

Conversion directe d'énergie mécanique en chaleur par dissipation visqueuse : Etude expérimentale et modélisation d'un prototype.

Philippe CHAUVELON^{1*}, Pascal BONNET, Muriel CARIN¹, Patrick GLOUANNEC¹

¹Laboratoire Ingénierie des MATériaux de Bretagne (LIMATB). Université de Bretagne Sud - UEB
Equipe Thermique et Energétique - Centre de recherche, BP 92116 - 56321 Lorient Cedex, France

* (auteur correspondant : philippe.chauvelon@univ-ubs.fr)

Résumé - L'objectif de la présente étude concerne la récupération de chaleur par dissipation visqueuse d'énergie mécanique. Un dispositif expérimental a été mis au point dans notre laboratoire. Par la suite, un modèle numérique a été développé afin de simuler le fonctionnement de ce prototype. Les résultats de la modélisation ont été confrontés aux résultats numériques. Cela a permis une analyse numérique de la sensibilité de différents paramètres (géométrie, propriétés physiques, ...) et ainsi de mettre en évidence les points à améliorer pour la mise au point d'un prototype futur.

Nomenclature

C	couple à l'arbre du rotor, $N.m$	<i>Symboles grec</i>	
C_p	chaleur massique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	λ	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
h	hauteur du rotor, m	μ	viscosité dynamique, $Pa.s$
K_{moy}	coefficient d'échange global, $W.K^{-1}$	ρ	masse volumique, $kg.m^{-3}$
q_m	débit massique d'eau, $kg.s^{-1}$	ω	vitesse de rotation, $rad.s^{-1}$
R_1	rayon du rotor, m	θ	angle, rad
R_2	rayon de l'enveloppe, m	<i>indice</i>	
r, z	coordonnées cylindriques, m	a	ambiante
T	température, $^{\circ}C$	e	entrée
t	temps, s	m	moyenne
U	vecteur vitesse, $m.s^{-1}$	s	sortie

1. Introduction

Depuis un certain nombre d'années, le contexte économique et environnemental amène à l'émergence de nouveaux systèmes de production d'énergie utilisant les énergies renouvelables. Certaines configurations particulières (sites isolés, installations mobiles, etc.) conduisent parfois à devoir rechercher des systèmes spécifiques et innovants qui hélas ont parfois une efficacité médiocre. Dans cette optique, une étude a été initiée en 2007 dans notre laboratoire. L'objectif est la production d'eau chaude sanitaire directement à partir d'une source d'énergie mécanique, cette dernière pouvant, par exemple, être d'origine éolienne. L'idée initiale était de l'utiliser dans le cadre de la navigation de plaisance. Soutenu par un contrat ISEO-ANVAR Jeune Bretagne dans le cadre de la formation en Master Energétique de l'Université de Bretagne Sud [1], le laboratoire LIMATB a mis au point un prototype. Dans une deuxième étape, nous avons développé une simulation permettant la modélisation numérique de ce prototype.

2. Le prototype expérimental

2.1. Antériorité

Bien que très tôt mise en évidence par la célèbre expérience de Joule [2] permettant d'établir la correspondance entre l'énergie mécanique et l'énergie calorifique, la conversion directe de l'énergie mécanique en chaleur par dissipation visqueuse a finalement peu donné lieu à des réalisations pratiques. Quelques références de systèmes ont cependant été trouvées dans la littérature : dispositif à pâles, dispositif à pâles perforées, dispositif à rotor rainuré, etc. [3-7]. La géométrie de notre système a été retenue après l'étude bibliographique sur les systèmes existants et après intégration des contraintes liées à nos propres objectifs (entre autres : une géométrie simple et modulable permettant une modélisation numérique aisée).

