

Etude expérimentale d'un moteur Stirling pour une application de véhicule hybride.

Experimental study of a Stirling engine for a hybrid vehicle.

Philippe NGUYEN¹, Sylvie BEGOT^{1*}, Steve DJETEL¹, François LANZETTA¹, Wissam BOU NADER²

¹FEMTO-ST Institute, Univ. Bourgogne Franche-Comté, CNRS, Département ENERGIE, 90000 Belfort, France

²Centre technique de Vélizy, Groupe PSA, 78943 Vélizy, France

*(auteur correspondant : sylvie.begot@univ-fcomte.fr)

Résumé – cet article présente une étude expérimentale d'une machine Stirling destinée à une application de véhicule hybride. Un prototype de puissance théorique 10 kW a été développé avec le groupe PSA avec comme gaz de travail de l'azote. Le banc d'essai utilisé pour valider le prototype est décrit. Les résultats présentés détaillent la marche du moteur à vide : pression au cours du cycle, températures, couple et vitesse instantanés, pertes dans les circuits de refroidissement.

Mots-clés : Moteur Stirling ; véhicule hybride ; étude expérimentale ;

Abstract – this article presents an experimental study of a Stirling machine for a hybrid vehicle application. A 10 kW theoretical power prototype has been developed with Groupe PSA using nitrogen as a working gas. The test bench used to validate the prototype is described. The results presents detailed operation of the machine in engine mode at no load : cycle pressure, temperatures, instantaneous torque and speed, losses in the cooling circuits.

Keywords: Stirling engine ; hybrid vehicle ; experimental study ;

Nomenclature

P	pression, bar	e	détente
Q	quantité de chaleur, J	ext	externe
S	entropie, J.K ⁻¹	H	température source chaude, K
T	température, K	L	température puits froid, K
V	volume, m ³	p	paroi
<i>Indices et exposants</i>		R	régénérateur
c	compression	r	rebond
E	entrée	S	sortie

1. Introduction

Les machines à apport de chaleur externe font partie des technologies qui sont à nouveau étudiées en remplacement de technologies peu compatibles avec la vision actuelle du développement durable. Fonctionnant en mode moteur, ces machines convertissent une énergie thermique en énergie mécanique donc potentiellement en électricité. L'apport de chaleur est externe à la machine ce qui les rend très polyvalentes vis-à-vis des sources thermiques : biocarburants, carburants solides, récupération de chaleur, sources solaires. La machine Stirling est un moteur à apport de chaleur externe inventée par Robert Stirling en 1816 [1].

Le cycle théorique de Stirling comprend 4 transformations thermodynamiques (Figure 1) :

- 1→2 compression isotherme où le maintien en température à T_L est assuré par l'échangeur froid,
- 2→3 un chauffage isochore où la quantité de chaleur stockée dans le régénérateur Q_R est transmise au gaz de travail,
- 3→4 une détente isotherme où le maintien en température à T_H est assuré par l'échangeur chaud,
- 4→1 un refroidissement isochore où le gaz transmet la quantité de chaleur Q_R au régénérateur.

Le cycle théorique de Stirling possède un rendement égal à celui de Carnot, ce qui est une des raisons de l'intérêt qu'on lui porte. Dans sa configuration originelle, la machine Stirling est une machine monocylindre qui comprend un piston de travail, un piston déplaceur, un volume de compression, un volume détente et un volume occupé par un régénérateur. Cette configuration porte le nom de configuration Bêta (Figure 2). Le piston de travail effectue la compression et la détente du fluide, alors que le piston déplaceur, appelé souvent simplement déplaceur, transfère le gaz entre les zones chaude et froide de la machine assurant ainsi les transformations isochores du cycle de Stirling. La présence du régénérateur permet de stocker la quantité de chaleur du fluide lors du transfert du gaz de la zone chaude à la zone froide et de la restituer dans le sens inverse.

