

Machines thermiques motrices de petite puissance adaptées à la conversion thermodynamique d'énergie solaire : classification, exemples, perspectives.

Muriel ALAPHILIPPE, Pascal STOUFFS*

Laboratoire LaTEP

IUT des Pays de l'Adour Département GTE – 64000 Pau

* (auteur correspondant : pascal.stouffs@univ-pau.fr)

Résumé – Nous nous intéressons aux machines thermiques motrices permettant la conversion thermodynamique de l'énergie solaire de petite puissance < 50 kWe. Huit critères sont proposés, qui permettent de définir la typologie des machines thermiques envisageables. Ces critères nous permettent de classer les différentes machines thermiques pertinentes pour la conversion thermodynamique d'énergie solaire de faible puissance. A partir de cette classification, différents exemples sont exposés de machines qui ont été développées par le passé ou de machines qui peuvent être imaginées et qui présentent un intérêt pour la conversion de l'énergie solaire.

1. Introduction

Les machines thermiques sont souvent répertoriées par référence à un cycle thermodynamique théorique censé décrire leur fonctionnement. On trouve ainsi, par exemple, des machines à cycle de Joule, à cycle de Rankine, à cycle de Otto, ... Or une machine à cycle de Joule peut faire référence aussi bien à une turbine à gaz de grande puissance, qu'à une petite machine alternative comme l'était originellement le moteur de Joule. D'autre part, la référence à un cycle thermodynamique théorique génère des ambiguïtés. Il est ainsi bien connu que les moteurs Stirling ont peu à voir avec le cycle thermodynamique théorique de Stirling et que les moteurs Ericsson fonctionnent généralement plus selon un cycle thermodynamique de Joule qu'un cycle thermodynamique d'Ericsson !

La succession des états thermodynamiques du fluide de travail devant décrire une courbe fermée d'aire non nulle dans un diagramme thermodynamique, ce fluide subit nécessairement une (des) phase(s) de compression et une (des) phase(s) de détente. Nous avons dès lors proposé [1] de classer les machines thermiques selon le type de machines utilisées pour la compression et la détente ainsi que différents critères liés à la technologie des systèmes.

Dans cette communication nous proposons de sélectionner les critères les plus pertinents pour la classification des machines thermiques adaptées à la conversion thermodynamique d'énergie solaire de faible puissance. A partir de cette classification, la typologie des machines, que, par analogie nous appelons « caryotype » dans cette communication, nous permet d'analyser différents moteurs existants, ou à imaginer.

2. Critères de classification adaptés aux moteurs de conversion d'énergie solaire de petite puissance

Pour apprécier l'adaptabilité des machines à la conversion thermodynamique solaire et ouvrir des voies d'investigations nous avons sélectionné les 8 critères suivants.

C1 : ALT, ROT, DYN selon le type de machines de compression et de détente utilisées dans l'installation thermique motrice. On connaît essentiellement trois familles de machines de compression et de détente : les machines dynamiques (turbomachines) (DYN), les machines volumétriques rotatives (ROT), et les machines volumétriques alternatives (ALT).

C2 : OUV, FER le choix d'un cycle ouvert (OUV) simplifie la technologie du système donc diminue son coût, mais limite les possibilités du cycle en fixant la pression minimum à la pression atmosphérique et le fluide de travail à de l'air. Toutefois, il peut paraître tout à fait judicieux de privilégier des technologies solaires simples, pour favoriser leur utilisation dans les pays en voie de développement par exemple.

C3 : EXT, RI selon que l'apport de chaleur nécessite un échangeur (EXT) ou selon que lorsque l'énergie est apportée sous forme radiative et que sa conversion en énergie thermique a lieu au sein du fluide de travail (RI). C'est le cas dans la plupart des systèmes à basse température (Sunpulse (fig. 1) [2], pompage solaire Sunwell (fig. 2) [3]). La version (RI) à haute température trouve quelques exemples de réalisations expérimentales dans le domaine des grandes puissances (production directe de vapeur dans des tubes sous vide des concentrateurs cylindro-paraboliques "PTC" [4], récepteur à lit fluidisé à particules de carbure de silicium [5]).



