RÉPUBLIQUE DU SÉNÉGAL

ECOLE POLYTECNIQUE DE THIES

PROJET DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR DE CONCEPTION

TITRE : CONCEPTION D'UN CAPTEUR PARABOLIQUE EXPERIMENTAL ET ETUDE DES DOMAINES D'APPLICATION DU MOTEUR STIRLING EN REGIONS TROPICALES

Gm. 0251

AUTEUR : LANGASO OLONGO
DIRECTEUR : MAURICE DUVAL
CO-DIRECTEUR : JEAN-CLAUDE WARMOES

DATE : MAI 1987

Génie : Mécanique

TABLE DES MATIERES

PRELIMINAIRE

Remerciements

Sommmaire

CHAPITRE I : Introduction.....1

CHAPITRE II: Généralités.....2

-Verre comparé au plastique.....5

- collecteurs focalisants par rapport aux collecteurs plats.....6

CHAPITRE III : Equations caractéristiques du fonctionnement du capteur.....8

A. Rendements.....9

B. Rayonnement de seuil.....10

C. Selectivité.....11

D. Température limite.....13

E. Point d'inversion.....13

F. Inertie thermique.....14

G. Surfaces d'échanges de chaleur 15

H. Concentration géométrique moyenne....17

I. Conductance des pertes thermiques....18

CHAPITRE IV : Métallisation.....22

CHAPITRE V : Suivi du soleil.....26

A. Monture.....27

B. Les coordonnées équatoriales.....28

C. Direction du rayonnement direct.....30

D. Equation du temps et temps solaire...32

E. Les mesures.....33

CHAPITRE VI : Le cycle de Stirling.....36

A. Description.....36

B. Etude thermodynamique.....40

B1. Puissance et renndement d'un cycle de Stirling à échangeur parfait.....40

B2. Puissance et rendement d'un cycle de Stirling à échangeur imparfait.....43

CHAPITRE VII : Le moteur stirling.....45

A. Bilan thermique.....48

B. Avantages du moteur stirling.....49

C. Fluide actif.....51

D. Combustibles.....52

E. Différentes configurations du moteur stirling.....54

E1. Le moteur à air chaud à basse pression 55

E2. Le moteur à cylindre libre.....55

E3. Le moteur alternateur 56

E4. Le concept "Stirling duplex".....56

CHAPITRE VIII : Recommandations.....58

CONCLUSION.....59

ANNEXES

- Dimensionnement du reflecteur parabolique.....60
- Calcul de la conductance des pertes.....63
- Détermination de l'image théorique au plan focal.....66
- Détermination de la distance focale et de la grandeur de l'image au plan focal.....67

BIBLIOGRAPHIE.....79

LISTE DES FIGURES

- Coordonnées équatoriales.....29
- Equation du temps.....33
- Principe du moteur stirling.....47 bis
- Moteur à air à basse pression.....70
- Performance d'un moteur à air à pression atmosphérique.....71
- Diverses configurations du moteur stirling à air chaud pour le pompage d'eau alimenté par la biomasse.....72
- Moteur à cylindre libre.....73
- Performances d'un moteur stirling expérimental RE1000.....74
- Stirling duplex.....75
- Définition d'un concentrateur à miroir.....76
- Paramètres géometriques d'un concentrateur...77

LISTE DES TABLEAUX

- Déclinaison solaire.....78

A Mon Feu Père

A Ma Mère

A Mes Frères

A Mes Soeurs

REMERCIEMENTS

Je remercie mes professeurs Maurice DUVAL et Jean-Claude WARMOES pour leur disponibilité tout au long du projet.

Mes sincères remeciements vont aussi à Monsieur Joseph SARR, chercheur au C.E.R.E.R de Dakar, pour sa collaboration.

Enfin , que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ce projet,trouvent içi,l'expression de ma profonde gratitude.

Chapitre I

INTRODUCTION

INTRODUCTION

L'énorme potentiel des pays tropicaux en énergies renouvelables, en énergie solaire en particulier, exige la maîtrise de ces formes d'energie pour surmonter la crise énergétique et contribuer au developpement des pays en question.

Le capteur solaire parabolique offre la possibilité d'atteindre des facteurs de concentration d'energie très élevés, donc des températures moyennes et élevées nécessaires dans certains procédés industriels et surtout pour des études en laboratoire.

