



(51) Classification internationale des brevets :
F02G 1/043 (2006.01) F02G 1/057 (2006.01)
F02G 1/055 (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2008/001709

(22) Date de dépôt international :
5 décembre 2008 (05.12.2008)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
0759590 5 décembre 2007 (05.12.2007) FR

(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) :
PASCOT, Philippe [FR/FR]; 7 rue Eugène Millon,
F-75015 Paris (FR).

(71) Déposant et

(72) Inventeur : KLUTCHENKO, Serge [FR/FR]; 24 allée
de Dublin, F-91300 Massy (FR).

(74) Mandataire : PONTET ALLANO ET ASSOCIES; 25,
rue Jean Rostand, PARC ORSAY UNIVERSITE,
F-91893 Orsay cedex (FR).

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre
de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM,
AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ,
CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ,
EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN,
HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR,
KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME,
MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO,
NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG,
SK, SL, SM, ST, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA,
UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre
de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH,
GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM,
ZW), eurasién (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ,
TM), européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE,
ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : THERMODYNAMIC MACHINE, PARTICULARLY OF THE CARNOT AND/OR STIRLING TYPE

(54) Titre : MACHINE THERMODYNAMIQUE, EN PARTICULIER DE TYPE CARNOT ET/OU STIRLING

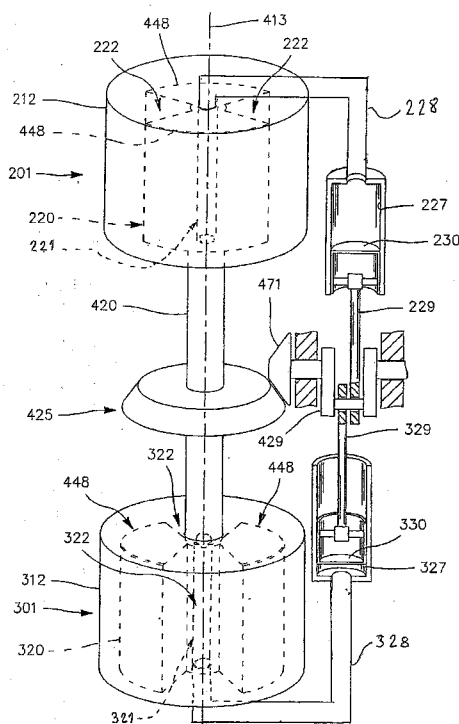


FIG. 11

(57) Abstract : According to the invention, in each unit (such as 201) of the machine, a tank (212) contains a rotary displacer (220) defining chambers (222) containing a working gas. The rotation of the displacer consecutively places the gas in a thermal exchange relation with heat-carrying exchange surfaces, i.e. a hot one for cooling regeneration and heat insulation and a cold one for heating regeneration and thermal insulation. At each moment, the tank is at an equal pressure, all the chambers of a same housing are at a same stage of the thermodynamic cycle, with the machine carrying out two cycles per revolution of the displacer in the present embodiment. The pressure in the tank is applied to a power piston (230). A gear (425) synchronises the piston (230) and the displacer (220). The invention can be used for improving the yield and enabling operation at a relatively high speed and/or under small temperature differences.

(57) Abrégé : Dans chaque unité (telle que 201) de la machine, une cuve (212) renferme un déplaceur rotatif (220) définissant des chambres (222) contenant un gaz de travail. La rotation du déplaceur place successivement le gaz en relation d'échange thermique avec des surfaces d'échange caloporteuse chaude, de régénération de refroidissement, d'isolation thermique, caloporteuse froide, de régénération de chauffage, et d'isolation thermique. A chaque instant,

[Suite sur la page suivante]



MC, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI
(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR,
NE, SN, TD, TG).

Publiée :

— *sans rapport de recherche internationale, sera republiée
dès réception de ce rapport (règle 48.2.g)*

Déclarations en vertu de la règle 4.17 :

— *relative à la qualité d'inventeur (règle 4.17.iv)*

la cuve est en équipression, toutes les chambres d'une même enceinte sont à un même stade du cycle thermodynamique, la machine exécutant deux cycles par tour de déplaceur dans la réalisation représentée. La pression dans la cuve est appliquée à un piston de puissance (230). Un engrenage (425) synchronise le piston (230) et le déplaceur (220). Utilisation pour améliorer le rendement et permettre le fonctionnement à vitesse relativement élevée et/ou sous de faibles différences de température.

- 1 -

« Machine thermodynamique, en particulier de type Carnot et/ou Stirling »

La présente invention concerne une machine thermodynamique, en particulier de type Carnot et/ou Stirling. Une telle machine est typiquement un moteur, mais elle peut également être conçue pour fonctionner en pompe à chaleur ou en machine frigorifique.

La présente invention vise plus particulièrement les machines essentiellement volumétriques dans lesquelles on déplace un gaz pour le mettre alternativement en contact avec une surface d'échange thermique chaude et une surface d'échange thermique froide.

Dans le cas d'un moteur, on alimente la surface d'échange thermique chaude avec des calories issues d'une source chaude externe. Par ses contacts avec des surfaces d'échange ayant des températures successivement différentes, le gaz subit des variations de température, qui induisent des variations de pression. Un piston exécute un temps moteur lorsque la pression est haute et un temps de compression lorsque la pression est basse.

Dans le cas d'une pompe à chaleur ou machine frigorifique, on fournit de l'énergie mécanique au piston pour comprimer le gaz et ainsi le réchauffer lorsqu'il est en contact avec la surface d'échange thermique chaude et/ou pour détendre le gaz lorsqu'il est en contact avec la surface d'échange thermique froide. Ainsi, le gaz réchauffe une source chaude reliée à la surface d'échange thermique chaude et/ou refroidit une source froide reliée à la surface d'échange thermique froide.

On souhaite en général que le cycle thermodynamique exécuté par la machine soit aussi proche que possible d'un cycle théorique. Pour une machine de type Carnot le cycle théorique comprend successivement une compression lente isotherme à la température de la source froide, une compression rapide adiabatique, une détente lente isotherme à la température de la source chaude, et une détente rapide adiabatique.

- 2 -

Un tel cycle a un rendement théorique égal à un moins le rapport entre la température absolue de la source froide et la température absolue de la source chaude. Ce cycle présente l'avantage de permettre l'exploitation de faibles différences de températures entre la source chaude et la source froide. Il est en revanche peu adapté à de fortes différences de température entre les sources car il nécessite alors de fortes variations de pression, et donc un piston de forte cylindrée.

Pour une machine de type Stirling le cycle théorique comprend successivement une compression isotherme à la température de la source froide, un chauffage isochore, une détente isotherme à la température de la source chaude, et un refroidissement isochore. Comme la compression et la détente se font à température constante, le chauffage et le refroidissement ont lieu entre les deux mêmes températures extrêmes, à savoir celle de la source chaude et respectivement celle de la source froide. Ceci permet de réaliser le chauffage et le refroidissement par échange de calories dans un échangeur. On parle alors de chauffage et de refroidissement par « régénération ». Un tel cycle a un rendement théorique avantageux, égal à la différence entre la température absolue de la source chaude et la température absolue de la source froide, divisée par la température absolue de la source chaude. Ce cycle est donc particulièrement adapté à l'exploitation de fortes différences de température entre la source chaude et la source froide.

Ce type de machine théoriquement très avantageux est difficile à mettre en œuvre. Il existe plusieurs architectures classiques dans lesquelles au moins un « déplaceur » (une sorte de piston) déplace le gaz de travail de la surface d'échange thermique chaude à la surface d'échange thermique froide à travers un conduit dans lequel est installé l'échangeur ou « régénérateur ». Le rendement de telles machines est très inférieur au rendement théorique du cycle de Stirling décrit précédemment. Pendant le fonctionnement, le conduit, le régénérateur et d'autres volumes intérieurs constituent des volumes morts dont la valeur totale est considérable par comparaison avec le volume de gaz qui, par exemple, est effectivement en contact avec la surface

- 3 -

d'échange thermique chaude pendant la détente dans le cas d'une machine motrice. En outre, de telles circulations de gaz génèrent des pertes de pression et des pertes thermiques.

Le but de la présente invention est ainsi de proposer une nouvelle machine thermodynamique qui réduise l'impact de tout ou partie des inconvénients précités, et/ou qui soit capable de fonctionner suivant au moins l'un des cycles réels plus proche des cycles théoriques souhaités.

Suivant l'invention, la machine thermodynamique comprenant :

- une enceinte contenant un gaz de travail et possédant des surfaces d'échange thermique à son intérieur ;
- des moyens de déplacement mobiles dans l'enceinte pour déplacer le gaz de travail dans l'enceinte et mettre successivement le gaz de travail en et hors de contact avec chacune des surfaces d'échange thermique pour réaliser des étapes successives d'un cycle thermodynamique ; et
- un organe de puissance mécanique soumis à la pression du gaz de travail ;

est caractérisée en ce que les moyens de déplacement font passer successivement devant les différentes surfaces d'échange thermique une chambre contenant une quantité de gaz de travail essentiellement constante dont au moins la majeure partie est globalement stationnaire par rapport aux moyens de déplacement. Un couplage indirect autorise un vilebrequin recueillant la force motrice de l'organe de puissance mécanique à tourner au moins transitoirement à une vitesse de rotation différente de celle d'un arbre commandant le mouvement des moyens de déplacement

Ainsi, suivant l'invention, au lieu de chasser le gaz de travail d'une chambre à l'autre pour chaque étape du cycle, le gaz de travail occupe en permanence une chambre qui défile devant les différentes surfaces d'échange thermique.

On peut ainsi fortement réduire ou même quasiment éliminer les volumes morts ou encore les pertes de pression liées à l'écoulement du gaz et/ou réduire significativement les pertes thermiques.

- 4 -

Dans la machine suivant l'invention, toute la quantité de gaz présente dans la chambre effectue une phase bien déterminée de son cycle thermodynamique, en liaison avec une surface d'échange thermique bien déterminée. Ceci permet de décomposer clairement le cycle thermodynamique dans la machine en des temps beaucoup plus proches que par le passé de ceux du cycle théorique recherché. Le rendement de cycle est donc amélioré. Ceci permet de réaliser des machines fonctionnant efficacement sous de très faibles différences de température, par exemple avec moins de 100°K de différence entre la source chaude et la source froide.

De préférence, la quantité de gaz sensiblement constante est un volume constant. Dans ce cas, la chambre peut être en communication permanente avec une cavité à volume variable, par exemple un cylindre, dans laquelle se déplace l'organe de puissance mécanique, tel qu'un piston.

Il est également concevable que la chambre soit elle-même à volume variable. Dans ce cas, l'organe de puissance mécanique peut être constitué par tout ou partie des moyens de déplacement.

De préférence, les moyens de déplacement comprennent un rotor mobile autour d'un axe. Ainsi, les surfaces d'échange thermique peuvent être réparties autour de l'axe. Le rotor entraîne la chambre en rotation pour qu'elle coïncide successivement avec les différentes surfaces d'échange.

Typiquement, les moyens de déplacement comprennent deux faces dirigées sensiblement l'une vers l'autre pour délimiter la chambre. La chambre a alors par exemple la forme d'une alvéole formée dans les moyens de déplacement et dont des surfaces ouvertes défilent devant les différentes surfaces d'échange thermique solidaires de l'enceinte. D'autres configurations sont possibles. Par exemple, lorsque les moyens de déplacement comprennent un rotor, la chambre peut être définie par une seule face des moyens de déplacement, en particulier un méplat sur la surface latérale du rotor tournant dans une enceinte cylindrique.

- 5 -

Les surfaces d'échange thermique peuvent comprendre des surfaces d'échange caloporteuses c'est-à-dire les surfaces d'échange déjà mentionnées précédemment reliées à une source chaude ou froide. La machine peut comprendre également des moyens de confinement thermique capables de restreindre les échanges de chaleur avec le gaz de travail.

Une idée originale de l'invention consiste à avoir réalisé une machine de type Carnot dans laquelle les moyens de déplacement traversent la région des moyens de confinement thermique. Lesquels se trouvent dans l'enceinte principale de sorte qu'il y a à l'intérieur de l'enceinte au moins une surface de confinement thermique intercalée entre les surfaces d'échange. Au contraire, dans les réalisations antérieures, les moyens de déplacement chassent le gaz d'une chambre à une autre, puis de l'autre chambre à la première, en faisant passer le gaz alternativement dans un sens et dans l'autre à travers un conduit qui est extérieur à l'enceinte principale et dans lequel se trouvent les moyens de confinement thermique.

Lorsque les moyens de déplacement mettent le gaz de travail en contact avec les moyens de confinement thermique, un mouvement de l'organe de puissance est effectué de façon que le cycle thermodynamique comprenne au moins une phase de variation adiabatique du volume du gaz de travail.

Le cycle thermodynamique de Carnot comprend le passage du gaz de travail en contact successivement avec les surfaces suivantes :

- une surface caloporteuse froide pendant que le volume du gaz de travail diminue,
- une surface de confinement thermique pendant que le volume du gaz de travail diminue,
- une surface caloporteuse chaude pendant que le volume du gaz de travail augmente,
- une surface de confinement thermique pendant que le volume du gaz de travail augmente.

- 6 -

De préférence la variation du volume est plus rapide pendant que le gaz de travail est en contact avec les surfaces de confinement que pendant que le gaz est en contact avec les surfaces d'échange caloporteuses. Le gaz en contact avec les surfaces caloporteuses doit effectuer un transfert thermique dont la vitesse dépend notamment de l'inertie thermique des matériaux et des surfaces d'échange. Au contraire, afin de minimiser les échanges thermiques et de raccourcir la durée du cycle, il est avantageux de faire varier rapidement le volume du gaz de travail, et donc la température, pendant que le gaz est en contact avec les surfaces de confinement.

Ainsi quand le gaz de travail est en contact avec une surface de confinement, on provoque par variation sensiblement adiabatique du gaz de travail une variation de température dans le même sens que celle subie par le gaz de travail au contact de la surface de régénération située en amont.

Les surfaces d'échange thermique peuvent comprendre également des surfaces d'échange de régénération intercalées entre les surfaces d'échange caloporteuses.

Une idée originale de l'invention consiste à avoir réalisé une machine de type Stirling dans laquelle les moyens de déplacement traversent la région des moyens de régénération, lesquels se trouvent dans l'enceinte principale. Au contraire, dans les réalisations antérieures, les moyens de déplacement chassent le gaz d'une chambre à une autre, puis de l'autre chambre à la première, en faisant passer le gaz alternativement dans un sens et dans l'autre à travers un conduit qui est extérieur à l'enceinte principale et dans lequel se trouvent les moyens de régénération.

