

# **Les moteurs Stirling:**

## **Une véritable alternative aux méthodes classiques de conversion de l'énergie des Biogaz,** par JP Vernet président d'EOSgen-technologies.

### **1-Introduction:**

Les biogaz sont la véritable alternative aux combustibles fossiles. En France, les ressources en la matière sont très importantes. Une étude, faite en 1996 avec Ernst et Young, montre que le gisement français des biogaz issus des fermentations entériques et des décharges suffirait à pourvoir totalement le pays en méthane, remplaçant par la même les importations. Nous pouvons aussi prendre en compte les gaz issus de la carbonisation du bois, ce qui améliore le bilan.

Cependant, le monopole de GDF sur ce marché, bien que reculant, reste un obstacle à sa distribution dans le réseau. Plusieurs motifs sont évoqués, comme la qualité du gaz, les gisements sont trop éloignés des réseaux de distribution...etc

La même étude préconisait de convertir les Biogaz en électricité sur les lieux de production de déchets . Les conclusions amenaient à construire des unités de conversion d'une taille de 50 à 250 kW et de les associer en parallèle en fonction des gisements.

Par ailleurs, les techniques ont évolué depuis 1995 surtout avec l'éclosion de l'engouement pour les énergies renouvelables et la fin du monopole d'EDF.

Il semble évident que la production de biogaz est aussi une voie pour diminuer la détérioration de la couche d'ozone par le méthane produit d'une part par les fermentations entériques, l'agriculture intensive et d'autre part par la densification des populations et de l'habitat. Ils diminuent très sensiblement la production de dioxyde de carbone des combustibles fossiles.

Il faut noter que les biogaz se transportent très bien.

Nous aborderons ci- après la conversion énergétique du biogaz par machines thermiques.

### **2-Les moyens classiques de conversion énergétique du méthane:**

#### **2-1 Le réformage:**

Deux alcanes gazeux principaux peuvent être produits par fermentation: le méthane et l'éthane.

Le méthane peut être diversement converti en d'autre hydrocarbures par les procédés catalytique à la vapeur. Les résultats en sont principalement le dihydrogène, le méthanol.

De même, l'éthane peut être converti chimiquement en éthylène, éthanol,...

Si nous évoquons rapidement ces procédés, c'est pour donner un aperçu des techniques utilisables conjointement à d'autres.

#### **2-2 Les machines thermiques:**

Suivant les énoncés de Clausius: Une quantité de chaleur ne peut jamais être transférée spontanément d'une source froide(BT) vers une source chaude (HT)

et de Kelvin: Il est impossible de prélever une quantité de chaleur  $Q$  d'une source d'énergie et de la transformer intégralement en travail,

Les machines thermiques nécessitent donc 2 niveaux de températures avec la certitude de ne pas pouvoir transformer la totalité de la chaleur donnée en énergie mécanique.

Le cycle de Carnot définit le cycle de la machine idéale. Il est composé de 2 isothermes (1 compression et une détente qui se font à  $T^\circ$  constante) et de 2 adiabatiques (une détente et une compression sans échange de chaleur).

A partir de cela, on va adapter plusieurs cycles en fonction des machines étudiées, parce que les inventeurs de ces machines, pour la plupart au XIX<sup>ème</sup> siècle n'avait pas l'idée de ce qu'était un cycle thermique.

Nous ne parlons ici que des cycles moteurs, pas des cycles frigorifiques ou à calorifiques.

Il existe donc les cycles Diesel et Beau de Rochas (à carburant et pistons), Clausius-Ranquine et Ranquine-Hirn (cycle à vapeur ou à gaz à pistons ou turbines), Joule et Stirling (à gaz chaud).

Les deux premiers sont à combustion interne et à carburants et les autres à combustion externe avec, soit de la vapeur, soit avec un gaz chaud. Les cycles de type Rankine sont soit ouverts soit fermés. Ceci veut dire que le gaz chaud (ou vapeur) est soit lâché dans la nature (locomotives à vapeur) soit recyclé (turbine de centrale).

Pour se référer à l'imaginaire collectif, le fardier de Cugnot fonctionnait avec un cycle de Rankine, les locomotives à vapeur fonctionnant avec un cycle de Rankine-Hirn (à vapeur surchauffée).

Les cycles à combustion interne (Diesel et Beau de Rochas) fonctionnent uniquement avec des moteurs à pistons (linéaires ou rotatifs). Il peuvent avoir 2 ou 4 temps.

