
LP 28 : Transducteurs électro-mécaniques, exemple d'un type de moteur électrique

Louis Usala et Julie Limonet
18/03/22

Bibliographie

📖 *Electrotechnique*, **Luc Lasne**, Dunod

Prérequis

niveau L2

- PFD, th du moment cinétique
- moment magnétique, couple
- Théorème de Faraday, force de Laplace

Table des matières

1	Conversion courant - mouvement de translation	2
1.1	Modèle du rail de Laplace	3
1.2	Utilisation	4
2	Rotation et courant continu	5
2.1	Modèle du moteur à courant continu	5
2.2	Utilisation	6
3	Rotation et courant alternatif	8
3.1	Modèle de la machine synchrone	8
3.2	Solutions pertinentes	8
3.3	Usage et limites	9

Présentation de la leçon

Introduction

Définition de transducteur.

Intérêt de la conversion d'énergie évident pour tous les appareils électriques utilisés au quotidien comme dans le milieu industriel. Séparer deux types d'utilisation possible :

- utilisation d'un courant électrique pour transmettre une information. Pas besoin de beaucoup d'énergie. Dans l'industrie, peut servir à donner une contrainte sur la position, la vitesse de rotation à atteindre...
- utilisation d'un courant électrique pour transporter de l'énergie. Notion de rendement bien plus importante. Branche qui touche à l'alimentation des appareils électroménagers, à la source d'énergie des voitures électriques, etc.

L'énergie électrique n'est pas utile en soi. Elle n'est qu'un moyen pour obtenir un mouvement (énergie mécanique) ou un apport de chaleur (énergie thermique) par exemple. En cela, c'est une énergie très pratique car elle est transportable très rapidement (proche de la vitesse de la lumière) sur de grandes distances (échelle continentale) avec peu de pertes (effet Joule des câbles). Cependant elle présente l'inconvénient de très mal se stocker. Elle doit être produite au moment de son utilisation ou stockée sous d'autres formes d'énergie (mécanique par exemple, dans les barrages). D'où l'autre intérêt des transducteurs.

1 Conversion courant - mouvement de translation

1.1 Modèle du rail de Laplace

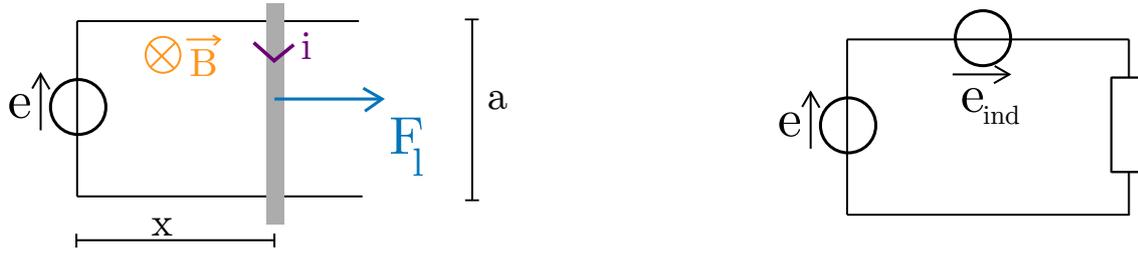


FIGURE 1

On aborde le problème des rails de Laplace avec une double approche mécanique et électrocinétique, comme présentée sur le schéma précédent. (n.b. Le courant dans le circuit électrocinétique est orienté dans le même sens que sur le schéma mécanique.) Précision : dans la suite de cette partie, on considère qu'une force de frottements fluides s'applique sur la barre. En pratique, elle est non-négligeable : le haut-parleur a pour but de faire bouger de l'air grâce à une membrane. Phénoménologiquement, on a le même comportement de la barre si on néglige les frottements. Sans frottements, la barre accélère jusqu'à atteindre une vitesse limite à laquelle la force électromotrice induite compense le générateur de tension. Avec frottements, la vitesse limite est un peu plus faible car le générateur s'oppose à la fem induite et aux frottements. Toutes les expressions suivantes restent valables en imposant $\lambda = 0$.

