



Mise au point et Contrôle de la puissance d'un moteur Stirling de type Gamma

Houda Hachem^{*1}, Ramla Gheith¹, Fethi Aloui² and Sassi Ben Nasrallah¹

¹Université de Monastir, Laboratoire d'Etude des Systèmes Thermiques et Energétiques, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, Rue Ibn El Jazzar, 5019 Monastir, Tunisie

² University of Lille North of France, LAMIH Laboratory, Campus Le Mont Houy
59313 Valenciennes Cedex 9, France

³ LUNAM Université, École des Mines de Nantes
GEPEA CNRS-UMR 6144, DSEE, 4 rue Alfred Kastler, BP20722, 44307 Nantes, France
e-mail*: houdahachem@yahoo.fr

Résumé : Compte tenu des applications modernes des moteurs Stirling tel que les systèmes de récupération de chaleur ou de cogénération dans les processus industriels, la puissance d'un moteur Stirling doit être fournie à une vitesse de rotation adaptée au fonctionnement du générateur. Pour exploiter les performances de cette machine dans les conditions de son utilisation et afin d'avoir un système bien conçu, une analyse expérimentale a été présentée pour contrôler la puissance produite par le moteur Stirling de type Gamma (SG). Une revue sur les différentes méthodes de contrôle de la puissance d'un moteur Stirling a été présentée. Les avantages et les inconvénients de chaque technique ont été discutés. Ce papier décrit les essais de mise au point du moteur SG en utilisant la méthode de la commande de la pression. Les résultats des essais de mise au point montre que : le moteur Stirling ne peut pas changer la vitesse rapidement; le control de la puissance par la commande de la pression de charge du moteur est un moyen efficace pour adapter la vitesse de rotation selon l'utilisation. Cependant, Cette méthode nécessite un contrôle et un suivi minutieux des intervalles de temps et du degré d'ouverture des vannes d'admission et de retrait de gaz de travail. Pour quelques cas critiques, cette méthode risque d'emballer le moteur et produit énormément de vibration. Les essais de mise au point décrit le comportement dynamique du moteur SG pendant le régime instable ce qui permet de déterminer le temps de relaxation.

Mots clés :

Contrôle, puissance, pression, température, régénérateur

1. Introduction

Le moteur Stirling utilise un fluide de travail (air, hélium, hydrogène ...) contenu dans une enceinte fermée, chauffée par une source de chaleur extérieure, dans laquelle les variations de volumes induisent les changements cycliques de la pression et de la température du fluide. Il existe trois principales configurations de moteurs Stirling: Alpha, Beta et Gamma. Ces moteurs ont le même cycle thermodynamique, mais des caractéristiques différentes pour leurs conceptions. La configuration Alpha contient deux pistons moteurs dans deux cylindres séparés [1-3]. La configuration Bêta contient un déplaceur et un piston moteur incorporés dans le même cylindre [4-7]. La configuration Gamma utilise deux cylindres distincts, l'un pour le déplaceur et l'autre pour le piston moteur [8-10]. Récemment, Cheng et Yang [11] ont indiqué les principales différences entre ces trois configurations. Ils ont étudié leurs performances visant l'optimisation des paramètres géométriques. Ils ont déduit que le moteur Gamma est le plus capable à fonctionner avec une faible différence de température.

Plusieurs difficultés sont rencontrées lors de la réalisation et l'utilisation des moteurs Stirling parmi les quelles le problème du contrôle de la puissance. Il existe quatre méthodes, dans la littérature, pour contrôler la puissance d'un moteur Stirling: Le contrôle de la pression moyenne à l'intérieur du moteur, Le contrôle de la course du piston, le contrôle de l'angle de déphasage et le contrôle des volumes mort.

a) Le contrôle de la pression moyenne à l'intérieur du moteur

La puissance du moteur Stirling est reliée à sa pression de travail. D'où la puissance peut être contrôlée par la régulation de la pression par un compresseur externe. La méthode la plus simple pour réduire la puissance est de retirer le gaz de travail contenu dans le moteur. Et fournir du gaz par un compresseur externe quand il est nécessaire de produire plus de puissance [12]. Dans ce cas, des électrovannes sont activées ou désactivées successivement, délivrant une masse de fluide de travail dans le moteur [13]. Dans la pratique, cette méthode nécessite un contrôle et un suivi minutieux des intervalles de temps et du degré d'ouverture des vannes [14]. Les moteurs Kockums / SES 4-95 et SOLO 161 utilisent cette méthode de commande de puissance [15].