2.2. Montage expérimental

2.2.1. Géométrie

Notre choix s'est porté sur un prototype constitué de deux cylindres coaxiaux. Le cylindre intérieur est mis en rotation autour de son axe vertical, l'autre restant immobile. L'espace entre les deux cylindres, de 3 mm, est rempli d'un fluide visqueux. De l'eau circule dans un circuit hélicoïdal à l'intérieur même de l'enveloppe extérieure (Fig. 1). Le cylindre intérieur a une hauteur de 240 mm pour un diamètre de 200 mm.

Toutes les pièces sont en aluminium hormis l'axe, la pièce d'accouplement entre l'axe et le mandrin et les embouts d'entrée et de sortie du circuit d'eau qui sont en acier inoxydable. La figure 2 montre les principaux éléments métalliques constituant le montage.

2.2.2. Métrologie

La rotation du cylindre intérieur est assurée par un moteur asynchrone, muni d'un réducteur, dont on peut faire varier la vitesse de rotation de 0 à 260 tr.min⁻¹. L'instrumentation mise en place permet de connaître le couple mécanique, l'énergie récupérée par le fluide et sa température en différents points (Fig. 1). Le couple mécanique est mesuré avec une précision estimée à ± 0.1 N.m. La température d'entrée d'eau de refroidissement circulant dans le circuit hélicoïdal du cylindre extérieur est régulée à l'aide d'un bain thermostaté. Trois thermocouples fins (diamètre 75 μ m, de type K), ont été implantés à trois hauteurs différentes (à 20, 120 et 220 mm), afin de mesurer la température dans le fluide visqueux à environ 0.3 mm de la paroi du cylindre fixe. Deux thermocouples ont été placés en entrée et en sortie de l'eau de refroidissement (diamètre 1mm, de type K). Le débit est réglé et mesuré à l'aide d'un débitmètre à flotteur avec vanne de réglage.

2.2.3. Caractéristique du fluide visqueux

Le choix du fluide s'est fait en tenant compte de plusieurs contraintes : viscosité importante, absence d'agressivité et de dangerosité, tenue en température et dans le temps du fluide et de ses caractéristiques physiques et thermo-physiques, connaissance des variations de celles-ci en fonction de la température. Au final, notre choix s'est porté sur une huile de lubrification d'engrenages BSS de chez Total™ (propriétés à 20°C : $\mu = 1,56$ Pa.s, $\lambda = 0,2$ W.m⁻¹.K⁻¹, $C_p = 1889$ J.kg⁻¹.K⁻¹ et $\rho = 888$ kg.m⁻³).

2.3. Résultats expérimentaux

Une première série d'essais a été réalisée afin de vérifier le bilan énergétique (1) et d'estimer les éventuels échanges thermiques avec l'air ambiant. La puissance mécanique est alors égale à la somme de la puissance calorifique récupérée sur l'eau et de l'estimation des pertes par l'enveloppe extérieure, ce qui s'écrit, en régime stationnaire :

$$\omega C = q_m C_p (T_s - T_e) + K_{moy} (T_m - T_a) \quad (1)$$

Les expériences ont été réalisées pour quatre températures d'entrée d'eau : 5°C, 15°C, 25°C et 35°C. Pour chacune des températures, nous avons fait varier la vitesse de rotation du moteur de 0 à 260 tr.min⁻¹. Après stabilisation, la puissance récupérée sur l'eau est calculée, ainsi que la puissance totale dissipée, à savoir la somme de la puissance échangée par l'eau et les pertes (coefficient d'échange global évalué à $K_{moy} = 0,7 \text{ W.K}^{-1}$). Les résultats sont présentés sur la figure 4. Nous pouvons remarquer la forte corrélation entre la température d'eau et la puissance dissipée.