Du cycle de Carnot, on va donner le rendement de Carnot.

Ce rendement est égal à  $1 - T_f/T_c$  où  $T_f$  est la température de la source froide et  $T_c$  la température de la source chaude. Ceci montre qu'il est parfois inutile de monter très haut en température, il suffit de baisser la température de la source froide.

### 2-2-1 Combustion:

Théoriquement, la combustion d'un alcane avec de l'air ne produit que du  $CO_2$  et de l'eau, a condition que l'alcane soit pur et que l'air soit pur.

Comme chacun sait, cela n'existe pas parce que cela requiert des conditions très précises peu réalisables en dehors d'un laboratoire.

L'air est fait d'azote, d'oxygène, de  $CO_2$ , d'eau, ..., de poussières, de sel, d'iode ...

L'alcane est souvent accompagné de soufre, mais dans le cas de biogaz, il est accompagné d'eau, de composés soufrés, de composés phosphorés, de composés chlorés, nitrés....

Même après traitement, il reste des traces fluctuantes suivant les paramètres de process de production et surtout d'épuration des biogaz.

Il faut prendre en compte ces traces pour étudier le meilleur moyen de convertir en énergie la combustion des biogaz. Les éléments mécaniques et les matériaux en contact avec les gaz chauds doivent pouvoir résister à la corrosion à basse, moyenne et haute température.

### 2-2-2 Les cycles classiques à combustion interne:

Ce sont des cycles exclusivement pour moteur à pistons alternatifs ou rotatifs.

Le cycle à 4 temps fonctionne comme suivant:

Admission, compression, auto-inflammation, détente, échappement. Le cycle complet est effectué en 2 tours.

Le cycle à 2 temps fonctionne comme suivant:

Admission-compression, détente-échappement. Il n'a pas de soupapes.

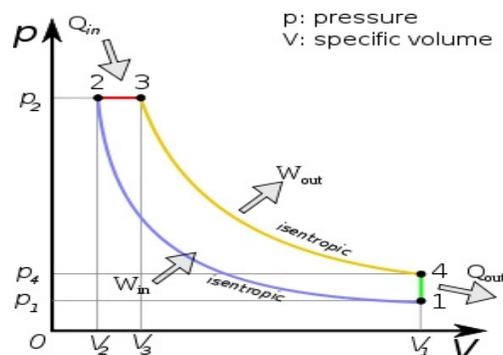
L'admission et l'échappement se font au travers de lumières qui sont placées dans la chemise, en bas de cylindre. Le cycle complet est effectué en 1 tour.

#### 2-2-2-1 Cycle diesel:

C'est le moteur le plus vendu dans le monde parce qu'il permet de fonctionner avec des combustibles à point éclair élevé comme les huiles ou les fiouls lourds.

La chaleur générée par la compression permet l'auto-inflammation du combustible. Ce n'est donc pas un moteur à explosion.

Le combustible est injecté dans la chambre de combustion sous forme liquide et, sous la forme de gouttelettes, est inflammé par la chaleur et brûle en surface de la gouttelette.



Aujourd'hui, presque tous les moteurs sont équipés d'un compresseur, d'un turbocompresseur seul, ou des deux ensembles qui permettent de diminuer le taux de compression donc d'augmenter très sensiblement le rendement du moteur.

Les moteurs les plus puissants sont à 2 temps, mais il tendent à disparaître au profit des 4 temps qui

polluent moins.

Il existe quelques rares moteurs Diesel fonctionnant au gaz. Ils fonctionnent surtout avec des gaz liquides qui sont mieux injectables.

Le problème rémanent du moteur Diesel est sa production des imbrûlés sous la forme de poussières et des oxydes d'azote (NOx) du fait de la température de combustion.

Il est atténué avec les filtres à particules et les pots d'échappements à catalyseur qui ne fonctionnent bien que si le combustible n'est pas trop chargé en soufre.

### **2-2-2-2 Cycle Beau de Rochas:**

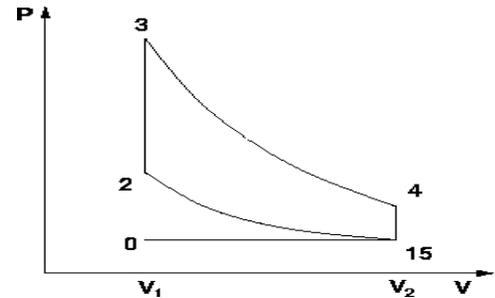
C'est le cycle à allumage commandé.

