

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Générateur thermo acoustique MHD pour la production directe d'énergie électrique.

Antoine. Alemany¹, Armands. Krause²,

¹Laboratoire SIMAP/EPM, équipe pami, UMR 5266, 1130 rue de la piscine, BP 75, 38402 St Martin d'Heres,
Antoine.Alemany@hmg.inpg.fr

²Laboratoire IPUL, Institute of Physics, University of Latvia, 32 Miera Street, LV-2169, Latvia

Résumé : Les générateurs thermo acoustiques offrent un moyen unique de convertir l'énergie thermique en énergie mécanique sans aucune pièce mécanique mobile et même sans circulation de fluide. Ils sont comparables aux machines Stirling avec l'avantage d'une beaucoup plus grande simplicité. Ce sont donc des candidats naturels pour des utilisations spéciales où les possibilités d'interventions sont limitées. Dans un fonctionnement en générateur se pose le problème de la transformation de l'énergie mécanique disponible en une forme facilement exploitable comme l'énergie électrique. Les générateurs MHD offrent d'excellentes possibilités dans ce domaine notamment en mettant en œuvre les mécanismes de l'induction. La présentation proposée concerne donc le couplage entre un générateur thermo acoustique qui peut être à onde stationnaire ou à onde progressive, avec un nouveau concept de générateur à induction permettant d'obtenir directement du courant électrique à tension et courant modulables, délivrés à la fréquence de l'onde thermo acoustique. Pour l'instant le projet n'a été abordé que par simulation numérique. Cependant un programme expérimental basé sur la réalisation d'une maquette est à l'étude en collaboration avec des partenaires industriels et universitaires (AREVA, CNES, ESA et l'institut de physique de l'université de Lettonie, IPUL). Le programme de développement sera également inclus dans le projet de communication.

1 Introduction

Dans l'option générateur la thermo acoustique permet la production d'énergie mécanique, cette énergie est associée à la génération d'une onde de pression produisant des oscillations de vitesse dans un fluide compressible. La conversion de cette énergie mécanique en électricité peut être réalisée de différentes manières. Il est par exemple possible de mettre à profit la piezo électricité. Cependant ce procédé très simple ne permet pas d'obtenir des niveaux de puissance très élevée (quelques Watt au maximum). D'autres solutions pourraient être exploitées mettant en œuvre par exemple un système bielle manivelle pour entraîner un alternateur. Cette possibilité bien réelle s'accompagne nécessairement de pièce mécanique en mouvement ce qui anéantit l'intérêt de la thermo acoustique qui se fonde précisément sur l'absence de pièce en mouvement. D'autres possibilités sont basées sur l'utilisation de machines linéaires à induction utilisant des pistons solides pour créer des variations de flux magnétique dans un bobinage et ainsi engendrer du courant électrique. Bien que beaucoup plus simple que les propositions précédentes cette option s'accompagne aussi de pièces mécaniques solides en mouvement.

La possibilité de coupler l'effet thermo acoustique à un générateur MHD a ceci d'attractif qu'elle ne fait intervenir aucune pièce mécanique mobile. Il est intéressant de noter

que ce type de générateur basé sur l'utilisation d'un métal liquide a déjà été proposé et expérimenté avec succès. Le principe de base s'appuie sur le concept des pompes électromagnétiques fonctionnant en générateur. Les pompes permettent de transformer de l'énergie électromagnétique en énergie mécanique, c'est exactement les transferts inverses qui se produisent dans les générateurs. Dans ce concept, deux types de machines peuvent être envisagés : Les machines à conduction [1] produisent du courant à forte intensité et faible tension, ces machines nécessitent des électrodes pour collecter le courant produit ce qui peut être un handicap pour des questions d'étanchéité, et les machines à induction [2] qui permettent de produire directement du courant électrique à tension et courant ajustable et qui ne nécessitent pas d'électrode ce qui est un atout important dans certains types d'utilisations.

