

Le cycle de Stirling sera-t-il celui des moteurs thermiques du XXI^e siècle ?

Parallèlement à la découverte et au développement du moteur à vapeur, il existait un autre type de machine thermique, au moins aussi performant et conduisant à des contraintes bien moindres : le moteur à air chaud que l'on a appelé plus tard « moteur Stirling », du nom des deux frères qui en ont réalisé le premier prototype au tout début du XIX^e siècle.

RÉMI SAUMONT

Le XIX^e siècle fut celui de la naissance du machinisme qui connut un grand essor grâce, tout d'abord, à l'invention et au développement de la machine à vapeur. Ce n'est qu'à partir des années 1870-1880 que le moteur électrique commença à la concurrencer dans la production d'énergie mécanique. Toutefois, il a fallu attendre les années 50 pour voir son abandon dans les transports ferroviaires et ceci malgré l'apparition entre-temps des moteurs thermiques à explosion, à combustion interne ou à réaction qui, en matière de transports hormis les transports ferroviaires, ont rapidement détrôné les autres.

En fait, le moteur thermique est encore à l'heure actuelle le seul moyen pratique de fournir de l'énergie mécanique à un véhicule autonome. Ceci est vrai pour les automobiles et camions, les fusées, les avions et les navires, y compris ceux utilisant du carburant nucléaire, ces derniers assurant, de

la sorte, un renouveau au moteur à vapeur sous forme de turbine.

Les moteurs thermiques répondent à des principes thermodynamiques communs dont les principaux sur le plan pratique sont ceux de Carnot. Ces principes concernent toutes les machines capables de transformer des calories en travail mécanique, donc en définitive d'effectuer une action néguentropique transformant une énergie dégradée en énergie « noble », mais avec un rendement souvent décevant. A cet égard, le rendement des divers systèmes qui ont été mis en œuvre ne sont pas équivalents. Celui des locomotives à vapeur dépourvues de condenseurs était particulièrement bas. Celui des moteurs à explosion actuels est moins mauvais et les qualités de légèreté de ces moteurs ont permis les premiers succès de l'aviation. Les moteurs à combustion interne (moteurs diesel) ont un rendement plus satisfaisant mais leur poids a constitué un handicap pour certaines applications comme, par exemple, l'aviation.

Un des points communs aux divers moteurs thermiques* d'utilisation pratique, c'est le rôle joué, sous l'effet de la température, par une même grandeur – la pression d'un fluide – pour provoquer l'apparition de la force mécanique : pression de gaz de combustion dans les moteurs à explosion ou à combustion interne, pression de vapeur d'eau par exemple dans la machine à vapeur s'exerçant sur le piston ou les aubes de turbine.

De toute manière, leur fonctionnement découle d'une combustion qui est externe au système mécanique dans la machine à vapeur ou interne à ce système dans les moteurs diesel ou à explosion. Cette dernière disposition impose des conditions de fonctionnement soumettant les parties mobiles à de hautes températures, donc à des contraintes mécaniques sévères qui atteignent leur maximum dans les moteurs du type turbopropulseur, par exemple.

De telles contraintes n'existent pas ou peu pour le premier cas, ce

* Il est parfois d'usage de réserver cette expression aux machines à mouvement alternatif utilisant des gaz permanents ce qui exclut fâcheusement les machines à vapeur et les turbines.

qui explique la robustesse que pouvaient avoir les machines à vapeur qui, par ailleurs, pouvaient utiliser des carburants variés, facilement accessibles ou peu coûteux (charbon, bois, alcools divers, huiles, etc.), ce qui permettait, malgré leur faible rendement, d'en rentabiliser l'utilisation pour les dispositifs ne subissant pas de contraintes de poids.

Pour les machines obéissant au cycle de Carnot, le rendement est d'autant meilleur que la différence de température existant entre celle de la source chaude (celle de la vapeur à son admission dans le cylindre pour les locomotives par exemple) et celle de la source froide (celle du fluide à sa libération dans l'atmosphère après qu'il ait effectué son travail mécanique) est plus élevée.