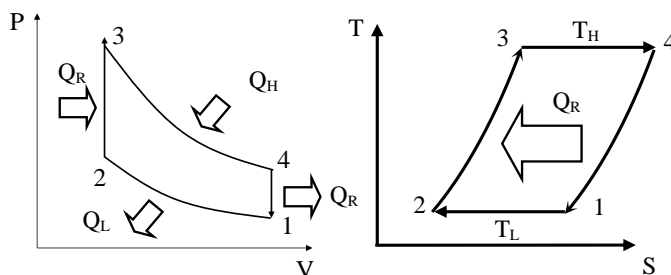


Figure 1: Diagramme de cycles de Stirling théoriques

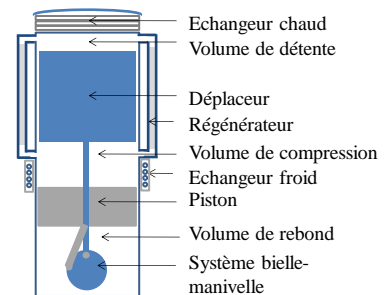


Figure 2. Moteur Stirling de type Bêta

Pour une application de transport automobile, les premiers résultats assez complets d'essais d'un prototype de moteur Stirling ont été publiés par la NASA en 1978 et 1979 [2][3]. Le moteur Stirling utilisé était le moteur GPU3 de 3 kW dérivé d'un moteur de 10 kW. Des essais avec un moteur P40 de 40 kW ont été publiés en 1981 [4]. Le GPU3 a été intégré dans une Opel KADETT en 1969. Une AMC Spirit en 1979 et une Chevrolet Celebrity en 1987 ont été équipées d'un moteur P40 de 40 kW [5]. Les résultats d'essais du moteur GPU3 sont encore très largement utilisés pour valider différents travaux de modélisation (Timoumi *et al.* en 2008 [6] et Hosseinzade *et al.* [7] en 2015 par exemple). Des résultats d'essais de prototypes de puissance de l'ordre de 10 -1 kW ont depuis été publiés (Aksoy et Cinar en 2013 [8], Scollo *et al.* en 2008 [9] par exemple), mais il n'existe pas à l'heure actuelle de résultats détaillés pour des moteurs Stirling de puissance de l'ordre de 10 kW. De plus, l'application envisagée d'intégration dans un véhicule électrique hybride compatible avec les normes automobiles actuelles implique de connaître de données qui n'étaient pas investiguées dans les essais des années 1970, en particulier les puissances, rendements, production de CO_2 et émissions de polluants sur des cycles d'aujourd'hui avec une hybridation. Aussi, nous avons pour projet de développer et d'étudier un prototype de moteur Stirling [10] afin d'obtenir de nouvelles données pour concevoir et modéliser des véhicules électriques hybrides. Dans cet article, nous présentons les premiers résultats expérimentaux du prototype construit.

2. Caractéristiques du prototype

Le prototype de moteur Stirling développé est une configuration Bêta (Figure 2) [3]. Le vilebrequin ainsi que les bielles du piston et du déplaceur sont situés dans un volume sous pression appelé volume de rebond. Le prototype a été conçu pour puissance nominale de 10 kW, une pression nominale est de 60 bar, et pour une utilisation avec l'azote comme gaz de travail. Il est prévu pour utiliser une source chaude à environ 1250 K et un puits froid à environ 300 K. Les principales caractéristiques du prototype sont présentées dans le Tableau 1.