Suivant l'invention, les surfaces d'échange de régénération et/ou de confinement sont positionnées pour délimiter une partie de la trajectoire de la chambre mobile se déplaçant avec les moyens de déplacement. Une machine selon l'invention peut être conçue pour opérer simultanément plusieurs cycles thermodynamiques identiques mais déphasés de façon que le chauffage par régénération d'un cycle soit alimenté en calories fournies

- 7 -

par le refroidissement du gaz dans un autre cycle, et/ou que le piston comprimant le gaz pour le chauffage adiabatique soit entraîné par l'énergie fournie par le piston détendant le gaz pour le refroidissement adiabatique.

Le transfert de calories par les surfaces d'échange de régénération peut avoir lieu par conduction thermique, ou par un fluide circulant intermédiaire, ou encore grâce à une réserve thermique intermédiaire qui prend en régime établi une température d'équilibre souhaitée.

On peut encore éviter les transferts thermiques entre cycles déphasés. Pour cela, la chaleur collectée lors du refroidissement du gaz est stockée dans une réserve thermique pour être restituée lors d'un réchauffement de gaz ultérieur. Si la chambre se déplace en va-et-vient, une surface de régénération peut être à la fois une surface de chauffage dans un sens de mouvement de la chambre et une surface de refroidissement dans l'autre sens de mouvement de la chambre. Si le mouvement de la chambre est une rotation continue, les surfaces d'échange de régénération sont spécialisées pour le chauffage ou respectivement pour le refroidissement et des moyens de transfert thermique sont prévus entre elles. Le transfert peut avoir lieu dans le sens de la rotation, ou encore dans le sens opposé. Il est également possible, comme on le verra plus loin dans la description d'un exemple, de combiner avantageusement dans une même machine des transferts dans les deux sens. Si l'on se place du point de vue du transfert de calories, le transfert a lieu de devant à derrière une surface d'échange caloporteuse froide, et de derrière à devant une surface d'échange caloporteuse chaude, relativement au sens de déplacement de la chambre. Si l'on se place du point de vue du transfert de frigories, les sens de transfert sont inverses de ceux décrits ci-dessus pour les calories.

Il est également possible suivant l'invention d'exploiter un cycle thermodynamique hybride Carnot-Stirling lorsque l'on dispose une surface de confinement thermique entre une surface de régénération située en amont, relativement au sens de déplacement du gaz de travail, et une surface d'échange caloporteuse située en aval.

- 8 -

Le cycle hybride selon l'invention comprend le passage du gaz en contact avec les surfaces suivantes pour un cycle moteur :

- une surface caloporteuse froide pendant que le volume du gaz diminue,
- une surface régénératrice de chauffage pendant que le volume du gaz de travail est sensiblement constant,
- une surface de confinement thermique pendant que le volume du gaz de travail diminue,
- une surface caloporteuse chaude pendant que le volume du gaz augmente,
- une surface régénératrice de refroidissement pendant que le volume du gaz de travail est sensiblement constant,
- une surface de confinement thermique pendant que le volume du gaz de travail augmente.

Pour un cycle de pompe à chaleur le gaz effectue le trajet inverse et le sens de variation du volume associé à chaque surface autre que les deux surfaces régénératrices doit également être inversé.

Une autre idée originale à la base de l'invention consiste à augmenter considérablement la superficie des surfaces d'échange thermique par comparaison avec les surfaces cylindriques, balayées par des pistons circulaires, de l'état de la technique. Suivant cet aspect de l'invention, on donne à la chambre une forme aplatie dont les grandes faces constituent les surfaces d'échange thermique tandis que l'une au moins des petites faces est constituée par une face frontale des moyens de déplacement.

De préférence, les surfaces d'échange thermique sont formées sur des ailettes formant entre elles des chambres individuelles. Les faces latérales des ailettes constituent les grandes faces de ces chambres. Les moyens de déplacement comprennent des ailes qui passent entre les ailettes. Chaque chambre plate possède au moins une face étroite constituée par la face frontale, c'est-à-dire la face antérieure ou postérieure relativement au sens de déplacement, d'une aile des moyens de déplacement.

- 9 -

L'invention concerne également un procédé de transformation d'énergie entre la forme thermique et la forme mécanique, dans lequel au cours d'un cycle thermodynamique on prélève de l'énergie thermique à un gaz de travail lors d'un refroidissement isochore et on fournit cette énergie thermique au gaz de travail lors d'un chauffage isochore, caractérisé en ce que le refroidissement isochore et/ou le chauffage isochore est adjacent d'un côté à une variation sensiblement adiabatique du volume du gaz de travail et de l'autre à une variation sensiblement isotherme du volume du gaz de travail.

D'autres particularités et avantages de l'invention ressortiront encore de la description ci-après, relatives à des exemples non limitatifs.

Aux dessins annexés :

- la figure 1 est un graphique pression-volume d'un cycle thermodynamique Stirling ;
- la figure 2 est le graphique température-volume du cycle de la figure 1 ;
- les figures 3 à 8 sont des représentations schématiques de principe d'une machine selon l'invention, à six étapes successives de son cycle de fonctionnement ;
- la figure 9 est un schéma mécanique de la machine des figures 3 à 8 ;
- la figure 10 est une vue analogue à figure 9 mais relative à un second mode de réalisation de la machine selon l'invention ;
- la figure 11 est une vue schématique en perspective, avec coupe partielle, d'un troisième mode de réalisation d'une machine selon l'invention ;
- la figure 12 est une vue partielle en coupe selon XII-XII de la figure 15, montrant l'enceinte et les moyens de déplacement de la machine de la figure 11 ;
- la figure 13 est une vue en perspective de deux plaques statoriques superposées, relatives à un cycle thermodynamique Stirling, de la machine de la figure 11 ;
- la figure 14 est une vue partielle en perspective du déplaceur de la machine de la figure 11 ;
- les figures 15 à 22 sont des vues schématiques de la machine de la figure 11 à huit stades successifs de son cycle de fonctionnement, en coupe

- 10 -

transversale à l'axe de rotation du déplaceur, l'ensemble cylindre-piston étant représenté tourné de 90° à des fins illustratives ;

-- la figure 23 illustre une variante pour le couplage mécanique entre le déplaceur et le vilebrequin de la machine de la figure 11 ; et

-- la figure 24 est un schéma de principe montrant la machine de la figure 11 fonctionnant en moteur alimenté par la chaleur résiduelle d'une turbine à vapeur ;

-- la figure 25 est une vue en perspective d'une plaque statorique hybride couplant cycle Carnot et Stirling, de la machine de la figure 11 ;

-- la figure 26 est une vue en perspective d'une surface d'échange caloporteuse parcourue par des conduits de circulation ;

-- la figure 27 est une vue en coupe partielle d'une surface d'échange caloporteuse ;

-- la figure 28 est une vue en perspective d'une plaque statorique relative à un cycle thermodynamique Carnot, de la machine de la figure 11 ;

-- la figure 31 est un graphique pression-volume d'un cycle thermodynamique Carnot ;

-- la figure 32 est un graphique pression-volume d'un cycle thermodynamique hybride couplant cycle Carnot et Stirling ; et

-- la figure 33 est un graphique température-volume d'un cycle thermodynamique hybride couplant cycle Carnot et Stirling.

Les figures 1 et 2 montrent un exemple de cycle de moteur selon un cycle Stirling. La figure 1 représente l'évolution de la pression du gaz de travail lorsqu'il subit les quatre étapes successives de son cycle exécuté dans le sens des flèches, à savoir une compression E1 depuis un volume maximal V1 jusqu'à un volume minimal V2, un chauffage isochore E2 alors que le volume est maintenu à sa valeur minimale V2, une détente E3 depuis le volume V2 jusqu'au volume V1, et un refroidissement isochore E4 alors que le volume est maintenu à sa valeur maximale V1.

La figure 2 représente l'évolution de la température du gaz de travail au cours du même cycle Stirling, toujours exécuté dans le sens des flèches. Ce graphe montre que la compression E1 et la détente E3 sont isothermes. La

- 11 -

compression E1 a lieu à une température basse constante T_b et la détente E3 à une température haute constante T_h . Compte tenu de la loi de Mariotte, ces compression et détente isothermes se traduisent dans le diagramme de la figure 1 par des segments de courbe de la fonction générale $P = nRT/V$ dans laquelle P représente la pression, n représente le nombre de moles de gaz, R représente la constante des gaz parfaits, T représente la température et V représente le volume. Ainsi, pendant la compression, la pression du gaz de travail augmente de P_1 à P_2 , et pendant la détente, la pression diminue de P_{22} à P_{11} . Pendant le chauffage isochore, la pression monte de P_2 à P_{22} , et pendant le refroidissement isochore, la pression diminue de P_{11} à P_1 . L'aire du cycle, hachurée à la figure 1, est représentative du travail mécanique théoriquement fourni par le cycle. On constate que pour une différence de volume $V_1 - V_2$ donnée, cette énergie est sensiblement proportionnelle à la masse de gaz contenue dans la machine. Pour augmenter le travail fourni par ce cycle, on peut alors augmenter la pression de remplissage en procédant à un gonflage initial du gaz de travail dans la machine.

Dans le cas d'un fonctionnement en pompe à chaleur ou en machine frigorifique, le même cycle peut être exécuté, mais dans l'autre sens, contraire à celui indiqué par les flèches, avec une compression isotherme à haute température T_h de la pression P_{11} à P_{22} , un refroidissement à volume constant V_2 minimal, une détente à basse température T_b de la pression P_2 à P_1 , et un chauffage à volume constant V_1 maximal. L'aire du cycle, hachurée à la figure 1, est alors représentative du travail mécanique théoriquement consommé par le cycle.

Dans le cas du moteur comme dans celui de la pompe à chaleur, le refroidissement et le chauffage se font donc entre des températures extrêmes identiques, à savoir de T_b à T_h pour le chauffage et de T_h à T_b pour le refroidissement. Le cycle de Stirling permet ainsi de récupérer des calories pendant le refroidissement pour les utiliser pendant le chauffage, et réciproquement de récupérer des frigories pendant le chauffage pour les utiliser pendant le refroidissement. Par conséquent, les seuls besoins

- 12 -

thermiques du cycle théorique vis-à-vis de l'extérieur sont le maintien du gaz de travail en contact avec une source chaude pendant l'étape de variation de volume à la température haute T_h , et en contact avec une source froide pendant l'étape de variation de volume à la température basse T_b .

Pendant la compression isotherme, le gaz fournit de la chaleur à la source avec laquelle il est en contact. Pendant la détente isotherme, le gaz prélève de la chaleur fournie par la source avec laquelle il est en contact.

La figure 31 montre un exemple de cycle de moteur Carnot. La figure 31 représente l'évolution de la pression du gaz de travail lorsqu'il subit les quatre étapes successives de son cycle exécuté dans le sens des flèches, à savoir une compression isotherme E5 depuis un volume maximal V_{31} jusqu'à un volume intermédiaire V_{32} , un chauffage adiabatique E6 par compression jusqu'à un volume minimal V_{33} , une détente isotherme E7 depuis le volume V_{33} jusqu'au volume V_{34} , et un refroidissement adiabatique E8 alors que le volume augmente jusqu'à sa valeur maximale V_{31} .

Dans le cas d'un fonctionnement en pompe à chaleur ou en machine frigorifique, le même cycle peut être exécuté, mais dans l'autre sens, contraire à celui indiqué par les flèches.

La figure 32 montre un exemple de cycle de moteur hybride. La figure 32 représente l'évolution de la pression du gaz de travail lorsqu'il subit les six étapes successives de son cycle exécuté dans le sens des flèches, à savoir une compression isotherme E9 depuis un volume maximal V_{21} jusqu'à un volume intermédiaire V_{22} , un chauffage isochore E10 alors que le volume est maintenu à sa valeur intermédiaire V_{22} , un chauffage adiabatique E11 par compression jusqu'à un volume minimal V_{23} , une détente isotherme E12 depuis le volume V_{23} jusqu'au volume V_{24} , un refroidissement isochore E13 alors que le volume est maintenu à sa valeur V_{24} , et un refroidissement adiabatique E14 par augmentation du volume jusqu'à sa valeur maximale V_{21} .

- 13 -

La figure 33 représente l'évolution de la température du gaz de travail au cours du même cycle hybride, toujours exécuté dans le sens des flèches. Ce graphe montre que la compression E9 et la détente E12 sont isothermes. La compression E9 a lieu à une température basse constante T_1 et la détente E12 à une température haute constante T_4 . Pendant le chauffage isochore, la pression monte de P_{122} à P_{222} , et pendant le refroidissement isochore, la pression diminue de P_{224} à P_{124} . Pendant le chauffage adiabatique, la pression monte de P_{222} à P_{223} , et pendant le refroidissement adiabatique, la pression descend de P_{124} à P_{121} . L'aire du cycle, hachurée à la figure 32, est représentative du travail mécanique théoriquement fourni par le cycle. On constate que pour une différence de volume V_1-V_2 donnée, cette énergie est sensiblement proportionnelle à la masse de gaz contenue dans la machine. Pour augmenter le travail fourni par ce cycle, on peut alors augmenter la pression de remplissage en procédant à un gonflage initial du gaz de travail dans la machine.

Dans la suite, pour simplifier, on ne décrira l'invention que comme fonctionnant en moteur, sauf lorsqu'on se réfèrera explicitement au fonctionnement en pompe à chaleur ou en machine frigorifique.

Les figures 3 à 8 représentent six états successifs d'une machine selon l'invention capable d'exécuter un cycle thermodynamique Stirling réel voisin du cycle des figures 1 et 2.

La machine comprend un alésage 11 formé dans un corps 12 qui constitue une enceinte pour cet alésage. Pour définir l'alésage 11, le corps 12 possède des surfaces d'échange thermique qui se succèdent le long de l'axe 13 de l'alésage. Il y a ainsi une surface d'échange thermique caloporteuse chaude 14h et une surface d'échange thermique caloporteuse froide 14b, séparées par une surface d'échange thermique de régénération 16. Les surfaces d'échange sont portées par des éléments, par exemple métalliques, qui sont séparés les uns des autres par des isolations thermiques 15 figurées par des doubles traits entre ces éléments, destinées à minimiser les fuites thermiques entre eux. La surface caloporteuse chaude 14h est en liaison

- 14 -

thermique avec la source chaude (non représentée), tandis que la surface caloporteuse froide 14b est en liaison thermique avec la source froide (non représentée). La surface d'échange thermique de régénération 16 est en liaison thermique avec un circuit de fluide 18 s'étendant entre une réserve thermique chaude 18gh et une réserve thermique froide 18gb.