Le rendement des moteurs diesel ou à explosion est satisfaisant parce que la température de la source chaude (celle des gaz de combustion dans les cylindres) est élevée (de l'ordre de 1 500°). Il est moins bon pour la machine à vapeur car la température de la source chaude ne peut guère dépasser 400° à 500°. Pour obtenir un rendement acceptable de ce genre de machine, il était donc nécessaire d'abaisser au mieux la température de la source froide, ce rôle étant dévolu à ce que l'on a appelé le « condenseur », permettant de ramener la température du fluide de sortie à la valeur ambiante, c'est-à-dire celle de la température d'une vapeur condensée en eau qui pouvait ainsi être recyclée dans la machine.

Comme il a été dit, et ceci pour de multiples raisons pratiques, le moteur des locomotives à vapeur était privé de condenseur de telle sorte que son fonctionnement se faisait en échappement libre d'une vapeur évacuée dans l'atmosphère à une température encore élevée. On acceptait donc une notable perte de rendement, compensée il est vrai par des artifices augmentant quelque peu la température de la source chaude (surchauffe de vapeur par exemple des locomotives type Chapelon, les fameuses Pacific, les 231 tirant les trains rapides). Il n'en demeure pas moins que le système ainsi exploité durant près de cent cinquante ans conduisait à des contraintes drastiques : complexité

de l'embiellage et difficulté de l'équilibrage de nombreuses pièces mobiles, explosions de chaudières dans les premiers temps, consommation élevée de combustible et surtout contraintes d'approvisionnement en eau. Cette dernière contrainte limitait le parcours pouvant être effectué sans ravitaillement à guère plus de 100 km durant lesquels des dizaines de tonnes d'eau étaient consommées. C'est ainsi que le parcours des trains transatlantiques Paris-Le Havre ne pouvait se faire d'une seule traite que grâce à l'utilisation à mi-parcours d'une méthode de ravitaillement plutôt « acrobatique », par utilisation d'une cuillère abaissée sous le tender et recueillant durant la marche l'eau d'une longue rigole située sur la voie entre Saint-Pierre-du-Vauvray et Pont-de-l'Arche-Alizay.

Cette longévité de la traction vapeur est un fait étonnant, même si l'on met de côté le coût élevé de l'électrification des voies ou le développement tardif des moteurs à combustion interne, car, parallèlement à la découverte et au développement du moteur à vapeur, il existait un autre type de machine thermique, au moins aussi performant et conduisant à des contraintes bien moindres : le moteur à air chaud que l'on a appelé plus tard « moteur Stirling », du nom des deux frères qui en ont réalisé le premier prototype au tout début du XIX^e siècle.

Le moteur dit à air chaud

On ne sait pas exactement à quand remonte la découverte de la propriété qu'a l'air atmosphérique de se dilater sous l'action de la chaleur ou de se rétracter sous l'action du froid. D'après les documents les plus anciens, il semble que Héron d'Alexandrie ait, dès le début du I^{er} siècle de notre ère, parfaitement connu une telle propriété dont il se serait inspiré pour décrire ou réaliser ses machines et ses automates actionnés par échauffement de l'air. Il aura fallu cependant plus d'un millénaire pour que ce genre de questions soit repris peu après 1500, par Léonard de Vinci qui nous a livré le croquis d'une pompe à eau actionnée par un échauffement de l'air puis son refroidissement brusque, ce

qui avait pour effet de produire une aspiration permettant de pomper l'eau. Les moteurs thermiques à air développés par la suite étaient semblables à ceux qui utilisaient alors la vapeur d'eau comme fluide moteur. C'est plus tard que leur développement conduisit à les différencier des autres appareils fonctionnant simplement selon le cycle de Carnot et qu'en 1807 George Cayley livra la description d'un moteur de conception originale « *fonctionnant sans eau, mais seulement avec du feu et de l'air* ».

A partir de cette époque, la constitution des moteurs thermiques à air différa notablement de celle des machines à vapeur et ceci, primitivement, dans le but d'éviter les explosions meurtrières des chaudières que nécessitaient ces machines compte tenu de la mauvaise qualité des aciers disponibles. Donc, pour les machines thermiques à air, ce n'était plus un simple remplacement de la vapeur d'eau par de l'air mais l'élaboration de machines de structure originale fonctionnant selon un cycle particulier (qui sera dit de Stirling) mettant en jeu des variations de pression dont la valeur moyenne demeurerait (à l'origine tout au moins) peu différente de celle de la pression atmosphérique (d'où le nom de moteurs atmosphériques que l'on a parfois donné à ces moteurs).