Le moteur Stirling présente des avantages qui permettent de l'utiliser avec des combustibles bon marché et disponibles dans certaines contrées rurales qui connaissent beaucoup des difficultés d' approvisionnement en combustibles liquides dérivés du pétrole . Par sa simplicité mécanique, il pose moins de problèmes d'entretien que les moteurs diesel. Son utilisation comme source d'energie mécanique est donc possible dans les pays tropicaux.

Chapitre II

GENERALITES

GENERALITES

Les collecteurs focalisants utilisent des systèmes optiques refracteurs ou reflecteurs pour augmenter l'intensité du rayonnement solaire sur une surface absorbante .

Des plus grands flux d'energie sur des telles surfaces signifie une plus petite surface pour une grande quantité d'energie totale et par conséquent des pertes thermiques réduites.Certaines considérations dans le bilan thermique montrent que des opérations à haute température sont possibles . Pendant que les pertes thermiques sont réduites , deux types de pertes additionnels deviennent signifiants : la plupart des sytèmes concentrateurs utilisent seulement le rayonnement solaire direct,le rayonnement diffus est perdu.Les pertes optiques deviennent signifantes.

Un collecteur focalisant peut être vu comme un cas spécial de collecteur plat, modifié par un concentrateur de radiation qui sert à augmenter le flux du

rayonnement solaire. Il y a des complications liées à l'usage des concentrateurs:

-flux non uniforme sur les absorbeurs

-grande variétés de forme

-température et pertes thermiques caractéristique des absorbeurs

-introduction des factuers optiques dans le bilan thermique

Les collecteurs focalisants peuvent avoir des intensités de rayonnement aux absorbeurs augmentées par une large gamme des ratios (facteurs de concentration), des faibles valeurs 1.5 à 2 aux hautes valeurs de l'ordre de 10000. Augmenter le facteur de concentration veut dire augmenter la température à laquelle l'energie sera délivrée mais ça veut dire aussi augmenter les exigences de précision des sytèmes optiques ,c'est à dire augmenter le prix. Le coût de l'energie delivrée par un collecteur focalisant est alors une fonction directe de la température à laquelle elle est délivrée. A des taux de concentration élevés , les collecteurs focalisants sont utilisés en laboratoire pour l'étude des matériaux aux hautes températures. A des taux de concetration faibles ou intermédaires, ils servent à la production

des températures intermédiaires utiles aux applications domestiques et parfois industrielles.

Du point de vue de l'ingénieur , les collecteurs focalisants présentent quelques problèmes additionnels. Ils doivent être orientés pour suivre le soleil(excepté pour des très faibles taux de concentration). Cependant la conception a permis une gamme des configurations des systèmes focalisants qui permettent de manipuler des nouveaux paramètres.IL y a aussi des des nouvelles exigences pour la maintenance, particulièrement pour maintenir la qualité des systèmes optiques pour des longues périodes en les protégeant de la poussière,de l'oxydation etc...

Le collecteur parabolique est celui qui donne les plus grands facteus de concentration.La présente étude est d'ailleurs consacré au dimensionement d'un collecteur parabolique.

VERRE COMPARE AU PLASTIQUE

Le meilleur remplaçant du verre est le plastique aluminisé(mylar) inaltérable aux intempéries.

Avantages du plastique sur le verre:

-le plastique est flexible et on peut le mouler facilement pour obtenir n'importe quelle forme.

-la surface donnée en verre est considérablement plus lourde et plus coûteuse que la même surface en plastique(on peut réaliser des surfaces plastiques de 0,01 à 0,02 mm d'épaisseur).avantage très important pour le transport :faible poids du plastique et le fait qu'il ne soit pas fragile.

COLLECTEURS FOCALISANT PAR RAPPORT AUX COLLECTEURS PLATS

-Les collecteurs focalisants ont des avantages sur les collecteurs plats en ce qu'ils donnent plus rapidement des températures plus élevées.

-Les collecteurs plats arrivent à peine à donner des températures dépassant 100°C le point d'ébullution de l'eau .Des températures plus élevées sont essentielles pour le fonctionnement des moteurs avec un bon rendement thermodynamique,pour la cuisine et pour la refrigération .