Deux pistons 19 et 21 sont montés coulissants de manière étanche dans l'alésage 11. Ils ont deux faces frontales 52, tournées l'une vers l'autre, qui définissent entre eux une chambre 22 contenant un gaz de travail. La quantité de gaz de travail contenue dans la chambre 22 est essentiellement constante. Dans cet exemple, la quantité constante est une masse constante. Les pistons 19 et 21 constituent des moyens de déplacement, qui se déplacent de manière synchronisée l'un avec l'autre pour faire passer successivement la chambre 22 devant les différentes surfaces d'échange thermique 14h, 16, 14b et mettre ainsi successivement le gaz de travail en contact d'échange thermique avec ces différentes surfaces d'échange. Pour optimiser le contact thermique, chaque surface d'échange 14h, 16 ou 14b définit tout le pourtour d'un tronçon respectif de l'alésage 11. Comme les pistons 19 et 21 coulissent dans l'alésage, leur direction de déplacement est parallèle aux surfaces d'échange constitutives de l'alésage. Suivant une particularité de l'invention, les moyens de déplacement (pistons 19, 21) balayent successivement les surfaces d'échange et notamment, de manière particulièrement remarquable, la surface d'échange de régénération 16.

Comme le montre l'observation simultanée des figures 3 à 8, la chambre 22 et la quantité de gaz de travail qu'elle contient sont essentiellement stationnaires par rapport aux deux pistons 19 et 21. C'est-à-dire que les deux pistons 19 et 21, ainsi que la chambre 22 définie entre eux et le gaz qu'elle contient se déplacent comme un seul ensemble. Certes, dans cet exemple, ledit ensemble est déformable en ce sens que les pistons sont à une distance variable l'un de l'autre comme on le verra plus loin. Mais, par rapport à chaque piston, le gaz reste toujours du même côté du piston, sans être chassé vers l'autre côté du piston ou vers une autre chambre à travers un conduit.

- 15 -

Dans la situation représentée à la figure 3, les deux pistons 19 et 21 sont positionnés de sorte que la chambre 22 ayant son volume maximal V_1 est en contact thermique avec la surface caloporteuse froide 14b. On se trouve à l'angle inférieur droit du cycle des figures 1 et 2, c'est à dire à la transition entre la fin de l'étape de refroidissement E4 et le début de l'étape de compression E1. Le piston 21 délimitant la chambre 22 du côté opposé à la surface d'échange caloporteuse chaude 14h est sensiblement immobile. L'autre piston 19 se déplace vers le piston 21 jusqu'à la situation représentée à la figure 4, où les deux pistons 19 et 21 sont sensiblement immobiles, et la chambre 22 est à son volume minimal V_2 tout en étant toujours en contact thermique avec la surface caloporteuse froide 14b. La chaleur produite par la compression a été simultanément évacuée par la source froide à travers la surface caloporteuse froide 14b. Ceci réalise la compression isotherme E1 du cycle des figures 1 et 2. Pendant cette compression, le piston 19 qui se déplace fournit de l'énergie mécanique au gaz.

Dans la situation représentée à la figure 5, les deux pistons 19 et 21 se déplacent ensemble dans la zone de la surface d'échange de régénération 16, tandis que la chambre 22 conserve son volume minimal V_2 . Dans le circuit 18, le fluide est mis en mouvement à partir de la réserve chaude 18gh. Le fluide chaud cède des calories au gaz de travail à travers la surface d'échange de régénération 16, puis va dans la réserve froide 18gb. Grâce à ces calories, le gaz de travail passe progressivement de sa température basse T_b à sa température haute T_h . Ceci réalise l'étape de chauffage isochore E2 du cycle.

Ensuite, les pistons 19 et 21 amènent la chambre 22, toujours à son volume minimal V_2 , en contact avec la surface d'échange caloporteuse chaude 14h (figure 6), puis le piston 21 change de sens de mouvement pour s'éloigner du piston 19 et agrandir la chambre 22 toujours en contact thermique avec la surface d'échange caloporteuse chaude 14h (figure 7). Ceci réalise l'étape de détente isotherme E3 du cycle. Pendant cette détente, la source chaude fournit des calories aux gaz à travers la surface caloporteuse chaude 14h de façon que le gaz reste à la température haute T_h malgré la diminution de sa

- 16 -

pression. Pendant cette détente, le piston 21 qui se déplace recueille de la part du gaz une énergie mécanique plus grande que celle fournie au gaz par le piston 19 pendant la compression (puisque la course réalisée est la même mais la pression appliquée au piston est plus grande).

Le piston 19 opposé à la surface caloporteuse froide 14b, qui était resté sensiblement immobile pendant l'étape de détente, se met à son tour en mouvement en direction de la surface caloporteuse froide 14b (figure 8) tandis que la chambre 22, conservant son volume maximal V_1 depuis la fin de la détente, vient se placer en contact thermique avec la surface d'échange de régénération 16. Dans le circuit 18, le fluide est mis en mouvement à partir de la réserve froide 18gb, absorbe des calories contenues dans le gaz de travail et refroidit celui-ci de la température haute T_h à la température basse T_b puis va dans la réserve chaude 18gh. Ceci réalise l'étape de refroidissement isochore E4 du cycle.

Le processus revient ensuite à la situation représentée à la figure 3 et le cycle déjà décrit recommence.

Dans ce mode de réalisation, les pistons 19 et 21 constituent à la fois des moyens de déplacement du gaz et des organes de puissance mécanique soumis à la pression du gaz pour fournir de l'énergie mécanique au gaz pendant l'étape de compression et recueillir de l'énergie mécanique de la part du gaz pendant l'étape de détente.

La figure 9 représente un mécanisme d'actionnement des pistons 19 et 21, capable en même temps de transmettre les forces de travail du gaz. Les pistons 19 et 21 sont situés entre deux systèmes bielles manivelles 23, 24 auxquels ils sont respectivement attelés. Les deux systèmes bielles manivelles sont couplés mécaniquement pour tourner à la même vitesse mais avec entre eux un déphasage tel que le piston 21 situé du côté de la surface d'échange caloporteuse froide 14b soit en avance sur l'autre piston 19. La puissance mécanique fournie par la machine est recueillie sur un arbre

- 17 -

moteur (non représenté) couplé aux deux systèmes bielles manivelles, par exemple un arbre moteur solidaire de l'une des manivelles.

Dans le mode de réalisation illustré à la figure 10, qui ne sera décrit que pour ses différences par rapport à celui des figures 3 à 9, les moyens de déplacement et les organes de puissance mécanique sont séparés.

Les moyens de déplacement ne comprennent plus qu'un seul piston 120 attelé à un seul système bielle manivelle 125. Le piston 120 est en forme de diabolos avec deux corps d'extrémité 119, 121 reliés rigidement entre eux par une tige 126 et définissant entre eux la chambre 22. La quantité de gaz constante contenue dans la chambre 22 est maintenant un volume constant défini entre deux faces à 152, tournées l'une vers l'autre et appartenant chacune à l'un des corps 119, 121.

Un alésage 127, formant chambre de travail, communique avec l'alésage 11 à travers la paroi latérale de ce dernier, par un passage 128 typiquement situé à mi-distance axiale entre la surface caloporteuse chaude 14h et la surface d'échange caloporteuse froide 14b. Un piston de puissance 130 coulisse de manière étanche dans l'alésage de travail 127 pour fermer ce dernier du côté opposé au passage 128. Le piston 130 est attelé à un système bielle manivelle de puissance 129.

À ses deux extrémités opposées, le piston déplaceur 120 comporte des collerettes d'étanchéité 131 qui sont suffisamment écartées l'une de l'autre pour que la chambre 22 communique en permanence avec l'alésage de travail 127. Toutefois, entre chacune des collerettes 131 et la tige de liaison 126, les corps d'extrémité 119, 121 remplissent la quasi-totalité de la section transversale de l'alésage 11. Ceci permet, comme représenté à la figure 10, de faire communiquer la chambre 22 avec le passage 128 tout en plaçant la très grande majorité du volume de la chambre 22 en contact thermique exclusif avec une surface d'échange telle que la surface d'échange caloporteuse froide 14b (situation représentée) ou la surface d'échange caloporteuse chaude 14h (situation non représentée) qui n'est pas celle où

- 18 -

débouche le passage 128. Les systèmes bielle manivelle 125 et 129 sont couplés mécaniquement l'un avec l'autre pour tourner à la même vitesse et avec un calage angulaire approprié l'un par rapport à l'autre.

Ce calage est tel que le piston de puissance 130 réduit le volume disponible pour le gaz dans l'alésage 127 lorsque le piston de déplacement 120 est à son extrémité de course où la chambre 22 est en contact thermique avec la surface d'échange caloporteuse froide 14b. C'est la situation représentée à la figure 10. Elle a pour effet de comprimer le gaz pendant qu'il est maintenu à sa température basse T_b , ce qui réalise la compression isotherme à basse température E1 déjà décrite. Par la suite, le système bielle manivelle 125 déplace le piston de déplacement 120 vers la position de contact thermique avec la surface d'échange de régénération 16 puis avec la surface d'échange caloporteuse chaude 14h alors que piston de travail 130 reste voisin de sa position où le volume disponible dans l'alésage 127 est faible, ce qui correspond à l'étape de chauffage isochore E2. Ensuite, le volume disponible dans l'alésage 127 s'agrandit alors que le piston déplaceur 120 positionne la chambre 22 en contact thermique avec la surface d'échange caloporteuse chaude 14h. Ceci réalise la détente isotherme à haute température E3. Enfin, l'étape de refroidissement isochore E4 se réalise lorsque le piston déplaceur 120 passe devant la surface d'échange de régénération 16 en direction de la surface d'échange thermique caloporteuse froide 14b tandis que le piston de puissance mécanique 130 reste voisin de sa position où le volume disponible dans l'alésage 127 est maximal.

Dans ce mode de réalisation, c'est le système bielle manivelle de puissance 129 qui recueille la puissance mécanique, alors que l'énergie mécanique globale fournie ou recueillie par le système bielle manivelle de déplacement 125 actionnant le piston déplaceur 120 est théoriquement nulle.

On va maintenant décrire en référence aux figures 11 à 22 et 25 à 28 le mode de réalisation préféré de l'invention, dans lequel le déplaceur est rotatif. Le déplaceur est un rotor tournant toujours dans le même sens dans l'enceinte constituant un stator.

- 19 -

Dans l'exemple représenté, la machine comprend en référence à la figure 11 deux unités 201, 301 dont les déplaceurs respectifs 220, 320 sont liés rigidement l'un à l'autre par un arbre rotatif commun 420. Chaque unité 201, 301 est une machine élémentaire à plusieurs chambres 222, 322. Chaque chambre 222, 322 exécute un cycle thermodynamique complet à chaque demi-tour de l'arbre 420 et des déplaceurs 220, 320. Les deux déplaceurs 220, 320 sont décalés de 90° l'un par rapport à l'autre autour de leur axe de rotation 413. Les machines élémentaires sont du type dans lequel la quantité de gaz constante contenue dans chaque chambre est un volume constant. Chaque unité 201, 301 comporte une enceinte 212, 312 en forme générale de cuve cylindrique étanche contenant le gaz de travail. Chaque enceinte 212, 312 est raccordée, par un passage 228, 328, à un alésage de travail respectif 227, 327 qui est fermé du côté opposé au passage 228, 328, par un piston de puissance 230, 330. Le passage 228, 328 communique avec la chambre 222, 322 par l'intermédiaire d'un évidement 221, 321 dans le déplaceur 220, 320. Les pistons 230, 330 sont reliés chacun par une bielle respective 229, 329 à un vilebrequin commun 429 qui est accouplé à l'arbre 420 par un engrenage 425. Le rapport d'engrenage est tel que l'arbre 420 commandant le mouvement des déplaceurs tourne deux fois moins vite que le vilebrequin 429 recueillant la force motrice de la machine. Ainsi, chaque piston de travail 230, 330 effectue un cycle complet (un aller retour) lorsque les déplaceurs effectuent un demi-tour et que par conséquent chaque machine élémentaire a elle-même effectué un cycle complet. En outre, l'engrenage 425 établit un calage angulaire approprié entre les déplaceurs 220, 320 d'une part et le vilebrequin 429 d'autre part. Les deux pistons 230, 330 sont déphasés d'un demi-cycle l'un par rapport à l'autre, comme le sont l'un par rapport à l'autre les déplaceurs 220 et 320. Le déphasage des pistons est obtenu en accouplant leurs deux bielles 229, 329 à un même maneton du vilebrequin 429, alors que les deux cylindres 227, 327 sont à 180° l'un de l'autre autour de l'axe du vilebrequin 429.

Chacun des déplaceurs 220, 320 comporte deux lobes 448 présentant chacun la forme générale d'un secteur de cylindre ayant pour axe l'axe de rotation 413. L'évidement 221, 321 est de préférence cylindrique d'axe 413.

- 20 -

Plus généralement, le nombre de lobes 448 dans chaque unité est égal au nombre de cycles thermodynamiques par tour de déplaceur. Les lobes 448 sont solidaires l'un de l'autre, et laissent subsister entre eux les chambres 222, 322 dans l'espace disponible à l'intérieur de l'enceinte. A chaque instant, les chambres 222, 322 occupent dans chaque enceinte des positions angulaires décalées autour de l'axe 413 d'un angle (180° dans l'exemple) qui est égal à l'angle à parcourir pour exécuter un cycle thermodynamique complet. De ce fait, toutes les chambres d'une même enceinte exécutent à chaque instant la même étape du cycle thermodynamique. La pression dans toutes les chambres d'une même enceinte est donc la même.

Cette particularité préférentielle de l'invention, selon laquelle toutes les chambres d'une même enceinte sont à chaque instant en équipression, permet selon un perfectionnement très avantageux de ne prévoir aucun dispositif d'étanchéité entre le déplaceur et les parois intérieures de l'enceinte. Par conséquent, les problèmes de frottement et de dilatation différentielle entre le déplaceur et les parois intérieures de l'enceinte sont fortement atténués ou éliminés. En outre, tout l'intérieur de la cuve constituant l'enceinte est à la pression des chambres 222 ou 322. Le déplaceur n'est donc pas réellement un piston, mais plutôt une sorte de corps mobile ayant pour fonction, à chaque instant, d'occuper l'espace où le gaz ne doit pas se trouver.

On va maintenant décrire en référence aux figures 12 et 14 la structure interne d'une unité, en prenant l'exemple de l'unité 201.