Il est utilisé pour les moteur à essence ou à gaz.

Les configurations physiques sont les mêmes que pour les moteurs diesels sauf que le carburant est toujours vaporisé en arrivant dans la chambre de combustion. De ce fait, lors de l'allumage, la combustion est instantanée ce qui est la caractéristique d'une explosion. Ils fonctionnent avec des combustibles à point d'auto-inflammation bas donc avec tous les gaz combustibles (H2 compris), alcools...

Pour des questions d'imbrûlés, dans les moteurs modernes, l'allumage est maintenu pendant une grande partie de la détente. La plupart des moteurs "Beau de Rochas" sont équipés d'injection (pour les combustibles liquides) et d'allumage électronique.

Les moteurs suivant ce cycle sont plus légers que les moteurs diesel parce qu'ils ont moins de contraintes mécaniques internes.



### **Conclusion pour les moteurs à pistons (Diesel et Beau de Rochas):**

Ce sont les moteurs les plus diffusés sur la planète. Ils sont bons à tout.

Leur inconvénients majeurs sont:

Il faut obligatoirement un refroidissement des constituants du moteur compte tenu que la chaleur est produite à l'intérieur du moteur. Le volume étant limité cette chaleur est confinée et doit être évacuée. Cela représente 15 points de rendement du moteur.

Plus le moteur tourne lentement, meilleur est son rendement. Ceci induit de longues courses pour les pistons, mais aussi moins de refroidissement à apporter.

L'étanchéité entre le piston et la chemise (réalisée par les segments) oblige le graissage des parties en contact (chemise, pistons, segments). L'huile est soumise aux très hautes températures et est maintenue dans la chambre de combustion où elle brûle. Un moteur consomme 0,002 à 0,005 litre d'huile par litre de carburant. Dans cette huile brûlée il y a tous les métaux lourds (cadmium, chrome, plomb, ...) usés par les frottements qui partent donc à l'échappement, plus les métaux usés sur les parties hautes des cylindres (soupapes, sièges de soupape,...).

La tenue des pistons est directement liée à la qualité de la combustion et aux "propretés" des combustibles et des comburants.

Enfin la tenue globale d'un moteur à combustion interne est directement proportionnelle à la propreté de l'huile et sa teneur en silice (qualité de la filtration d'air et des respirations des reniflards), eau (reprise d'humidité de l'huile) et charbon (surchauffe de l'huile).

Les moteurs à combustion interne ne fonctionnent pas à l'hydrogène sauf aménagements spéciaux de la chambre de combustion.

N'oublions pas que la maintenance d'un moteur à combustion interne c'est:

- Une vidange toutes les 1000 à 1500 heures
- Un réglage de culbuteurs toutes les 4000 heures
- Un réglage de carburation toutes les 1000 à 1500 heures
- Un changement de bougies (moteurs à gaz) toutes les 1000 heures

### **2-2-2-3 Le cycle de la turbine à gaz (turbine industrielle équivalant au turbopropulseur d'avion):**

C'est le cycle de Joule Brayton.

L'air passe dans le turbo-compresseur où il est élevé à une pression variable suivant l'usage et la puissance mais qui peut dépasser 20 Mpa. Dans la chambre de combustion il brûle le carburant, puis il est détendu dans la turbine pour être éjecté à la pression atmosphérique et à une vitesse la plus basse possible.

Les températures de fonctionnement sont plus basses que dans un moteur à combustion interne à pistons, mais les débits de gaz chauds sont plus élevés, les températures des gaz en sortie sont aussi plus chaudes.

Comme il s'agit d'un débit continu, les gaz peuvent facilement servir à un deuxième cycle (qui est à vapeur). Cela s'appelle un cycle combiné. Les rendements de tels cycles sont excellents, ils peuvent dépasser 60%, mais ils ne sont possibles que pour de fortes puissances (supérieures à 50 MW).

Il n'y a pas, sur le marché, de petite turbine à gaz industrialisée d'une puissance inférieure à 500 kW.