Figure 1 : Sunpulse [2]

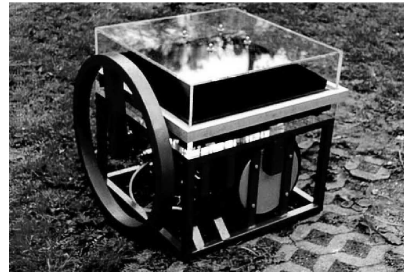


Figure 2 : Pompage solaire SunWell [3]

C4 : IHX, NIX selon la présence (IHX) ou pas (NHX) d'échangeur interne au cycle (récupérateur, régénérateur, ...). Dans le souci d'optimiser les performances énergétiques, et d'exploiter au mieux l'énergie solaire, on trouve par exemple des récupérateurs, hormis à très basse température, dans la plupart des moteurs Stirling.

C5 : 1PH, 2PH selon que le fluide de travail reste monophasique (1PH), ou est présent sous deux phases dans la machine (2PH).

C6 : 1C, 2C nous rajoutons ce critère par rapport à la classification originale [1] pour le cas où le fluide est constitué d'un (1C) ou de deux composants (2C) par exemple air (gazeux)+ eau (liquide et vapeur).

C7 : NOV, VLV ce critère de classification important concerne la présence (VLV) ou non (NOV) de clapets, de soupapes ou d'organes mécaniques qui ferment les éléments de la machine pendant les phases de compression et de détente.

C8 : HDT, LDT la nature et la température des réservoirs chaud et froid. Les niveaux de température de la source chaude solaire qui peuvent être envisagés sont liés au choix des capteurs solaires. Ils peuvent varier de moins de 100 °C (LDT) à quasiment 800 °C-1000 °C (HDT). La température de la source froide est quant à elle généralement fixée par les conditions de l'environnement.

Les machines destinées à la conversion thermodynamique de l'énergie solaire sont donc définies d'après leur "caryotype" (Tableau 1). Dans le cas où le type de système de compression et de détente est différent, nous obtenons 1152 machines potentielles. Il n'est donc pas possible d'effectuer une revue exhaustive de toutes les possibilités. Pour cette raison, nous ne mentionnons que quelques réalisations ou quelques voies possibles d'améliorations et d'investigations.

C1		C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Compression	Détente	Cycle	Ap. Chaleur	Récupérateur	Fluide		Vanne	Temp.
ALT_C	ALT_E	OUV	RI	NIX	1PH	1C	NOV	LDT
ROT_C	ROT_E	FER	EXT	IHX	2PH	2C	VLV	HDT
DYN_C	DYN_E							

Tableau 1. « Caryotype » des machines thermiques motrices solaires

3. Le moteur Stirling

Le moteur Stirling (Tableau 2) est actuellement le seul à avoir fait ses preuves pour la conversion solaire en électricité de faible puissance dans les systèmes Dish-Stirling. Depuis 1984, plusieurs systèmes Dish-Stirling ont été développés à travers le monde. Les constructeurs sont internationaux : USAB (Suède) et USAB/SES(USA), STM Corporation (USA), SOLO (Allemagne) [6] [7]. Le système MDAC a toujours la meilleure performance obtenue pour la conversion d'énergie solaire en électricité avec 29 à 30 % de rendement global crête [7]. Ces systèmes ont été validés par des milliers d'heures de fonctionnement. Les avantages de ces systèmes reposent sur des performances élevées, liés à de fortes concentrations et de hauts niveaux de températures et de pression ; de plus ils nécessitent peu d'opérations de maintenance. Cependant ces choix technologiques se traduisent par des coûts d'investissement élevés, et pénalisant pour la commercialisation de ces systèmes. D'autres inconvénients [8] sont liés à l'absence de clapets ou soupapes et au fait que les variations cycliques de pression ainsi que les écoulements du fluide sont uniquement contrôlés par les variations de volume du moteur.