3. Modèle numérique

Parallèlement à l'étude expérimentale, un modèle numérique thermohydraulique 2D-axisymétrique a été développé afin de simuler les écoulements et les échanges thermiques dans le fluide visqueux et l'enveloppe et ainsi d'obtenir une estimation de la chaleur récupérée par l'eau en fonction des conditions expérimentales. Le fluide est supposé incompressible et Newtonien. Les propriétés dépendent de la température. La convection naturelle est négligée. Le modèle développé sous Comsol Multiphysics ® permet de résoudre les équations couplées de conservation de la quantité de mouvement (Eq. 2), de conservation de la masse (Eq. 3) et de l'énergie (Eq. 4) en tenant compte des effets dissipatifs responsables de l'échauffement de l'huile (Equation 5, exprimée en coordonnées cylindriques).

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right] = -\nabla p + \nabla \cdot \left(\mu \left(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T \right) \right) + \vec{F}_v \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (3)$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \mu \Phi \quad (4)$$

$$\phi = \left(r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v}{r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} \right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{u}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (5)$$

Le couple est calculé grâce à l'équation (6)

$$C = \frac{4 \pi \times \omega \times \mu \times R_1^2 R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \times h \quad (6)$$

La circulation hélicoïdale d'eau autour du dispositif étant difficilement modélisable en 2D axisymétrique, celle-ci est prise en compte en imposant un flux de chaleur convectif pour lequel la température de l'eau est estimée, au niveau de chaque canal, en tenant compte des pertes subies à chaque passe. Le coefficient d'échange convectif est, quant à lui, constant et estimé à 600 W.m⁻².K⁻¹ à partir de formules de corrélation.

Nous présentons sur la figure 3 le maillage, constitué de 28 395 éléments triangulaires, plus raffiné pour le domaine fluide, ainsi que les conditions aux limites.

4. Comparaison modèle numérique – résultats expérimentaux

Nous avons effectué différents calculs correspondant aux conditions expérimentales puis confronté les résultats expérimentaux aux résultats de la simulation. Nous avons observé un bon accord entre modèle et expérience, comme l'illustre la figure 5 qui présente les profils de température – à mi-hauteur- dans le fluide visqueux et pour 4 vitesses de rotation (100, 150, 200 et 260 tr.min^{-1}) et une température d'entrée d'eau de 25°C.

5. Analyse de sensibilité

Après avoir validé le modèle numérique, nous avons étudié l'influence des différents paramètres sur la puissance récupérée.

Pour étudier l'influence de la viscosité, des simulations ont été réalisées avec des fluides qui seraient plus visqueux que notre huile BSS de référence (une huile NVIP 1050 deux fois plus visqueuse et un mélange huile + polymère trois fois plus visqueuse). Comme le montre la figure 6, on observe une augmentation non négligeable de la puissance dissipée avec l'augmentation de la viscosité. De même, nous avons mis en évidence que l'épaisseur de l'interstice de fluide visqueux avait une forte influence. En effet, on obtient un gain d'environ 75% sur les puissances dissipées en réduisant l'espace entre les deux cylindres de 3 mm à 1 mm. Ceci s'explique par l'augmentation du taux de cisaillement avec la réduction de l'interstice et donc de l'apport de chaleur par frottement. La température d'entrée de l'eau a, elle aussi, une influence non négligeable, mais très certainement, indirectement, à cause de son incidence sur la viscosité de l'huile. Les autres paramètres : conductivité thermique du fluide, débit d'eau, coefficient d'échange etc., ont des effets relativement très minimes sur la chaleur récupérée.

6. Amélioration du prototype

Afin d'augmenter l'échauffement du fluide visqueux, on peut augmenter la vitesse de rotation du cylindre intérieur ou les dimensions du prototype, mais cela peut conduire à des problèmes techniques ou technologiques divers. L'important étant d'augmenter le cisaillement et la surface de contact avec le fluide visqueux, on peut envisager de rainurer verticalement le cylindre intérieur ou d'utiliser un empilement de disques tournant en sens contraire les uns avec les autres ou d'utiliser un cylindre (éventuellement moins haut que celui utilisé dans notre prototype) mais avec des évidements concentriques (voir Fig. 7).