1. Bilan mécanique

On applique le PDF à la barre mobile.

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{p} + \vec{N} + \vec{F}_L + \vec{f}, \quad (1)$$

avec le poids \vec{p} et la réaction normale des rails \vec{N} qui se compensent selon la verticale et avec la force de Laplace \vec{F}_L et la force de frottements \vec{f} qui sont selon la direction du mouvement \vec{e}_x . Les frottements sont modélisés par une force proportionnelle à la vitesse : $\vec{f} = -\lambda \vec{v} = -\lambda \dot{x} \vec{e}_x$.

Le flux de champ magnétique Φ_B au travers du circuit s'exprime simplement comme

$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{S} = aBx \quad (2)$$

2. Lien mécanique \rightarrow électrocinétique

Il se fait par l'intermédiaire de la loi de Faraday.

Définition

Loi de Faraday : la variation du flux de champ magnétique au travers d'un circuit engendre une force électromotrice induite dans le circuit électrocinétique équivalent vérifiant :

$$e_{\text{ind}} = -\frac{d\Phi_B}{dt}. \quad (3)$$

Avec les conventions prises ici,

$$e_{\text{ind}} = -\frac{d a B x}{dt} = -a B \dot{x}. \quad (4)$$

3. Bilan électrocinétique

On fait une loi des mailles pour déterminer le courant dans le circuit. La résistante R est la résistance équivalente du circuit. (On néglige le fait qu'elle dépende de la longueur du circuit et donc qu'elle ne soit pas constante au cours du temps puisque le circuit est allongé peu à peu.)

$$e + e_{\text{ind}} - Ri = 0 \longrightarrow i = \frac{e + e_{\text{ind}}}{R} = \frac{e - aB\dot{x}}{R}. \quad (5)$$

4. Lien électrocinétique \rightarrow mécanique

Il se fait par l'intermédiaire de l'expression de la force de Laplace qui dépend du courant.

$$d\vec{F}_L = i d\vec{l} \wedge \vec{B} = i dl B \vec{e}_x \quad (6)$$

Puisque le champ magnétique est homogène et la barre est droite, on a directement

$$\vec{F}_L = \int d\vec{F}_L = i aB \vec{e}_x \quad (7)$$

Bilan

On obtient l'équation différentielle

$$\ddot{x} + \left(\frac{a^2 B^2}{mR} + \frac{\lambda}{m} \right) \dot{x} = \frac{aB}{mR} e. \quad (8)$$

1.2 Utilisation

En pratique, le rail de Laplace est utilisé pour des déplacements bornés de la barre, par exemple pour des déplacements périodiques. En ce sens, il est intéressant de connaître la réponse en déplacement de la barre à un signal périodique. Pour cela, on suppose e sinusoïdale de pulsation ω et on passe en notations complexes. On peut alors exprimer la vitesse de la barre en fonction de la tension à l'aide d'une fonction de transfert :

$$\underline{\dot{x}} = \underline{H} e \quad ; \quad \underline{H} = \frac{\frac{aB}{mR}}{\frac{a^2 B^2}{mR} + \frac{\lambda}{m} + j\omega} = \frac{H_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_0}}, \quad (9)$$

où on introduit

$$H_0 = \frac{1}{aB + \frac{\lambda R}{aB}} \quad ; \quad \omega_0 = \frac{a^2 B^2}{mR} + \frac{\lambda}{m}. \quad (10)$$

Formellement, ce dispositif est un passe-bas du premier ordre, ce qui est cohérent car la barre a une certaine inertie qui la rend moins réactive aux hautes fréquences. Le dispositif précédent peut aussi être vu en considérant que le signal imposé en entrée est une vitesse et le signal de sortie est une tension. La fonction de transfert dans cette vision est

$$e = \underline{H}^{-1} \dot{x} = \frac{1 + j \frac{\omega}{\omega_0}}{H_0} \dot{x}. \quad (11)$$

Le dispositif donnant une vitesse à partir d'une tension (convention moteur) correspond à un usage des rails en tant que haut-parleur. A l'inverse, le dispositif donnant une tension à partir d'une vitesse (convention génératrice) correspond à un usage en tant que microphone.