3.1. Exploration des variantes du moteur Stirling

C1		C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Compression	Détente	Cycle	Ap. Chaleur	Récupérateur	Fluide		Vanne	Temp.
ALT_C	ALT_E	OUV	RI	NIX	1PH	1C	NOV	LDT
ROT_C	ROT_E	FER	EXT	IHX	2P	2C	VLV	HDT
DYN_C	DYN_E							

Tableau 2. « Caryotype » minimum d'un moteur Stirling

Les principales variantes du moteur Stirling qui nous paraissent intéressantes pour les applications solaires se réduisent à des variations autour du fluide de travail et des niveaux de température (Tableau 2). Le fluide traditionnel à un composant gazeux peut être remplacé par un fluide à un ou deux composants et présent sous une ou deux phases dans le moteur. Bien que le rendement de Carnot nous incite à travailler avec de grandes différences de température (HDT), de faibles différences de température (LDT) présentent l'avantage de conduire à des procédés simples et de faibles coûts.

3.1.1. Cas d'un fluide constitué d'un composant, sous deux phases

Un fluide composé d'un seul composant et de deux phases a été mis en œuvre dans les années 1930. Un ingénieur Anglais, John Malone, a mis au point un moteur fonctionnant avec de l'eau liquide comme fluide de travail. L'eau passe de l'état liquide à un état situé dans la région supercritique. Malone aurait utilisé différents fluides pour son moteur comme le mercure, l'huile et l'eau. L'eau a donné les meilleurs résultats [8]. Il semblerait que la

troisième version de son moteur pesait 8000 kg, produisait 37 kW avec un rendement de 20 %, avec de l'eau à $700 \cdot 10^5$ Pa [9].

3.1.2. Cas d'un fluide constitué de deux composants sous deux phases

De nombreux travaux scientifiques ont été menés dans les années 1980, sur l'utilisation d'un fluide à 2 phases et 2 composants afin d'améliorer les performances énergétiques des moteurs Stirling. Les premières investigations sur le moteur "2P2C" datent de 1972 [8] puis 1980 [10]. L'idée consiste à utiliser un fluide constitué d'un composant gazeux et d'un composant qui passe alternativement de l'état liquide à l'état gazeux dans le régénérateur, de sorte que lorsque ce composant est dans l'espace de compression il est sous forme liquide, et dans l'espace de détente il est sous forme gazeuse. L'intérêt est multiple car, à masse égale de fluide, l'énergie nécessaire pour comprimer le liquide est très inférieure à celle qui est nécessaire pour comprimer le gaz. D'autre part, le volume massique de l'eau liquide est beaucoup moins important que son équivalent gazeux, par conséquent le rapport entre la pression maximum et minimum est augmenté, ce qui se traduit par de meilleures performances. Le travail net évalué dans ces conditions est jusqu'à 2 à 3 fois plus élevé qu'avec un fluide gazeux.

Des approches expérimentales puis théoriques menées quelques années plus tard vers 1988, avec l'air (gazeux) et l'eau (liquide et vapeur) [11] ont confirmé des améliorations qui se sont révélées cependant moins importantes que prévu. Dans les années 1995, une étude menée sur un moteur Stirling à piston liquide, dont le fluide est composé d'un gaz et d'une vapeur qui passe à l'état liquide à l'intérieur de la machine [12], confirme l'intérêt d'associer gaz et vapeur. L'avantage supplémentaire est de permettre des conditions quasiment isothermes pendant les phases de compression et de détente. Il apparaît que c'est sur les machines à basse ou moyenne différence de température que l'avantage de ce fluide composé est le plus significatif par rapport à un fluide gazeux.

3.1.3. Les moteurs Stirling LOW DT

Depuis les années 1980, quelques machines à faible différence de température ont été développées pour des applications de pompage ou la production d'électricité solaire. Elles reposent sur des technologies simples. Généralement le fluide de travail est de l'air qui circule entre la partie chaude constituée d'un absorbeur placé sous une paroi transparente (apport de chaleur RI) et la partie froide refroidie par une circulation d'eau ou par convection naturelle avec l'environnement. Une différence de température de $0,5 \text{ °C}$ à plus généralement environ 50 °C suffit pour que ces moteurs fonctionnent [13-14]. Les rendements de conversion de ces systèmes sont faibles, généralement inférieurs à 10 %.