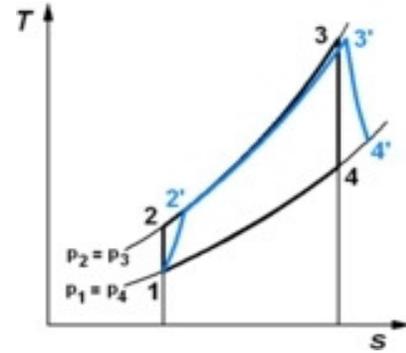
Les coûts sont élevés (20 fois ceux d'un moteur diesel de puissance équivalente).

Il ne faut pas oublier que, pour être brûlé dans la chambre de combustion, le gaz doit être recomprimé à une pression au moins égale à celle qui y régnait. Ceci induit donc une perte de plusieurs points de rendement.

Pour contourner ce problème, j'ai travaillé avec Mr Boudigues (ancien directeur scientifique de l'ONERA) sur les turbines à gaz à cycle inversé.

C'est la chambre de combustion qui est en tête de process. Elle travaille un peu en dessous de la pression ambiante. La turbine détend les gaz de combustion très en dessous de la pression atmosphérique. Après refroidissement à la source froide, le compresseur re-comprime les gaz brûlés pour les amener à la pression atmosphérique.

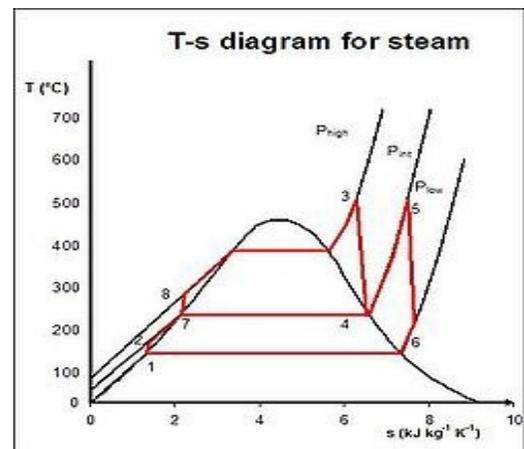
Ce type de turbine a un bon rendement. Aujourd'hui elles sont étudiées pour les fours solaires.



#### **2-2-2-4 Les cycles de Rankine et Rankine Hirn.**

Avec ce type de cycle, tous les combustibles peuvent être brûlés dans une chaudière. Malheureusement, ces cycles, appelés aussi cycles à condensation, sont peu automatisables en totalité et la puissance unitaire minimum est d'environ 100 kW. Les installations sont complexes, nécessitent une grande compétence, et craignent le gel pour les cycles à vapeur d'eau.

Ce sont les cycles des machines à vapeur dit à re-surchauffe. Aujourd'hui, il est utilisé pour toutes les turbines à vapeur des centrales thermiques. Il fonctionne avec de la vapeur d'eau, mais aussi avec d'autres gaz comme l'ammoniac, quelques fluides frigorigènes comme les CFC, ... Le cycle permet de travailler à de hautes températures et, pour les centrales thermiques non nucléaires, il a un très bon rendement qui peut atteindre de 42 à 47% en fonction de la température ambiante. En cycle combiné avec une turbine à gaz, c'est la meilleure machine thermique qui puisse exister. Les meilleurs rendements enregistrés sont supérieurs à 60% avec les conditions d'ambiance appropriées: haute pression atmosphérique et basse température.



Il existe, à l'état de prototypes, des turbines à gaz chaud à combustion externe pour les applications solaires.

### 2-2-2-5 Le cycle de Stirling:

En 1816, le pasteur Stirling eu l'idée d'une machine qui puisse fonctionner partout, sans vapeur, avec tous types de combustibles (bois ou charbon, ou tourbe).

Il inventa ainsi le moteur à air chaud.

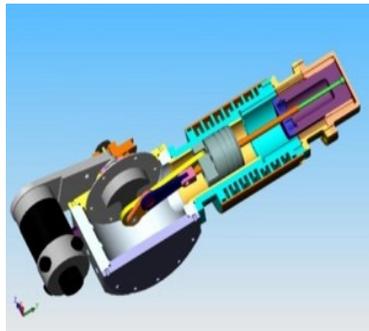
C'est en effet l'air chaud emprisonné dans le moteur qui tient lieu de fluide moteur. La combustion est externe.

Ces moteurs, de petite puissance, furent fabriqués en série jusque dans les années vingt date à laquelle ils furent remplacés par les moteurs à pétrole.