b) Le contrôle de la course du piston

La puissance peut également être contrôlée en faisant varier la course des pistons. Cette technique peut être appliquée aux moteurs à simple ou à double action, et même aux moteurs à piston libre. Le mécanisme d'entraînement plateau oscillant 'swashplate' avec un angle d'inclinaison variable permet de varier la course du piston. Ce mécanisme est utilisé pour contrôler la puissance du moteur Stirling STM 4-120 [16].

c) Le contrôle de l'angle de déphasage

Cette technique est une des meilleures façons qui permet un contrôle rapide de la puissance du Moteur Stirling. Cependant, cette méthode ne peut pas être appliquée aux moteur Stirling à double effet [14]. Un dispositif de conversion de mouvement introduit par Marks [17] modifie la course et la phase des pistons ce qui réduit la puissance du moteur sans perte significative dans l'efficacité.

d) Le contrôle des volumes mort

Malgré que l'espace mort représente un volume nuisible qui doit être réduit, une méthode de contrôle de puissance consiste à varier le volume mort. En particulier, les laboratoires Philips préfère ce système de contrôle plutôt que le système de contrôle par variation de pression [18]. Récemment, Beltran-Chacon et al. [19] ont proposé un système de contrôle de la puissance du moteur Stirling utilisant un volume mort variable. Ils ont étudié l'influence de ce contrôle sur la puissance produite par le moteur.

Ce papier décrit la méthode de contrôle de la puissance d'un moteur Stirling en utilisant la méthode de la commande de la pression moyenne. L'effet de la pression de charge sur les performances du moteur SG est déterminé dans différentes conditions de fonctionnement. Les essais expérimentaux sont divisé en essais de montée en puissance ou accélération du moteur et en essais de descente de puissance ou ralentissement du moteur.

2. Dispositif expérimental

Le moteur Stirling Gamma est un moteur dimensionné par la société allemande Viebach ST05 G. Ce moteur est de type cinématique ayant un système d'entraînement bielle-manivelle. Comme tous les moteurs Stirling, ce moteur est composé de trois échangeurs de chaleurs (le réchauffeur, le régénérateur et le refroidisseur) et de deux espaces de travail. Une coupe de ce moteur, sur laquelle apparaissent les cinq espaces élémentaires du moteur, est fournie sur la figure 1. La pression de charge initiale du moteur Stirling Gamma est imposée par un compresseur externe. Ce dernier permet de garder une pression constante à l'intérieur du moteur pendant les mesures expérimentales. Le moteur Stirling Gamma utilise l'air comme fluide de travail comprimé sous une pression de charge maximale de 10 bar. Sa vitesse de rotation maximale est d'environ 600 tr/mn et il peut fournir une puissance mécanique maximale de 500 W. Les espaces de compression et de détente sont disposés suivant un angle de 90°. Ils sont animés par un système classique de bielle-manivelle. Le tableau 1 résume les différentes caractéristiques géométriques de ce prototype.