-la surface chauffée exposée au rayonnement est plus petite pour un collecteur focalisant qu'elle ne l'est pour un collecteur plat et cette surface plus petite pour les pertes de chaleur contribue à contrebalancer les pertes plus élevées par unité de surface produites par des températures plus élevées.

Désavantages des collecteurs focalisants sur les collecteurs plats:

-ils doivent se déplacer pour suivre le soleil

soit à la main soit par un mécanisme automatique

-le rayonnement diffus est est utilisé par les collecteurs plats mais on ne peut pas l'utiliser pour les collecteurs focalisants.

-les miroirs focalisants sont bons à rien les jours nuageux mais les collecteurs plats sont encore efficaces avec le rayonnement diffus même les jours nuageux clairs

-les miroirs focalisants sont généralement énormément coûteux par mètre carré.Pour comparer les coûts ,on doit considérer:

-la surface chauffée

- la température obtenue

-le prix de la construction et fonctionnement

- les collecteurs focalisants peuvent avoir des préférences dans des climats ensoleillés sans temps très nuageux et dans les pays où la la main d'oeuvre pour tourner le miroir n'est pas cher.Les collecteurs plats sont intéresants là ou il y a des nuages fréquents.

Chapitre III

EQUATIONS CARACTERISTIQUES DU FONCTIONNEMENT DU CAPTEUR

Equations caractéristiques du fonctionnement

$P_a = P_u + P'$ Pa:puissance incidente du rayonnement absorbée

par unité de surface

P_u :puissance utile

P':perte thermique

$P_a = EC\alpha\tau\rho$

E: éclairement energétique au niveau du capteur

(en W/m^2)

C: concentration géométrique du capteur

α : absoptivité des surfaces absorbantes (%)

τ: transmitivité des parois protectrices(%)

ρ:reflectivité des surfaces refléchissantes(%)

$P_u = qc(\theta_s - \theta_e)$

q: débit massique du fluide caloporteur

(kg/sm_2)

c: chaleur spécifique du fluide caloporteur

θ_s, θ_e : température du fluide à l'entrée et à la sortie du capteur

$P' = C_p (\theta_{moy} - \theta_a)$

C_p: conductance apparente des pertes à la température moyenne (W/m^2)

θ_{moy} : température moyenne des surfaces absorbantes (°C)

θ_a : température ambiante (°C)

C_p tient compte de l'effet cmobiné des pertes par rayonnement et par convection avec les milieux qui ne sont pas en général à la température ambiante. Le rendement global instantané du capteur est :

$\eta = Pu/CE$ Or $Pu = CE \rho \tau \alpha - Cp (\theta_{moy} - \theta_a)$

$$= \rho \tau \alpha - \frac{Cp (\theta_{moy} - \theta_a)}{C_E}$$

Le rendement instantané η_i d'un capteur est donné par

l'expression $\frac{Pu}{Pa} = E$

$$Pu = E\rho C\tau\alpha - C_p(\theta_{moy} - \theta_a) \quad et \; P_a = L$$

$$P_a = E\rho C\tau\alpha \Rightarrow \eta_i = 1 - \frac{C_p(\theta_{moy} - \theta_a)}{E\rho\tau C\alpha}$$

Les paramètres ρ, τ, α caractérisent les propriétés optiques des matériaux fonctionnels du capteur.

Le paramètre C caractérise la géométrie du capteur

Le paramètre Cp caractérise les propriétés thermiques des matériaux s'opposant aux pertes du capteur.

On remarque que pour avoir des renements élevés,il faut non seulement diminuer les pertes mais aussi avoir un facteur de concentration élevé.

B)<u>Rayonnement de seuil</u>

Lorsque la valeur de l'éclairement énergétique au niveau du capteur devient faible, le rendement global instantané peut devenir nul, bien que la température du fluide à la sortie soit maintenue à la valeur imposée . La valeur du rayonnement qui satisfait à ces conditions est dite rayonnement de seuil ou point de cut-off. Pour un bon dimensionnement du capteur solaire celui-çi

doit admettre une valeur de rayonnement de seuil très réduite. En considérant l'équation

$$\eta = \rho \tau \alpha = \frac{C_p(\theta_{moy} - \theta_a)}{CE}$$

en l'égalant à zéro $\eta = 0$, $\rho \tau \alpha = \frac{C_p(\theta_{moy} - \theta_a)}{C E_s}$

$$E_s = \frac{C_p(\theta_{moy} - \theta_a)}{C \rho \tau \alpha}$$

Une fois de plus le facteur de concentration intervient au dénominateur, donc plus il est grand plus le rayonnement de seuil est petit plus notre installation est bonne.