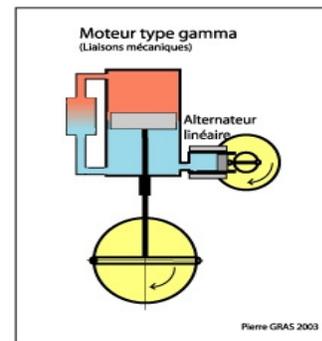
Aujourd'hui les applications du moteur Stirling sont principalement dans les domaines du militaire (sous-marins, cryo-refroidissement), de l'aérospatial (générateur d'électricité à plutonium) et de la co-génération domestique au gaz.

Il y a 3 géométries possibles qui donnent 3 types de moteurs:

Le moteur Bêta (Sthélio)



Le moteur Gamma.



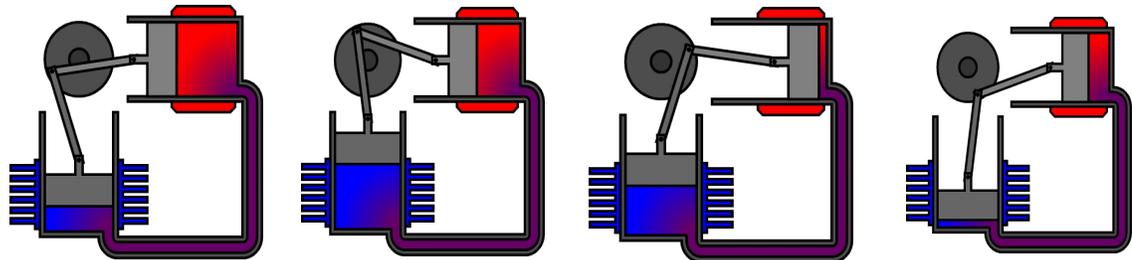
### **Les 4 temps du cycle pour un moteur alpha (moteurstirling.com)**

1er temps du cycle

2ème temps

3ème temps

4ème temps



C'est un moteur d'une grande simplicité mécanique: pas de soupape, pas d'arbre à came, pas d'allumage ou d'injection.

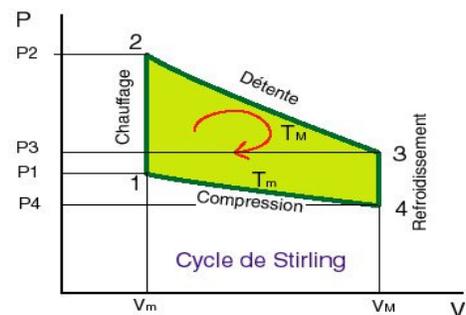
Son cycle est d'apparence simple. Il fut décrit au XIXème siècle. A cette époque le deuxième principe de la thermodynamique n'existait pas.

Il se trouve que le cycle est beaucoup plus complexe. En effet, comme dit ci-dessus, la géométrie a beaucoup d'importance.

De plus, les échanges de températures au niveau de la source chaude et surtout de la source froide jouent un rôle crucial.

Enfin, il peut y avoir des "fuites" thermiques entre la source chaude et la source froide.

Cycle théorique (moteur stirling.com)

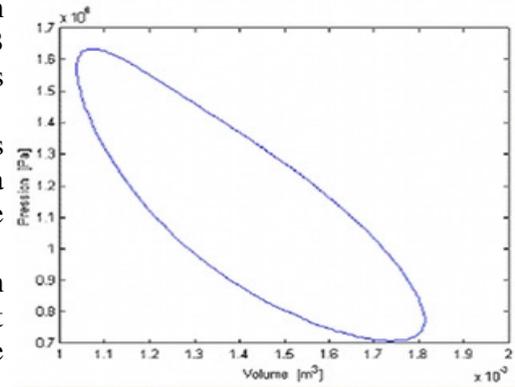


### 2-2-2-5-A Pourquoi tant de différence entre le cycle théorique et le cycle mesuré?

En observant les diagrammes des volumes en fonction des positions on voit que les PMH et PMB des pistons déplaceur et moteur ne correspondent pas aux points indiqués de départ du cycle.

Le cycle réel met en évidence que le point où les volumes est le plus faible n'est pas le point où la pression est la plus faible. Ceci vient de la sur-détente due au refroidissement.

Au point où le volume est le plus haut la pression n'est pas la plus forte du fait que le chauffage étant continu la pression continue de monter bien que le volume augmente.