Les deux possibilités peuvent être envisagées dans le cas du couplage avec la thermo acoustique. L'étude des générateurs à conduction couplés avec l'effet thermo acoustique a été réalisée dans le cadre d'une thèse [3], et publiée [4]. Ce système permet théoriquement d'excellent rendement énergétique, avec cependant des conditions de charge qui ne sont pas très réalistes.

La possibilité d'utiliser les mécanismes de l'induction paraît bien plus attractive, elle est d'autant plus réaliste que la thermo acoustique délivre de l'énergie mécanique

directement sous forme alternative ce qui se prête parfaitement à la mise à profit de générateurs basés sur des variations de flux magnétique.

Le système proposé concerne un nouveau type de générateur à induction mettant en œuvre les oscillations d'un métal liquide, produites par l'effet thermo acoustique.

2 Description du générateur

Le principe du générateur MHD à induction [5] est représenté sur la figure 1. Globalement, le système se fonde sur l'oscillation d'un métal liquide en présence d'un champ magnétique imposé. L'interaction des oscillations de vitesse du métal avec le champ magnétique produit du courant électrique induit qui est pulsant à la même fréquence que les oscillations de vitesse. Ces courants pulsants créent à leur tour un champ magnétique induit pulsant également qui génère des variations de flux magnétique dans un bobinage extérieur. Ces variations de flux magnétique créent à leur tour du courant électrique dans le bobinage dont les caractéristiques dépendent d'une part de celles de la charge et d'autre part des caractéristiques de la bobine, et notamment de sa self.

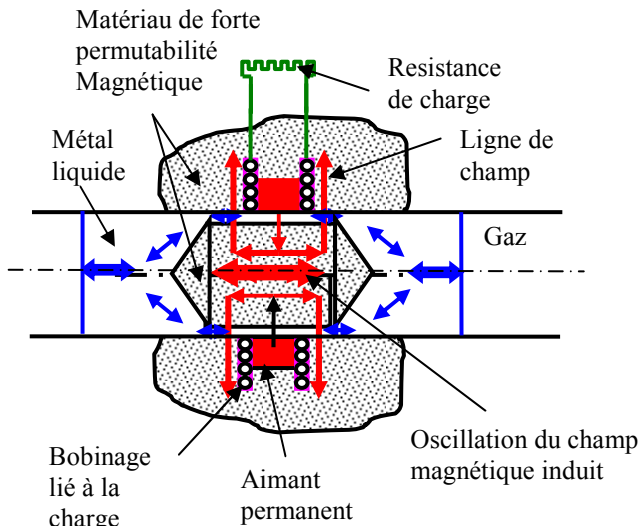


Figure 1 : Schéma de principe du générateur MHD à induction

La forme du canal et l'espace annulaire dans lequel oscille le fluide peuvent être modifiés pour donner la meilleure efficacité énergétique.

3 Description du système

Le générateur électrique MHD lui-même doit être couplé avec le générateur thermo acoustique pour fournir un dispositif complet et autonome. La proposition peut être représentée sur la figure 2 suivante :

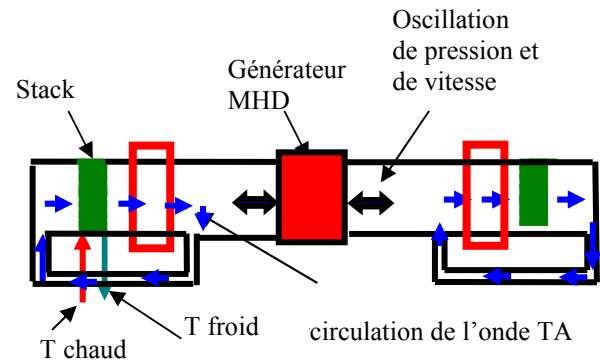


Figure 2 : Schéma du Concept de production d'électricité par combinaison de générateur thermo acoustique et MHD

Le générateur MHD est localisé entre 2 tubes thermo acoustiques qui peuvent être disposés par exemple comme l'indique la figure. Le circuit de retour correspondant à la mise en œuvre d'une onde progressive peut être supprimé le générateur se trouve alors en sandwich entre 2 tubes produisant chacun une onde stationnaire. Les fluctuations de pression générées de part et d'autre du générateur MHD permettent de produire les oscillations de vitesse au sein du métal liquide qui par interaction avec le champ magnétique imposé par un aimant permanent produit du courant électrique.