C) SELECTIVITE

Lorsqu'on agit sur la conductance des pertes pour diminuer la valeur des pertes thermiques, on dit que le cateur a été rendu sélectif.

a) Réduteurs utilisés pour abaisser les pertes par rayonnement thermique

- -système effet de serre
- -surface sélective

dépôt par projection sous vide(vaporisation)

- dépôt par action chimique (CVD)
- oxydation à chaud
- dépôt par pulvérisation(spray)
- dépôt par voie électrolytique
- structures anti-rayonnantes
- effet de serre renforcé

b) réducteurs utilisées pour abaisser les pertes par convection naturelle et par convectinon forcée.

1.convection naturelle

*paroi réductrice de mouvement

*structure alvéolaire anti-convectives

*sytème à vide

2.convection forcée

*parois protectrices

*écrans protecteurs

*systèmes cavités

D) TEMPERATURE LIMITE

Un capteur soumis à un rayonnement intense peut parfois avoir des absorbeurs dont la température est très élevée lorsque l'extraction de la chaleur s'arrête bruquement.

Le comportement des matériaux à ces températures limites est donc à considérer avec attention de même que les systèmes permettant de limiter ces échaffements dangereux (dépointage, écrans protecteurs, systèmes à portée importante en surcharge).

Pour la température limite θ_i et pour $\eta = 0$

on peut écrire: $$\rho \tau \alpha = \frac{C_p(\theta_1 - \theta_a)}{CE}$$

d'ou $$\theta_1 = \theta_a + \frac{CE \rho \tau \alpha}{C_p}$$

E) POINT D'INVERSION

C'est la valeur de l'éclairement incident pour laquelle la température à la sortie est égale à la température à l'entrée. Le bilan énergétique pour ce point d'inversion est donc:

$$\rho \tau \alpha C E_i = C_p(\theta_e - \theta_a)$$

$$d'où \quad E_i = \frac{C_p(\theta_e - \theta_a)}{\rho \tau \alpha C}$$

F) INERTIE THERMIQUE

Avant d'atteindre son fonctionnement à régime permanent, le capteur passe par un fonctionnement dit à régime variable dont la durée est principalement fonction de la nature des matériaux constituant le dispositif de conversion, et du taux de concentration. L'équation caractéristique du fonctionnement en régime transitoire est alors la suivante (par unité de surface de l'absorbeur

$$\alpha \tau_f EC = C_p (\theta_f - \theta_a) + \frac{m_e c_e (\theta_s - \theta_a)}{t}$$

θ_f : température de l'absrbeur lors du préchauffage

m_e : masse équivalente des matériaux constituant le convertisseur

c_e : chaleur spécifique équivalente des matériaux du convertisseur

t : temps nécessaire au préchauffage de l'installation

G)SURFACES D'ECHANGES DE CHALEUR

Lorsque le taux de concentration devient élevé au niveau du convertisseur, le transfert de chaleur s'effectue alors avec des gradients de température assez importants dans le fluide actif.

Des tels gradients peuvent alors provoquer des pertes thermiques importantes.Pour éviter cet inconvénient, on est conduit à augmenter les surfaces d'echanges de chaleur.La puissance calorifique à transmettre est donnée par:

$$P_u = hS_e \Delta\theta$$

P_u: puissance calorifique disponible par unité de surface

S_e :la surface d' échange nécessaire au transfert de chaleur par unité de surface

$\Delta\theta$:gradient de température dans le fluide caloporteur

Dans un système à concentration parfaitement dimensionné,on peut negliger les pertes thermiques au niveau du convertisseur.