L'espace intérieur de chaque enceinte est subdivisé en un grand nombre de couloirs annulaires superposés 422 (figure 12) entourant l'axe de rotation 413 et ayant une forme aplatie parallèlement à un plan perpendiculaire à l'axe de rotation 413. Les couloirs 422 sont séparés les uns des autres par des ailettes 441 qui s'étendent radialement vers l'axe 413. La périphérie intérieure 442 des ailettes 441 présente un faible jeu avec un noyau central cylindrique 443 du déplaceur 220. Le noyau 443 ferme les couloirs du côté radialement intérieur. Chaque ailette 441 s'étend sur 360° autour de l'axe

- 21 -

413 et appartient à une plaque statorique 444 en forme de disque (voir aussi figure 13). Les plaques statoriques sont empilées les unes sur les autres dans l'enceinte. Chaque plaque 444 présente à sa périphérie un bossage annulaire 446 ayant une épaisseur bien déterminée correspondant à l'épaisseur voulue pour chaque couloir 422. Dans l'empilement des plaques, une face plane de chaque plaque s'appuie sur le bossage de l'une des plaques voisines. Les couloirs ont une section transversale rectangulaire qui est la même dans tous les plans axiaux.

Chacun des deux lobes 448 (figure 14) du déplaceur 220 est formé d'une série d'ailes planes 449 en forme de secteur de disque s'étendant dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation 413. Les ailes sont fixées sur le noyau central 443. Elles ont dans chaque plan axial une section dont la forme et les dimensions sont identiques, à un jeu de fonctionnement près, à celles de la section transversale précitée des couloirs. En outre, les ailes 449 ont entre elles une distance libre sensiblement égale, à un jeu de fonctionnement près, à l'épaisseur des ailettes 441. Le rayon du bord radialement extérieur 451 des ailes 449 est sensiblement égal, à un jeu de fonctionnement près, au rayon de la face radialement intérieure 447 (figure 13) des bossages 446. Chaque aile 449 d'un lobe 448 est coplanaire avec une aile 449 de l'autre lobe. Dans l'exemple représenté, chaque aile s'étend sur 135° autour de l'axe de rotation 413, et par conséquent chaque chambre élémentaire 222 s'étend sur 45° autour de l'axe 413.

À l'état assemblé, il y a une paire d'ailes 449 dans chaque couloir. Les deux ailes 449 d'une paire occupent tout l'espace disponible dans un couloir à l'exception des deux chambres élémentaires 222. Toutefois, les ailes 449 ne sont pas en contact étanche avec les surfaces du couloir.

Chaque chambre élémentaire 222 est délimitée entre deux plaques par un contour formé de la surface latérale du noyau 443, la surface latérale intérieure cylindrique 447 d'un bossage 446, et deux faces frontales 452 dirigées l'une vers l'autre de deux ailes coplanaires 449 du déplaceur 220.

- 22 -

Le noyau central cylindrique 443 comprend également un évidement 500 intérieur sous la forme d'un alésage cylindrique d'axe 413. L'évidement 500 communique avec chaque chambre élémentaire 222 au moyen d'une ouverture respective 502 pratiquée au travers le noyau central cylindrique 443. A une extrémité du déplaceur 220, l'évidement 500 communique également avec le passage 228, 328.

Les deux grandes faces de chaque ailette 441 ainsi que la face périphérique intérieure 447 de chaque bossage 446 constituent les surfaces d'échange thermique de la machine. Elles s'étendent parallèlement à la direction de déplacement circulaire des ailes 449 du déplaceur.

Pour cela, chaque ailette 441 est constituée de secteurs thermiquement conducteurs qui se succèdent suivant la direction circonférentielle avec une alternance régulière de secteurs caloporteurs froids 454b ou chauds 454h et de secteurs de régénération 456ic,fc,ir,fr que l'on détaillera plus loin. Pour chaque plage angulaire correspondant à un cycle thermodynamique, donc chaque plage angulaire de 180° dans l'exemple, il y a un secteur caloporteur froid 454b portant une surface d'échange caloporteuse froide 14b et un secteur caloporteur chaud 454h portant une surface d'échange caloporteuse chaude 14h. Les secteurs caloporteurs 454 sont prolongés radialement vers l'extérieur par une zone plus épaisse appartenant au bossage 446, traversée par une lumière 457 destinée au passage d'un fluide caloporteur froid ou chaud, respectivement.

L'observation simultanée des figures 12 et 13 montre que les plaques 444 sont empilées de façon que les secteurs de même nature soient superposés. Ainsi, par exemple, tous les secteurs caloporteurs froids sont exactement superposés, et tous les secteurs caloporteurs chauds sont exactement superposés. Les lumières 457 des secteurs caloporteurs chauds superposés forment ensemble un conduit parallèle à l'axe 413 pour un fluide caloporteur chaud, et les lumières 457 des secteurs caloporteurs froids superposés forment ensemble un conduit parallèle à l'axe 413 pour un fluide caloporteur froid. Des moyens d'étanchéité non représentés sont aménagés entre les

- 23 -

plaques 444, autour des lumières 457, pour canaliser les fluides caloporteurs de manière étanche dans les conduits constitués par les lumières 457 alignées. À leurs extrémités, les conduits précités sont raccordés de manière étanche avec des canalisations d'arrivée et de départ 458 (figure 12) à travers des orifices correspondants 459 traversant l'enceinte 212, 312.

Compte-tenu du mouvement continu, toujours dans le même sens, effectué par le rotor déplaceur dans ce mode de réalisation, ce ne sont plus les mêmes surfaces d'échange de régénération qui assurent alternativement la régénération de chauffage et la régénération de refroidissement. Au contraire il y a des surfaces de régénération de refroidissement 16r qui précèdent les surfaces caloporteuses froides 14b et des surfaces de régénération de chauffage 16c qui précèdent les surfaces caloporteuses chaudes 14h.

Pour rendre le processus de régénération plus efficace, chaque étape de régénération est subdivisée en deux phases successives, à savoir une phase de régénération initiale suivie d'une phase de régénération finale. Cette particularité se concrétise par la présence de deux secteurs de régénération successifs dans chaque zone de régénération. Plus particulièrement, chaque zone de régénération de chauffage comprend un secteur de régénération initiale de chauffage 456ic suivi d'un secteur de régénération finale de chauffage 456fc. De même, chaque zone de régénération de refroidissement comprend un secteur de régénération initiale de refroidissement 456ir suivi d'un secteur de régénération finale de refroidissement 456fr.

Chaque secteur de régénération initiale de chauffage 456ic, situé juste derrière un secteur caloporteur froid 454b, et chaque secteur de régénération finale de refroidissement 456fr, situé juste devant un secteur caloporteur froid 454b sont des secteurs de régénération froids ayant en service sensiblement une même température T_{gb} plus proche de celle des secteurs caloporteurs froids 454b que de celle des secteurs caloporteurs chauds 454h. On peut par exemple avoir $T_{gb} \approx T_b + (T_h - T_b) / 3$.

- 24 -

De façon similaire, chaque secteur de régénération initiale de refroidissement 456ir, situé juste derrière un secteur caloporteur chaud 454h, et chaque secteur de régénération finale de chauffage 456fc, situé juste devant un secteur caloporteur chaud 454h sont des secteurs de régénération chauds ayant en service sensiblement une même température T_{gh} plus proche de celle des secteurs caloporteurs chauds 454h que de celle des secteurs caloporteurs froids 454b. On peut par exemple avoir $T_{gh} \approx T_b + 2(T_h - T_b) / 3$.

Dans l'exemple représenté, chaque secteur caloporteur 454 s'étend sur 45° autour de l'axe de rotation 413. En outre, chaque secteur de régénération initiale 456ir ou 456ic, ou finale 456fr ou 456fc s'étend sur $22,5^\circ$ autour de l'axe de rotation 413. Ainsi, chaque zone de régénération composée d'un secteur de régénération initiale suivie d'un secteur de régénération finale s'étend sur 45° . Plus généralement, la plage angulaire correspondant à un cycle thermodynamique, c'est-à-dire 180° dans l'exemple, est divisée en quatre parts égales, respectivement affectées à la compression isotherme, au chauffage isochore par régénération, à la détente isotherme et au refroidissement isochore par régénération.

Suivant une particularité avantageuse de l'invention, les moyens de régénération fonctionnent par transfert de calories, plus particulièrement transfert par conduction, dans le sens circonférentiel entre des zones de régénération fournissant des calories (régénération précédant un secteur caloporteur froid) et des zones de régénération consommant des calories (régénération précédant un secteur caloporteur chaud).

Les secteurs de régénération froids 456ic, 456fr situés de part et d'autre d'un secteur caloporteur froid 454b sont reliés l'un à l'autre en un seul arceau thermiquement conducteur froid 460gb par un pont thermique froid 461gb qui s'étend radialement à l'extérieur du secteur caloporteur froid. Les secteurs de régénération chauds 456ir, 456fc situés de part et d'autre d'un secteur caloporteur chaud 454h sont reliés l'un à l'autre en un seul arceau thermiquement conducteur chaud 460gh par un pont thermique chaud 461gh

- 25 -

qui s'étend radialement à l'extérieur du secteur caloporteur chaud. Ainsi, chaque secteur caloporteur 454 (454h ou 454b) est chevauché extérieurement par un arceau 460 (460gh ou 460gb) comprenant une paire de secteurs de régénération reliés par un pont thermique. Chaque plaque 444 est composée, pour chaque plage angulaire correspondant à un cycle thermodynamique, de deux secteurs caloporteurs et de deux arceaux.

Les arceaux 460, et en particulier leur pont thermique 461 (461gh ou 461gb), servent de réserve thermique. Il est avantageux que cette réserve thermique soit relativement grande pour qu'en fonctionnement établi la température des secteurs de régénération soit relativement stable, c'est-à-dire que la variation cyclique de température soit faible à chaque passage d'une chambre en contact thermique avec un secteur de régénération. En même temps, lorsque les arceaux 460 ont une grande capacité thermique et une grande conductivité thermique, l'égalité souhaitée entre les températures des deux secteurs de régénération de l'arceau est mieux réalisée en fonctionnement.

Les secteurs caloporteurs 454 (454h ou 454b) doivent eux aussi avoir une bonne capacité thermique et une bonne conductivité thermique pour que les calories soient bien transférées entre leurs surfaces d'échange caloporteuses 14h ou 14b d'une part et les fluides caloporteurs d'autre part, avec un gradient de température aussi faible que possible entre les surfaces d'échange caloporteuses et les fluides caloporteurs.

Des isolations thermiques 415, symbolisées par des doubles traits à la figure 13, sont prévues à la séparation entre chaque élément caloporteur 454 et l'arceau 460 qui le chevauche, ainsi qu'entre arceaux adjacents.

Les modes de réalisation représentés aux figures 25 à 28 ne seront décrits que pour leurs différences par rapport à celui représenté figure 13.

Dans l'exemple représenté figure 28, chaque ailette est constituée d'une alternance de secteurs caloporteurs froids 554b ou chauds 554h entre

- 26 -

lesquels sont intercalés des secteurs de confinement thermique 556. Pour chaque plage angulaire correspondant à un cycle thermodynamique, donc chaque plage angulaire de 180° dans l'exemple, le mouvement du déplaceur engendre alors le passage du gaz successivement par un secteur caloporteur froid 554b, un secteur de confinement thermique 556, un secteur caloporteur chaud 554h, et un secteur de confinement thermique 556. Dans l'exemple représenté, les secteurs ont une plage angulaire sensiblement identique de 45° , les secteurs de confinement thermique sont reliés entre eux en chevauchant intérieurement chaque secteur caloporteur.

L'observation simultanée des figures 28, 26 et 27 montre que les secteurs caloporteurs 554b, 554h sont prolongés radialement vers l'extérieur par une zone plus épaisse appartenant au bossage 546, traversée dans un mode de réalisation préféré des lumières par 557e, 557s, respectivement d'entrée et de sortie pour un fluide caloporteur parcourant un réseau de canaux 558 intérieurs à chaque secteur caloporteur. La circulation du fluide caloporteur à l'intérieur des secteurs caloporteurs 554b, 554h présente l'avantage, comparativement à la circulation décrite en référence figure 13, de favoriser les échanges thermiques entre le fluide caloporteur et le gaz de travail. Dans ce mode de réalisation tous les secteurs caloporteurs froids ou respectivement chauds sont thermiquement en parallèle entre un conduit d'entrée constitué par l'empilement des lumières 557e et deux conduits de sortie formés par l'empilement des paires de lumières de sortie 557s. Plus généralement, il est décrit les éléments caloporteurs multiples montés thermiquement en parallèle entre au moins un conduit de fluide caloporteur entrant et au moins un conduit de fluide caloporteur sortant.

Selon le mode de réalisation particulièrement préféré de la figure 25, l'ailette 441 est constituée d'une alternance suivant la direction circonférentielle de secteurs caloporteurs froids 654b ou chauds 654h entre lesquels sont intercalés des secteurs de régénération 656c, 656r et des secteurs de confinement thermique 655. Pour chaque plage angulaire correspondant à un cycle thermodynamique, donc chaque plage angulaire de 180° dans l'exemple, le mouvement du déplaceur 220 fait passer successivement le gaz

- 27 -

de travail en contact avec un secteur caloporteur froid 654b, un secteur de régénération de chauffage 656c, un secteur de confinement thermique 655, un secteur caloporteur chaud 654h, un secteur de régénération de refroidissement 656r, et un secteur de confinement thermique 655. En outre dans l'exemple représenté, chaque secteur s'étend sur 30° autour de l'axe de rotation 413.

Chaque secteur de régénération de chauffage 656c est relié, avec un régénérateur de refroidissement 656r, par un arceau thermique 660 qui chevauche un secteur de confinement thermique 655 et un secteur caloporteur froid 654b consécutifs, ou de façon non représentée un secteur de confinement thermique 655 et un secteur caloporteur chaud 654h consécutifs. Il est encore possible, de façon également non représentée de relier tous les secteurs de régénération ensemble par des arceaux formant ensemble une couronne. A titre de variante par rapport au mode de réalisation de la figure 13, les arceaux de chevauchement sont situés à radialement à l'intérieur des secteurs chevauchés et non plus à l'extérieur.

Les secteurs caloporteurs 654b, 654h sont prolongés radialement vers l'extérieur par une zone plus épaisse appartenant au bossage 646, traversée par des lumières 557e, 557s respectivement d'entrée et de sortie pour un fluide caloporteur parcourant un réseau de canaux 558 intérieurs à chaque secteur caloporteur, sensiblement comme les secteurs 554b, 554h de la figure 28.

On va maintenant décrire, en référence aux figures 15 à 22, le fonctionnement de la machine des figures 11 à 14 en prenant l'exemple de l'unité supérieure 201, et plus particulièrement celui de deux chambres diamétralement opposées 222. Dans les explications qui vont suivre, on va fictivement considérer que chaque chambre 222 ne coopère qu'avec les surfaces d'échange et les moyens de transfert thermique d'une seule plaque, à des fins de clarté et de simplification. Il doit toutefois être bien clair qu'en réalité, dans ce mode de réalisation, chaque chambre est définie entre deux

- 28 -

plaques et coopère thermiquement avec des surfaces d'échange et des moyens de transfert thermique de ces deux plaques.