Cycle de moteur alpha mesuré (P. Stouffs, LATEP)

Ceci explique le très bon rendement du moteur. Avec la sur-détente les pistons sont aspirés. Avec la sur-compression due à l'apport continu de chaleur, la pression maxi est supérieure à celle fournie par la compression simple du gaz. En quelque sorte, le moteur Stirling est propre turbo-compresseur.

Ces 2 phénomènes sont dus au différentiel de vitesse entre le piston et la vitesse de l'échange de chaleur, l'échange de chaleur va plus vite que la vitesse du piston.

Pour que le cycle fonctionne bien, il faut un gaz moteur (entre les pistons moteurs et déplaceurs) qui soit très bon conducteur thermique. C'est le cas de l'hydrogène (le meilleur), de l'hélium, de l'azote (le moins bon).

La puissance est alors directement proportionnelle à la pression de "gonflage".

#### **2-2-2-5-B Quels sont les atouts du moteur Stirling?**

C'est un moteur à combustion externe, donc il n'y a aucune possibilité que les gaz brûlés entre en contact avec les parties mécaniques mouvantes et l'huile de lubrification.

De ce fait, il est très fiable et silencieux et ne fait pas plus de bruit qu'un groupe frigorifique. La durée de vie peut dépasser 350 000 heures (Voyager 1 et 2 lancés en 1977 et fonctionnel jusqu'en 2020). Dans ce cas ce sont des Stirling dont la source de chaleur (100°K) est le plutonium. Ils ont un rendement excellent parce que fonctionnant avec une température de source froide de quelques degrés kelvin.

Son rendement peut atteindre facilement 45% (rendement énergie produite/énergie consommée) voire plus (jusqu'à 85%) si on le combine avec une production de chaleur et, ou, de froid (tri-génération).

Avec des composants en céramiques, on peut monter jusqu'à plus de 1500°C en continu.

Compte tenu de son mode de fonctionnement "enfermé" il ne nécessite que peu d'entretien, voire pas du tout.

Chaque géométrie de moteur peut avoir une application différente: le moteur alpha est plus particulièrement adapté au application très haute température, le moteur bêta aux températures plus modérées et le moteur gamma aux basses températures.

Dans le cas des biogaz, ce seront les moteurs alpha ou bêta qui seront préconisés.

Dernier point, le moteur Stirling est réversible et peut fonctionner en pompe à chaleur. Dans cette configuration ils sont utilisés en cryogénie basse température ( $10\text{ °K} < T < 20\text{ °K}$ : Thalès).

#### **2-2-2-5-C Quels sont les inconvénients du moteur Stirling?**

Il n'y a pas, sur le marché, de moteur Stirling spécialement dédié aux biogaz. Il y en a qui fonctionnent au di-hydrogène (Kockum), au gaz naturel (de Dietrich,...) ou avec des fumées de chaudière à bois (Sunmachine,...), mais aucun qui soit conçu pour recevoir des gaz brûlés acides ou corrosifs. C'est ce sur quoi nous travaillons aujourd'hui.

Quoiqu'il en soit, les tailles de moteurs Stirling sont limitées à cause des pressions internes du gaz moteur. N'oublions pas que plus la pression initiale est élevée, meilleur est le rendement, mais il faut plus de matière pour la contenir.

Pour des moteurs Stirling de conception classique, la vitesse de rotation est difficile à réguler.

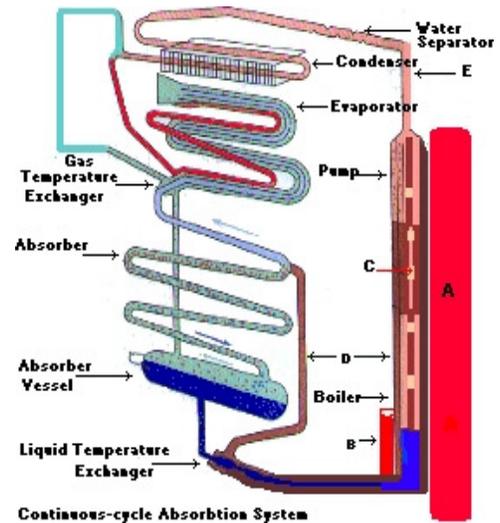
### 2-2-2-5-D Orbem, notre moteur Stirling :

Il est issu d'un moteur pour la production d'énergie solaire à concentration. C'est une architecture alpha. Il peut fonctionner jusqu'à une température de 2000°C. Sa source froide est à -40°C.