Considérations pratiques

Pour créer un haut-parleur à partir de ce dispositif, on cherchera à transmettre les fréquences audibles avec une même intensité. Pour ce faire, il est important de bien choisir les paramètres définissant ω_0 de sorte que la bande passante ($f < \omega_0/2\pi$) recouvre les fréquences audibles ($f \in [20 \text{ Hz} ; 20 \text{ kHz}]$).

Transition

Bien que le haut-parleur appartienne au domaine de l'**électronique de puissance**, il ne permet pas de convertir de grandes puissances. Ce dispositif fonctionne avec des puissances typiques de l'ordre de **100 W**. En effet, il faut fournir de l'énergie à la barre pour la faire accélérer, puis pour la **ralentir**, puis pour l'accélérer dans l'autre sens, etc. Il serait plus rentable de fournir toute l'énergie à la barre pour l'accélérer "toujours dans le même sens". Ceci n'est pas possible en ligne droite si on souhaite garder un dispositif confiné dans l'espace (ce qui est attendu pour les moteurs). La solution est la suivante : **ne pas induire un mouvement de translation mais un mouvement de rotation**.

2 Rotation et courant continu

2.1 Modèle du moteur à courant continu

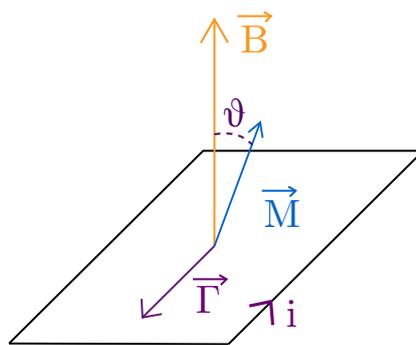


FIGURE 2 – Schéma du rotor pour le moteur à courant continu.

Le moteur à courant continu est utile dans les situations où on alimente un dispositif par une source de courant qui ne change pas de sens : une pile, un accumulateur, une batterie... De même qu'avant, on place un circuit électrique dans un champ magnétique constant (selon la direction que l'on appelle \vec{e}_x), comme représenté sur la figure 2. Le circuit peut tourner autour de l'axe (Oz) (confondu avec \vec{T} sur le schéma). La boucle de courant est formellement équivalente au dipôle magnétique

$$\vec{M} = i \vec{S} \quad (12)$$

avec i le courant dans le circuit et \vec{S} le vecteur surface orienté d'après i par convention. D'après les résultats sur les dipôles magnétiques, la boucle subit un couple

$$\vec{T} = \vec{M} \wedge \vec{B} = -iSB \sin \theta \vec{e}_z \quad (13)$$

en appelant θ l'angle orienté de \vec{M} vers \vec{B} . On note I le moment d'inertie du rotor selon \vec{e}_z et on lui applique le théorème du moment cinétique selon cette même direction.

$$I\ddot{\theta} = \vec{T} \cdot \vec{e}_z = -iSB \sin \theta, \quad (14)$$

$$\ddot{\theta} = -\frac{iSB}{I} \sin \theta. \quad (15)$$

(n.b. On aurait pu ajouter un couple résistant à l'équation pour modéliser le travail fourni en sortie. On n'aurait pas changé la phénoménologie. Ce couple aurait pris le rôle de couple moteur en convention génératrice.) A partir de cette équation, on distingue deux cas :