Dans la situation représentée à la figure 15, les deux chambres sont en contact thermique avec les secteurs d'échange caloporteurs chauds 454h tandis que le piston 230 est au milieu de sa course dans le sens de l'agrandissement de la chambre de travail 227. C'est l'étape de la détente isotherme E3.

Aux figures suivantes 16 à 22, le déplaceur rotatif a chaque fois tourné d'1/8 de cycle, donc 1/16 de tour, c'est-à-dire 22,5°, par rapport à la figure respectivement précédente.

A la figure 16, une moitié de l'étendue angulaire de chaque chambre 222 est encore en contact avec un secteur caloporteur chaud 454h. L'autre moitié de chaque chambre 222 est en contact thermique avec un secteur de régénération initiale de refroidissement 456ir. On se trouve à la transition entre l'étape de détente isotherme E3 et l'étape de refroidissement isochore E4. Le piston de puissance 230 approche de sa fin de course, appelée « point mort bas », pour laquelle le volume de la chambre de travail 227 est maximal. Le gaz contenu dans la chambre 222 cède des calories au secteur de régénération initiale de refroidissement 456ir. Comme indiqué par les flèches H, ces calories se propagent dans le pont thermique chaud 461gh puis dans les secteurs de régénération finale de chauffage 456fc qui attendent plus en arrière le passage de la chambre suivante. On voit que ce transfert de calories se fait en sens contraire de la rotation du rotor. En même temps, en cédant des calories, le gaz contenu dans la chambre 222 commence à se refroidir.

Dans la situation représentée à la figure 17, le piston de puissance 230 est à son point mort bas tandis que chaque chambre 222 est en contact thermique avec un secteur de régénération initiale de refroidissement 456ir et un secteur de régénération finale de refroidissement 456fr, qui émettent de la chaleur, respectivement, vers le secteur de régénération finale de chauffage

- 29 -

456fc situé en amont et le secteur de régénération initiale de chauffage 456ic situé en aval (voir les flèches H). Il s'agit de l'étape de refroidissement isochore E4.

A la figure 18, une moitié de l'étendue angulaire de chaque chambre 222 est entrée en contact avec un secteur caloporteur froid 454b. L'autre moitié de chaque chambre 222 est encore en contact thermique avec un secteur de régénération finale de refroidissement 456fr. On se trouve à la transition entre l'étape de refroidissement isochore E4 et l'étape de compression isotherme E1. Le piston de puissance 230 commence à quitter son point mort bas. Le gaz contenu dans la chambre 222 cède des calories au secteur de régénération finale de refroidissement 456fr. Comme indiqué par les flèches H, ces calories se propagent dans le pont thermique froid 461gb puis dans les secteurs de régénération initiale de chauffage 456ic situés en aval qui sont en attente du passage ultérieur d'une chambre. Ce transfert de calories se fait dans le sens de la rotation du rotor. En même temps, en cédant des calories, le gaz contenu dans la chambre 222 termine son refroidissement.

Dans la situation représentée à la figure 19, les deux chambres sont en contact thermique avec les secteurs d'échange caloporteurs froids 454b tandis que le piston de puissance 230 est au milieu de sa course dans le sens de la réduction du volume de la chambre de travail 227. C'est l'étape de la compression isotherme E1.

A la figure 20, une moitié de l'étendue angulaire de chaque chambre 222 est encore en contact avec un secteur caloporteur froid 454b. L'autre moitié de chaque chambre 222 est en contact thermique avec un secteur de régénération initiale de chauffage 456ic. On se trouve à la transition entre l'étape de compression isotherme E1 et l'étape de chauffage isochore E2. Le piston de puissance 230 approche de sa fin de course, appelée « point mort haut », pour laquelle le volume de la chambre de travail 227 est minimal. Le gaz contenu dans la chambre 222 absorbe des calories fournies par le secteur de régénération initiale de chauffage 456ic, en provenance du pont

- 30 -

thermique froid associé 461gb, lui-même antérieurement approvisionné en calories par le secteur de régénération finale de refroidissement 456fr au cours des étapes des figures 17 et 18.

Dans la situation représentée à la figure 21, le piston de puissance 230 est à son point mort haut tandis que chaque chambre 222 est en contact thermique avec un secteur de régénération initiale de chauffage 456ic et un secteur de régénération finale de chauffage 456fc, approvisionnés en chaleur, respectivement, par le secteur de régénération finale de refroidissement 456fr situé en amont et le secteur de régénération initiale de refroidissement 456ir situé en aval (voir les flèches H). Il s'agit de l'étape de chauffage isochore E2.

A la figure 22, une moitié de l'étendue angulaire de chaque chambre 222 est entrée en contact avec un secteur caloporteur chaud 454h. L'autre moitié de chaque chambre 222 est encore en contact thermique avec un secteur de régénération finale de chauffage 456fc. On se trouve à la transition entre l'étape de chauffage isochore E2 et l'étape de détente isotherme E3. Le piston de puissance 230 commence à quitter son point mort haut. Le gaz contenu dans la chambre 222 prend des calories au secteur de régénération finale de chauffage 456fc, lui-même approvisionné en calories par le pont thermique chaud 461gh, et à travers celui-ci par le secteur de régénération initiale de refroidissement situé en aval.

Ensuite, le cycle recommence avec une détente isotherme telle que décrite en référence à la figure 15.

Ainsi, en fonctionnement, les ponts thermiques opèrent un transfert thermique différé : l'un des deux secteurs de régénération reliés à chaque pont reçoit des calories de la part du gaz lorsque la chambre est en contact thermique avec ce secteur, puis le deuxième secteur de régénération recevant les calories à travers le pont, restitue celles-ci un peu plus tard, soit plus loin à la même chambre (cas d'un arceau froid), soit en arrière à la chambre suivante (cas d'un arceau chaud).

- 31 -

On a décrit le fonctionnement en se plaçant du point de vue du transfert des calories. On peut également raisonner en transfert de frigories, qui a toujours lieu en sens inverse de celui des calories. Dans ce cas, les frigories sont transférées à la même chambre dans le sens de la rotation du rotor à travers un pont thermique chaud, et en sens contraire de la rotation du rotor à travers un pont thermique froid.

Par ailleurs, la machine peut fonctionner en pompe à chaleur (destinée à chauffer le fluide caloporteur chaud) ou en machine frigorifique (destinée à refroidir le fluide caloporteur froid). Il suffit pour cela d'invertir les éléments caloporteurs froids et chauds de façon que la détente isotherme se fasse à basse température et la compression isotherme à haute température. On obtient le même résultat en n'invertissant pas les éléments caloporteurs froids et chauds, mais en décalant le vilebrequin 429 ou le rotor 220 d'un demi-cycle c'est-à-dire dans l'exemple en décalant le vilebrequin de 180° et en laissant le rotor 220 en position inchangée dans chacune des figures 15 à 22, ou encore en décalant le rotor de 90° et en laissant le vilebrequin en position inchangée dans chacune des figures 15 à 22.

On va maintenant décrire en référence conjointe à la figure 31 le fonctionnement de la machine des figures 25 à 27.

Lorsque les deux chambres sont en contact thermique avec les secteurs d'échange caloporteurs chauds 554h, le piston agit dans le sens d'un agrandissement de la chambre de travail. Le volume du gaz de travail augmente, c'est l'étape de la détente isotherme E7.

Lorsque les deux chambres sont en contact avec les secteurs de confinement thermique 556, le piston agit dans le sens d'un agrandissement rapide de la chambre de travail, le volume du gaz de travail augmente rapidement. C'est l'étape de détente adiabatique E8.

- 32 -

Lorsque les deux chambres sont en contact thermique avec les secteurs d'échange caloporteurs froids 554b, le piston agit dans le sens d'une diminution de la chambre de travail. Le volume du gaz de travail diminue, c'est l'étape de la compression isotherme E5.

Lorsque les deux chambres sont en contact avec les secteurs de confinement thermique 556, le piston agit dans le sens d'une diminution rapide de la chambre de travail, le volume du gaz de travail diminue rapidement. C'est l'étape de compression adiabatique E6.

En référence à la figure 31, le cycle thermodynamique décrit correspond à un cycle de Carnot. Le rendement théorique du cycle de Carnot est égal au rendement théorique du cycle Stirling décrit précédemment. Les transferts par conduction thermique étant peu efficaces lors de faibles gradients thermiques entre la source chaude et la source froide, le rendement réel du cycle de Carnot peut être supérieur au rendement réel du cycle de Stirling lorsque le gradient de température est faible. Par ailleurs le cycle thermodynamique de Carnot peut être parcouru plus rapidement que le cycle Stirling car les transferts thermiques du cycle de Stirling peuvent être longs. Au contraire pour les gradients thermiques importants, le cycle de Carnot impose d'importantes variations de volume difficiles à mettre en œuvre. Pour cette raison le cycle Stirling est particulièrement privilégié lors de forts gradients de température.

C'est pourquoi de manière particulièrement préférentielle, le moteur selon l'invention met en œuvre un cycle hybride Carnot-Stirling. On va maintenant décrire en référence conjointe aux figures 3é, 33 le fonctionnement de la machine de la figure 28.

Lorsque les deux chambres sont en contact thermique avec les secteurs d'échange caloporteurs chauds 654h, le piston agit dans le sens d'un agrandissement de la chambre de travail. Le volume du gaz de travail augmente, c'est l'étape de la détente isotherme E12.

- 33 -

Lorsque les deux chambres sont en contact thermique avec les secteurs de régénération de refroidissement 656r, le piston de puissance 230 est sensiblement immobile donc le volume de la chambre de travail est sensiblement constant. Le gaz contenu dans la chambre 222 cède des calories au secteur de régénération de refroidissement 656r. Le gaz de travail descend alors jusqu'à une température T_2 supérieure à la température T_1 du secteur d'échange caloporteur froid 654b. C'est l'étape de refroidissement isochore E13.

Lorsque les deux chambres sont en contact avec les secteurs de confinement thermique 655 alors que le piston agit dans le sens d'un agrandissement rapide de la chambre de travail, le volume du gaz de travail augmente rapidement. La température du gaz de travail diminue jusqu'à la valeur T_1 alors que le piston atteint son point mort bas. C'est l'étape de détente adiabatique E14.

Lorsque les deux chambres sont en contact thermique avec les secteurs d'échange caloporteurs froids 654b, le piston agit dans le sens d'une diminution du volume de la chambre de travail. Le volume du gaz de travail diminue, c'est l'étape de la compression isotherme E9.

Lorsque les deux chambres sont en contact thermique avec les secteurs de régénération de chauffage 656c, le piston de puissance 230 est sensiblement immobile donc le volume de la chambre de travail est sensiblement constant. Le gaz contenu dans la chambre 222 prend des calories au secteur de régénération de refroidissement 656r. Le gaz de travail remonte alors à une température T_3 inférieure à la température T_4 du secteur d'échange caloporteur chaud 654h. C'est l'étape de chauffage isochore E10.

Lorsque les deux chambres sont en contact avec les secteurs de confinement thermique 655 alors que le piston agit dans le sens d'une diminution rapide du volume de la chambre de travail, le volume du gaz de travail diminue rapidement. La température du gaz de travail augmente jusqu'à la valeur T_4

- 34 -

alors que le piston atteint son point mort haut. C'est l'étape de compression adiabatique E11.

Le mode de réalisation représenté à la figure 23 ne sera décrit que pour ses différences par rapport à celui de la figure 11. On a intercalé entre le vilebrequin de puissance 429 et le pignon menant 471 de l'engrenage 425 couplant l'arbre 420 du déplaceur avec le vilebrequin 429, un engrenage 472 dont les roues dentées sont non circulaires. Dans l'exemple représenté les roues dentées sont ovales pour, dans un cycle Stirling, augmenter la vitesse de rotation du vilebrequin 429 lorsque les pistons 230 et 330 sont au voisinage du milieu de leur course, et pour diminuer la vitesse de rotation du vilebrequin 429 lorsque les pistons 230, 330 sont au voisinage de leurs points morts haut et bas. Le vilebrequin 429 entraîne l'arbre de sortie de puissance 470 de la machine par l'intermédiaire de l'engrenage 472. Ainsi, le moment d'inertie de la charge régularise la rotation du déplaceur et impose une rotation irrégulière, telle que décrite ci-dessus, au vilebrequin 429. Cette rotation irrégulière a pour effet de minimiser les variations du volume de gaz pendant les étapes de chauffage et de refroidissement, pour les rendre plus semblables aux étapes idéales isochores du cycle. Par conséquent, l'essentiel des variations de volume se produit pendant la compression et la détente. De manière analogue, les roues dentées peuvent être sensiblement elliptiques pour un cycle Carnot mais décalées angulairement de manière adaptée aux variations de vitesse décrites précédemment. De manière non représentée, le pignon peut avoir une forme plus compliquée, par adaptation du rapport des diamètres des roues dentées pour obtenir à chaque instant la vitesse de piston correspondant à l'étape thermodynamique de la machine, notamment pour le cycle Carnot-Stirling.

D'autres mécanismes connus permettent d'obtenir un effet similaire. Par exemple, on peut prévoir un vilebrequin comportant deux manetons décalés angulairement de par exemple 30°. Le mécanisme comprend encore pour chaque piston deux bielles articulées chacune, par l'une de ses extrémités à l'un respectif des manetons, et par son autre extrémité à une extrémité respective d'un palonnier dont l'axe central est articulé au piston.

- 35 -

On a représenté à la figure 24 la mise en œuvre d'une machine selon les figures 11 à 23 et 25 à 28 fonctionnant en moteur utilisant comme source chaude le refroidisseur 473 d'une turbine à vapeur 474. L'arbre moteur 476 de la turbine entraîne une machine de production d'électricité 477. Dans cette installation, la vapeur refroidie dans le refroidisseur 473 est comprimée par un compresseur 478, chauffée dans une chaudière 479, typiquement chauffée par la chaleur de la combustion d'un combustible. La vapeur est ensuite envoyée à l'entrée haute pression 481 de la turbine 474. La vapeur se détend dans la turbine 474 puis s'échappe par la sortie basse pression 483 pour être envoyée au circuit vapeur 484 du refroidisseur 473. Le circuit vapeur 484 est en relation d'échange de chaleur avec un circuit caloporteur 486 contenant un fluide dont la nature et la pression sont appropriées, compte tenu notamment de la température de la vapeur à la sortie basse pression 483 de la turbine. Le fluide caloporteur est maintenu en circulation par une pompe 487. À la sortie du refroidisseur 473, le fluide est envoyé à travers les secteurs caloporteurs chauds 454h des unités 201 et 301 de la machine des figures 11 à 23. En référence à la figure 12, le fluide caloporteur passe par les lumières 457, les orifices 459 et canalisations 458. Après avoir traversé les secteurs caloporteurs chauds, le fluide caloporteur retourne à l'entrée froide du refroidisseur 473.