Il est apparu lors de cette étude qu'une viscosité importante du fluide était primordiale. Il est donc impératif d'employer une huile de très forte viscosité. Comme celle-ci, et donc la chaleur récupérée, diminuent lorsque la température augmente, il serait intéressant de trouver un fluide dont la viscosité varie peu avec la température.

En tenant compte de toutes ces remarques, le modèle nous montre que l'on pourrait envisager de doubler l'énergie récupérée en moyenne.

7. Conclusion

Les résultats obtenus lors de cette première approche du problème laissent augurer des résultats intéressants lors du développement de ce système. L'objectif est donc de poursuivre l'étude par la mise au point et l'exploitation d'un prototype tel que présenté au paragraphe 6 tenant compte des résultats de cette première étude.

Références

- [1] P. Bonnet, Conversion directe de l'énergie mécanique d'une éolienne en chaleur par dissipation, Rapport de stage de Master M2 Energétique, Université de Bretagne Sud (2008).
- [2] J.P. Joule, On the existence of an equivalent relation between heat and the ordinary forms of mechanical power, *Philosophical Magazine*, serie 3, 27 (1845), 205.
- [3] Alessandro Beldimano; Patent: Apparatus for transforming mechanical energy into heat ; The Alien Properties Custodian 14 mars 1944 N° 326,790
- [4] Nazeer Ahmed; Myrna M. Ahmed; Patent: Method of heating water using wind energy and apparatus therefore 9 juin 1981 N° 4,271,790
- [5] Dean A; Patent: Heat generating device, Freihage 16 juin 1981 N° 4,273,075
- [6] Monte R.Krechtmar ; Charles K.England; Patent: Heat generating unit for heating a liquid 12 mai 1987 N° 4,664,068
- [7] Takahiro Moroi ; Takashi Ban; Tatsuy Hirose ; Kiyoshi Yagi; Patent: Viscous heater with shear force increasing means , 29 juin 1999 N° 5,915,341

Remerciements

Nous remercions ici : ISEO-ANVAR Bretagne pour l'aide financière apportée lors de la réalisation du prototype, les techniciens de l'université : Michel Dumons, Jean Costa et Francois Portanguen, ainsi que Mr Jacques Morvan qui est à l'origine de ce projet.

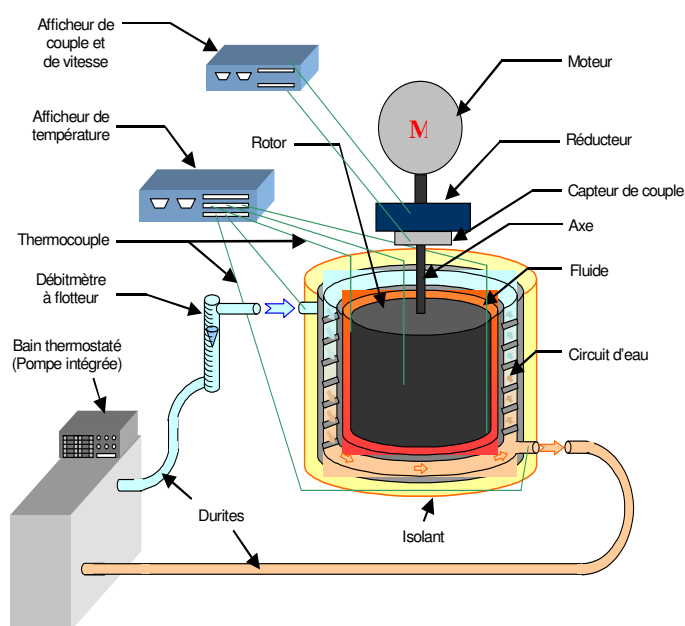


Figure 1 : Schéma de principe de l'installation.