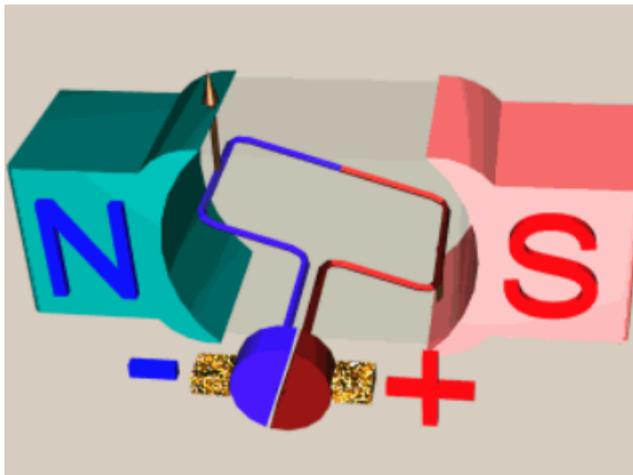


FIGURE 3 – Schéma du moteur à courant continu. Animation à montrer en classe disponible ici : <https://hpallam.pagesperso-orange.fr/> .

- quand $\theta \in [-\pi; 0]$, $\ddot{\theta}$ est du signe de i . En convention $i > 0$, on a une accélération angulaire positive dans cette zone,
- quand $\theta \in [0; \pi]$, $\ddot{\theta}$ est de signe opposé à i . Avec les mêmes conventions, dans cette zone le moteur induit une accélération angulaire négative.

Pour garder une accélération dans le même sens tout au long du mouvement ($\ddot{\theta} > 0$), et ce alors que le courant envoyé dans le circuit est continu, la solution consiste à inverser les branchements entre la pile et la spire quand $\theta = 0$ et $\theta = \pi$. Ainsi, le sens du courant dans la spire change et le signe de l'accélération reste constant. Une manière analogue de voir le problème consiste à dire que le changement de branchements conserve le signe de i mais redéfinit \vec{S} avec un sens opposé. Ainsi, θ est redéfini à chaque demi-tour avec un ajout de $+\pi$, ce qui revient à inverser le signe de $\sin \theta$.

En pratique, ce changement de branchements se fait par l'intermédiaire de balais métalliques qui font le contact entre le générateur et la spire, comme on peut le voir en figure 3.

2.2 Utilisation

Les moteurs à courant continu permettent de convertir des puissances plus importantes que les rails de Laplace. On les utilise par exemple dans les moteurs des voitures électriques où on atteint des puissances de l'ordre de $P \sim 300 \text{ hp} = 2.2 \cdot 10^5 \text{ W}$.

De même qu'en partie 1, ce dispositif peut être inversé. En imposant un couple au rotor plongé dans un champ magnétique constant, on obtient un courant dans le circuit qui est toujours du même signe grâce aux balais. Notons que, même si le courant est continu, il n'est pas constant. Le courant fourni est plus grand vers $\theta \simeq 0, \pi$ que vers $\theta \simeq \pi/2$. Pour résoudre ce problème, il est possible de récupérer le courant provenant de plusieurs boucles de courant décalées entre elles d'un même angle. La somme des courants en sortie est lissée par rapport aux courants individuels (c.f. figure 4).

Cet usage en génératrice est utilisé dans les turbines (éoliennes, barrages...). Elles atteignent des puissances de l'ordre de $P \sim 10^7 - 10^9 \text{ W}$. Ce dispositif est aussi utilisé pour convertir l'énergie mécanique d'une voiture en énergie électrique au moment du freinage. Cet usage est appelé "freinage régénératif" et il permet de recycler l'énergie cinétique d'une voiture en rechargeant la batterie.