Comme pour les machines à vapeur de l'époque, le cœur du système moteur était constitué par un cylindre dans lequel un piston se déplaçait de manière étanche et en mouvement alternatif de manière à entretenir au moyen d'un mécanisme bielle manivelle la rotation d'un volant d'inertie. Mais alors que dans le moteur à vapeur, la répétition du cycle moteur ne dépendait que de l'ouverture passive de soupapes ou du mouvement passif d'un « tiroir », dans les machines atmosphériques, cette fonction était réalisée de manière active par un dispositif appelé « déplaceur » constitué, dans un second cylindre, par un piston à fonctionnement non étanche, ce cylindre étant en communication avec le cylindre moteur dont il assurait l'alimentation en cycle fermé et, par conséquent, la commande (**figure 1**). Ainsi, le rendement de la machine devenait relativement moins dépendant de la différence de

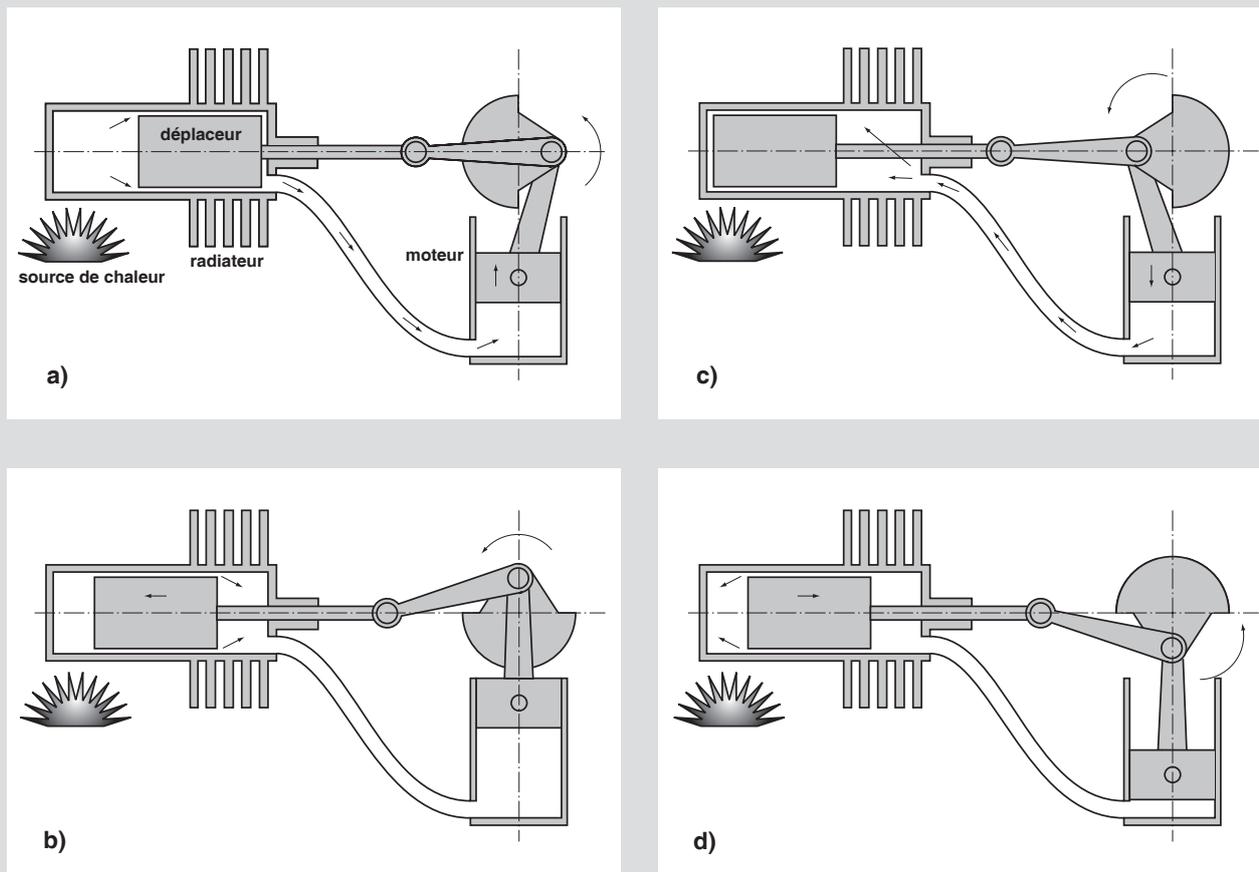


Figure 1. a) Phase de travail. Echauffement de l'air contenu dans le fond du cylindre du déplaceur ; cet air se dilate monte en pression passe par le tuyau de jonction vers le fond du cylindre moteur où il pousse le piston de telle sorte que le volant se met à tourner.
 b) Phase de refroidissement. La rotation du volant fait reculer le déplaceur vers la partie chaude de son cylindre et l'air est transféré vers la partie refroidie de ce cylindre. Cet air se contracte et sa pression diminue ce qui contribue à faire descendre le piston moteur.
 c) Phase de compression. L'air qui était à son minimum de pression commence à être de nouveau comprimé par la descente du piston.
 d) Phase de transfert. Le déplaceur rejoint la partie froide de son cylindre et l'air déjà préchauffé par la compression est transféré en passant autour du déplaceur dans la partie chaude de ce cylindre.
 Et le cycle recommence

Dans un tel dispositif, les deux bielles sont accouplées sur le même maneton. Une autre disposition des cylindres peut être adoptée de telle sorte que, par exemple, ils soient tous les deux verticaux, ce qui permet de diminuer et même d'annuler la longueur du tuyau de liaison. Dans un tel cas, les bielles doivent être articulées sur deux manetons différents décalés de 90° l'un par rapport à l'autre.

température entre source chaude et source froide, et ceci à un point tel qu'il a été possible de construire (à titre expérimental) des moteurs à air fonctionnant à partir de différences de température de seulement quelques degrés entre source chaude et source froide.