Caractéristiques	Unité	Valeurs nominales	Valeurs expérimentales
Température source chaude	K	1250	1250
Température puits froid	K	300	300
Pression	bar	60	14
Gaz de travail		N ₂	N ₂
Fréquence de rotation	Hz	50	8
Diamètre du piston	m	10 ⁻¹	10 ⁻¹
Volume balayé par le piston	m ³	4.5x10 ⁻⁴	4.5x10 ⁻⁴
Puissance	kW	10	à vide

Tableau 1 : *Caractéristiques du prototype*

3. Description du banc d'essais

Le banc d'essais du moteur est présenté sur la Figure 3. Il reprend les principes utilisés par la NASA [2]. La source chaude est constituée par un four électrique installé autour de la tête et maintenu par un support. Les caractéristiques du four sont les suivantes : un corps chauffant tubulaire de diamètre 200 mm pour une hauteur de 150 mm, une puissance de chauffe de 7 kW, une température maximale de 1200 °C. La puissance du four est pilotée grâce à une commande qui comprend un auto-transformateur variable qui indique la valeur du courant et celle de la tension. Le puits froid est constitué par un circuit de refroidissement à eau au niveau de l'échangeur situé autour du volume de compression.

Pour le démarrage, la machine Stirling est entraînée par une machine électrique asynchrone de puissance 11 kW et d'un variateur de fréquence de même puissance. La liaison mécanique entre l'arbre de la machine électrique et la machine Stirling est assurée par un accouplement magnétique constituée par un rotor externe, une cloche ou pot d'entrefer et par un rotor interne. La cloche doit être refroidie. Un circuit de refroidissement est aussi utilisé pour refroidir le volume de rebond et donc le système bielle-manivelle.

En ce qui concerne l'instrumentation (Figure 4), les capteurs utilisés sont les suivants :

- 3 capteurs de pression pour les espaces de détente (Kulite EWCTV-31-70 bar), de compression et de rebond de la machine (Kulite ETM-DC-375 70 bar), leur calibration a été effectuée au laboratoire et leurs incertitudes de mesure estimées à +/- 1 bar,
- 11 thermocouples de type K, gainés inox, précision +/-1.5°C et diamètre 3 mm pour mesurer les différentes températures,
- 1 capteur pour mesurer le couple et la vitesse de rotation (Dataflex 32 - 300 N.m +/- 0.5%)
- 1 capteur fourche magnétique pour détecter quand le déplaceur atteint son point mort haut, la précision estimée est de +/-5°,

- 2 débitmètres à flotteur pour mesurer les débits de refroidissement de la cloche magnétique (Key instruments FR4L71BVBN de précision 5%) et du volume de rebond (Brooks GT1000 1024NZ1044 de précision 2%),
- 1 débitmètre électromagnétique (Rosemount 8750W de précision 0.5%) pour mesurer le débit de refroidissement du volume de compression.

Un système National Instruments NI cDAQ 9133 équipé de cartes d'entrée thermocouples et d'entrées analogiques permet l'acquisition des données.