De manière non représentée, l'installation comprend encore un circuit caloporteur froid, traversant les secteurs caloporteurs froids des unités 201 et 301, et raccordé à une source froide comme par exemple un évaporateur ou un cours d'eau. De manière également non représentée, l'arbre de puissance 429 de la machine selon l'invention peut être couplé à l'arbre moteur 476 de la turbine 474, pour ajouter sa puissance à celle de la turbine, ou encore être couplé à une autre machine de production d'électricité, ou encore à une autre charge utile.

Une machine selon l'invention est réalisable dans de très nombreuses versions, en fonction de sa puissance et de la température des sources notamment.

- 36 -

La machine donnée comme exemple aux figures 11 à 23 et 25 à 28 est envisagée pour des réalisations de grande taille, les unités 201 et 301 ayant par exemple un diamètre de quelques mètres, et une longueur axiale de quelques mètres également. Les ailettes 441 peuvent avoir une épaisseur de quelques millimètres, comprise par exemple entre 5 et 10 mm, de même que les chambres 422 et les ailes 449 du rotor déplaceur 220. Les secteurs caloporteurs et les arceaux des plaques statoriques peuvent être métalliques. Si la température de la source chaude est suffisamment modérée, le rotor déplaceur peut être réalisé en matière synthétique. On peut également envisager un noyau métallique 443 sur lequel seraient fixées des ailes synthétiques 449. Le volume balayé par le piston de travail par rapport au volume total de gaz balayé par la machine est fonction des températures.

Alors que les machines de type Stirling connues ne fournissent en général que des rendements bien plus faibles que le rendement théorique du cycle Stirling, et uniquement lorsque ces machines connues tournent à très faible vitesse et avec une relativement grande différence de température entre la source chaude et la source froide, il a été trouvé que la machine selon l'invention, en particulier avec une architecture du genre de celle représentée aux figures 11 à 24, était capable de fournir un rendement proche du rendement de son cycle théorique, même avec une vitesse de rotation relativement élevée et une relativement faible différence de température, par exemple inférieure à 100°C, entre la source chaude et la source froide.

Il a de plus été trouvé selon l'invention une architecture capable de fournir un rendement proche du rendement du cycle théorique de Carnot, architecture particulièrement adaptée aux faibles différences de température entre la source chaude et la source froide.

Il a également été trouvé selon l'invention une architecture permettant la combinaison des cycles thermodynamiques de Carnot et Stirling capable, par un rendement élevé et une vitesse de rotation élevée, de fournir une puissance accrue relativement au volume de la chambre de travail. Dans ce cycle, la gamme des températures pendant le refroidissement isochore est

- 37 -

en moyenne plus élevée que la gamme des températures pendant le réchauffage isochore. Il y a ainsi entre les deux un gradient qui accélère la conduction ou autre forme d'échange entre les surfaces de régénération. Ceci permet une vitesse de fonctionnement plus rapide. On a donc d'une manière générale conçu un cycle à régénération dans lequel le chauffage isochore s'effectue à une température en moyenne plus basse que le refroidissement isochore.

Bien entendu, l'invention n'est pas limitée aux exemples décrits et représentés. Dans un mode de réalisation à déplaceur rotatif, tel que celui de la figure 11, on pourrait réaliser une machine avec une seule enceinte ou avec plus de deux enceintes, et avec un seul cycle par tour et par enceinte ou plus de deux cycles par tour et par enceinte.

On pourrait également concevoir une machine dotée de plusieurs pistons, dont la cylindrée peut être différente, les uns générant les variations de volume correspondant aux phases adiabatiques, et les autres générant les variations de volume correspondant aux phases isothermes. Certaines variations de volumes, notamment rapides, pourraient être générées conjointement par l'ensemble des pistons.

On peut également concevoir une machine dotée de plaques 444 empilées de façon que des secteurs de nature différente soient superposés, les plaques pouvant être différentes entre elles, de façon par exemple à homogénéiser les temps de transformation thermodynamique et réduire les variations de vitesse du piston.

On pourrait concevoir une machine fonctionnant selon le principe général de la réalisation des figures 3 à 9, c'est-à-dire avec masse de gaz constante dans chaque chambre, mais dans lequel le déplaceur rotatif pourrait aussi assurer des variations de volume.

REVENDICATIONS

1. Machine thermodynamique comprenant :

- une enceinte (12, 212, 312) contenant un gaz de travail et possédant des surfaces d'échange thermique (14h, 14b, 16 ; 16c, 16r) à son intérieur ;
- des moyens de déplacement (19, 21 ; 120 ; 220, 320) mobiles dans l'enceinte pour déplacer le gaz de travail dans l'enceinte et mettre successivement le gaz de travail en contact et hors de contact avec chacune des surfaces d'échange thermique pour réaliser des étapes successives (E1, E2, E3, E4) d'un cycle thermodynamique ; et
- un organe de puissance mécanique (19, 21 ; 130 ; 230, 330) soumis à la pression du gaz de travail ;

caractérisée en ce que les moyens de déplacement font passer successivement devant les différentes surfaces d'échange thermique une chambre (22 ; 222, 322) contenant une quantité de gaz de travail essentiellement constante dont au moins la majeure partie est globalement stationnaire par rapport aux moyens de déplacement (19, 21 ; 120 ; 220, 320).

2. Machine selon la revendication 1, caractérisée en ce que la quantité de gaz de travail essentiellement constante est un volume essentiellement constant.

3. Machine selon la revendication 1 ou 2, caractérisée en ce que la chambre est délimitée par deux faces (52 ; 152 ; 452) dirigées sensiblement l'une vers l'autre, solidaires des moyens de déplacement (19, 21 ; 120 ; 220, 320).

4. Machine selon l'une des revendications 1 à 3, caractérisée en ce que les moyens de déplacement comprennent un rotor (220, 320, 420) mobile en rotation autour d'un axe (413).

5. Machine selon la revendication 4, caractérisée en ce que les surfaces d'échange thermique (14h, 14b ; 16c, 16r) occupent des zones angulaires respectives dans l'enceinte essentiellement cylindrique (212, 312).

6. Machine selon la revendication 4 ou 5, caractérisée en ce que le rotor comprend au moins un lobe (448) en forme générale de cylindre partiel tournant autour de l'axe (413).

7. Machine selon l'une des revendications 1 à 6, caractérisée en ce qu'elle comprend des moyens de confinement thermique (556, 655) capables de restreindre les échanges de chaleur, et en ce que les moyens de déplacement mettent le gaz de travail en contact avec les moyens de confinement thermique pendant un mouvement de l'organe de puissance, de façon que le cycle thermodynamique comprenne au moins une phase de variation adiabatique (E6, E8, E11, E14) du volume du gaz de travail.

8. Machine selon l'une des revendications 1 à 7, caractérisée en ce qu'il y a à l'intérieur de l'enceinte (12, 212, 312) au moins une surface de confinement thermique (556, 655) intercalée entre les surfaces d'échange (546, 656c, 656h).

9. Machine selon la revendication 7 ou 8, caractérisée en ce qu'un cycle thermodynamique comprend le passage du gaz en contact avec les surfaces suivantes :

- une surface caloporteuse froide (554b) pendant que le volume du gaz de travail diminue,
- une surface de confinement thermique (556) pendant que le volume du gaz de travail diminue,
- une surface caloporteuse chaude (554h) pendant que le volume du gaz de travail augmente,
- une surface de confinement thermique (556) pendant que le volume du gaz de travail augmente.

10. Machine selon la revendication 9, caractérisée en ce que la variation du volume est plus rapide pendant que le gaz de travail est en contact avec les surfaces de confinement que pendant que le gaz est en contact avec les surfaces d'échange caloporteuses.

11. Machine selon l'une des revendications 1 à 6, caractérisée en ce qu'elle comprend des moyens de régénération du gaz de travail, qui collectent de la chaleur pendant une phase de refroidissement du gaz de travail et chauffent le gaz de travail pendant une phase de chauffage avec la chaleur collectée pendant la phase de refroidissement, et/ou qui collectent du froid pendant une phase de chauffage du gaz de travail et refroidissent le gaz de travail pendant une phase de refroidissement avec le froid collecté pendant la phase de chauffage, et en ce que les moyens de déplacement balayent les moyens de régénération de façon à en chasser le gaz de travail pendant au moins une phase de travail parmi des phases de compression et de détente faisant partie du cycle thermodynamique.

12. Machine selon l'une des revendications 1 à 6 ou 11, caractérisée en ce que les surfaces d'échange comprennent le long du trajet de la chambre, des surfaces d'échange caloporteuses chaude (14h) et froide (14b), et entre celles-ci au moins une surface d'échange de régénération (16 ; 16c, 16r).

13. Machine selon la revendication 11 ou 12 caractérisée en ce qu'elle comprend une surface de confinement thermique (655) intercalée entre une surface de régénération (656c, 656r) située en amont, relativement au sens de déplacement du gaz de travail, et une surface d'échange caloporteuse (654b, 654h) située en aval.

14. Machine selon la revendication 13, caractérisée en ce que quand le gaz de travail est en contact avec une surface de confinement, on provoque par variation sensiblement adiabatique du gaz de travail une variation de température dans le même sens que celle subie par le gaz de travail au contact de la surface de régénération située en amont.

15. Machine selon la revendication 14, caractérisée en ce que la variation sensiblement adiabatique du volume est plus rapide qu'une variation sensiblement isotherme réalisée pendant que le gaz de travail est en contact avec la surface d'échange caloporteuse.

- 41 -

16. Machine selon l'une des revendications 13 à 15, caractérisée en ce qu'un cycle thermodynamique comprend le passage du gaz en contact avec les surfaces suivantes :

- une surface caloporteuse froide (654b) pendant que le volume du gaz diminue,
- une surface régénératrice de chauffage (656c) pendant que le volume du gaz de travail est sensiblement constant,
- une surface de confinement thermique (655) pendant que le volume du gaz de travail diminue,
- une surface caloporteuse chaude (654h) pendant que le volume du gaz augmente,
- une surface régénératrice de refroidissement (656r) pendant que le volume du gaz de travail est sensiblement constant,
- une surface de confinement thermique (655) pendant que le volume du gaz de travail augmente.

17. Machine selon la revendication 12, caractérisée par des moyens de transfert thermique (461) entre deux surfaces d'échange de régénération situées: l'une (16r) à la transition entre surface d'échange caloporteuse chaude (14h) et surface d'échange caloporteuse froide (14b), l'autre (16c) à la transition entre surface d'échange caloporteuse froide (14b) et surface d'échange caloporteuse chaude (14h), relativement au sens de mouvement de la chambre (222).

18. Machine selon la revendication 12, caractérisée en ce que

- l'enceinte porte entre surfaces d'échange caloporteuses successives une surface d'échange de régénération initiale suivie, relativement au sens de déplacement de la chambre, d'une surface d'échange de régénération finale,
- des surfaces d'échange de régénération précitées, initiale (456ir) et respectivement finale (456fc), situées en sortie et respectivement en entrée de surface d'échange caloporteuse chaude (14h), sont liées thermiquement entre elles, et

- 42 -

- des surfaces d'échange de régénération précitées, initiale (456ic) et respectivement finale (456fr), situées en sortie et respectivement en entrée de surface d'échange caloporteuse froide (14b), sont liées thermiquement entre elles.

19. Machine selon la revendication 18, caractérisée en ce que les surfaces d'échange de régénération qui sont liées thermiquement entre elles forment des paires assemblées par pont thermique (461) chevauchant extérieurement et/ou intérieurement une surface d'échange caloporteuse précitée associée à la paire.

20. Machine selon la revendication 19, caractérisée par une isolation thermique (415) entre le pont thermique (461) et la surface d'échange caloporteuse associée.

21. Machine selon l'une des revendications 17 à 20, caractérisée en ce que les moyens de transfert thermique opèrent par conduction thermique.

22. Machine selon l'une des revendications 11 à 21, caractérisée en ce que les moyens de régénération comprennent une réserve thermique qui se charge pendant une phase de refroidissement du gaz et se décharge pendant une phase de réchauffement du gaz.

23. Machine selon l'une des revendications 1 à 22, caractérisée en ce que les surfaces d'échange qui se succèdent le long du trajet de la chambre sont séparées par isolation thermique (15, 415).

24. Machine selon l'une des revendications 1 à 23, caractérisée en ce que la chambre (222) a une forme plate, en ce que les surfaces d'échange thermique successivement en contact avec le gaz de travail forment deux grandes faces opposées de la chambre plate, et les moyens de déplacement délimitent la chambre par au moins une face frontale étroite (452).

- 43 -

25. Machine selon l'une des revendications 1 à 24, caractérisée en ce que les surfaces d'échange appartiennent à des ailettes (441) ayant des faces parallèles à la direction de mouvement des moyens de déplacement par rapport à l'enceinte (212, 312).

26. Machine selon la revendication 25, caractérisée en ce que les moyens de déplacement comprennent des ailes (449) passant entre les ailettes (441).

27. Machine selon la revendication 25 ou 26, caractérisée en ce que les surfaces d'échange sont portées par un empilement de plaques (444) définissant chacune une ailette (441) et s'appuyant les unes sur les autres par des bossages (446), et en ce que les ailettes (441) forment entre elles pour les moyens de déplacement des couloirs (422) dont l'épaisseur est définie par les bossages (446).

28. Machine selon l'une des revendications 1 à 27, caractérisée par une absence de moyens d'étanchéité entre les moyens de déplacement et les surfaces d'échange, l'intérieur de l'enceinte (212, 312) étant sensiblement en équipression à chaque instant.

29. Machine selon l'une des revendications 1 à 28, caractérisée en ce que l'enceinte (212, 312) communique avec une chambre de travail (127 ; 227, 327) dans laquelle se trouve l'organe de puissance mécanique (130 ; 230, 330).

30. Machine selon l'une des revendications 1 à 29, caractérisée en ce que les moyens de déplacement remplissent sensiblement le volume libre à l'intérieur de l'enceinte (212, 312) à l'exception de l'au moins une chambre (222).

31. Machine selon l'une des revendications 1 à 30, caractérisée en ce que cette machine est un moteur, en ce que les surfaces d'échange thermique comprennent au moins une surface d'échange caloporteuse chaude

- 44 -

alimentée en énergie calorifique à partir d'une source chaude (473) tandis que l'organe de puissance mécanique fournit un travail mécanique utile.

32. Machine selon la revendication 23, caractérisée en ce que l'énergie calorifique alimentant la source chaude (473) est de l'énergie résiduelle fournie par une autre machine thermique (474) motrice, en particulier utilisant un combustible.