L'équation du bilan devient alors $E_p C_a \tau = P_u$

en remplaçant P_u par sa valeur

$$E_p C \tau \alpha = h S_e \Delta\theta$$

$$S_e = \frac{E_p C \tau \alpha}{h \Delta\theta}$$

Détermination du coefficient d'échange

a) Régime laminaire ($Re < 2000$)

$$N_u = \frac{2}{\pi} G_z$$

$$N_u = \frac{h D}{\lambda} \quad (\text{Nombre de Nusselt})$$

$$G_z = \frac{q c}{\lambda L} \quad (\text{Nombre de Graez})$$

h: coefficient d' échange du fluide caloporteur

D: diamètre du tube de circulation

: conductivité thermique du fluide

q : débit massique c :chaleur spécifique du fluide à pression constante

L: longueur du tube de circulation

b) Régime turbulent ($Re > 9000$)

$$Nu = 0{,}023\ Re^{0,8}\ R^{0,4}$$

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$ (Nombre de Reynolds)

$$P_r = \frac{\mu . c}{\lambda}$$ (Nombre de Prandl)

: masse volumique du fluide

v : vitesse d'écoulement

: viscosité dynamique du fluide

Ces formules permettent le calcul du coefficient d'échanges de chaleur moyen au niveau du film du fluide dans la canalisation

Le coefficient global tient compte également de la nature et de l'épaisseur de la paroi en contact avec le fluide caloporteur

CONCENTRATION GEOMETRIQUE MOYENNE

C'est le rapport entre la surface de captation et la surface apparente à l'entée du convertisseur. Elle caractérise la géometrie générale d'un capteur. Pour un capteur concentrateur parabolique, elle est donnée par l'expression:

$$C = \frac{\sin^2 \beta}{4 \gamma_t^2}$$

β = angle d'ouverture

$2\gamma_t$ = erreur angulaire acceptable

CONDUCTANCE DES PERTES THERMIQUES

Le convertisseur d'energie solaire à concentration comporte généralement un absorbeur-échangeur qui est le siège des déperditions thermiques par convection et par rayonnement sur sa surface éclairée, d'autre part des pertes par conduction sur sa surface qui comporte l'échangeur de chaleur.On a donc:

$$C_p = h_r + h_{cv} + h_{ar}$$

La conductance arrière par unité de surface de l'absorbeur est de la forme:

$$h_{ar} = \frac{S_r}{S} \cdot \frac{\lambda_{ar}}{e} \cdot \frac{(\theta_{moy} - \theta_{ar})}{(\theta_{moy} - \theta_{ai})}$$

avec S_r: surface réelle de l'absorbeur

S : surface apparente de l'absorbeur

λ_{ar} : conductivité thermique du matériau isolant à sa température moyenne.

e : épaisseur de l'isolant à l'arrière de l'absorbeur

θ_{ar} : température superficielle de la paroi arrière de l'isolant.

b) surface absorbante non protégé sur sa face éclairée

Le coefficient d'échange par rayonnement est donné par la formule:

$$h_r = \varepsilon_a \cdot \sigma \frac{T_{moy}^4 - T_a^4}{T_{moy} - T_a}$$

ε_a : facteur d'émission apparente de la cavité chaudière

σ : constante de Stefan-Boltzman

T_{moy} : température moyenne de la surface absorbante

T_a : température moyenne de la voute environnant le convertisseur (cette voute est composée d'une part par le réflecteur et d'autre part ,en général, par l'environnement naturel.Sa température est considerée comme étant la même que celle de l'ambiance)

L'expression précédente peut encore s'écrire:

$$h_r = \varepsilon_a \sigma (T_{moy}^2 + T_a^2)(T_{moy} + T_a)$$

Le coefficient d' échange par convection est donné par

l'expression çi-après pour les gammes des moyennes et des hautes températures (100°C à 500°C):

$$h_{cr} = 7,5 + 4V \quad (0 < V \leq 4 \text{ m/s})$$
$$h_{cr} = 7,3\, V^{0,80} \quad (4 < V < 40 \text{ m/s})$$

ou v=vitesse du vent(m/s)

Afin d'estimer les performances moyennes d'un convertisseur, ces expressions sont à utiliser afin d'obtenir des ordres de grandeur des déperditions par convection.Seule une étude expérimentale sur un système donné peut permettre de déterminer avec précision les valeurs descoefficients d'échange de chaleur par convection

Le coefficient d'échange de chaleur par convection naturelle reste sensiblement constant pour cette gamme de température,car il s'avère que l'augmentation de la viscosité de l'air avec la température et la dimunition de la masse volumique compensent l'accroissement de l'échauffement de sorte que la valeur du nombre de Raleigh reste quasiment constant

Les expressions du coefficient de transfert par convection sont données par unité de surface apparente ou réelle du convertisseur par

