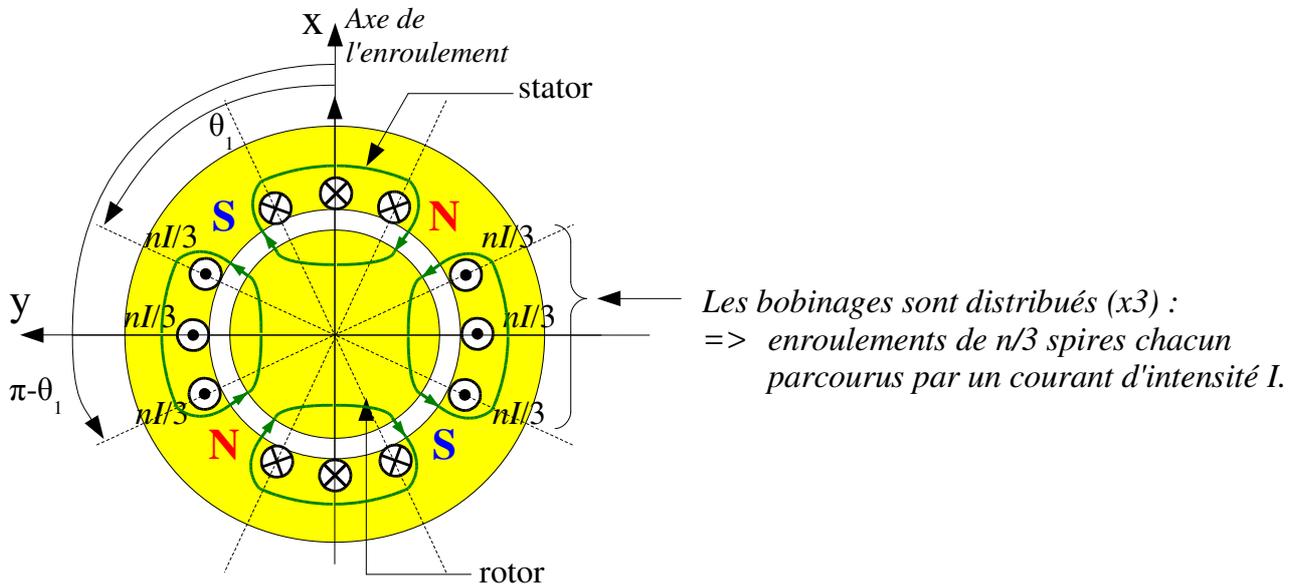


Effectuer l'hypothèse du premier harmonique, afin de déterminer l'expression du terme fondamental de $B(\theta)$.

III) Force magnétomotrice d'entrefer

III.2) Champ B créé par p enroulements parcourus par un courant continu :

Nous modélisons à présent une machine qui possède p paires de pôles (p pôles Nord et p pôles Sud).



Exemple d'une machine à 2 paires de pôles et à enroulements distribués : étude du champ statorique.

III) Force magnétomotrice d'entrefer

III.2) Champ B créé par p enroulements parcourus par un courant continu :

La machine possède p paires de pôles (p pôles Nord et p pôles Sud intercalés).
Son stator est parcouru par un courant d'intensité I constante.

- Combien vaut la périodicité spatiale de la répartition $B(\theta)$?
- En déduire l'expression de $B(\theta)$.

III) Force magnétomotrice d'entrefer

III.3) Champ B créé par une phase de p enroulements parcourus par un courant alternatif sinusoïdal :

Hypothèses :

- La machine est monophasée,
- Elle possède p paires de pôles (p pôles Nord et p pôles Sud intercalés),
- Son stator est traversé par un courant d'intensité :

$$I(t) = I_m \cdot \cos(\omega t)$$

Avec, $\omega = 2\pi f$

- 
- Exprimer le champ B dans l'entrefer en fonction de θ et de t .
 - Combien vaut la périodicité spatiale de la répartition $B(\theta, t)$?
 - Combien vaut la périodicité temporelle de la répartition $B(\theta, t)$?
 - A quelle vitesse angulaire tourne l'onde de champ $B(\theta, t)$?

III) Force magnétomotrice d'entrefer

III.3) Champ B créé par une phase de p enroulements parcourus par un courant alternatif sinusoïdal :

Hypothèses :

- La machine est monophasée,
- Elle possède p paires de pôles (p pôles Nord et p pôles Sud intercalés),
- Son stator est traversé par un courant d'intensité :

$$I(t) = I_m \cdot \cos(\omega t)$$

Avec, $\omega = 2\pi f$

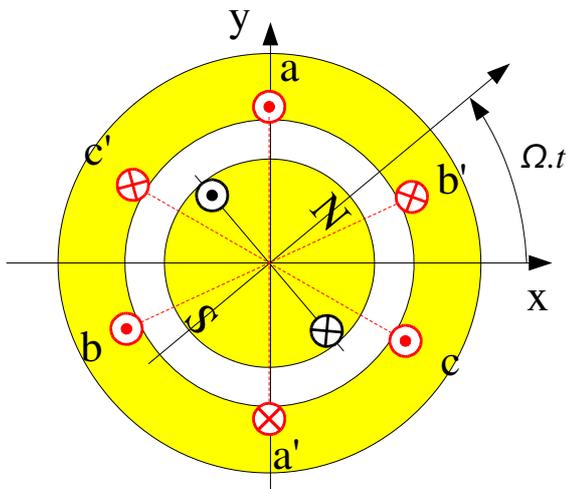
Théorème de Leblanc :