Cette température est assurée par une double boucle à absorption avec pompe de circulation. Le désorbeur prélève l'énergie sur les fumées à 120°C. Le COP du système est de 1,1. L'énergie produite au niveau des absorbeurs est récupérable pour une boucle de trigénération. (cf schéma ).

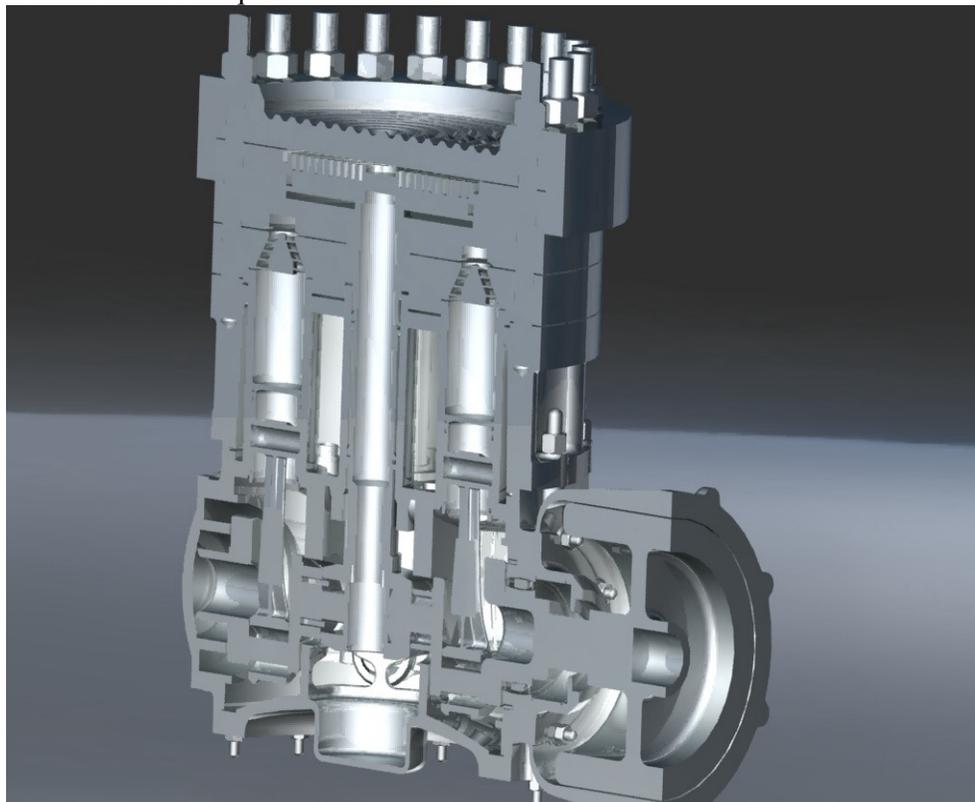
Nous abordons, comme cela une autre possibilité de convertir directement les biogaz en énergie: la production de froid. Orbem a une puissance unitaire comprise entre 30 et 100 kW.

Il pourra fonctionner avec des gaz de chaudière ou en sortie d'échappement de moteur à combustion interne. Le fluide moteur est de l'hélium ou de l'hydrogène. Ceci ne représente aucun danger compte tenu de la conception "fermée" du moteur.



Notre moteur est conçu avec des composants en céramique et sans lubrification, donc sans entretien, pour fonctionner au minimum 150 000 heures sans être ouvert ( 15 ans, 24h24h, 365 jours/an).

Grâce à un système breveté, la vitesse peut-être réglée précisément pour assurer une production d'électricité à fréquence constante.