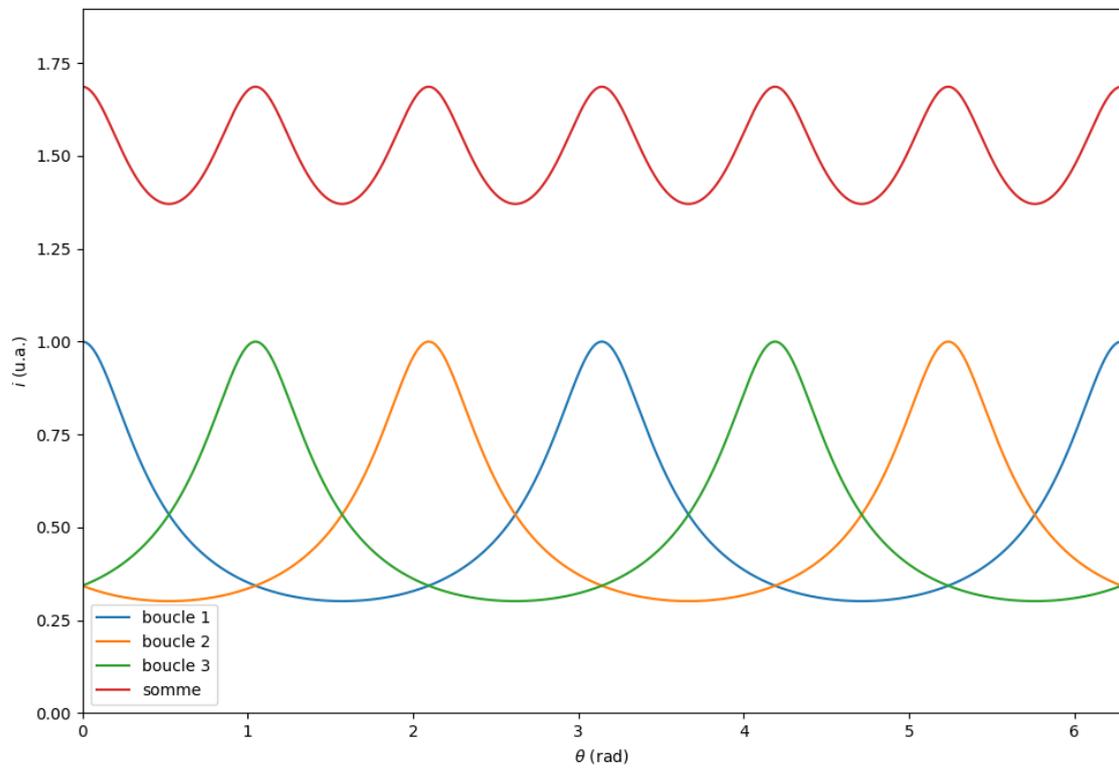


FIGURE 4 – Courants obtenus par chaque spire d'une génératrice à courant continu et somme des courants.

Transition

Le moteur à courant continu permet de convertir de grandes puissances d'une forme électrique vers une forme mécanique et inversement. Il permet notamment d'utiliser le courant continu produit par les batteries et accumulateurs. Cependant, pour des raisons de transport, l'électricité utilisée au quotidien (réseau électrique) est très majoritairement reçue sous forme de courant alternatif. Il faut un autre type de moteur pour l'exploiter.

3 Rotation et courant alternatif

3.1 Modèle de la machine synchrone

Jusque là, on a vu des moteurs où une partie mobile traversée par un courant constant se déplaçait dans un champ magnétique fixe. Cette approche ne fonctionne plus car on n'a plus de courant constant. Pour obtenir un dipôle magnétique, on utilisera maintenant un aimant. Celui-ci ne peut pas changer d'orientation à mi-parcours comme le moment du courant continu. Ainsi, pour ne pas avoir une position d'équilibre fixe du rotor, on doit faire tourner le champ magnétique. Pour le produire, on fait passer le courant alternatif dans des bobines.

On considère un aimant astreint à tourner dans le plan (Oxy) (le plan du schéma en figure 5). On entoure le dispositif de 3 bobines tournées les unes par rapport aux autres d'un tiers de tour et dans lesquelles on fait passer des courants déphasés entre eux de $2\pi/3$. Ceci crée un champ magnétique tournant de norme constante B . (On prend pour convention que \vec{B} tourne dans le sens direct à une pulsation ω).