Une machine monophasée possédant p paires de pôles et parcourue par un courant sinusoïdal de pulsation ω génère dans son entrefer deux ondes de champ magnétique de même amplitude :

- L'une tournant à la vitesse angulaire ω/p dans le sens direct,
- L'autre tournant à la vitesse angulaire $-\omega/p$ dans le sens indirect.

III) Force magnétomotrice d'entrefer

III.4) Champ B créé par un bobinage triphasé parcouru par un système triphasé de courant alternatifs sinusoïdaux :



Exemple le plus simple :
Machine triphasée à une paire de pôles,
et à enroulements non distribués.

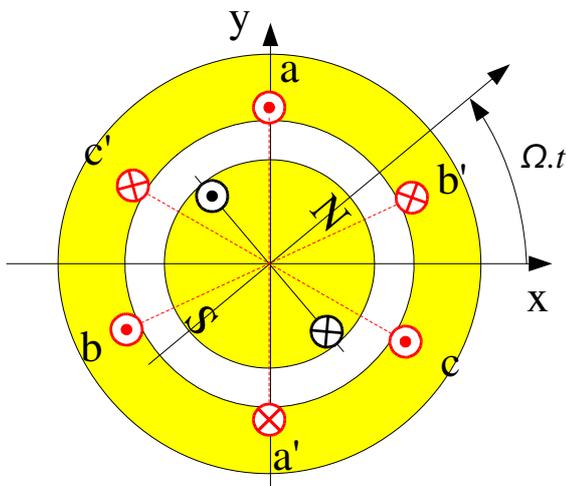
Hypothèses :

- La machine est triphasée,
- Chacune des trois phases possède p paires de pôles,
- Les axes des trois phases sont décalés de $2\pi/(3p)$.
- Les trois phases sont parcourues par un système triphasé de courants sinusoïdaux.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Phase aa'} \rightarrow I_a(t) = I_m \cdot \cos(\omega t) \\ \text{Phase bb'} \rightarrow I_b(t) = I_m \cdot \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \text{Phase cc'} \rightarrow I_c(t) = I_m \cdot \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{array} \right.$$

III) Force magnétomotrice d'entrefer

III.4) Champ B créé par un bobinage triphasé parcouru par un système triphasé de courant alternatifs sinusoïdaux :



Exemple le plus simple :
Machine triphasée à une paire de pôles,
et à enroulements non distribués.

Hypothèses :

- La machine est triphasée,
- Chacune des trois phases possède p paires de pôles,
- Les axes des trois phases sont décalés de $2\pi/(3p)$.
- Les trois phases sont parcourues par un système triphasé équilibré de courants sinusoïdaux.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Phase aa'} \rightarrow I_a(t) = I_m \cdot \cos(\omega t) \\ \text{Phase bb'} \rightarrow I_b(t) = I_m \cdot \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \text{Phase cc'} \rightarrow I_c(t) = I_m \cdot \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{array} \right.$$

III) Force magnétomotrice d'entrefer

III.4) Champ B créé par un bobinage triphasé parcouru par un système triphasé de courant alternatifs sinusoïdaux :

Hypothèses :

- La machine est triphasée,
- Chacune des trois phases possède p paires de pôles,
- Les axes des trois phases sont décalés de $2\pi/(3p)$.
- Les trois phases sont parcourues par un système triphasé équilibré de courants sinusoïdaux.



- *Exprimer le champ B dans l'entrefer en fonction de θ et de t .*
- *Combien vaut la périodicité spatiale de la répartition $B(\theta, t)$?*
- *Combien vaut la périodicité temporelle de la répartition $B(\theta, t)$?*
- *A quelle vitesse angulaire tourne l'onde de champ $B(\theta, t)$?*

III) Force magnétomotrice d'entrefer

III.4) Champ B créé par un bobinage triphasé parcouru par un système triphasé de courant alternatifs sinusoïdaux :

Hypothèses :

- La machine est triphasée,
- Chacune des trois phases possède p paires de pôles,
- Les axes des trois phases sont décalés de $2\pi/(3p)$.
- Les trois phases sont parcourues par un système triphasé équilibré de courants sinusoïdaux.