4. Le moteur Ericsson

Contrairement au moteur Stirling, caractérisé par le critère C7 'NOV' le moteur Ericsson (Tableau 3) est équipé de soupapes et/ou clapets qui permettent de fermer les espaces de détente et de compression (C7 'VLV'). Ainsi, les échangeurs de chaleur ne doivent plus être considérés comme des volumes morts. L'augmentation de leur taille n'est donc pas préjudiciable : ceci peut être un atout dans le cas de la conversion d'énergie solaire faiblement ou moyennement concentrée, en particulier lorsque la concentration n'est pas ponctuelle (concentrateur cylindro-parabolique, par exemple). De plus il est possible de faire fonctionner le moteur Ericsson en cycle ouvert.

C1		C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Compression	Détente	Cycle	Ap. Chaleur	Récupérateur	Fluide		Vanne	Temp.
ALT_C	ALT_E	OUV	RI	NIX	1PH	1C	NOV	LDT
ROT_C	ROT_E	FER	EXT	IHX	2PH	2C	VLV	HDT
DYN_C	DYN_E							

Tableau 3. « Caryotype » minimum d'un moteur Ericsson

4.1. Exploration des variantes du moteur Ericsson

Le caryotype minimum du moteur Ericsson (Tableau 2) offre un grand nombre de possibilités. Les différences de température dans le moteur peuvent être élevées (HDT) ou non (LDT). Le fluide de travail peut être constitué d'un ou deux composants sous une phase ou deux phases. Ces possibilités qui ont été testées avec succès dans les cycles de grande puissance basées sur des turbomachines (turbines à gaz à injection de vapeur STIG, à air humide HAT, ...) semblent prometteuses pour les moteurs Ericsson. L'apport de chaleur externe (EXT) est aisé à réaliser au moyen du couplage avec un capteur solaire. La version RI à haute température, précédemment évoquée, peut être envisagée. Le moteur offre des possibilités supplémentaires par rapport au moteur Stirling car le cycle peut être ouvert (OUV) ou fermé (FER). Rappelons que le choix d'un cycle ouvert limite les possibilités du fluide à l'air (éventuellement humidifié), et que la pression minimale du cycle est alors égale à la pression atmosphérique. Enfin historiquement, la détente et la compression ont toujours, à notre connaissance, été effectuées au moyen de systèmes alternatifs (Pistons Cylindres).

5. Les micro-turbines

Généralement, les machines dynamiques sont plutôt réservées aux grands débits, donc aux grandes puissances. Il existe cependant des micro-turbines issues de l'industrie automobile adaptées aux faibles puissances. Actuellement, on trouve des applications des micro-turbines dans le domaine de la cogénération. Pour les applications solaires, des études sont menées sur des cycles de Rankine (ORC) réalisés grâce à l'association de micro-turbines à des capteurs sous vide. Les rendements de conversion solaire en électricité pourraient atteindre 10 à 13 % [6]. Une thèse soutenue en 1982 [15] traite d'une turbine à gaz de faible puissance destinée à la conversion de l'énergie solaire. Plus récemment, des recherches sont menées sur la conversion de l'énergie solaire dans une turbine à gaz fonctionnant avec du CO₂ supercritique [16].

6. Les moteurs à vis ou à palettes

Actuellement, il n'existe pas à notre connaissance de moteur à vis ou à palettes opérationnel. Les machines volumétriques rotatives "à vis" sont largement utilisées dans les compresseurs. Les systèmes "à palettes" semblent réservés au domaine des outillages pneumatiques ou moteurs pneumatiques. On trouve cependant dans la littérature des exemples de réalisations de moteurs à vis ou à palettes appliquées à l'énergie solaire datant des années 1980 [16]. Renault CIT a développé des moteurs à vis dans les années 1977 à 1979 dans une gamme de puissance à l'arbre de 3 à 25 kW. Ces derniers ont été mis en œuvre avec du Fréon 12 comme fluide de travail, dans le projet de la centrale solaire de Diré au Mali. Ils ont apporté toute satisfaction avec un contrôle rigoureux de la lubrification des vis par injection d'un film d'huile. En 1978, le CEA a développé un moteur à palette de 3 kW. Peu d'informations sont données sur les caractéristiques techniques de ces moteurs, hormis qu'elles étaient excellentes! [17].