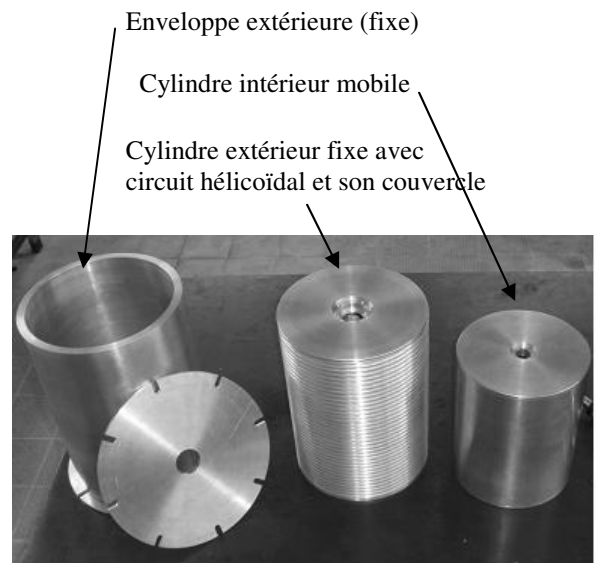


Figure 2 : photo des principaux éléments constituant le prototype.

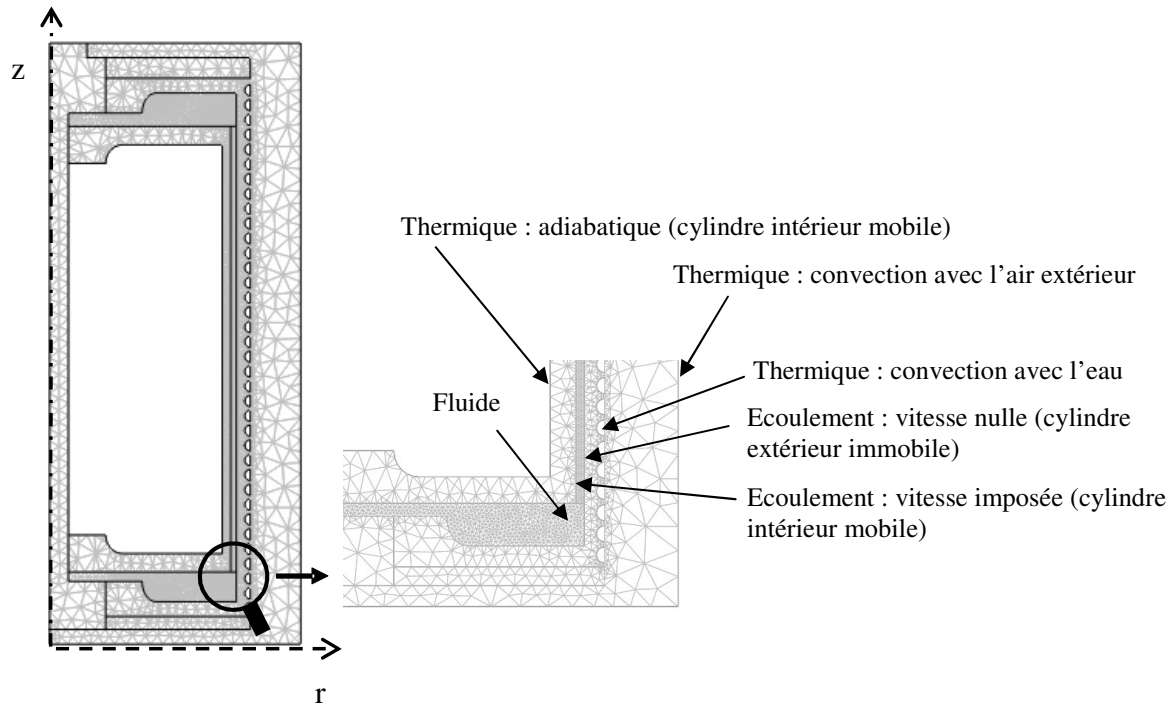


Figure 3 : Maillage et conditions aux limites retenues

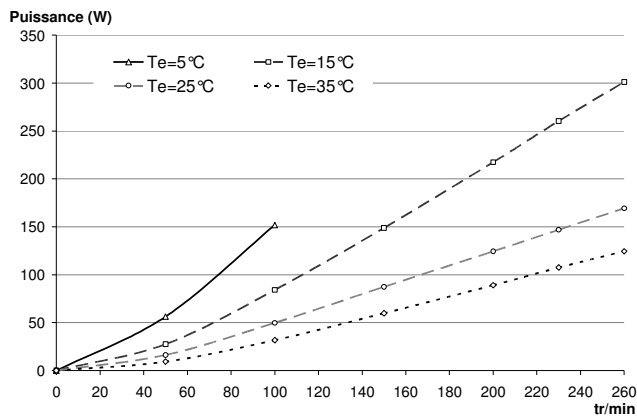


Figure 4 : Puissance dissipée mesurée (ou puissance mécanique)