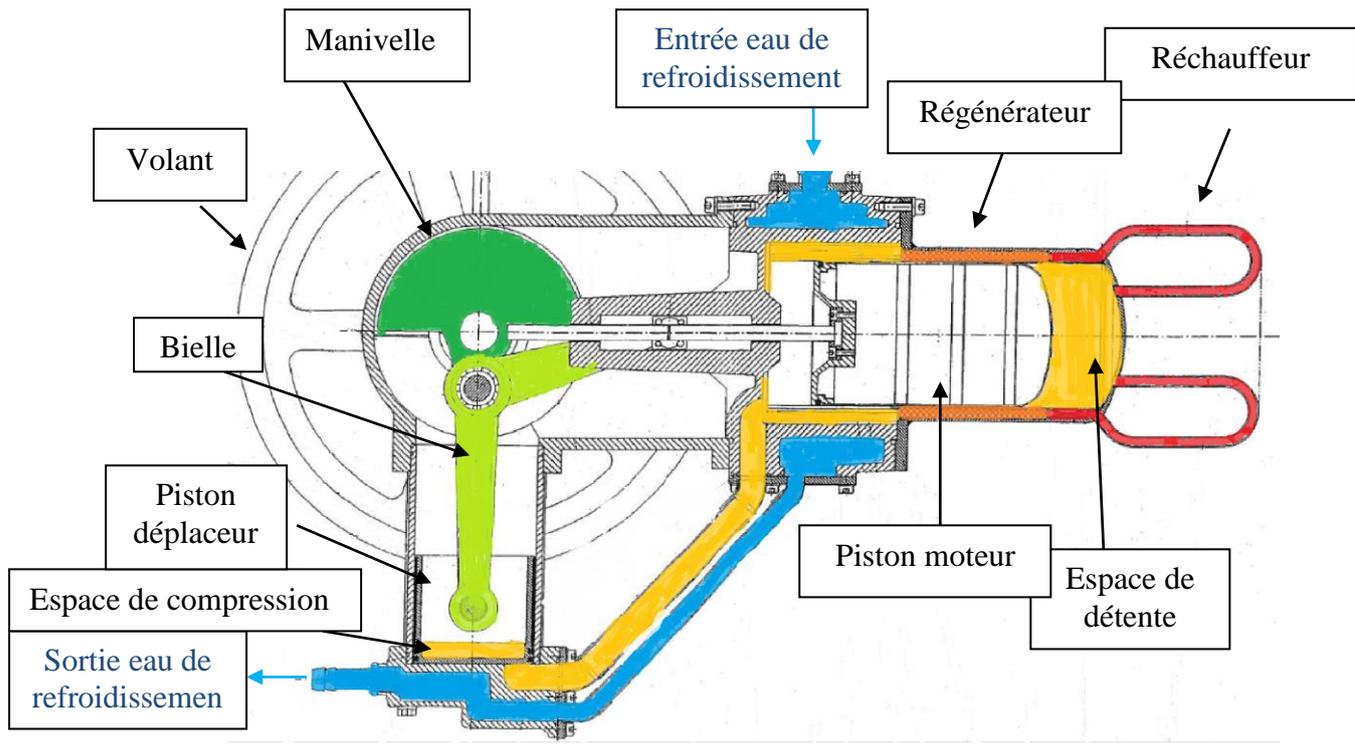


Figure 1. Coupe explicative du moteur Stirling Gamma

Paramètres	Valeurs	Paramètres	Valeurs
Gas de travail	air	Régénérateur	
Rayon de la manivelle	66 mm	Diamètre extérieur	134 mm
Longueur de la bielle	130 mm	Diamètre intérieur	98 mm
Espace de compression		Hauteur	50 mm
Diamètre	80 mm	Matériaux	Acier inoxydable
Hauteur	145 mm	Porosité	85%
Course	75 mm	Refroidisseur	
Volume mort	12.10^{-5} m^3	Diamètre	12mm
Espace d'expansion		Longueur	650 mm
Diamètre	95 mm	Réchauffeur	
Hauteur	120 mm	Nombre de tube	20
Alésage	96mm	Longueur de tube	349mm
Volume mort	$3.06.10^{-5} \text{ m}^3$	Diamètre interne du tube	6mm
Rapport de compression	3.5		

Tableau 1. Caractéristiques géométriques du moteur Stirling Gamma

3. Résultats et discussions

3.1. Effet de la pression de charge du moteur sur la puissance du moteur SG en régime stationnaire

Pour concevoir un système de contrôle de puissance, il sera avantageux d'analyser l'influence de la pression sur la puissance du moteur pour différentes conditions de fonctionnement. La figure 3 présente le contour de la puissance produite par le moteur Stirling en fonction de la température de la source chaude et de la pression de charge du moteur. La puissance du moteur augmente avec l'augmentation de la température de la source chaude. L'augmentation de la température chaude apportera une quantité supplémentaire de chaleur au moteur. Par conséquent, la quantité de chaleur fournie au fluide de travail à l'intérieur du réchauffeur augmentera et

l'efficacité du réchauffeur augmentera également. Ainsi, la différence de température entre les deux espaces de travail augmente et améliore les performances du moteur Stirling. Cependant, l'augmentation de la température d'extrémité chaude est limitée par la capacité calorifique du fluide de travail.