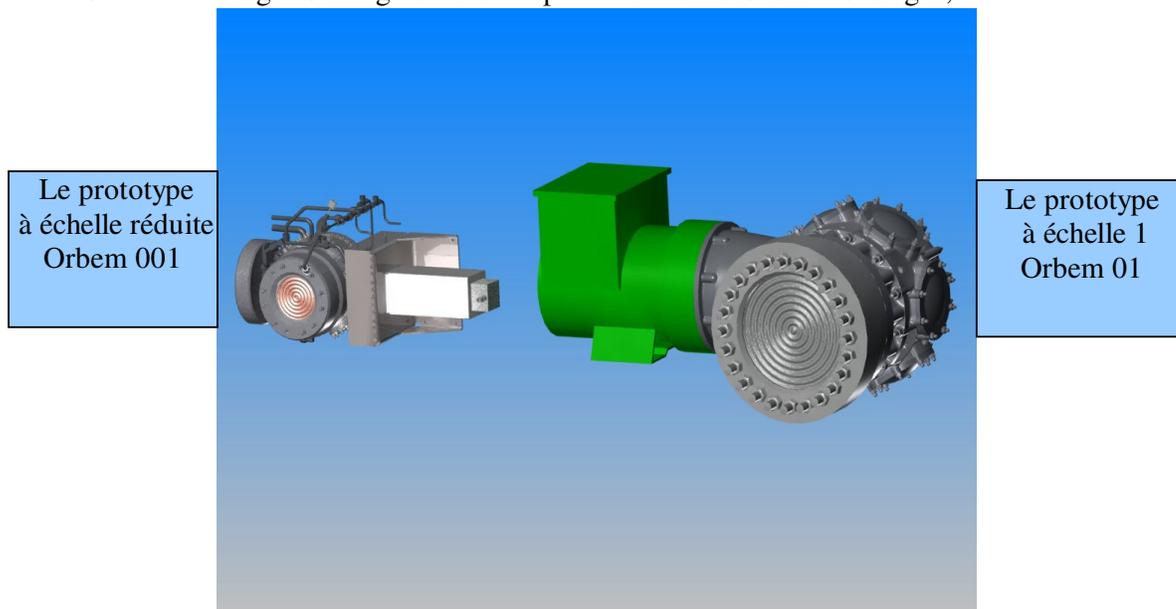
Nous développons une génératrice spécifique pour tenir cette durée, puisque sur le marché, pour les puissances du moteur, il n'y a pas d'alternateur qui puisse avoir une fiabilité supérieure à 60 000 heures parce que, d'une manière générale, les alternateurs de ces puissances sont montés avec des moteurs à combustion interne (diesel ou essence) dont la durée de vie maximale est entre

30 000 et 45 000 heures suivant l'usage.

Les modèles présentés ici sont ceux destinés à l'énergie solaire. Les chambres de combustion sont en cours de conception.

### **Conclusion:**

Si la technologie Stirling est très adaptée à la combustion des biogaz, il en va comme de



toutes technologies en développement durable. Chacune est adaptée à un usage donné: le ciseau à bois ne sert pas de burin.

Pour la combustion des biogaz, il y a plusieurs dilemmes à résoudre: quelle taille d'installation, sinon quelle collecte? Comment s'adapter aux contraintes de classement SEVESO?...

Il y a donc de la place pour diverses technologies.

Le vrai développement durable étant de rapprocher les lieux de production des lieux de consommation, la production d'énergie doit donc être proche des lieux de consommation, le réseau électrique servant à effacer les pointes de consommation ou de production.

Si, comme le prouve la concentration des industriels des ordures et déchets, ceux -ci sont à même de gérer de très grosses quantités, le problème reste entier pour les milliers d'installations (stations d'épuration, déchets animaux et composts) qui sont gérés par des individus seuls, en groupement de communes ou d'agriculteurs ou de petits industriels.

En prenant en compte que plus l'installation est grosse plus elle génère de nuisance, je prône la construction de systèmes qui sont gérables humainement, voire automatisables.

Le moteur Stirling est la seule alternative simple et fiable au moteur à combustion interne. C'est une alternative bénéfique parce que sa fiabilité et son coût d'entretien sont inégalables. Son fonctionnement est facilement automatisable. Son coût, même s'il est plus élevé qu'un moteur conventionnel, s'amortit plus facilement parce que ses frais de fonctionnement sont quasiment nuls et son rendement bien plus élevé.

Par ailleurs, grâce à ses moyens de conception et de calcul en mécanique, en thermique et en CFD, EOSgen-technologies est capable de modéliser toutes les parties du processus de méthanisation: digesteur, échanges thermiques, combustion, conversion, chaudières, brûleurs, lavage des gaz, malaxage ou mélangeage,...., et les études de risques relatives au classement Seveso des installations.

**Eosgen-technologies**

**ZA des Tourrais, 871 rue Pierre Auguste Roiret 69290 Craponne**

**Tel: 06 62 06 31 33**