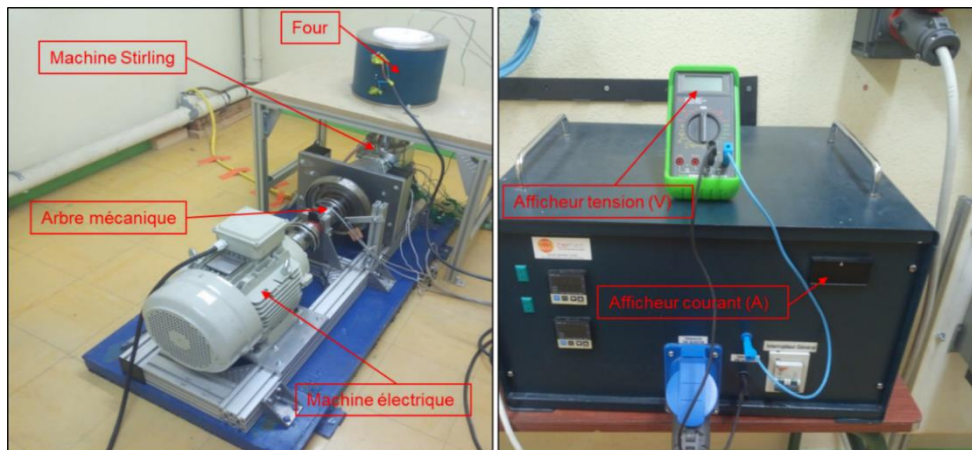


Figure 3: Banc d'essai de la machine

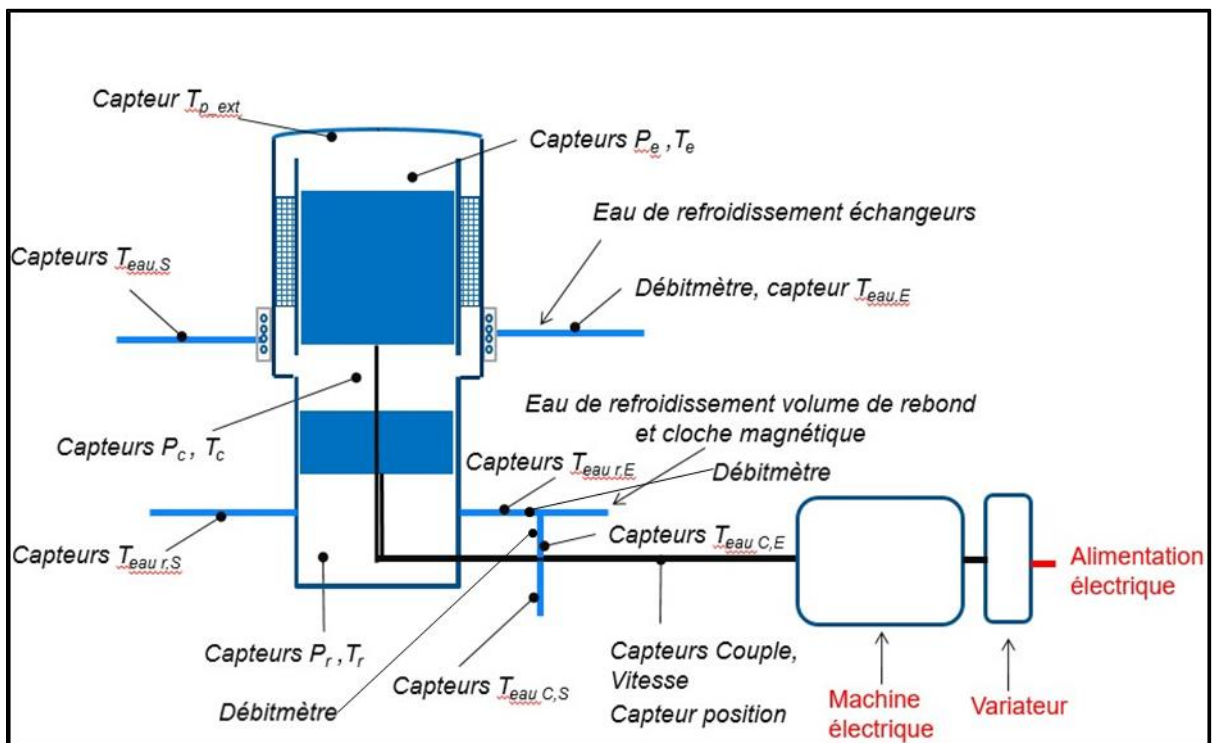


Figure 4: Instrumentation du banc d'essai et de la machine Stirling

4. Résultats expérimentaux

Dans ce paragraphe, nous décrivons les premiers essais de fonctionnement de la machine en mode moteur. Dans ces essais, la machine est utilisée dans des conditions opérationnelles de puissance de la source thermique et de pression réduites.

