

Sujet de stage de master 2 :

Génération d'impulsions de courant par dynamo homopolaire lancée

Proposé par :

Julien Fontchastagner, Maître de conférences, Université de Lorraine – GREEN

Jean-Pierre Brancher, Professeur Émérite, Université de Lorraine – IECL

Description scientifique et technique :

L'effet dynamo est une histoire vieille de 70 ans, qui commence avec la dynamo unipolaire de Bullard [1]. Elle est depuis régulièrement étudiée, en particulier en magnétohydrodynamique. Le présent projet propose de s'intéresser à un de ses modes de fonctionnement particulier, qui pourrait avoir un grand intérêt dans le domaine des matériaux magnétiques.

On considère la dynamo homopolaire de Bullard (voir Figure 1), constituée d'un axe conducteur et d'un disque de cuivre tournant à la vitesse Ω (en tours-sec⁻¹) et d'un circuit $\mathcal{C}$ avec un contact glissant au bord du disque et un autre sur l'axe. Si la vitesse est suffisamment grande, le moindre courant dans le circuit $\mathcal{C}$ croît exponentiellement, la dynamo s'amorce et s'il n'y a aucun couple moteur appliqué, la vitesse de rotation va chuter très rapidement.

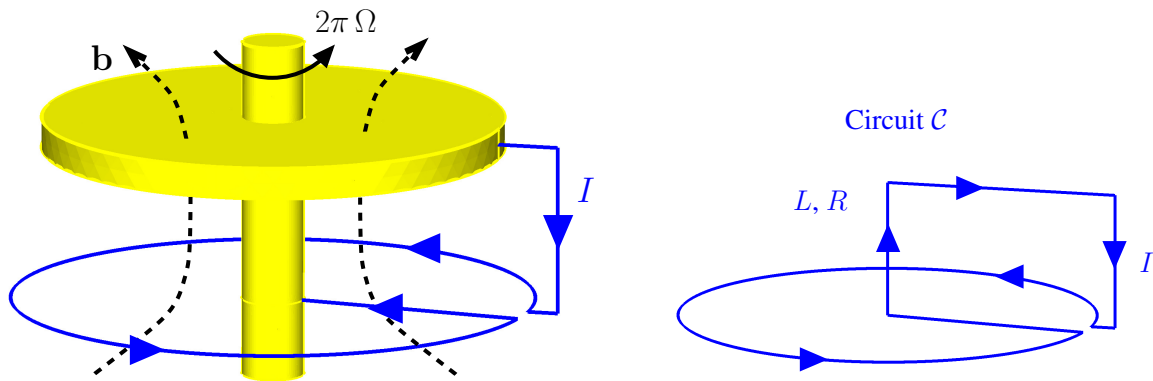


FIGURE 1 – Dynamo homopolaire de Bullard

On obtient alors un générateur d'impulsion de courant de puissance électrique très grande car l'énergie est délivrée en un temps très court. Un tel dispositif pourrait être particulièrement intéressant pour des applications d'aimantation d'aimants permanents ou de pastilles supraconductrices. En effet, il permettrait de générer de très fortes impulsions de courant sans avoir recours à des décharges de bancs capacitifs et de l'électronique associée [2]. Il pourrait également convenir à l'alimentation d'une bobine supraconductrice de stockage d'énergie (SMES) [3].

Comme le champ magnétique créé par la boucle du circuit $\mathcal{C}$ doit être contrarié par un champ créé par des courant azimutaux dans le disque (théorème d'Alfvén), on peut ainsi modéliser le problème par la dynamo feuilletée où un anneau conducteur sur le bord du disque de résistance R' et de courant J donnera un champ opposé à celui créé par la boucle du circuit $\mathcal{C}$ (voir Figure 2) [4, 5].

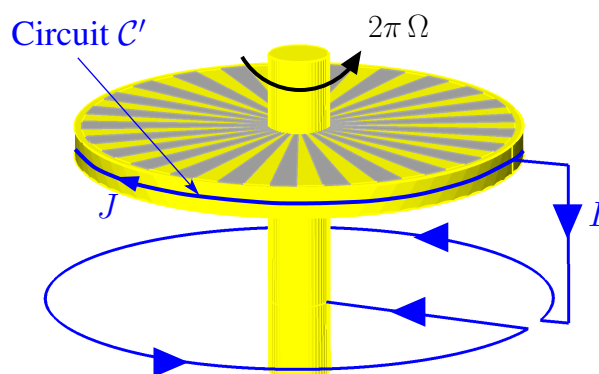


FIGURE 2 – Dynamo feuilletée avec courant azimuthal J

Déroulement du projet

Dans ce projet :

1. On étudiera les deux modèles simplifiés (voir annexes) où, après une analyse dimensionnelle, on résoudra pour chacun un système d'équations non-linéaires du premier ordre donnant le comportement de la dynamo lancée à une vitesse suffisamment grande pour qu'elle s'amorce quand on établit le contact glissant sur le bord du disque. On vérifiera que lorsque la résistance du circuit du bord C' tend vers l'infini dans le deuxième modèle, on retrouve le premier.
2. On essaiera de résoudre le problème réel avec un calcul numérique de champ et de courant dans le disque de cuivre, ce qui permettra de dimensionner un démonstrateur dont la géométrie réelle sera à déterminer. On pourra pour cela penser à utiliser un circuit C avec plusieurs boucles autour d'un cylindre ferromagnétique.
3. Enfin, si le temps le permet, on réalisera une dynamo simplifiée expérimentale avec une vitesse suffisamment élevée pour qu'elle s'amorce.