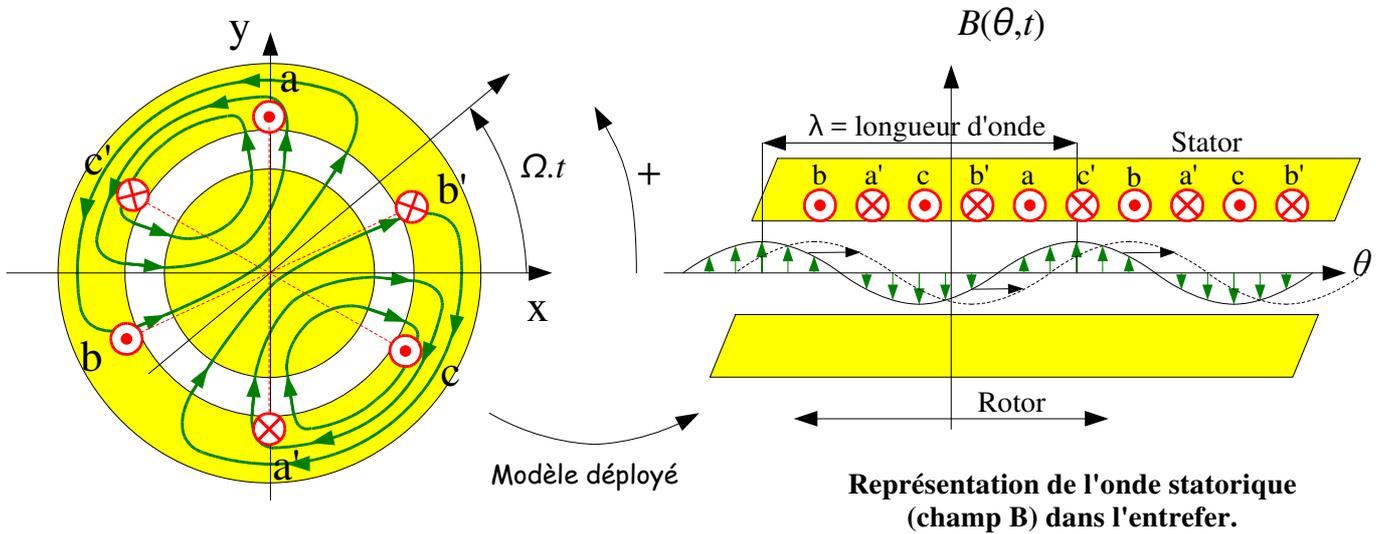
Théorème de Ferraris :

Une machine triphasée possédant p paires de pôles et parcourue par un système triphasé équilibré de courants sinusoïdaux de pulsation ω crée dans son entrefer une onde de champ magnétique tournant à la pulsation ω/p .

III) Force magnétomotrice d'entrefer

III.4) Champ B créé par un bobinage triphasé parcouru par un système triphasé de courant alternatifs sinusoïdaux :

Illustration du théorème de Ferraris : cas d'une machine triphasée, à une seule paire de pôles.



IV) Bilan / classification des principaux types de machines :

Tableau de classification des principales machines électriques

	Machine à courant continu	Machine synchrone	Machine asynchrone
Onde de champ statorique	<i>Fixe par rapport au stator</i>	<i>Tourne par rapport au stator</i>	<i>Tourne par rapport au stator</i>
Onde de champ rotorique	<i>Tourne par rapport au rotor</i>	<i>Fixe par rapport au rotor</i>	<i>Tourne par rapport au stator</i>
Condition de création d'un couple moyen non nul	<i>Les deux champs magnétiques sont immobiles par rapport au stator, et ils sont en quadrature.</i>	<i>Les deux ondes (statorique et rotorique) doivent tourner à la même vitesse angulaire, et conserver le même déphasage.</i>	
Remarque	<i>Le collecteur du rotor permet de faire tourner l'onde de champ rotorique par rapport à ce dernier.</i>	<i>Le rotor tourne à la vitesse de synchronisme (= vitesse de rotation de l'onde de champ tournant)</i>	<i>Le rotor « glisse » par rapport à l'onde de champ statorique (phénomène de glissement)</i>

IV) Bibliographie

Sites internet :

- [1] https://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_électrique
- [2] https://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_synchrone
- [3] <http://www.etasf.fr/index.php?/accueil/sommairesec/machineSynchrone>
- [4] http://www.lerepairedessciences.fr/sciences/agregation_fichiers/Electronique/Cours_Machines_alternatives.pdf
- [5] <https://www.edf.fr/groupe-edf/producteur-industriel/carte-des-implantations/centrale-nucleaire-de-golfech/presentation>
- [6] http://sciences-physiques.ac-dijon.fr/documents/lycee/phys_app/traction_fer/traction_fer.pdf (document sur la traction ferroviaire)

Ouvrages présents à Bib'Insa :

- [621.46 MAY] « Moteurs électriques industriels », (P. Mayé) 2ème édition, éditions Dunod, 2011.
- [621.3 PAL] « Précis d'électrotechnique », (Ch. Palermo) éditions Dunod, 2012.
- [621.3 SEG] « Électrotechnique Industrielle » (G. Séguier, F. Notelet) 3ème édition, éditions Tech&Doc, 2006.

Autres ouvrages :

- Cours électrotechnique 2ème année École Centrale de Lille (année 1995-1996) (C. Rombaut, B. Sémail)