



**HAL**  
open science

## Moteur à énergie solaire sur paliers supraconducteurs

Kévin Berger, Fawzi Boufatah, Hocine Menana, Melika Hinaje, Bruno Douine,  
Jean Lévêque

### ► To cite this version:

Kévin Berger, Fawzi Boufatah, Hocine Menana, Melika Hinaje, Bruno Douine, et al.. Moteur à énergie solaire sur paliers supraconducteurs . Symposium de Génie Electrique (SGE 2016): Electrotechnique du Futur (EF), Electronique de Puissance du Futur (EPF) et Matériaux pour le Génie Electrique (MGE), Jun 2016, Grenoble, France. p. 34, id. 86869 - S0-2C: 5. hal-01286452

**HAL Id: hal-01286452**

**<https://hal.science/hal-01286452>**

Submitted on 11 Mar 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Moteur à énergie solaire sur paliers supraconducteurs

Kévin BERGER, Fawzi BOUFATAH, Hocine MENANA, Melika HINAJE,  
Bruno DOUINE, Jean LEVEQUE  
GREEN, Université de Lorraine, 54506 Vandœuvre-lès-Nancy, France

**RESUME** – Cet article présente l'étude de conception et de réalisation d'une structure originale de moteur électrique à énergie solaire, lévitant sur des paliers supraconducteurs. Le principe de fonctionnement et la structure sont d'abord exposés. Puis, un modèle électrique de la machine est obtenu à travers la modélisation analytique des grandeurs électromagnétiques. Nous précisons ensuite quelques éléments concernant la réalisation, en particulier, les paliers supraconducteurs. Pour finir, nous proposons une application potentielle de cette machine en tant que circulateur pour fluide cryogénique.

**Mots-clés**— énergie solaire, moteur à courant continu, moteur Mendocino, panneau photovoltaïque, supraconducteurs.

## 1. INTRODUCTION

Il existe certains types moteurs électriques dont l'avenir industriel est incertain mais qui méritent néanmoins d'être étudiés pour des applications spécifiques ou simplement par curiosité scientifique. Le moteur étudié dans ce travail fait partie de cette catégorie de moteurs à plusieurs titres.

Il s'agit d'une structure de moteur alimenté par énergie solaire et dont le rotor lévite magnétiquement. Cette structure de moteur à commutation par la lumière a été décrite pour la première fois en 1962 par Daryl Chapin *et al.* lors de leurs travaux sur les cellules photovoltaïques au Bell Telephone Laboratories [1], [2]. A cette époque, le rotor ne lévissait pas. La sustentation magnétique du rotor a été ajoutée plus tard par Larry Spring en 1994 [3], et parce que son laboratoire expérimental était situé sur la côte Mendocino en Californie, le moteur a été nommé « Larry Spring's Magnetic Levitation Mendocino Brushless Solar Motor », plus communément « moteur Mendocino ». Le principe de fonctionnement est celui d'un Moteur à Courant Continu (MCC) dont l'inconvénient majeur, i.e. les contacts bagues-balais, n'existe plus. En effet, les enroulements de l'induit sont alimentés par des panneaux photovoltaïques tournants et la commutation est réalisée naturellement lorsque les panneaux solaires fixés au rotor passent d'une luminosité élevée à une luminosité plus faible.

L'originalité apportée à cette structure est la sustentation magnétique sur paliers supraconducteurs limitant les frottements et assurant une stabilité naturelle du rotor. Nous commençons par une description de la structure de la machine, qui sera suivie par le développement du modèle électromagnétique associé.

## 2. STRUCTURE DE LA MACHINE

La structure de la machine est illustrée en Fig.1. Le stator se compose d'un aimant permanent, placé à la base, qui crée un champ magnétique fixe. Le rotor se compose d'un bobinage, alimenté par 4 panneaux photovoltaïques à surface plane, Fig.2. Le rotor est maintenu en lévitation par des paliers constitués d'aimants permanents associés à des pastilles supraconductrices refroidies à l'azote liquide.