4.1. Démarrage en mode moteur à vide

La pression de remplissage est de 10 bar. La puissance du four qui constitue la source chaude est réglée à 2 kW jusqu'à ce que sa température du four atteigne 1000 °C. Pour démarrer, la machine Stirling est lancée par l'intermédiaire de la machine électrique commandée par le variateur. La vitesse de consigne est de 235 tr.min⁻¹. Lorsque la vitesse de l'entraînement dépasse la vitesse de consigne du variateur, celui-ci est déconnecté. La machine électrique est alors entraînée, sans être reliée électriquement au réseau. Nous observons alors une accélération de la machine Stirling qui fonctionne alors en mode moteur. Sur la Figure 5, on observe le fonctionnement piloté par le variateur dans l'encadré (vert) correspondant à l'intervalle 5-10 s, puis la montée en vitesse et le passage de la machine Stirling à sa vitesse maximale correspondant à l'intervalle 13-15 s (encadré en rouge). Après le passage à vitesse maximale, on observe le ralentissement puis l'arrêt de la machine en raison de la chute de température dans le volume de détente que nous présentons au paragraphe suivant.

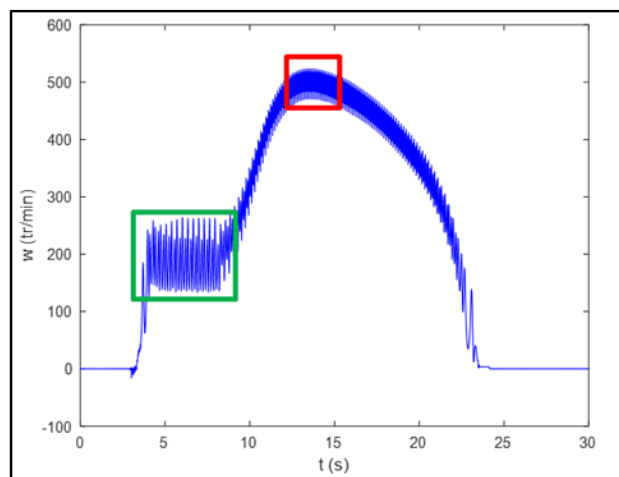


Figure 5: Démarrage de la machine Stirling

4.2. Paramètres expérimentaux en mode moteur à vide

Dans ce paragraphe, sont présentés les résultats expérimentaux des vitesses instantanées, couple mécanique, pressions et températures lorsque la vitesse moyenne est maximale. Ces valeurs sont reportées sur 2 périodes du cycle de fonctionnement.

La Figure 6 présente l'allure de la pression dans la machine mesurée dans le volume de compression et celle mesurée dans le volume de rebond. Après mise en température de la machine, la pression initiale de 10 bar augmente jusqu'à une valeur moyenne de 14 bar mesurée dans le volume de compression. La pression dans le volume de rebond est presque en opposition

de phase avec celle de la machine. Sa variation est plus faible que celle observée au cœur de la machine en raison de la valeur du volume de rebond qui est importante.

La vitesse et le couple relevés sur l'arbre mécanique de liaison sont présentés sur la Figure 7. Nous observons une vitesse moyenne de 500 tr.min^{-1} soit 8.3 Hz . Cette vitesse de rotation est inférieure à la vitesse nominale et aux vitesses des moteurs GPU3 et P40 qui sont de 1000 à 4000 tr.min^{-1} . Cette différence peut s'expliquer par la faible valeur de la puissance de la source chaude et celle de la pression. Le couple instantané fluctue très fortement au cours du cycle entre les phases motrices et réceptrices du cycle. Le couple moyen est de -2.25 N.m , il correspond au couple moyen de pertes relevé sur l'arbre. La puissance mécanique moyenne calculée grâce aux valeurs de couple et de vitesse est de 130 W . La machine n'étant pas chargée, cette puissance correspond aux pertes mécaniques à vide.