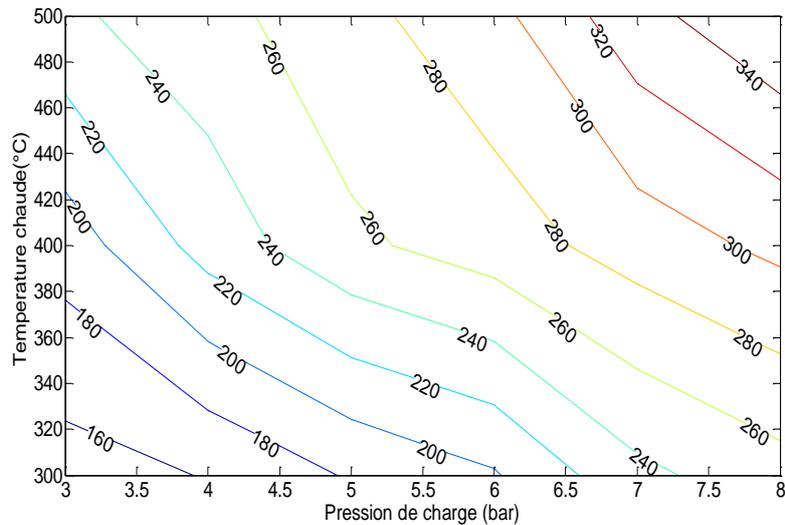


Figure 3. Contour de la puissance en fonction de la température chaude et de la pression

L'augmentation de la pression de charge initiale augmente la pression de fonctionnement. Ce qui augmente ainsi la puissance et l'efficacité du moteur Stirling jusqu'à une valeur optimale. La pression de charge a ainsi un effet positif sur les performances du moteur Stirling jusqu'à une valeur limite après laquelle elle devient négative. En effet, à des valeurs plus élevées de masse de fluide de travail, la différence de température entre espace chaud et froid se réduit et ainsi la production de travail devient plus faible. La figure 4 présente le contour de la puissance pour deux températures chaudes différents ($T_h=300^\circ\text{C}$ et 500°C) en fonction de la pression de charge et du débit d'eau de refroidissement. Il est clair que l'augmentation du débit de refroidissement améliore légèrement la puissance produite. En effet, l'augmentation du débit de refroidissement, améliore la différence de température entre source chaude et froide. Ce qui améliore les performances du moteur Stirling.

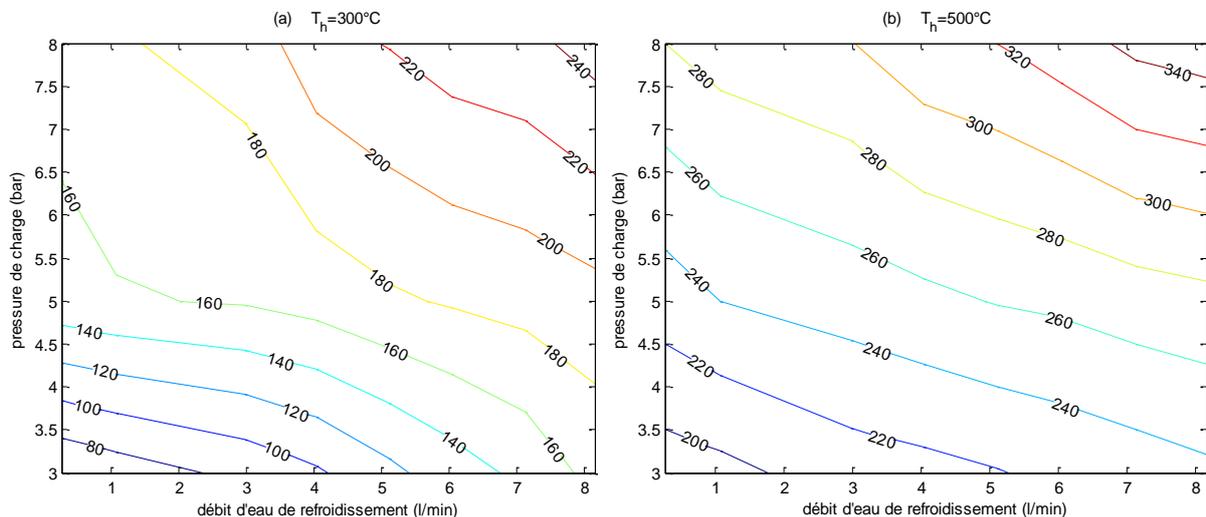


Figure 4. Contour de la puissance en fonction de la pression et du débit de l'eau de refroidissement (a) $T_h=300^\circ\text{C}$ (b) $T_h=500^\circ\text{C}$

La figure 5 présente le contour de la puissance pour différentes températures chaudes ($T_h=300^\circ\text{C}$, 400°C et 500°C) en fonction de la vitesse de rotation et de la pression de charge. La vitesse de rotation du moteur est un paramètre critique. L'évolution de la puissance par rapport à la vitesse de rotation atteint une valeur optimale. En fait, l'augmentation de la vitesse de rotation réduit la perte de chaleur par conduction externe à travers les parois du moteur, réduit le temps d'échange de chaleur et augmente la perte par friction à l'intérieur de chaque échangeur de chaleur. Les paramètres (vitesse de rotation, pression de charge, température chaude et débit de

l'eau de refroidissement) sont dépendants et leurs interactions affectent de manière significative la puissance du moteur Stirling.