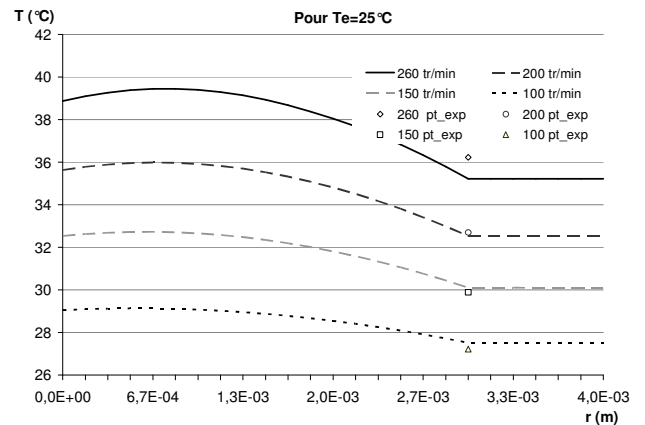


Figure 5 : profil de température modélisé dans le fluide visqueux et points expérimentaux à mi hauteur

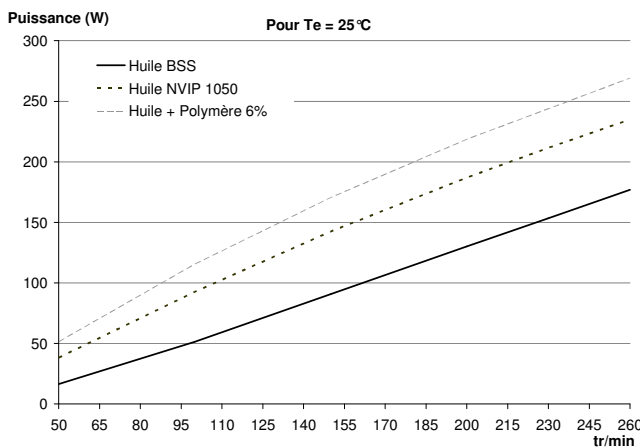


Figure 6 : Incidence de la viscosité sur la puissance dissipée.

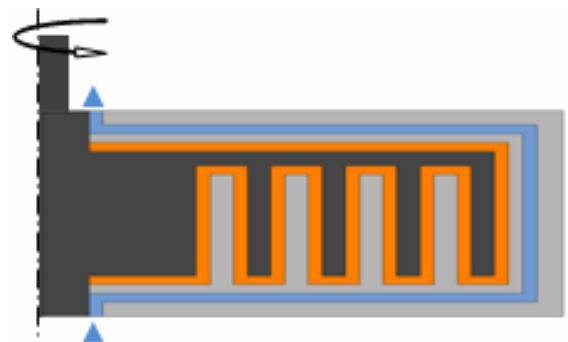


Figure 7 : géométrie proposée pour un second prototype