33. Machine selon l'une des revendications 1 à 32, caractérisée en ce que cette machine est une machine frigorifique ou une pompe à chaleur dans laquelle les surfaces d'échange thermique comprennent une surface d'échange caloporteuse chaude et une surface d'échange caloporteuse froide, et en ce que l'organe de puissance mécanique absorbe de l'énergie mécanique pour que le gaz de travail comprimé fournisse de la chaleur à la surface d'échange caloporteuse chaude et que le gaz détendu soit réchauffé par la surface d'échange caloporteuse froide.

34. Procédé de transformation d'énergie entre la forme thermique et la forme mécanique, dans lequel au cours d'un cycle thermodynamique on prélève de l'énergie thermique à un gaz de travail lors d'un refroidissement isochore et on fournit cette énergie thermique au gaz de travail lors d'un chauffage isochore, caractérisé en ce que le refroidissement isochore et/ou le chauffage isochore est adjacent d'un côté à une variation sensiblement adiabatique du volume du gaz de travail et de l'autre à une variation sensiblement isotherme du volume du gaz de travail.

1 / 7

FIG. 1

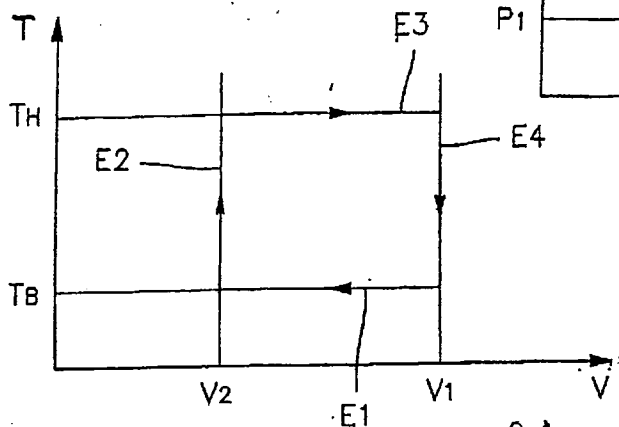


FIG. 2

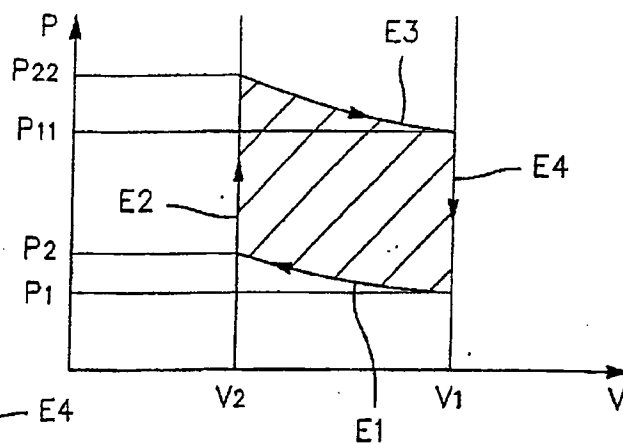


FIG. 31

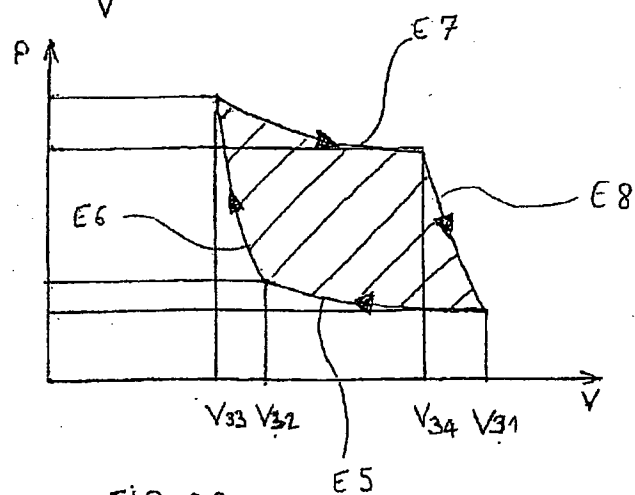


FIG. 32

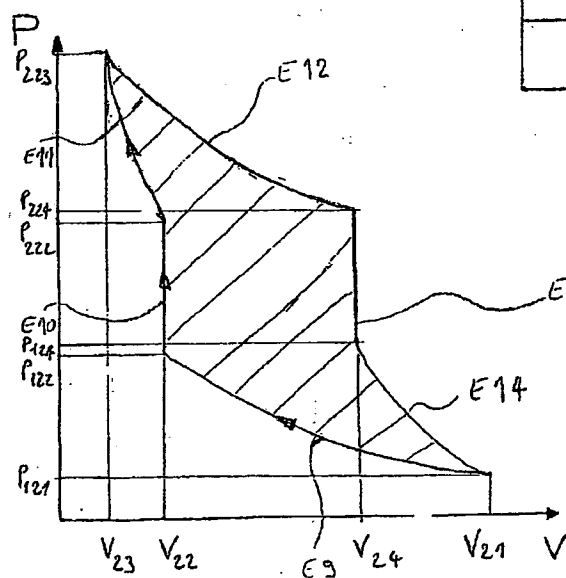
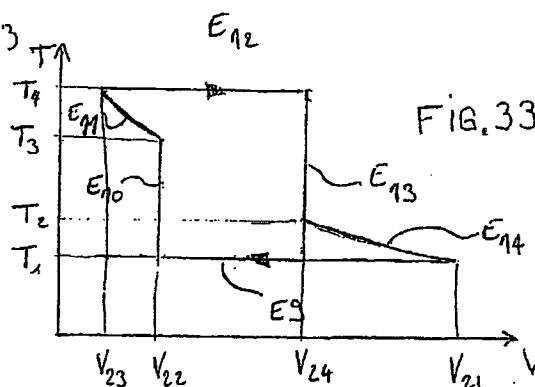