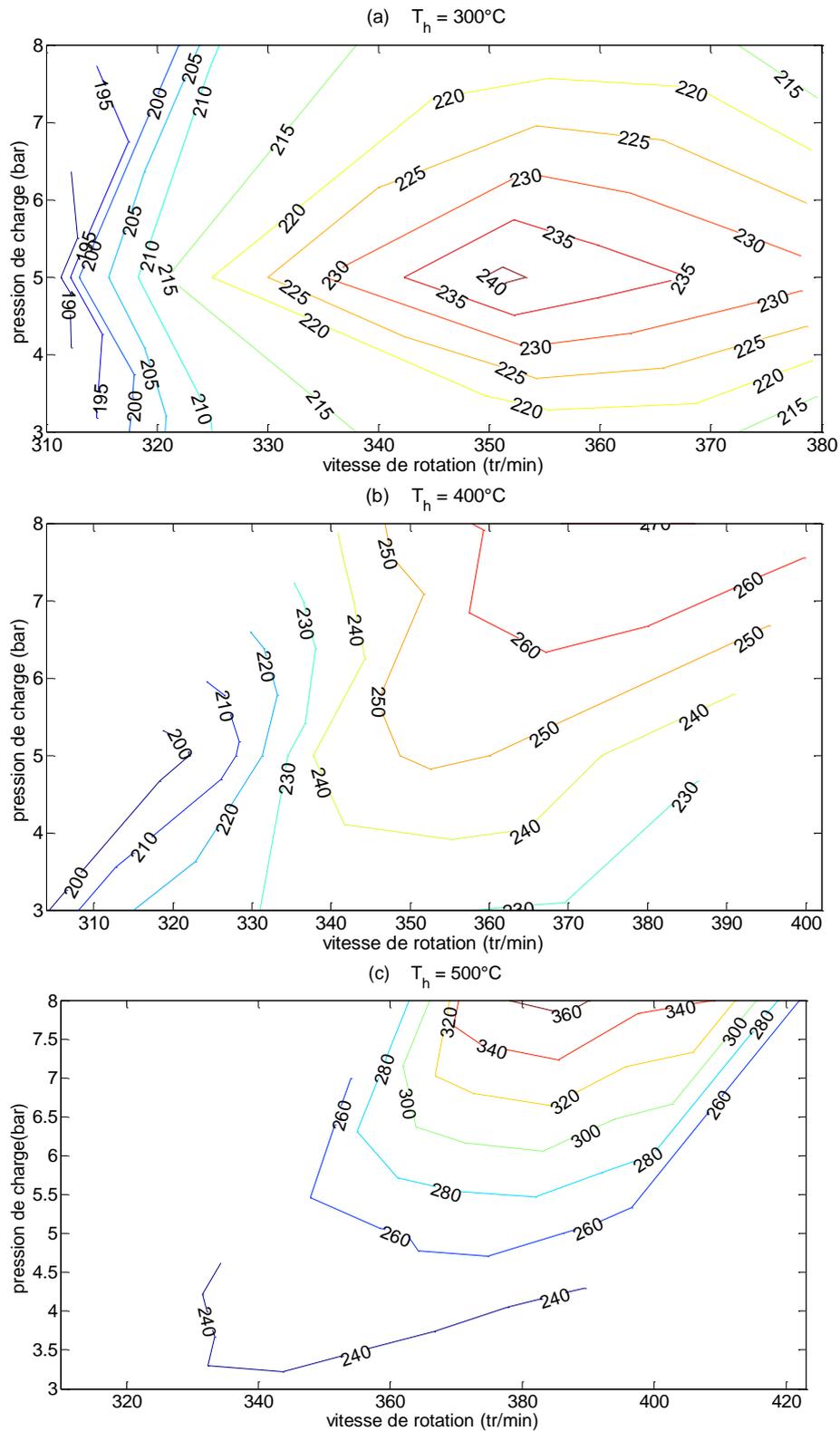


Figure 5. Contour de la puissance en fonction de la pression et du débit de la vitesse (a) $T_h=300^\circ\text{C}$ (b) $T_h=400^\circ\text{C}$ et (c) $T_h=500^\circ\text{C}$