Le dispositif comporte des conductances partielles.Elles sont les suivantes:

:conductances internes par rayonnement et par convection naturelle

:conductances externes par rayonnement et par convection naturelle

: emissivité apparente des cavités

: emissivité de la couverture

: température moyenne de l'absorbeur (K)

: température moyenne de la couverture(K)

L'expression qui permet de calculer le coefficient d'échange résultant est la suivante:

Chapitre IV

METALLISATION

METALLISATION

En analysant différents spectres de réflection des différents métaux pour le rayonnement thermique(-6,8<log <4) on constate que l'aluminium et l'argent présentent les meilleurs caractéristiques de réflexion(bon pouvoir réflecteur).Dans une moindre mesure le cuivre ,l'or présentent d'assez bonnes

caratéristiques mais le coût de l'or ne permet pas son utilisation dans un tel projet.

On retiendra l'aluminium et l'argent dont les pouvoirs réflecteurs sont voisins de 0.90(90%).Une préférence sera accordé à l'aluminium pour sa faible masse volumique (gain en poids) ,sa disponibilité et son coût sur le marché car on peut s'en procurer sous forme de papier d'emballage ou sous forme de tôles minces.

Pour la fabrication des surfaces réfléchissantes, les alliages légers permettent de résoudre économiquement les problèmes difficiles : les traitements électrolytiques et chimiques permettent d'obtenir sur des grandes surfaces, un pouvoir réflecteur dans le visible de 90%.

Ce pouvoir réflecteur peut être stabilisé par l'oxydation anodique qui, recouvrant la surface par un film transparent et dur ,la protège du ternissement , de la corrosion , de l'abrasion,et permet un entretien facile l'etude du pouvoir réflecteur d'une surface d'aluminium brillantée et oxydée anodiquement montre une absorption dans l'infrarouge , pour des longueers d'onde

comprises entre trois et quatre microns et au-delà de sept microns. Cette absorption pourrait élever la température deu miroir si l'aluminium n'était doué d'un pouvoir émissif élevé .A la température de 38°C , le pouvoir emissif d'une surface d'aluminium recouverte d'une pellicule d'alumine de trois microns, atteint 70% de celui du corps noir.

Il est possible en oxydant q'une face du miroir , d'emettre ces radiations dans une seule direction intéressante: le miroir se transformera sur sa face oxydée en émetteur secondaire, de sorte que la dimunition du pouvoir réflecteur ,pour une longueur d'onde donnée ,ne constitue pas nécessairement une perte importante.

Après traitement thermique de l'aluminium ,on pourra soit le mouler soit le coller(feuille) à l'aïde de la résine sur une forme paraboloïdale réalisée par une technique exposée plus loin.

Une façon d'obtenir la métallisation des miroirs en verre ou en plastique est l'évaporation sous vide.Cette technique réussit particulièrement bien à

aluminium qui ne présente pas le trou de du pouvoir réflecteur de l'argent dans le proche ultraviolet et conserve un pouvoir réflecteur aussi grand dans domaine du visible.

Chapitre V

SUIVI DU SOLEIL

SUIVI DU SOLEIL

Le reflecteur parabolique doit pouvoir se mouvoir pour capter le maximum d'éclairement du soleil à tout moment.Pour celà le foyer, le sommet de la parabole et le soleil doivent être en ligne droite .Le système doit être capable de se mouvoir selon deux axes.Ces axes peuvent horinzontal et vertical ou un axe de rotation peut être incliné de telle façon qu'il soit parallèlle à l'axe de rotation de la terre(axe polaire) et l'autre perpendiculaire à lui.

On distingue les systèmes manuels et les systèmes mécanisés. Les systèmes manuels dépendent de l'observation de l'opérateur et de son aptitude à faire les corrections nécessaires et peuvent être adéquats pour certaines circonstances si le facteur de concentration n'est pas très grand et si la main d'oeuvre est bon marché.Ce sytèmes ne sont pas adaptés pour l'industrie mais nous pouvons nous en contenter pour notre capteur expérimental.

Les systèmes mécanisés d'orientation peuvent être divisés en deux:système suiveur de soleil et

systèmes pré-programmés.

Les systèmes suiveurs de soleil utilisent un des détecteurs pour déterminer le mauvais alignement du sytème et à travers un système de contrôle les corrections nécessaires sont faites pour réaligner le sytème. Ces systèmes fonctionnent en boucle fermée.