Le système proposé s'appuie sur l'utilisation d'un gaz comme fluide thermo dynamique fournissant l'énergie mécanique au système global et sur un métal liquide (du sodium) dans le générateur MHD pour transformer l'énergie mécanique en énergie électrique. Le sodium est en effet le fluide le plus approprié pour effectuer ce transfert énergétique, du fait de sa faible masse volumique qui le rend sensible aux fluctuations de pression en limitant les effets dues à l'inertie, et du fait également de sa grande conductivité électrique qui le rend sensible à l'influence d'un champ magnétique.

Le problème de l'interface liquide gaz peut être résolu aisément lors d'une application terrestre du procédé puisque dans ce cas, le générateur MHD peut être localisé en partie basse du dispositif, les deux parties thermo acoustiques étant situées en partie supérieure. Ainsi la gravité permet de résoudre facilement le problème. En ce qui concerne les applications dans le domaine spatial le problème est un peu plus délicat. Il peut être résolu en mettant à profit la tension superficielle par exemple comme l'indique la figure 3. D'autres options sont à l'étude basées sur la possibilité d'utiliser une barrière magnétique entre les 2 fluides.

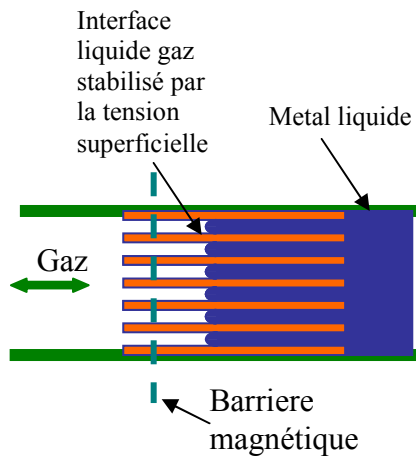


Figure 3 : Schéma de principe du dispositif préconisé pour la stabilisation de l'interface liquide gaz pour une application spatiale

4 Le couplage

Le couplage entre les 2 éléments thermo acoustiques et MHD n'est pas immédiat puisqu'il faut assurer à la fois la continuité de la pression à l'interface liquide gaz et la continuité de la vitesse. Deux possibilités peuvent être envisagées pour résoudre le problème.

Il est admis que les 2 éléments thermo acoustique et MHD sont modélisés séparément.

En ce qui concerne la thermo acoustique les modèles existent même s'ils sont encore incomplets relativement à l'effet de la turbulence par exemple et au dimensionnement des échangeurs tout à fait singuliers puisque soumis à des écoulements non permanents à vitesse moyenne nulle. La modélisation utilisée s'appuie donc sur une description simple unidirectionnelle déjà proposée par Swift.

Le générateur MHD a été modélisé également sous les hypothèses d'un faible nombre de Reynolds magnétique qui permet de négliger le champ induit devant le champ appliqué d'une part et d'autre part en négligeant les effets de viscosité et de turbulence, le champ de vitesse dans une section droite du générateur est considéré comme constant. Le détail du calcul est assez long et dépasse en taille le cadre de ce papier, mais il sera donné dans les grandes lignes lors de l'exposé oral.

La première possibilité de couplage entre les 2 modèles consiste à partir des caractéristiques obtenues dans le générateur MHD qui donne la pression et la vitesse à l'interface liquide gaz, et d'en déduire les paramètres d'entrée à la source chaude, notamment le flux thermique introduit. Cette méthode ne semble ne pas toujours conduire à un résultat physiquement acceptable.