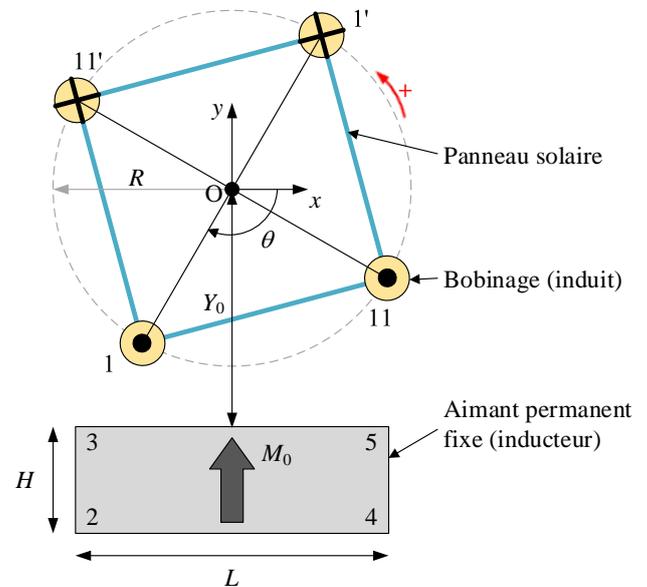


Fig.1 Illustration de la machine avec les dimensions utilisées. L'inducteur, un aimant permanent délimité par ses coins {2, 3, 4, 5}. L'induit est composé de 2 bobines, soit 4 fils notés {1, 1', 11, 11'}.



Fig.2 Photo du rotor d'un moteur à énergie solaire.

### 3. MODELISATION ELECTROMAGNETIQUE

Un modèle simplifié de la machine en 2D est présenté en Fig.1. Les composantes  $B_x$  et  $B_y$  de l'induction magnétique produite par un aimant considéré infiniment long suivant l'axe  $z$ , sur le fil noté 1 de l'induit de la machine est donné par [4]:

$$B_x = \frac{\mu_0 M_0}{4\pi} \ln \left( \frac{(\Delta y_{13}^2 + \Delta x_{13}^2)(\Delta y_{14}^2 + \Delta x_{14}^2)}{(\Delta y_{12}^2 + \Delta x_{12}^2)(\Delta y_{15}^2 + \Delta x_{15}^2)} \right), \quad (1)$$

$$B_y = \frac{\mu_0 M_0}{2\pi} \left( \arctan \left( \frac{\Delta y_{12}}{\Delta x_{12}} \right) - \arctan \left( \frac{\Delta y_{13}}{\Delta x_{13}} \right) - \arctan \left( \frac{\Delta y_{14}}{\Delta x_{14}} \right) + \arctan \left( \frac{\Delta y_{15}}{\Delta x_{15}} \right) \right), \quad (2)$$

avec  $\Delta x_{ij} = x_i - x_j$  et  $\Delta y_{ij} = y_i - y_j$ ,  $x_i$  et  $y_i$  étant les coordonnées du point noté  $i$  dans le plan  $xOy$ , et  $M_0$  l'aimantation de l'aimant permanent.

Les courants circulant dans les fils {1, 11} dépendent de l'angle d'incidence des rayons de la source lumineuse sur le panneau solaire qui les alimente, et donc de la position  $\theta$  du rotor. Les courants circulant dans les fils {1', 11'} sont rigoureusement opposés à ceux dans {1, 11}. Connaissant le courant dans chaque fil en fonction de la position du rotor, le couple peut ainsi être calculé analytiquement.

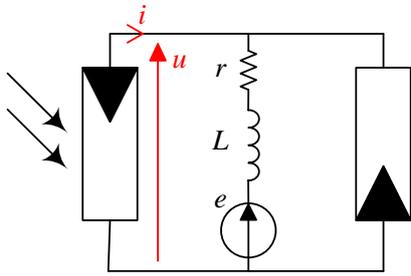


Fig.3 Schéma électrique de l'induit, avec un panneau solaire éclairé, à gauche.

A partir du schéma électrique de l'induit représenté sur la Fig.3, on écrit la tension aux bornes de chaque bobine {1, 1'}, {11, 11'} sous la forme classique pour une MCC :

$$u(t) = ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + e(t) \text{ avec } e(t) = k_\omega \omega(t), \quad (3)$$

où les paramètres  $r$ ,  $L$  et  $k_\omega$  peuvent tous être calculés analytiquement, en utilisant notamment (1) et (2).

### 4. RÉALISATION ET APPLICATIONS POTENTIELLES

Un premier prototype de cette machine sera construit au laboratoire début 2016. Nous envisageons d'utiliser des panneaux solaires délivrant une puissance unitaire de l'ordre du Watt, et possédant des dimensions proches de  $60 \times 120 \times 2 \text{ mm}^3$ .