3.2. Essais de mise au point du moteur SG

Les essais de mise au point du moteur SG sont réalisés par la variation instantané de la pression à l'intérieur du moteur SG. L'état de fonctionnement initial est stable tel que la température de chauffage est d'environ 500 °C, le débit de l'eau de refroidissement est d'environ 7 l/mn. L'expérience consiste à perturber un état d'équilibre initial stable en changeant brusquement la pression à l'intérieur du moteur. Un problème statique est rencontré dès l'excitation du régime de fonctionnement stable par un paramètre de fonctionnement. Il y a une création brusque d'un couple moteur qui change le régime de fonctionnement de la stabilité vers l'instabilité.

Une modification de la pression de charge du moteur entraine une action correctrice qui tend à rétablir le régime stable. Un ralentissement correspond à une diminution de la pression de charge initiale. Une accélération correspond à une augmentation de la pression de charge initiale. Les essais expérimentaux sont divisé en essais de montée en puissance ou accélération du moteur (cas 1 jusqu'au cas 5) et en essais de descente de puissance ou ralentissement du moteur (cas 6 jusqu'au cas 9). Les conditions de fonctionnement des deux états d'équilibre initial et final sont décrits dans le tableau 2.

Cas	Etat d'équilibre initial				Etat d'équilibre final			
	Vitesse de rotation (tr/min)	Couple (N.m)	Puissance (W)	Pression (bar)	Vitesse de rotation (tr/min)	Couple (N.m)	Puissance (W)	Pression (bar)
1	344,351	5,378	193,947	2,547	385,239	5,311	214,248	3,665
2	317,78	5,196	172,9	2,278	404,67	4,967	210,479	4,624
3	335,248	5,094	178,823	2,268	399,35	4,817	201,46	5,844
4	323,448	5,04	170,697	2,174	408,728	4,662	199,53	6,168
5	344,99	4,971	179,576	2,467	440,129	3,8	175,165	6,703
6	401,9	5,146	216,615	4,594	347,07	5,243	190,568	2,414
7	424,6	4,667	207,504	5,401	347,166	5,06	183,949	2,195
8	438,55	4,109	188,722	6,187	374,643	5,025	197,158	2,487
9	440,12	3,8	175,165	6,703	384,43	4,99	200,948	2,412

Tableau 2. Description des essais expérimentaux lors de la régulation de la pression de charge

La figure 6 montre l'évolution temporelle de la vitesse de rotation pour différent cas expérimentaux lors de la montée en puissance et lors de la descente en puissance du moteur Stirling. D'après la figure, l'évolution de la vitesse subit une oscillation avant d'atteindre l'état d'équilibre finale. L'augmentation soudaine de la pression de charge du moteur, perturbe l'état d'équilibre initial, d'où le système tend à un nouvel équilibre environ dans 16 minutes. Ceci assume que le moteur Stirling ne peut pas changer sa vitesse rapidement. D'après la figure 6, La quantité de gaz introduite dans le moteur n'a pas d'influence sur le temps nécessaire pour atteindre l'état d'équilibre final appelé temps de relaxation.

Sur la figure 6(a), suite à l'introduction d'une masse de gaz froide dans le moteur, la valeur de la vitesse atteint un pic maximal puis elle subit une oscillation (décroit puis augmente progressivement) en raison des irréversibilités à l'intérieur du moteur. La vitesse de l'état d'équilibre finale est environ égale à la vitesse du pic, une légère différence entre les deux valeurs de vitesse est expliquée par la perte par fuite de gaz. L'état transitoire peut être divisé en deux phases. Pendant la première phase, la température du gaz à l'intérieur du moteur diminue progressivement en raison de l'introduction d'une masse d'air froide à l'intérieur du moteur. Au cours de la deuxième phase, qui dure plus longtemps que la première phase, la masse d'air froide introduite prend du temps pour se réchauffer.

La figure 6 (b) montre l'évolution temporelle de la vitesse de rotation lors de réduction de la pression de charge. À l'instant de la perturbation de l'état d'équilibre initial, par diminution soudaine de la pression de charge, la valeur de la vitesse de rotation décroît immédiatement jusqu'à atteindre un pic minimale, ce qui risque d'emballer l'arbre du moteur. De même, après réduction soudaine de la pression qui règne dans les compartiments du moteur, l'évolution de la vitesse suit une oscillation afin d'atteindre l'état d'équilibre final stable.