Le dispositif décrit par la **figure 1** est un système type qui a pu en fait connaître diverses variantes.

Dans le dispositif d'origine à cycle fermé, celui des frères Stirling, le piston moteur en partie basse et le dépla-

ceur en partie haute étaient disposés verticalement dans un même cylindre, le piston seul étant ajusté dans le cylindre ; le déplaceur était alors commandé à partir de l'axe manivelle par une tige traversant le piston de manière étanche (**figure 2**, type I).

Diverses variantes de ce dispositif ont été expérimentées dont les principales sont montrées par la **figure 2** : types I, II et III. Le type III fonctionne à plus haute température et par conséquent à pression plus élevée.

Le cycle thermodynamique et le rendement

Le cycle de Stirling est voisin du cycle de Carnot. Dans le cycle théorique, la compression et la détente sont isothermes et l'échauffement et le refroidissement se font à volume constant. Dans la pratique, le respect d'un tel cycle est impossible du fait des contraintes mécaniques

qu'il imposerait. La **figure 3** donne l'aspect que peut prendre le cycle d'un moteur à air chaud.

La formule donnant le rendement d'une machine thermodynamique a été énoncée par Carnot en 1824. Ce rendement théorique dépend de l'écart de température existant entre la source froide et la source chaude exprimée en degrés Kelvin (degrés centigrades plus 273 degrés donnant ce que l'on appelle la température absolue) selon la formule :

$$R = 1 - T_f/T_c,$$

où R est le rendement en pourcentage, T_f la température absolue de la source froide et T_c celle de la source chaude. On voit que pour une différence de température de l'ordre de 400°C entre une source chaude à 450°C et une source froide à 50°C, le rendement théorique ne dépasse guère 55 %.

En réalité, le rendement pratique des machines thermodynamiques est bien souvent très inférieur et celui de la plupart des locomotives à vapeur n'atteignait pas 10 %. Il est donc remarquable de constater que, pour des différences de température de l'ordre de celle de ces machines à vapeur, le moteur Stirling dans ses dernières réalisations a atteint, comme nous allons le voir, des rendements dépassant 40 %, c'est-à-dire des rendements supérieurs à celui des meilleurs moteurs diesel pour lesquels les différences de température sont pourtant notablement supérieures à 1 000°C.