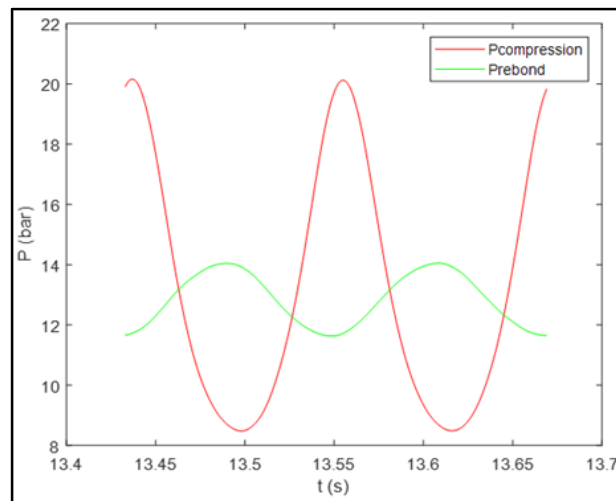


Figure 6 : Pressions dans les volumes de compression et de rebond

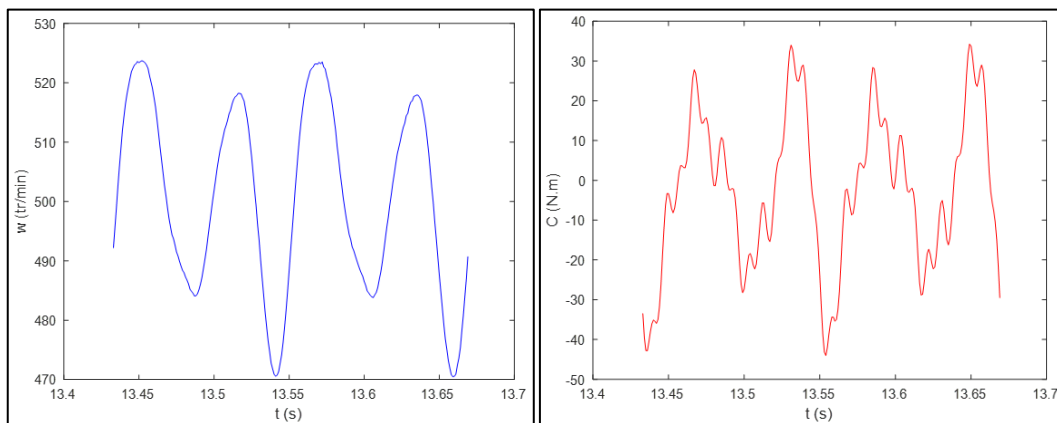


Figure 7 : Vitesse et couple instantanés

La Figure 8 présente l'évolution des températures mesurées dans le dispositif. Les températures du four mesurées en partie haute et basse restent constantes à environ 1000 °C (Figure 8a). La température du volume de détente descend jusqu'à une température de 840 °C (Figure 8b). L'échange thermique au niveau de la source chaude ne permet pas de maintenir la

température du volume de détente et la machine s'arrête. A l'inverse, la température du volume de compression croît et atteint son maximum à 33 °C au même moment (Figure 8b). La température du volume de rebond augmente en raison des pertes mécaniques du système bielle-manivelle (Figure 8d). Les températures entrée et sortie d'eau de l'échangeur du volume de compression (refroidisseur) et la température du volume de compression ont logiquement la même allure (Figure 8c et Figure 8e). De même, le profil que l'on peut observer pour le circuit de refroidissement de l'accouplement magnétique (cloche magnétique) indique bien que cette dernière présente également des pertes (Figure 8g). Enfin, la température ambiante est mesurée à 23 °C environ (Figure 8f).