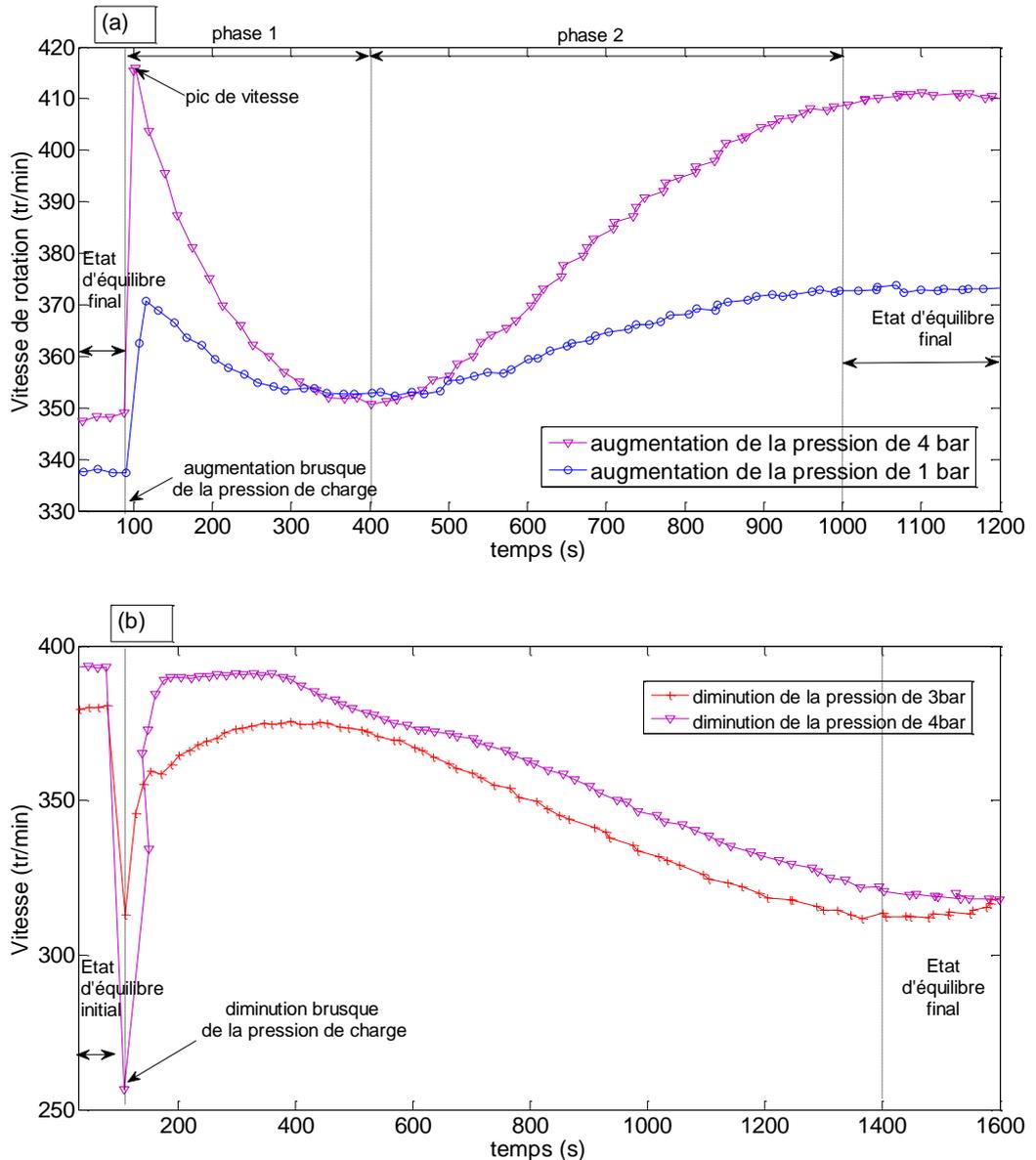


Figure 6. Evolution temporelle de la vitesse de rotation (a) lors de l'accélération (b) lors du ralentissement

4. Conclusion

La méthode de la régulation de pression de charge du moteur Stirling est exploitée pour régler sa puissance. A partir des essais de mise au point, on peut conclure que :

- Le moteur ne peut pas changer la vitesse rapidement.
- la méthode de contrôle de la pression risque d'emballer le moteur et produit énormément de vibration.
- Non seulement les paramètres de fonctionnement influent sur la stabilité du moteur, les caractéristiques géométriques de chaque partie et les propriétés physiques du gaz de travail utilisé agit sur sa possibilité de changer son régime à partir d'un état stable à un autre.
- En régime instable, l'augmentation de la vitesse de rotation du moteur provoque un emballement jusqu'à un nouveau point stable qui peut être dangereux mécaniquement.
- La diminution de vitesse provoque un calage du moteur qui se produit lorsque la pression de charge du moteur est insuffisante pour vaincre les forces de frottement à l'intérieur de la machine Stirling.