Les moteurs Stirling de fabrication industrielle

Dans un moteur Stirling, la partie refroidie peut être située comme dans la **figure 1** au niveau du cylindre du déplaceur, et donc dans une partie voisine de la partie chaude avec un gradient de température atteignant la dizaine de degrés par centimètre, de telle sorte qu'elle doit comporter un radiateur efficace, et ceci même si l'on augmente la longueur du cylindre. Ce refroidissement peut être effectué au moyen d'ailettes comme pour les moteurs à explosion à refroidissement par air ou par circulation d'eau pour les gros moteurs. Le système refroidisseur peut aussi pour partie être reporté sur la base

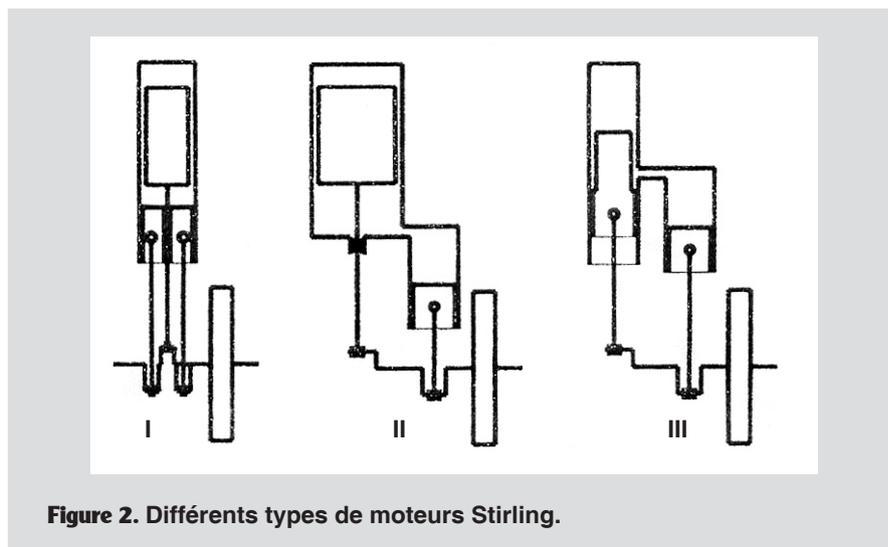


Figure 2. Différents types de moteurs Stirling.

du cylindre moteur.

A première vue, il semble donc qu'il existe au niveau du cylindre déplaceur une source de déperdition parasite de chaleur susceptible d'altérer le rendement du moteur. En effet, il en serait ainsi si, d'une part, le matériau constituant ce cylindre était bon conducteur de la chaleur et surtout, d'autre part, s'il n'existait pas un procédé permettant de réduire cette perte d'énergie. Ce procédé préconisé dans certains des brevets de Robert Stirling consiste à intercaler sur le trajet du fluide entre le cylindre du déplaceur et le cylindre du piston moteur un dispositif qu'il a qualifié de « régénérateur ». Il s'agit en fait d'une sorte d'accumulateur de chaleur ou de froid selon la partie du cycle considéré mais à transition rapide et donc constitué, par exemple, par un peloton de très minces filaments de cuivre très nombreux mais disposés de telle manière qu'ils n'entravent pas le mouvement du fluide ; des systèmes régénérateurs de ce genre peuvent même être insérés dans le piston déplaceur, le passage du fluide se faisant alors au travers de celui-ci.

L'expérience a montré l'efficacité de ces systèmes régénérateurs capables de jouer leur rôle d'échangeur rapide durant chaque cycle correspondant à des vitesses de rotation du volant de l'ordre de 600 à 1 000 tours/min.

Un moteur élémentaire de petite taille de type atmosphérique peut voir son rendement (de quelques pour cent pour ce genre de moteur) multiplié par trois ou quatre par l'adjonction d'un tel régénérateur,

ce qui permet à cette petite machine d'atteindre malgré sa simplicité un rendement de 8 à 10 %

De nombreux modèles de moteurs furent développés entre 1850 et 1950 et firent l'objet de réalisations industrielles, mais ceci surtout dans les pays anglo-saxons et ceux du nord de l'Europe (Allemagne, Suède, Pays Bas, etc.). Beaucoup étaient de petits moteurs d'une puissance de quelques dizaines à une centaine de watts (moteur du ventilateur anglais KY-KO, par exemple). Des moteurs beaucoup plus puissants furent cependant construits comme celui du bateau à roues de 2 200 tonnes de John Ericson. Toutefois, les progrès les plus significatifs réalisés en matière industrielle furent ceux dus à la firme hollandaise Philips.