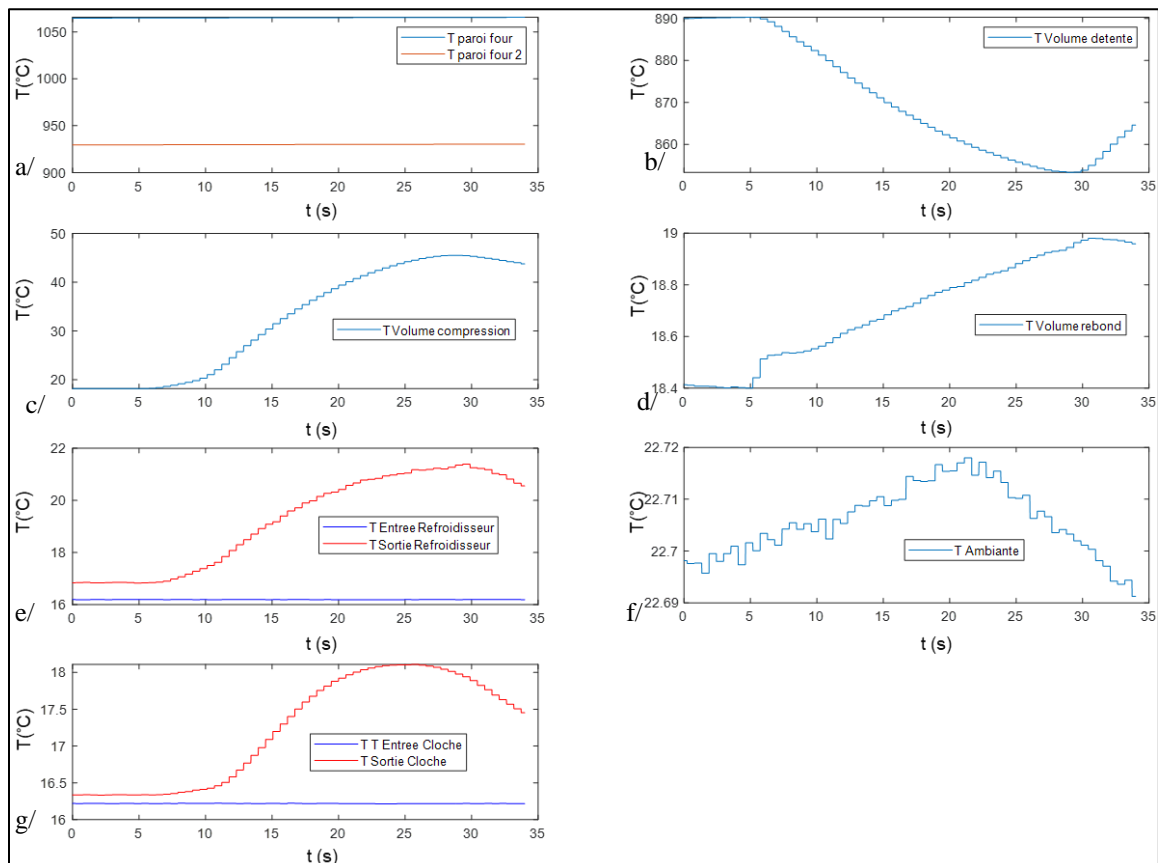


Figure 8 : Températures : a/Parois du four ; b/Volume de détente ; c/Volume de compression ; d/ Volume de rebond ; e/ Circuit de refroidissement du volume de compression ; f/ Ambiante ; g/ Circuit de refroidissement de l'accouplement magnétique

La puissance du circuit de refroidissement du volume de compression, calculée à l'aide de la mesure du débit d'eau de refroidissement et des températures entrée et sortie, est présentée sur la Figure 9a. Avant le lancement de la machine, entre 0 et 3s, les pertes sont dues à la conduction directe entre les parties chaudes et froides de la machine. Après le lancement, les pertes augmentent en raison du travail de compression effectué par le piston. Elles sont maximales au moment où la vitesse est maximale puis elles baissent. On observe que cette puissance est supérieure à la puissance du four entraînant une baisse de la température du volume de détente. Le circuit de refroidissement de l'accouplement magnétique (Figure 9b) évacue des pertes qui augmentent avec la vitesse et atteignent une valeur maximale de 160 W.