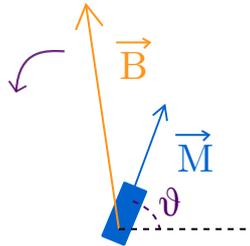


FIGURE 5

Dans le référentiel du laboratoire (supposé galiléen), on repère le moment de l'aimant par l'angle θ . De même que précédemment, l'aimant subit un couple moteur \vec{T} de la part du champ magnétique. On considère que l'action du rotor sur l'extérieur se traduit par un couple résistant \vec{T}_r sur le rotor qui, en première approximation, est supposé proportionnel à sa vitesse de rotation.

$$\vec{T} = \vec{M} \wedge \vec{B} = MB \sin(\omega t - \theta) \vec{e}_z, \quad (16)$$

$$\vec{T}_r = -\lambda \dot{\theta} \vec{e}_z. \quad (17)$$

On appelle I le moment d'inertie du rotor selon \vec{e}_z et on lui applique le théorème du moment cinétique selon \vec{e}_z .

$$I\ddot{\theta} = MB \sin(\omega t - \theta) - \lambda \dot{\theta}. \quad (18)$$

3.2 Solutions pertinentes

On ne résout pas cette équation exactement. Intéressons-nous uniquement à des cas particuliers pertinents. On attend d'un moteur qu'il tourne à vitesse constante. Est-ce possible ici? Cette condition

revient à avoir $\ddot{\theta} = 0$, $\dot{\theta} = \Omega$, $\theta = \Omega t - \varphi$. En réinjectant cette condition dans (18), on obtient

$$MB \sin((\omega - \Omega)t + \varphi) - \lambda\Omega = 0. \quad (19)$$

Cette équation devant être vérifiée à tout t , on doit avoir $\Omega = \omega$. Ce moteur ne peut fonctionner qu'en tournant à la même vitesse que le champ magnétique. C'est pourquoi on l'appelle "moteur synchrone". On remarquera que φ s'interprète comme l'angle entre le moment \vec{M} et le champ \vec{B} . Par ailleurs, on obtient

$$\sin \varphi = \frac{\lambda\omega}{MB}. \quad (20)$$

Cette équation donne une contrainte sur le couple demandé en sortie :

$$\frac{\lambda\omega}{MB} \leq 1 \iff \lambda\omega \leq MB. \quad (21)$$

Pour une vitesse de rotation donnée, il existe un couple maximum que l'on peut appliquer en sortie. Pour augmenter ce couple, on peut prendre des aimants plus puissants (M augmente) ou appliquer un champ magnétique B plus intense.

3.3 Usage et limites

Les machines synchrones sont utiles pour transformer de grandes puissances d'une forme électrique vers une forme mécanique et inversement. Elles sont par exemple utilisées en convention moteur dans les navires. Les puissances mises en jeu sont alors de l'ordre de $10^6 - 10^7$ W. Les machines synchrones sont aussi très répandues dans un usage en génératrice : c'est le principe de la dynamo.

On a vu que la machine synchrone ne fonctionnait qu'à vitesse de rotation fixe : celle du champ magnétique. Ceci la rend utile dans des applications où on cherche à imposer une vitesse de rotation. C'est le cas de diverses machines utilisées sur les chaînes de production dans l'industrie.

L'inconvénient associé est que la machine à courant continu ne fonctionne que sur une gamme donnée de contraintes. Au-delà, elle décroche : elle n'est plus capable de suivre le champ magnétique et celui-ci la fait tourner autant dans un sens que dans l'autre. Par ailleurs, on ne s'est intéressé qu'à des solutions stationnaires, mais le moteur doit d'abord accélérer pour suivre le champ magnétique. Or, à cause de l'inertie du rotor, il est incapable de suivre directement le rotor. Au démarrage, la machine synchrone est par défaut en décrochage et il faut un dispositif annexe pour la lancer.

Conclusion

Dans cette leçon, nous avons modélisé des dispositifs permettant de convertir de l'énergie électrique en mouvement et inversement. Le mouvement rectiligne a certaines applications mais il n'est pas adapté pour transformer de grandes puissances. On lui préférera la rotation. Nous avons vu comment exploiter un courant continu (utile quand la source est une batterie) et un courant alternatif (utile pour une machine branchée sur le secteur). La machine synchrone étudiée ici permet de choisir une vitesse de rotation, mais en contrepartie elle a des limitations en couple fourni et des inconvénients au démarrage. Pour des applications où la vitesse de rotation importe peu mais où on ne souhaite pas avoir de décrochage, on utilisera plutôt une machine asynchrone dont la modélisation pourrait faire l'objet d'une leçon entière.