Profil recherché :

Les candidats peuvent être issus (liste non-exhaustive) : de Master 2 « Physique » ou équivalent, de Master 2 « Mathématiques Appliquées » ou équivalent, de Master 2 « Génie Électrique » ou équivalent, ou d'une École d'ingénieur avec une formation abordant les domaines précédents.

Thèmes scientifiques abordés : électromagnétisme et mécanique élémentaires ; mathématiques appliquées : équations aux dérivées partielles, stabilité, chaos.

Les postulants devront montrer un goût prononcé pour la physique et les mathématiques, et une expérience préliminaire (stage, projet de fin d'étude, ...) dans un laboratoire de recherche ne fera que renforcer le dossier de candidature. Une bonne connaissance des méthodes numériques de résolution des équations aux dérivées partielles (type MEF) et/ou des systèmes différentiels ordinaires serait appréciée, mais n'est en rien obligatoire.

Complément d'information :

Lieu du stage : GREEN (site ENSEM, Brabois, Vandœuvre-lès-Nancy)

Début du stage : février/mars 2025

Durée : 5 mois

Indemnités : environ 600 € / mois.

Candidature en envoyant une lettre de motivation et un CV par e-mail simultanément à :

— Julien Fontchastagner : julien.fontchastagner@univ-lorraine.fr

— Jean-Pierre Brancher : jean-pierre.brancher@univ-lorraine.fr

Annexes

On peut montrer que, dans les deux cas, l'équation électrique du circuit $\mathcal{C}$ est :

$$\frac{d\phi_c}{dt} + RI = \Omega \phi_d \quad (1)$$

où R est la résistance, ϕ_c le flux magnétique traversant le circuit, et ϕ_d celui traversant le disque. L'équation du mouvement est quant à elle :

$$C_0 \frac{d\Omega}{dt} = -\frac{I \phi_d}{4\pi^2} \quad (2)$$

où C_0 est le moment d'inertie du disque, le couple appliqué étant nul dans notre cas.

Modèle 1 : Dynamo de Bullard

Dans ce cas, on peut poser :

$$\begin{cases} \phi_c = LI \\ \phi_d = MI \end{cases}$$

En développant et en effectuant une analyse dimensionnelle, on montrera que le système se ramène au système différentiel non-linéaire suivant :

$$\begin{cases} \frac{dX}{d\tau} = (Z - 1)X \\ \frac{dZ}{d\tau} = -X^2 \end{cases} \quad (3)$$

Avec : $\tau = \frac{R}{L} t$, $X = \frac{M}{R} \sqrt{\frac{L}{C_0}} \frac{I}{2\pi}$, et $Z = \frac{M}{R} \Omega$

Modèle 2 : Dynamo feuilletée

Dans ce cas, on peut poser :

$$\begin{cases} \phi_c = LI + MJ \\ \phi_d = L'J + MI \end{cases}$$

On ajoute l'équation électrique du circuit $\mathcal{C}'$ aux deux précédentes :

$$\frac{d\phi_d}{dt} + R'J = 0 \quad (4)$$

Et en appliquant la même méthode que dans le cas précédent, on peut se ramener au système :

$$\begin{cases} \frac{dX}{d\tau} = \alpha [(Z - 1)X + (\beta + Z)Y] \\ \frac{dY}{d\tau} = \alpha [(1 - Z)X - (\gamma + Z)Y] \\ \frac{dZ}{d\tau} = -XY - X^2 \end{cases} \quad (5)$$

Avec : $\tau = \frac{R}{L} t$, $\alpha = \frac{LL'}{LL' - M^2}$, $\beta = \frac{R'M^2}{RL'^2}$, $\gamma = \frac{LR'}{L'R}$, $X = \frac{M}{R} \sqrt{\frac{L}{C_0}} \frac{I}{2\pi}$, $Y = \frac{L'}{R} \sqrt{\frac{L}{C_0}} \frac{J}{2\pi}$ et $Z = \frac{M}{R} \Omega$.

Pour le premier cas, il est intéressant de discuter les conditions d'amorçage, de trouver une intégrale première, et de faire un bilan énergétique sur les équations réduites.

Dans les deux cas, pour la résolution numérique, on mettra une condition sur X (par exemple $X(0) = X_0 = 10^{-3}$) pour l'amorçage. Pour vérifier les calculs, on pourra examiner le cas où $R' \rightarrow \infty$.