Cette firme produisait durant les années 30 des récepteurs de radio à lampes gros consommateurs de puissance électrique (50 à 100 W) si on les compare aux récepteurs actuels, ce qui restreignait leur diffusion dans les pays à énergie électrique inexistante, rare ou chère. Elle entreprit donc l'étude de groupes électrogènes rustiques pouvant être alimentés par des combustibles de production locale : charbon, bois, paille, alcools, huiles de récupération, etc., ou par (ce qui aurait dû intéresser les écologistes) la chaleur solaire.

Pour un tel usage, le moteur Stirling se trouvait être le candidat idéal car léger, silencieux et fiable ; encore fallait-il en perfectionner les caractéristiques et surtout le rendement et la compacité, tâche à laquelle s'attela cette puissante firme. Le résultat fut spectaculaire. Dès 1938 apparurent

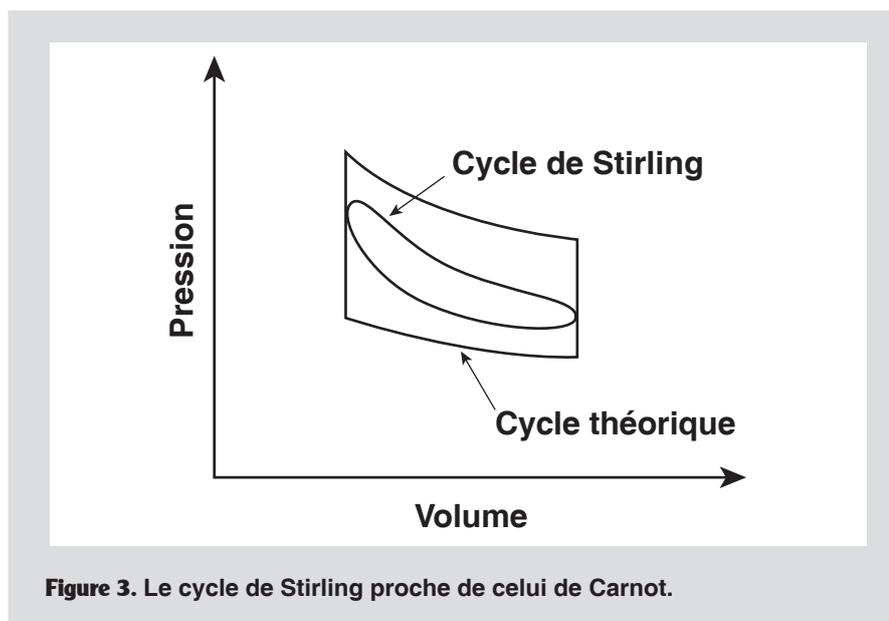


Figure 3. Le cycle de Stirling proche de celui de Carnot.

des petits moteurs légers, susceptibles de fournir plusieurs dizaines de watts avec un rapport puissance cylindrée atteignant près de 2 W/cm^3 , ce qui donne une idée de leur compacité remarquable pour l'époque pour des moteurs à air de petite taille pas ou peu pressurisés.

Dans le même temps, la firme entreprit l'étude et la réalisation de moteurs plus puissants dont les plus gros, au cours des années 50, développaient plusieurs centaines de kilowatts. C'est à ce titre qu'elle accorda des licences à des firmes de construction mécanique ou automobile : Ford, General Motors, MAN, etc.

C'est aussi vers cette époque que la Suède entreprit d'équiper les sous-marins de sa flotte de guerre de tels moteurs, ce qui lui a permis de porter à peu de frais leur temps de plongée d'un jour à près d'une semaine.

Il est curieux que ces faits aient été presque ignorés dans les pays du sud de l'Europe comme la France, Espagne, Italie, etc., hormis peut-être le fait qu'une machine Stirling produit du froid lorsqu'on lui fournit de l'énergie mécanique.

C'est uniquement sous cet aspect que le cycle de Stirling est (peu) connu en France. Et, à ma connaissance, aucune revue scientifique n'a traité de manière significative de la machine Stirling en tant que moteur, si ce ne sont les revues de bricolage comme *Système D* ou les revues de modélistes des machines à vapeur comme *l'Escarbille*.

Il n'est que de consulter *l'Encyclo-*

pédie Universalis. Il n'y figure que cinq lignes sur le sujet dans la rubrique « Thermodynamique » dans lesquelles le cycle de Stirling n'est décrit succinctement que comme cycle de machines frigorifiques.