La deuxième se fonde sur la notion d'impédance. Dans ce cas, il s'agit de définir la corrélation pression vitesse par une relation de la forme :

$$P = Z V$$

L'Impédance Z étant une quantité complexe. Ce type de relation peut être défini pour la partie thermo acoustique et pour la partie générateur MHD. L'égalité des 2 impédances donne alors un point de fonctionnement. Ce travail est en cours.

5 Perspectives

Les modèles numériques thermo acoustiques et MHD sont actuellement opérationnels, il reste à définir le couplage.

Sur le plan expérimental la construction d'une expérience pour valider les performances du générateur MHD est en cours de définition. Cette expérience pourrait être conduite en collaboration avec l'université de Lettonie (Institut de Physique de l'Université de Lettonie, IPUL) compétente pour la conduite d'expérimentation au sodium.

L'objectif premier du projet est la production d'énergie électrique dans l'espace à un niveau de puissance voisin de 500 Watts électriques, la source chaude étant un élément de combustible nucléaire (RHU) qui fournit de l'énergie thermique en continu pendant près de 1 siècle. La source froide serait un radiateur rayonnant l'énergie dans l'espace.

Au niveau des performances il est envisagé les caractéristiques suivantes :

Source chaude :	~ 1000 ,K
Source froide :	~ 600 K
Fluide thermodynamique	hélium
Pression moyenne	> 30 bars
Métal liquide :	Sodium ou NaK
Puissance électrique :	~ 500 Watts
Tension	~50 à 100 Volt
Courant :	~5 à 10 Ampère
Masse totale envisagée	~20 à 30 Kg
Rendement global envisagé	~50%de Carnot
Masse spécifique envisagée	~10 W par Kg.

Table 1 : Quelques caractéristiques du générateur TA/MHD pour une application spatiale

La masse est un élément important pour une application spatiale ainsi la notion de puissance spécifique c'est-à-dire la puissance par unité de masse est tout aussi importante que la notion de rendement.

Les partenaires du projet sont la société AREVA, Le CNRS, et l'ESA (Agence spatiale Européenne), ainsi que L'Institut de Physique de l'Université de Lettonie (IPUL).

Parmi les perspectives très importantes figurent aussi les applications à la production d'électricité par énergie solaire. Dans ce cas la machine serait placée au foyer d'un capteur solaire parabolique ou cylindro-parabolique.

Remerciements

Ce travail en cours a bénéficié du soutien de la société AREVA TA et de l'ESA que je tiens à remercier, notamment pour le co-financement de la thèse de C. Vugin, Il s'inscrit également dans le cadre des activités du GDR Thermo acoustique du CNRS et du GDRE Européen GAMAS (Groupe pour les Applications des Magnéto Sciences).

References

- [1] Marty Ph., "Direct-current power generation in self-excited liquid metal magnetohydrodynamic generators" *Magnetohydrodynamics*, vol.27 no. 4, 455-60. USA.. (1991)
- [2] Jousselein F. Alemany A. Werkoff F. and Marty Ph., "MHD induction generators at weak magnetic Reynolds number - Part 1 Self-excitation criterion and efficiency" *Europ. Journal of Méchanics*, Vol.8B 1 (1989).
- [3] Vogin C. "Etude d'un générateur thermo acoustique MHD pour une application spatiale" Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, soutenue le 4 Janvier 2005.
- [4] Vogin C., and Alemany A., "Analysis of the flow in a thermo-acoustic MHD generator with conducting walls" *European Journal of Mechanics / B Fluids*, 26 (4), 479-493, (2007).
- [5] Ramee T., Roux JP., Alemany A: "TA MHD electrical generator study Engineering Baselines Definition" Rapport interne ESA 5 11 2009.