Conditions Initiales : $X_0 = 10^{-3}$, $Z_0 = 100$ (et $Y_0 = 0$ dans le modèle 2)

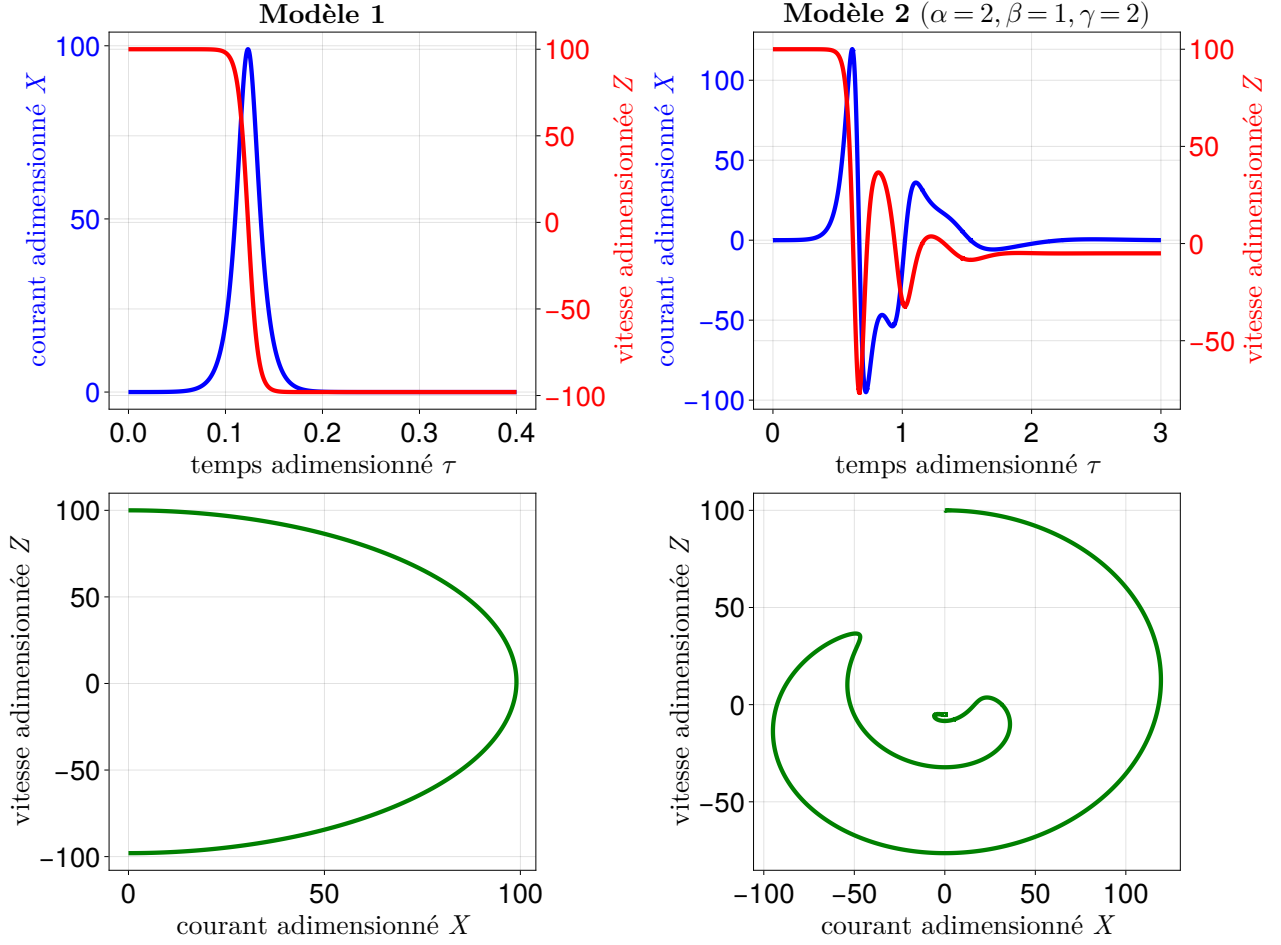


FIGURE 3 – Exemple de tracés des vitesses et courants adimensionnés calculés par les deux modèles.

Résultats préliminaires

Un exemple de résultats fournis par les deux modèles, pour un même point initial est donné en Figure 3, et montre clairement leurs différences.

Sources bibliographiques :

- [1] E. Bullard, “The stability of a homopolar dynamo,” Mathematical proceedings of the Cambridge philosophical society, vol. 51, n° 4. Cambridge University Press, 1955.
- [2] C. Rioux, “Étude et réalisation d’une dynamo unipolaire à régime impulsionnel ne comportant pas de matériaux ferro-magnétiques”, Annales de Physique, vol. 13, n° 9, pp. 729-765, 1964.
- [3] B. Geoffrion, et M. Legentil, “Étude et réalisation d’une bobine de stockage d’énergie magnétique adaptée à une dynamo unipolaire impulsionnelle de 5 MJ”, Revue de Physique Appliquée, vol. 10, n° 1, pp.11-16, 1975.
- [4] H. K. Moffatt, “A Self-consistent treatment of simple dynamo systems,” Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics, vol. 14, n° 1, pp. 147–166, 1979.
- [5] J.-P. Brancher, “Dynamo unipolaire en régime impulsionnel,” Comptes Rendus de l’Académie des sciences, vol. 301, Série II, n° 14, 1985.