Pourtant, même en se limitant à cet aspect de la question, le cycle de Stirling aurait mérité plus d'égards car les machines frigorifiques qu'il permet de réaliser sont remarquables et peuvent sans grande complication permettre d'atteindre des températures très basses.

Il faut dire qu'avec la disparition des postes récepteurs de radio à lampes vers 1955-1960 due au développement des récepteurs à transistors, la motivation originelle de la firme Philips pour les moteurs Stirling s'est atténuée et à finalement pris fin, de telle sorte que cette firme a arrêté l'étude de nouveaux moteurs et a cessé de commercialiser ceux existant vers 1980, tout en poursuivant cependant la fabrication des machines frigorifiques à cycle Stirling dans le cadre de son activité « Grands Froids ».

Peut-on en conclure alors que la découverte du transistor a ainsi brisé l'essor renaissant de ce type de moteur ?

Contrairement à ce que pourrait laisser supposer le mépris avec lequel apparemment on le traite dans les pays méditerranéens, il n'en est rien, et le moteur Stirling jouit actuellement d'une faveur renouvelée mais qui ne fait pas la une des journaux. Tout d'abord, parce qu'il est l'objet de recherches à caractère militaire

plus ou moins secrètes dans divers pays (de quelles performances serait capable un char d'assaut à moteur Stirling !) et ensuite parce que le domaine dans lequel ce moteur excelle, mais seulement en tant que moteur de service, c'est celui de l'aéronautique.

Les versions modernes du moteur Stirling

Une des dernières productions de la firme Philips fut le moteur 102c équipant un groupe électrogène compact particulièrement réussi.

Le nombre de prototypes de modèles divers réalisés fut de plusieurs dizaines dont la puissance atteignait pour certains plusieurs centaines de kilowatts et ceci avec un rendement effectif de l'ordre de 40 %.

La déconfiture de Philips n'empêcha pas la poursuite des travaux de recherche des firmes sous licence, comme Ford qui a réalisé et continue à étudier un moteur d'automobile dont il existe actuellement plusieurs prototypes.

En effet, rien ne s'oppose à multiplier le nombre des cylindres du moteur actionnant, comme pour le moteur à essence, un vilebrequin commun, le piston déplaceur étant pour chaque cylindre superposé au piston moteur selon la technique originelle de Robert Stirling et actionné sur un même maneton par l'embiellage « rhomboïde » développé par les techniciens de Philips.

L'avantage est, pour de telles machines, qu'il n'y a plus besoin de soupapes, d'arbre à cames, de carburateur, ni de système d'allumage ou d'injection et ceci pour un moteur silencieux (sans explosions ni échappement), léger, peu polluant, fiable et qui ne voit en aucun des points de sa structure la température dépasser 500°C .

Il est possible de réaliser ainsi des moteurs suffisamment compacts, dont la puissance peut aller de 50 à 200 kW, c'est-à-dire celle demandée pour les véhicules routiers, de la voiture de tourisme au gros camion.

Cependant, il existe d'autres moyens permettant, outre la multiplication des cylindres, d'augmenter la puissance et dans une moindre mesure le rendement déjà élevé des

↳ moteurs de type Stirling.

Le premier consiste à en augmenter la pression moyenne de fonctionnement. Evidemment, dans ce cas, on ne peut plus parler de moteur atmosphérique même si le fluide utilisé reste de l'air. On a ainsi développé des moteurs puissants dont le cycle fermé du fluide se développe autour d'une pression moyenne atteignant 200 bars.

Un autre moyen consiste à utiliser un fluide plus intéressant que l'air en ce qui concerne les propriétés thermodynamiques, l'hélium par exemple ou mieux l'hydrogène. Pourtant, on lui préfère l'hélium, moins diffusible et surtout ininflammable en cas de fuite.

L'utilisation de ces techniques conduit à la réalisation de machines d'une puissance assez élevée pour propulser à bonne vitesse des bateaux de plusieurs centaines de tonnes. Leur rendement est pour le moins comparable à celui des meilleurs moteurs diesel et leur compacité est telle qu'elle est caractérisée par un rapport puissance cylindrée pouvant atteindre 200 W/cm³ et plus.

Dans un tel domaine, la connaissance exacte des performances de ces moteurs est difficile à obtenir, compte tenu du secret avec lequel sont menées certaines recherches militaires.