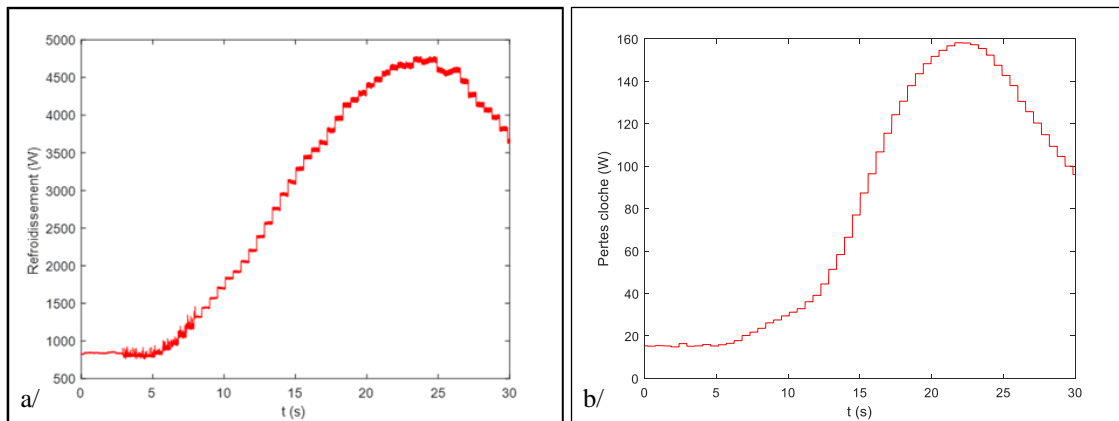


Figure 9 : Puissance circuit de refroidissement a/volume de compression b/cloche magnétique

5. Conclusion

Cet article présente une étude expérimentale d'une machine Stirling destinée à une application de véhicule hybride. Un prototype de puissance théorique 10 kW a été développé avec le groupe PSA. Un banc d'essai a été construit et mis en service. Des essais en condition de puissance et de pression réduites ont été effectués. Ils ont permis d'obtenir des premiers résultats en mode moteur à vide : couple vitesse de rotation, températures et pertes thermiques. Les travaux futurs porteront sur des essais à puissance plus importante.

Références

- [1] G. Walker. *Stirling engines*. Oxford University Press, New York, NY, (1980).
- [2] L.G. Thieme. Low-power baseline test results for the GPU 3 Stirling engine; DOE/NASA/1040-79/6. Technical report, (1979).
- [3] L.G. Thieme and R.C. Tew Jr. Baseline performance of the GPU 3 Stirling engine. DOE/NASA/1040-78/5. Technical report, (1978).
- [4] G.G. Kelm, J.E. Cairelli, and R.J. Walter. Test results and facility description for a 40-kilowatt Stirling engine. DOE/NASA/51040-27. (1981).
- [5] W.D. Ernst and R.K. Shaltens. Automotive Stirling engine development project DOE/NASA/0032-34. (1997).
- [6] Y. Timoumi, I. Tlili, and S. Ben Nasrallah. Design and performance optimization of GPU-3 Stirling engines. *Energy*, 33(7) (2008), 1100 – 1114.
- [7] H. Hosseinzade and H. Sayyaadi. CAFS: The Combined Adiabatic–Finite Speed thermal model for simulation and optimization of Stirling engines. *Energy Conversion and Management*, 91 (2015), 32 – 53.
- [8] F. Aksoy and C. Cinar. Thermodynamic analysis of a beta-type Stirling engine with rhombic drive mechanism. *Energy Conversion and Management*, 75 (2013), 319 – 324.
- [9] L. Scollo, P. Valdez, and J. Barón. Design and construction of a Stirling engine prototype. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(13) (2008), 3506 – 3510.
- [10] S. Djetel-Gothe, S. Bégot, F. Lanzetta, E. Gavignet, and W. S. Bou Nader. A Stirling engine for automotive applications. In *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC) - IEEE*, (Belfort, France, 11th – 14th dec, 2017). DOI: 10.1109/VPPC.2017.8331061