Les systèmes pré-programmés ,d'autre part ,font mouvoir le système de manière prédéterminée (ex: 15°/h autour de l'axe des pôles) et nécessite occasionnellement de contrôle pour assurer l'alignement du système.En général , ils fonctionnent en boucle ouverte.Il peut être avantageux de combiner les deux méthodes.

Plus grande sera la température à laquelle l'energie sera livrée,plus le facteur de concentration doit être grand et plus le concentrateur et le système d'orientation devront être précis.

MONTURE

Nous avons opté pour une monture équatoriale à commande manuelle pour ce projet , vu le budget assez faible et le caractère expérimental du capteur.

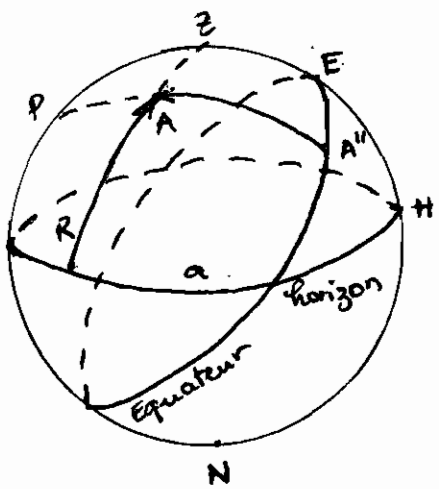
Cette monture est mobile autour de la ligne des

pôles. Il est constitué de deux axes , l'un parallèle à l'axe des pôles (appelé axe horaire); l'autre lui est perpendiculaire:c'est l'axe de déclinaison. La déclinaison étant l'angle constant(approximation) que fait la direction d'une étoile (içi , le soleil) avec l'axe du monde.Pour trouver une étoile dont on connait l'angle de déclinaison, il faut caler l'instrument, par rotation autour de l'axe de déclinaison, dans cette direction connue à l'avance ,puis chercher l'étoile et la suivre par rotation autour de l'axe horaire.

LES COORDONNEES EQUATORIALES OU HORAIRES

En prenant l'équateur comme cercle de référence sur la sphère celeste ,l'arc A"A est alors appelé déclinaison;la déclinaison δ d'un astre est positive si son point directeur A est , sur la sphère celeste du

même côté que le pôle Nord, elle est négative s'il se trouve sur l'autre hémisphère; La déclinaison est donc comprise entre -90° et +90°. L'autre coordonnée est mesurée le long de l'equateur, elle est appelée angle horaire et est représentée par l'arc EA" orienté dans le sens retrograde de E vers A".



Pour exprimer la grandeur de l'angle horaire , les astronomes font usage d'une unité qu'ils sont les seuls à utiliser et qui est la vingt-quatrième partie de circonférence(15°) : cette unité a reçue le nom d'heure.

Les coordonnées ainsi introduites , appelées coordonnées horaires ont l'avantage de permettre une représentation simple du mouvement diurne en un lieu donné: au cours de ce mouvement , les déclinaisons restent en efffet constantes (en première approximation, seuls les angles horaires varient,ils varient

d'ailleurs dans le même sens en laissant constante leur différence mutuelle.

\I DIRECTION DU RAYONNEMENT DIRECT

L'angle d'incidence θ du rayonnement direct est l'angle mesuré entre le rayonnement direct et la normale à la surface. Il est donné par l'expression:

$$\cos\theta = \sin\delta\cos\phi\cos s - \sin\delta\cos\phi\sin s\cos\tau + \cos\delta\cos\phi\cos s\cos w + \cos\delta\sin\phi\sin s\cos\tau\cos w + \cos\delta\sin s\sin\tau\sin w$$

ou ϕ= latitude du lieu(nord^positif)

δ= angle de déclinaison(c.à.d la position angulaire du soleil à midi solaire par rapport au plan de l'équateur)

s= angle azimuthal de la surface , la déviation de la normale à la surface par rapport au méridien local. (plein sud=0, Est=positif,Ouest=négatif)

w= angle horaire , midi solaire=0 et chaque heure égale 15° de longitude avec matin positif et après-midi négatif.

θ= angle d'incidence du rayonnement direct ,angle mesuré entre le rayonnement et la normale à la surface.