Heureusement, une telle tenue au secret est moindre en ce qui concerne les moteurs Stirling à fonctionnement résonant développés par la NASA à des fins astronautiques. De tels moteurs très légers et fiables ont des parties mobiles mises en mouvement linéaire, de telle sorte que le couplage entre déplaceur et moteur subit un décalage dû à un déphasage entre les fréquences de résonance mécanique de ces deux éléments, et le mouvement du dernier actionne directement un alternateur, lui aussi linéaire, destiné à produire de l'électricité à partir donc de la différence de température existant entre une partie de l'appareil éclairée par le Soleil et l'autre portée à température plus basse par le froid sidéral.

Il est possible que des moteurs de ce type particulièrement compacts, légers et fiables aient été réalisés à d'autres fins que l'aéronautique. Ils seraient par là même beaucoup plus puissants et performants en utilisant des sources d'énergie calorifique plus conventionnelles.

Conclusion

La source de chaleur conventionnelle la plus adaptée au moteur Stirling est celle obtenue par la combustion de l'hydrogène dans l'oxygène, autrement dit le chalumeau oxyhydrique. Dans un tel cas, la température de la source chaude peut dépasser 2 000 ° et le rendement théorique et même effectif dépasser les 70 %. En utilisant des bouteilles de gaz comprimés, un sous-marin ainsi équipé pourrait voir son rayon d'action (en plongée) accru considérablement, à tel point qu'il pourrait presque rivaliser, pour un coût bien moindre, avec le sous-marin nucléaire et ceci d'autant plus que le résultat de la combustion utilisée pour sa propulsion est de l'eau pouvant servir aux besoins de l'équipage.

Dans de nombreux domaines, le moteur Stirling mériterait de s'imposer, le domaine maritime bien sûr mais aussi celui de la locomotion terrestre.

Ainsi, si l'on s'en tenait aux seuls critères de qualité, le moteur à explosion ou même le moteur diesel tellement polluants devraient voir leur champ d'utilisation considérablement réduit.

Le XXI^e siècle sera-t-il celui du triomphe du moteur Stirling ainsi que le voudrait le bon sens ? ■

EXPOSITION
Arago et
l'Observatoire de Paris
du 4 octobre
au 6 décembre 2003,
les mercredis, vendredis,
samedis et dimanches,
de 14 h à 18 h.

Bâtiment Perrault,
61 av. de l'Observatoire,
75014 Paris.

Tarif : 4,5 euros, TR : 2 euros.
Gratuit pour tous
pendant la Fête de la science.

FUSION

La science, passionnément !

Directeur de publication
Christophe Lavernhe

Directeur de la rédaction
Philippe Messer

Rédacteur en chef
Emmanuel Grenier

Rédaction
Christine Bierre, Pierre Bonnefoy,
Benoit Chalifoux, Marsha Freeman,
Pierre-Yves Guignard,
Laurence Hecht, Marjorie Hecht,
Lothar Komp, Yves Paumier,
Rémi Saumont,
Ralf Schauerhammer,
Gil Rivière-Wekstein,
Charles Stevens,
Jonathan Tennenbaum.

Conseillers de la rédaction
Jacques Cheminade,
Dino De Paoli.

Ont participé à ce numéro
Bruce Director, Agnès Farkas.

Dépôt légal
5^eme bimestre 2003
Commission paritaire n° 63876
ISSN 0293-5880
Imprimerie Stedi - 75018 Paris

Fusion
53 rue d'Hauteville
75010 Paris
Tél. : 01.42.46.72.67
Fax : 01.42.46.72.60
E. mail : fusion_e@club-internet.fr

Fusion est publié par les
Editions Alcuin,
53 rue d'Hauteville - 75010 Paris

Crédit photo
David T. Sandwell : pp.38-39 ; Herb
Kawainui Kane : couv. (b), p.34 ; Cali-
fornia Institute of Technology : p. 10 ;
Commission européenne : p.55 ; Stretto
di Messina SpA : p.57 ; Dito Morales :
p.36 ; Kevin Desplanques : pp.5-6.

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans la présente publication, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (loi du 11 mars 1957 - art. 40 et 41 et Code pénal art. 425). Toutefois, les copies à usage PÉDAGOGIQUE, avec indication de l'auteur et de la source, sont fortement encouragées. Les articles externes sont publiés sous la responsabilité de leurs auteurs.