Questions

- **Quels sont les points les plus difficiles à faire passer dans ta leçon** En fonction des moteurs, on utilise les lois d'induction de Lorentz ou de Neumann. La démarche n'est pas la même donc il y a un risque de confusion.

- **Adaptable en terminale si oui comment ?** Avec une approche qualitative il y a de quoi faire, en introduisant des notions de moments magnétiques qui doivent suivre le champ B. Approche énergétique par comparaison avec l'énergie potentielle et transferts d'énergie.
- **D'autres exemples d'utilisation de l'énergie électrique** En énergie thermique par effet Joule, dans un frigo avec beaucoup d'étapes intermédiaires. Pour l'éclairage aussi.
- **Pourquoi faire le choix de ne pas présenter les manips devant la classe ?** C'est possible pour le rail de Laplace, mais on peut aussi en faire l'objet d'une séance de TP. Pour le reste, les dispositifs sont rarement disponibles dans les lycées et classes préparatoires. Avoir des approches alternatives avec les animations permet de s'affranchir du matériel.
- **Quelle est la différence entre la Force de Laplace et la Force de Lorentz ?** La force de Laplace correspond à une version macroscopique de la partie magnétique de la force de Lorentz sur un conducteur.
- **ODG sur taille dispositifs/ champs appliqués pour l'odg de fréquence de coupure pour les rails de Laplace que tu présentes** $\omega_c = \frac{a^2 B^2}{mR}$ avec $m \approx 0.1kg$; $a \approx 0.1m$; $B \approx 0.1T$; $\omega_c \approx 10^5$ ce qui donne $R \approx 10^{-8}$ ce qui est pas envisageable. On est plus vers l'ordre du ohm ou de la dizaine d'ohm. Il faut alléger le dispositif et augmenter les champs magnétiques en utilisant des bobines.
- **D'autres exemples de transducteurs electromécaniques ?** Appareils qui associent courant à position (potentiomètres), ou dispositifs piezoélectriques. Plus sur du transfert d'information que du transfert d'énergie.
- **Bilan de puissance sur un moteur ?** $E_p = -\vec{M} \cdot \vec{B}$ donc $\Delta E_p = 2MB$ et donc $\langle P \rangle = \frac{\Delta E_p}{T/2} = \frac{4MB}{T} = \frac{4eSB}{TR}$
- **Schéma moteur alternatif** On fait trois bobines qui permettent de créer un champ magnétique tournant.
- **Qu'est-ce qui change entre les moteurs alternatifs et continu au niveau mécanique** Spire pour les moteurs continu, aimants pour les moteurs synchrones, cage d'écureuil pour les asynchrones. Les balais pour changer les bornes sont une source d'usure rapide sur les moteurs continus. De plus, ils peuvent créer des étincelles.
- **Pourquoi trois champs et pas 5 ou 6** Fonctionnerait à partir de 2 mais on récupère un courant triphasé au niveau du réseau EDF.
- **Si tu veux monter la manip du moteur synchrone, comment fais tu ?** Il faut se mettre en situation où on n'a pas de décrochage et il faut lancer le moteur.
- **Tu as une idée de l'ordre de grandeur du taux de conversion, si on a beaucoup de pertes ou pas ?** Le taux de conversion des machines étudiées en parties 2 et 3 est de l'ordre de 95 à 98%. Les pertes sont avant tout dues aux frottements.

Commentaires

- Bien pour le rythme, schémas...
- Attention sur le titre, 1 exemple pas 3. On peut compenser en insistant un peu plus sur les bilans de puissance, parler des pertes
- Bonne chose l'animation sur le moteur à courant continu

- Une manipulation illustrative sur les rails de Laplace serait pas mal, pareil pour le moteur synchrone.
- Bons efforts sur les transitions