FIG. 33



217

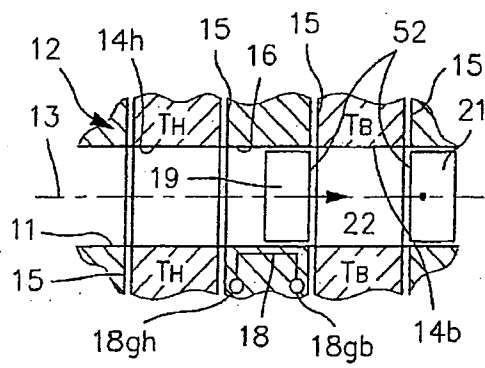


FIG. 3

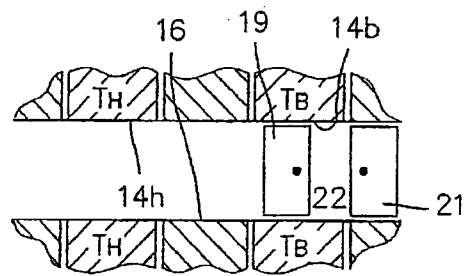


FIG. 4

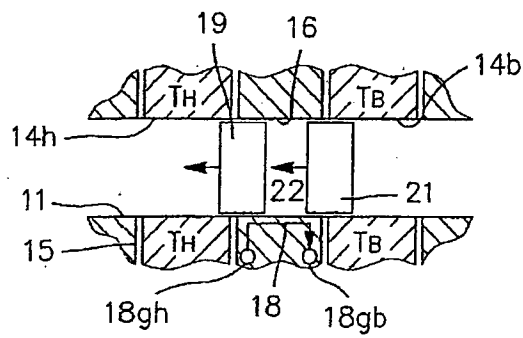


FIG. 5

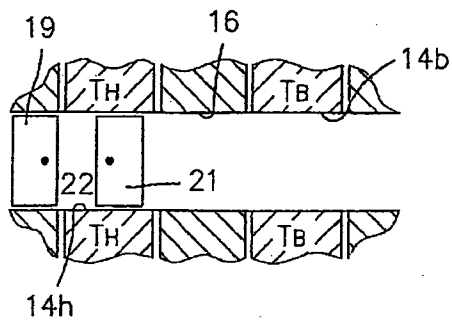


FIG. 6

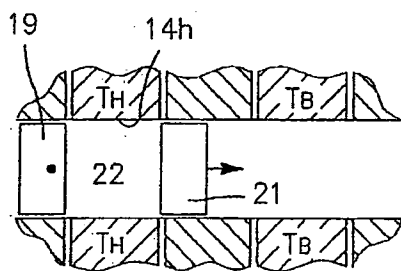


FIG. 7

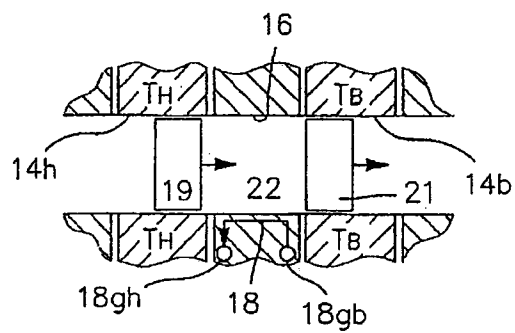


FIG. 8

3 / 7

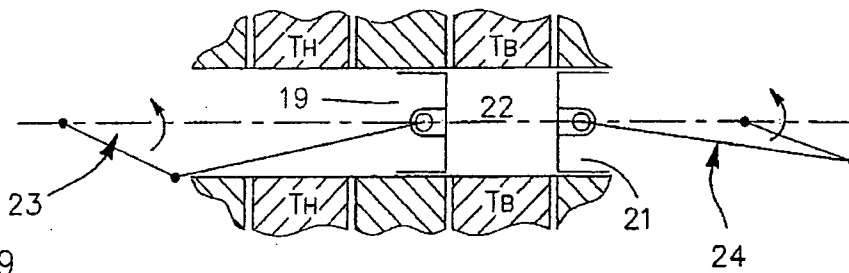


FIG. 9

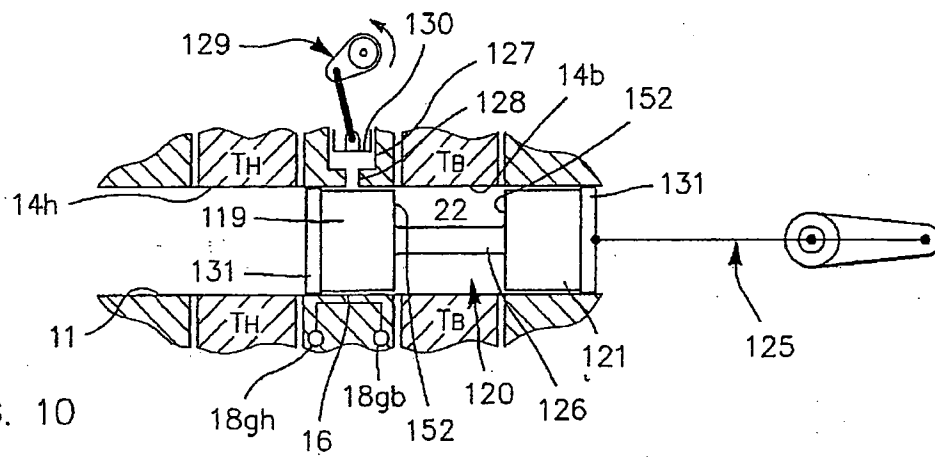


FIG. 10

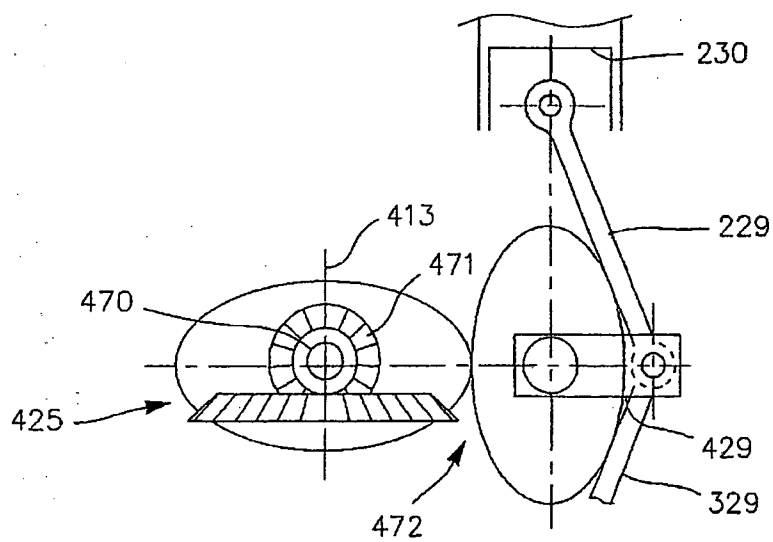


FIG. 23

4/7

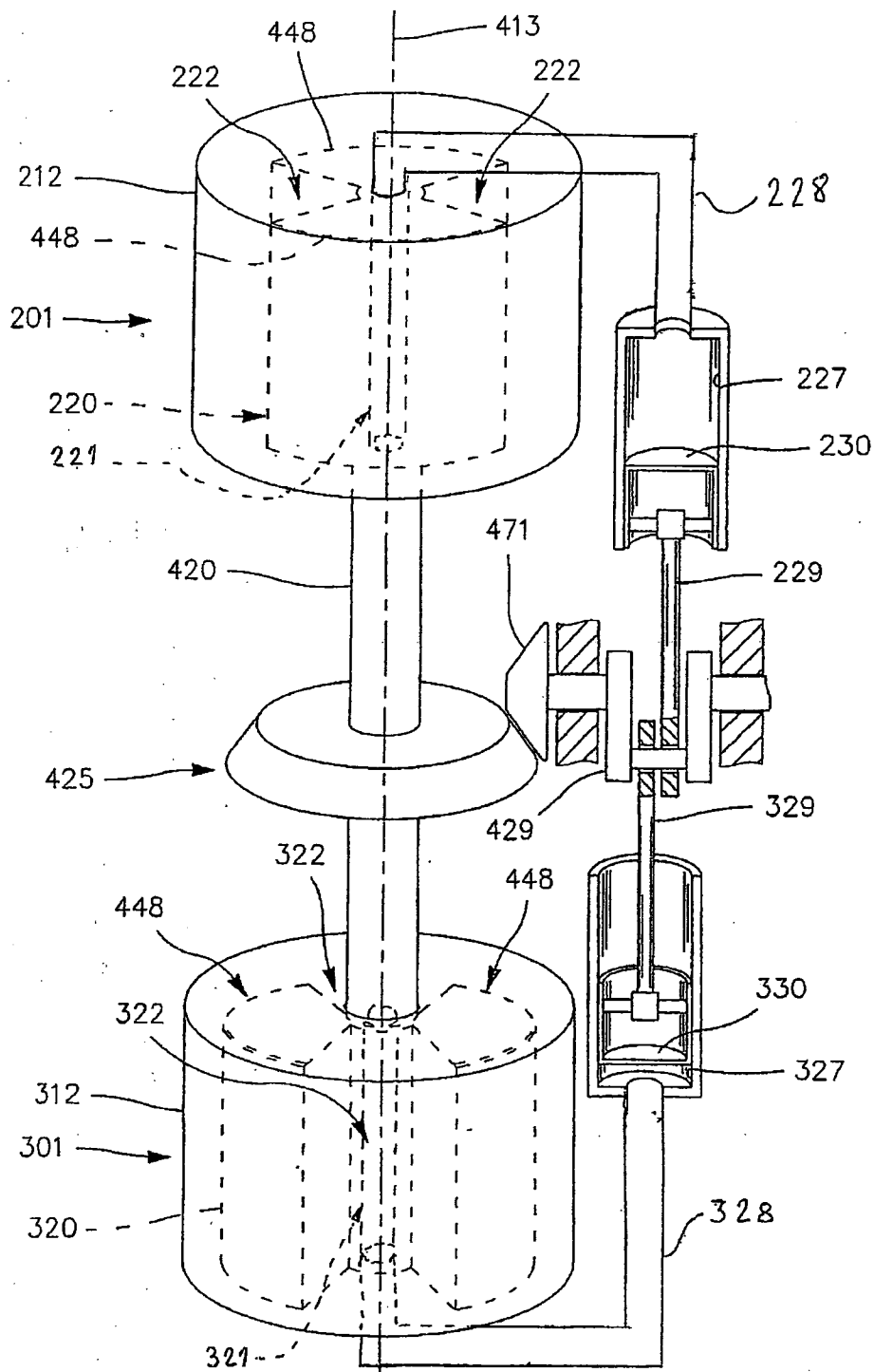


FIG. 11

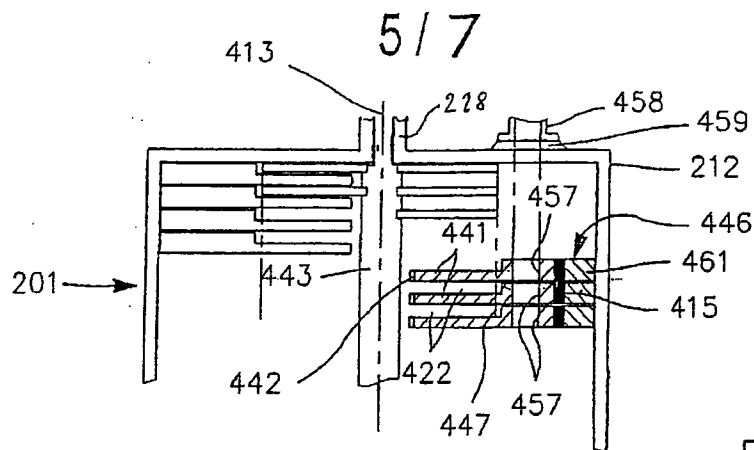


FIG. 12

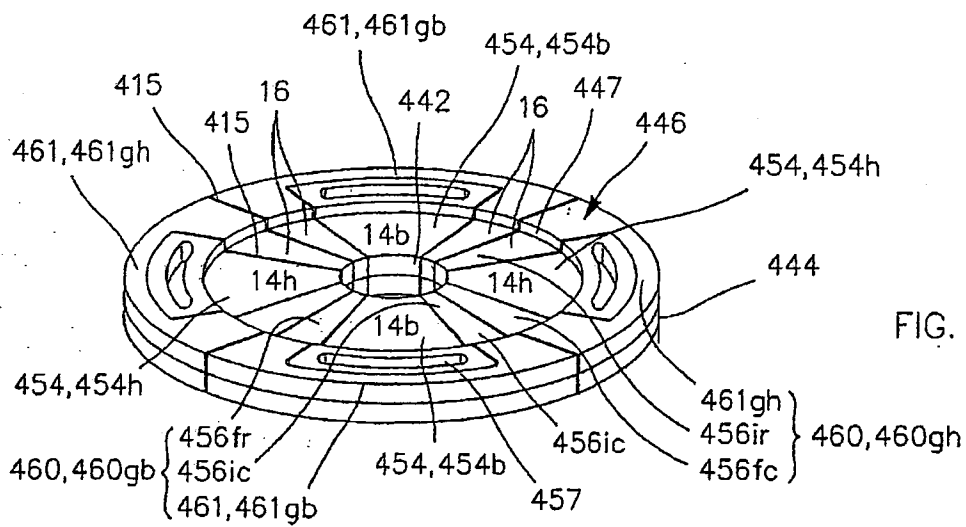


FIG. 13

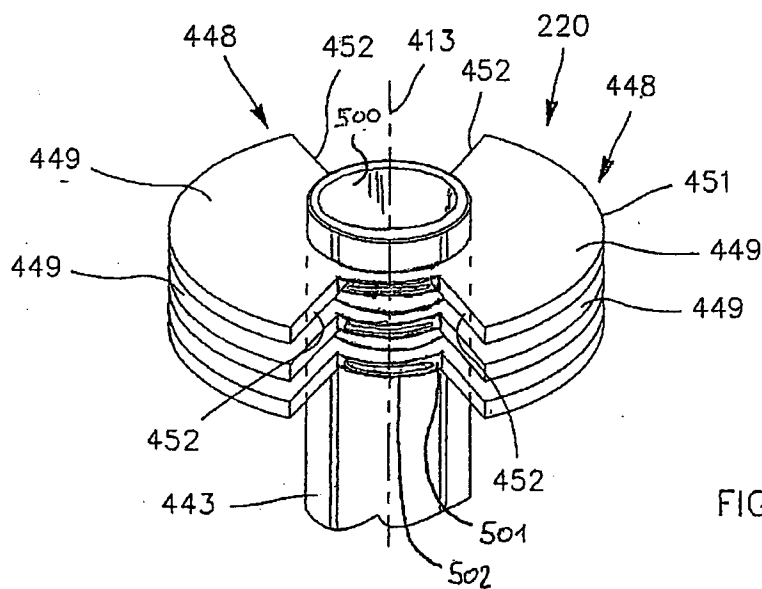


FIG. 14

6/7

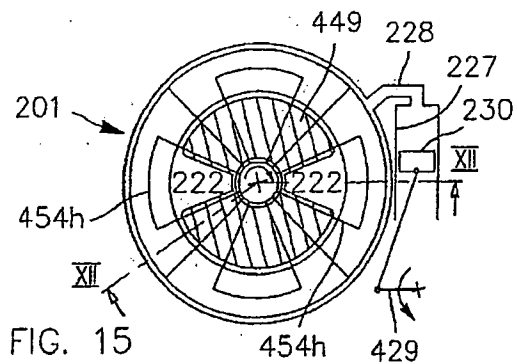


FIG. 15

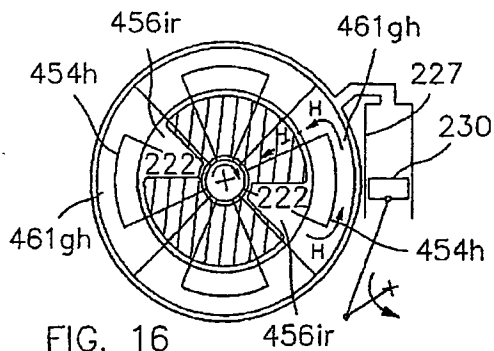


FIG. 16

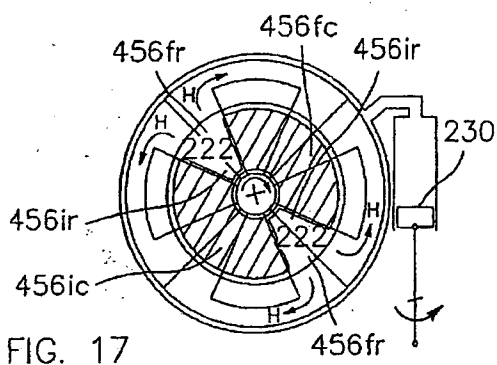


FIG. 17

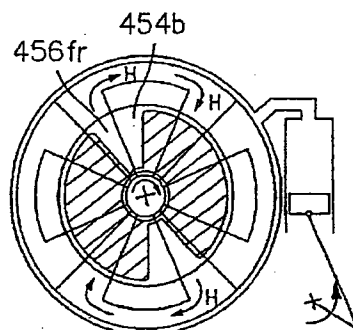


FIG. 18

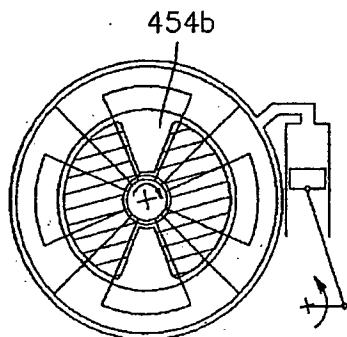


FIG. 19

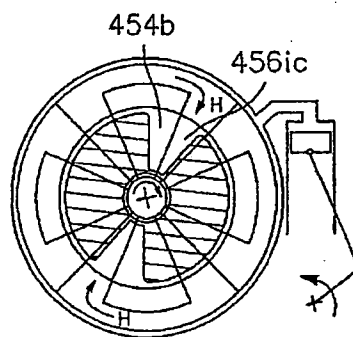


FIG. 20

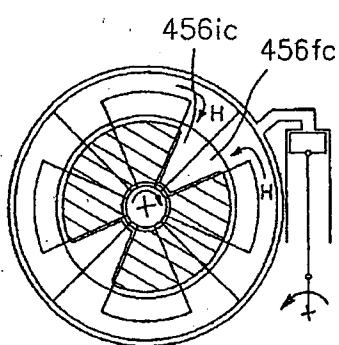


FIG. 21

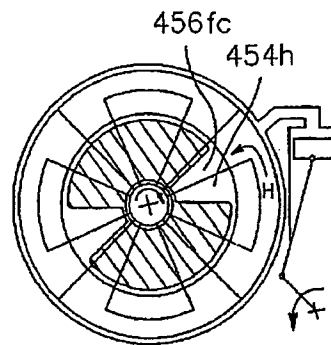


FIG. 22

7/7

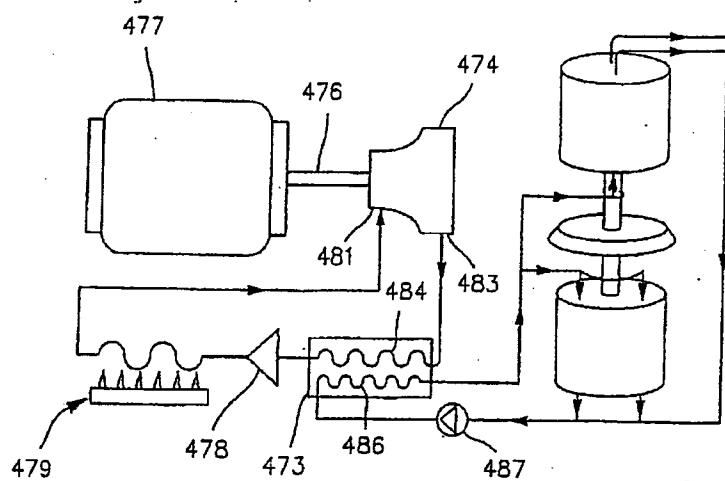


FIG. 24

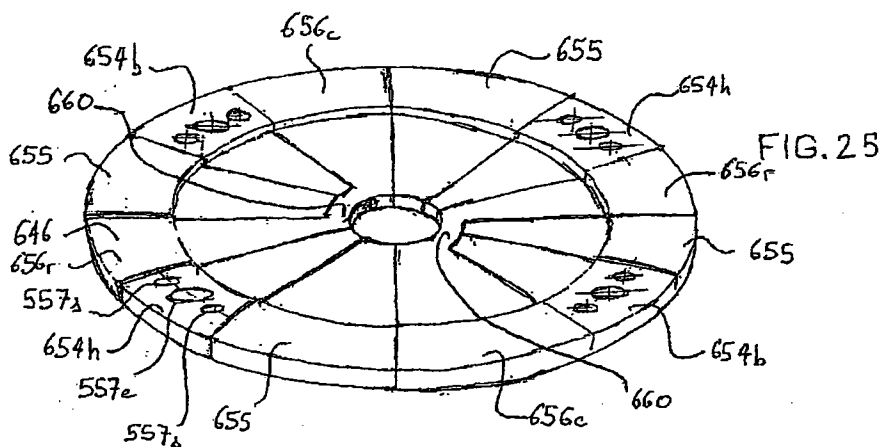


FIG. 25

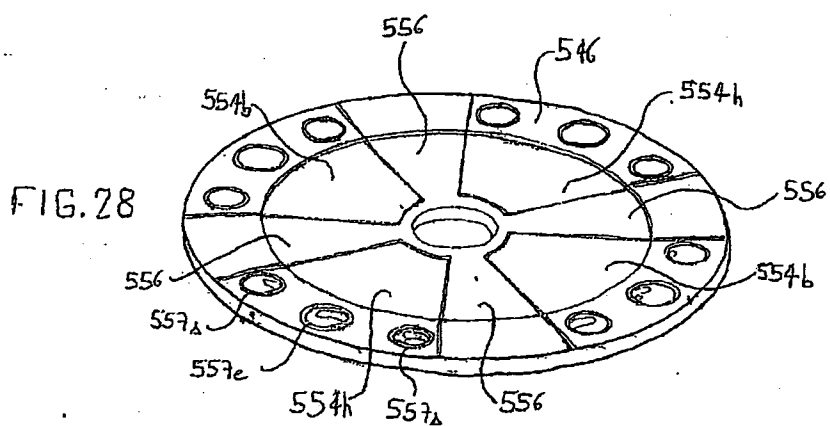


FIG. 28

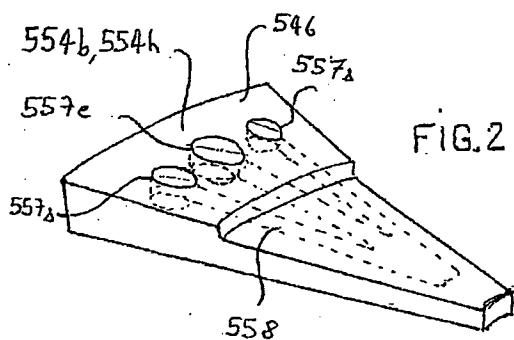


FIG. 26

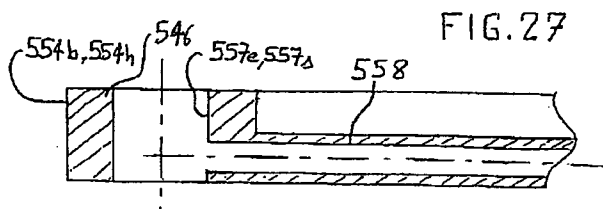


FIG. 27