6.1. Exploration des variantes de moteur à système rotatif ou dynamique

Toutes les variantes qui ont été déjà évoquées avec les moteurs Stirling et Ericsson sont envisageables. A l'exemple des grandes puissances, un cycle de Rankine peut être réalisé avec des fluides constitués d'un composant sous deux phases (CO₂, ORC), ou bien un cycle de Joule à récupération avec des fluides à deux composants sous deux phases à l'exemple de l'air (gaz) + eau (Liq/Vapeur). Contrairement à la tradition, il serait peut-être intéressant d'envisager l'association de machines de compression et de détente différentes. Certaines machines peuvent en effet être très performantes comme compresseur, mais leur utilisation comme machine de détente à haute température peut s'avérer difficile ou moins performante.

7. Conclusion

Nous présentons une classification des machines thermiques adaptées à la conversion thermodynamique d'énergie solaire de faible puissance. A partir de cette classification, il ressort de nombreux exemples de machines qui semblent pertinentes pour la conversion de l'énergie solaire. Certaines ont été développées par le passé, d'autres sont à imaginer.

Références

- [1] P. Stouffs, Machines thermiques non conventionnelles : état de l'art, applications, problèmes à résoudre..., Journée SFT, Paris, pp 1-15, 1999.
- [2] J. Kleinwächter, Bomin Solar Technologies GBH, Lörrach, Germany, <http://www.bsrsolar.com>
- [3] E. Weber, Sunmachine, <http://www.sunmachine.de>
- [4] E. Zarza et al., Direct steam generation in parabolic troughs : Final results and conclusions of the DISS project, Energy, 29, pp 635-644, 2004.
- [5] J.J. Beziau et al., Un nouveau concept de centrale solaire thermodynamique basé sur un récepteur à lit fluidisé, Proceedings IJTH 2007, Albi France, pp 346-350, 2007.
- [6] D.Mills, Advances in solar thermal electricity technology, Solar Energy, Vol. 76, pp 19-31, 2004.
- [7] W. Sciel and D. Laing , Survey on Solar-Electric Dish/Stirling Technology, 10th International Stirling Engine Conference 2001 (10th ISEC), Osnabrück, Germany, pp 33-39, 2001.
- [8] G. Walker, Regenerative engines with dense phase working fluids - The Malone Cycle, American institute of aeronautics and astronautics, Vol.809454, pp 2278-2284, 1980.
- [9] G.W. Swift, A Stirling engine with a liquid working substance, Journal of Applied Physics, N°11, pp 4157-4172, 1989.
- [10] G. Walker and B. Agbi, Thermodynamic Aspects of Stirling Engines with Two-phase, two-Component Working Fluids, CSME-10, Canadian Society for Mechanical Engineering, Montréal, 2, N°1, pp 1-8, 1973.
- [11] D.A. Renfroe and M. Counts, Model of TPTC Stirling Engine with adiabatic working spaces, Journal of Engineering for Gas turbines and Power, Vol.110, pp 658-663, October 1988.
- [12] P. Fette, Pressure Computation for a Stirling Engine Which Works with Compound Fluids, Proceedings of the International Conference on Stirling Cycle Machines, Tokyo, pp 279-286, 1995.
- [13] H. Al-Towaie and J. Eickhoff, System technical investigation of a solar low temperature Stirling engine in Aden/Yemen, pp 218—225.
- [14] N. Martaj, L. Grosu, P. Rochelle, Thermodynamic study of a low temperature difference Stirling engine at steady state operation, International Journal of Thermodynamics, 10 (4), pp. 165-176,2007.
- [15] J.F. Leone, Conception et réalisation d'une turbine à gaz de faible puissance destinée à la conversion de l'énergie solaire. Modélisation du fonctionnement de l'installation en régime variable, Thèse de doctorat, INSA Lyon, 1982.
- [16] Zhaolin Gu and Haruki Sato and Xiao Feng, Using supercritical heat recovery process in Stirling engines for high thermal efficiency, Applied Thermal Engineering, 21, pp1621-1630, 2001.
- [17] Alexandre Herléa, L'énergie solaire en France, Comité des Travaux Historiques et Scientifiques, CTHS ISBN 2-7355-0312-7, 1995.