References

- [1] Costa S.C., Barrutia H., Esnaola J. A., Mustafa Tutar, Numerical study of the pressure drop phenomena in wound woven wire matrix of a Stirling regenerator, *Energy Conversion and Management*, Vol. 67, pp. 57-65, **2013**.
- [2] Youssef Timoumi, Iskander Tlili, Sassi Ben Nasrallah. Performance optimization of Stirling engines. *Renewable Energy* 33 (2008) 2134–2144.
- [3] El-Ehwany A.A, Hennes G.M, Eid E.I, El-Kenany E.A. Development of the performance of an alpha-type heat engine by using elbow-bend transposed-fluids heat exchanger as a heater and a cooler. *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, pp.1010-1019, **2011**.
- [4] Cheng C-H, Yu Y-J, Dynamic simulation of a beta-type Stirling engine with cam-drive mechanism via the combination of the thermodynamic and dynamic models. *Renewable Energy*, Vol. 36, pp. 714-725, **2011**.
- [5] Hachem H., Gheith R., Aloui F., Ben Nasrallah S. and Dincer I., Exergy assessment of heat transfer inside a Beta type Stirling engine, *International Journal of Exergy*, Vol. 20, No. 2, **2016**.
- [6] Chin-Hsiang CHENG, Chu-Yin HUANG , and Hang-Suin YANG . Experimental and Theoretical Study of a 90-K Beta-Type Stirling Cooler with Rhombic-Drive Mechanism. Copyright © by ISEC International Stirling Engine Committee. All right reserved. 2014.
- [7] Cinar C., Yucesu S., Topgul T., Okur M., Beta-type Stirling engine operating at atmospheric pressure, *Applied Energy*, 81, 351-357 (2005(1)).
- [8] Gheith R., Aloui F., Tazerout M., Ben Nasrallah S. Experimental investigations of a Gamma Stirling engine. *Energy Research*, Vol. 36, pp. 1175–1182, **2012**.
- [9] Ruijie Li, Lavinia Grosu, Diogo Queiros-Condé. Losses effect on the performance of a Gamma type Stirling engine. *Energy Conversion and Management*, Vol. 114, pp. 28–37, **2016**.
- [10] Nezaket Parlak, Andreas Wagner, Michael Elsner, Hakan S. Soyhan, Thermodynamic analysis of a gamma type Stirling engine in non-ideal adiabatic conditions, *Renewable Energy*, Vol. 34, pp. 266–273, **2009**.
- [11] Cheng CH, Yang HS. Optimization of geometrical parameters for Stirling engines based on theoretical analysis. *Appl Energy* 2012;92:395–405.
- [12] Jaspers HA. Power-control system for Stirling engines. United States: North American Philips Corporation; **1975**.
- [13] Squier JJDSE. Performance of the vanguard solar Dish-Stirling engine module. Canoga Park, California: Energy Technology Engineering Center; **1986**.
- [14] Thombare DG, Verma SK. Technological development in the Stirling cycle engines. *Renew Sustain Energy Rev*, Vol. 12(1), pp.1-38, **2008**.
- [15] Siva Reddy V, Kaushik SC, Ranjan KR, Tyagi SK. State-of-the-art of solar thermal power plants: A review. *Renew Sustain Energy Rev*, Vol. 27, pp.258e73, **2013**.
- [16] Stine WB, Diver RB. A compendium of solar dish/Stirling technology. Other Information: PBD, **1994**.
- [17] Marks, D.T., Stirling engine power control and motion conversion mechanism. Google Patents, **1983**.
- [18] Walker G. Stirling engines. , New York: Oxford University Press; **1980**.
- [19] R. Beltran-Chacon, Daniel Leal-Chavez, D. Saucedo, Manuel Pellegrini-Cervantes, Monica Borunda. Design and analysis of a dead volume control for a solar Stirling engine with induction generator, *Energy* , Vol. 93, pp. 2593-2603, **2015**.