Il existe de nombreux travaux décrivant les performances en lévitation de pastilles supraconductrices. Dans un article récent [5], les auteurs montrent qu'une pastille  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  perforée, de 30 mm de diamètre et 10 mm de hauteur, refroidie à l'azote liquide (77 K) à 10 mm d'un aimant permanent NdFeB, de 27 mm de diamètre et 10 mm de hauteur, est capable de maintenir un poids de 1,5 kg dans la direction axiale et 0,2 kg dans la direction radiale. Ces valeurs peuvent être considérablement augmentées en réduisant la distance initiale

entre l'aimant et le supraconducteur. De plus, le système ayant 2 paliers, il faut également doubler ces valeurs.

Deux configurations de paliers supraconducteurs-aimants envisagées pour le moteur sont présentées Fig.4. La configuration Fig.4 (a) permet, par exemple d'optimiser le refroidissement du supraconducteur, noté YBCO. Ainsi, en fonction de la configuration de la machine, horizontale ou verticale, de la configuration des paliers, il est possible de faire léviter une masse de quelques kilogrammes.

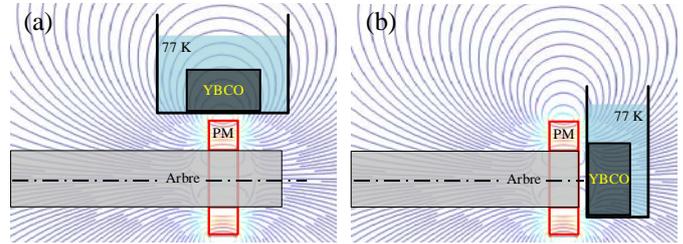


Fig.4 Configurations envisagées pour les paliers supraconducteurs-aimants.

Une des applications potentielles de ce moteur serait une pompe ou un circulateur pour fluide cryogénique comme l'azote liquide. En effet, l'un des principaux inconvénients de cette machine est l'utilisation d'un cryogène, nécessaire refroidir pour les paliers supraconducteurs. Un fonctionnement dans un fluide cryogénique serait donc un atout incontestable. Le bobinage de l'induit pourrait alors être réalisé en utilisant des fils supraconducteurs, réduisant ainsi à zéro les pertes joules de l'induit, seules pertes existantes dans ce moteur. L'inducteur pourrait également être remplacé par un aimant supraconducteur, augmentant ainsi l'induction magnétique à la surface d'un facteur 2 par rapport à un aimant conventionnel placé dans l'air, soit environ 800 mT à 77 K.

Par ailleurs, il est souvent mentionné dans la littérature que les performances des panneaux solaires augmentent avec la diminution de la température. Cependant, à notre connaissance, un fonctionnement prolongé dans l'azote liquide n'a pas encore été étudié. Il sera donc nécessaire d'élucider ce point en particulier.

### 5. CONCLUSIONS

Nous présentons dans cet article, la conception et la réalisation d'une nouvelle structure de moteur à courant continu, alimenté par énergie solaire et placé sur paliers supraconducteurs. Sous certaines hypothèses simplificatrices, tout le dimensionnement peut-être fait analytiquement. On obtient ainsi directement les performances de la machine en termes de caractéristique couple-vitesse. Nous proposons également d'utiliser ce moteur comme pompe ou circulateur dans un environnement cryogénique, sous réserve de fonctionnement des panneaux solaires.

### 6. REFERENCES

- [1] D. M. Chapin, C. S. Fuller, and G. L. Pearson, "Solar energy converting apparatus," Feb. 1957.
- [2] D. M. Chapin, *Energy from the sun*. New York: Bell Telephone Laboratories, Incorporated, 1962.
- [3] Larry Spring, "Larryspring School of Common Sense Physics [online]". Available at: [http://www.larryspring.com/sub06\\_motors.html](http://www.larryspring.com/sub06_motors.html).
- [4] F. Sass, G. G. Sotelo, R. de A. Junior, and F. Sirois, "H-formulation for simulating levitation forces acting on HTS bulks and stacks of 2G coated conductors," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 28, no. 12, p. 125012, 2015.
- [5] D. H. N. Dias, G. G. Sotelo, L. A. Moysés, L. G. T. Telles, P. Bernstein, D. Kenfaui, M. Aburas, X. Chaud, and J. G. Noudem, "Application of textured YBCO bulks with artificial holes for superconducting magnetic bearing," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 28, no. 7, p. 075005, 2015.