θ_z = angle zénithal, l'angle entre la verticale et le rayonnemnent direct.

$$\cos \theta_z = \sin\delta\sin\phi + \cos\delta\cos\phi\cos w$$

l'angle de lever du soleil est donné par:

$$\cos w = \tan\phi\tan\delta$$

La durée du jour est donnée par:

$$T = (2/15)*\cos(-\tan\phi\tan\delta)$$

\H TEMPS SOLAIRE ET EQUATION DU TEMPS \h

Il est à noter que dans les calculs d'angles solaire, le temps utilisé est le temps solaire qui ne coïncide pas nécessairement avec le temps local indiqué par l'horloge. Il est nécessaire de convertir le temps standard local en temps solaire. Premièrement il y a une différence constante en longitude entre le site considéreé et le méridien sur lequel est basé le temps standard local. La seconde correction est de l'équation du temps qui prend en compte les différentes perturbations dans l'orbite terrestre et le taux de rotation qui affecte le temps auquel le soleil croise le méreidien de l'observateur. Cette correction est obtenue des graphiques et des tables publiés. Le temps solaire puet être obtenu par la relation :

Temps solaire= Temps standard + E + $4(L_{St} - L_{loc})$

ou E=équation du temps de la figure ci-dessous,en minutes

L_{loc}= longitude du lieu en question,en degrés Est

L_{St}= longitude du méridien standard pour le temps local

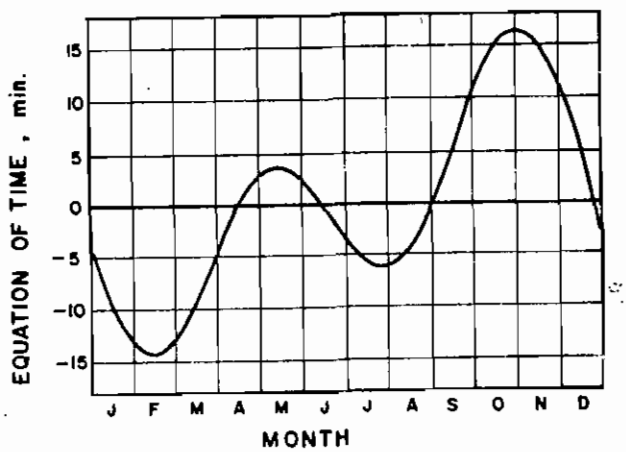


Figure 2.7.1 The equation of time, E, in minutes, as a function of time of year.

La déclinaison δ, peut être calculée par l'équation approchée de COOPER (1969):

$$\delta = 23.45 \sin[360*(284+N)/365)]$$

ou

N est le jour de l'année

δ exprimée en degré \i

LES MESURES

Pour pouvoir évaluer les rendements, on devra mesurer les grandeurs suivantes:

-Eclairement énergétique

* au niveau de la surface de captation

* au niveau du convertisseur (absorbeur)

-Températures

* à l'entrée de l' échangeur

* à la sortie de l'échangeur

* à l'arrière de l'isolant du convertisseur

-Durée d'éclairement

-Données météorologiques

* température ambiante

* vitesse du vent

* sens du vent

L' équipement météorologique pour mesurer ces grandeurs :

-Le pyrhéliomètre de type EPPLEY (conseillé par World Meteorological Organisation)

-Themocouples fer-constantan

-anémomètre

-girouette

RIGIDITE DU CAPTEUR

La rigidité du capteur est assurée par une épaisseur suffisante de tôle d'aluminium et par une âme à nid d'abeille qui permet au capteur de résister aux sollicitations de traction , de compression et de flexion.

ENTRETIEN

La poussière et la saleté diminuent de façon significative l'efficacité du capteur. Celui-çi devra être , nettoyer regulièrement sans causer des rayures sur sa surface refléchissante.

LA FABRICATION DU CAPTEUR

Le procédé de fabrication retenu est l'assemblage des tôles en forme de tartes sur une structure paraboloïdale .Dans un premier temps on donnera aux tôles d'aluminium la forme (contour et courbure) de la paraboloïde , ensuite on les assembera sur la structure.

L'emboutissage de la paraboloïde unique est difficile à réaliser et le soudage est à éviter car il introduit des contraintes résiduelles de tension et de compression dans la région du joint de soudure.

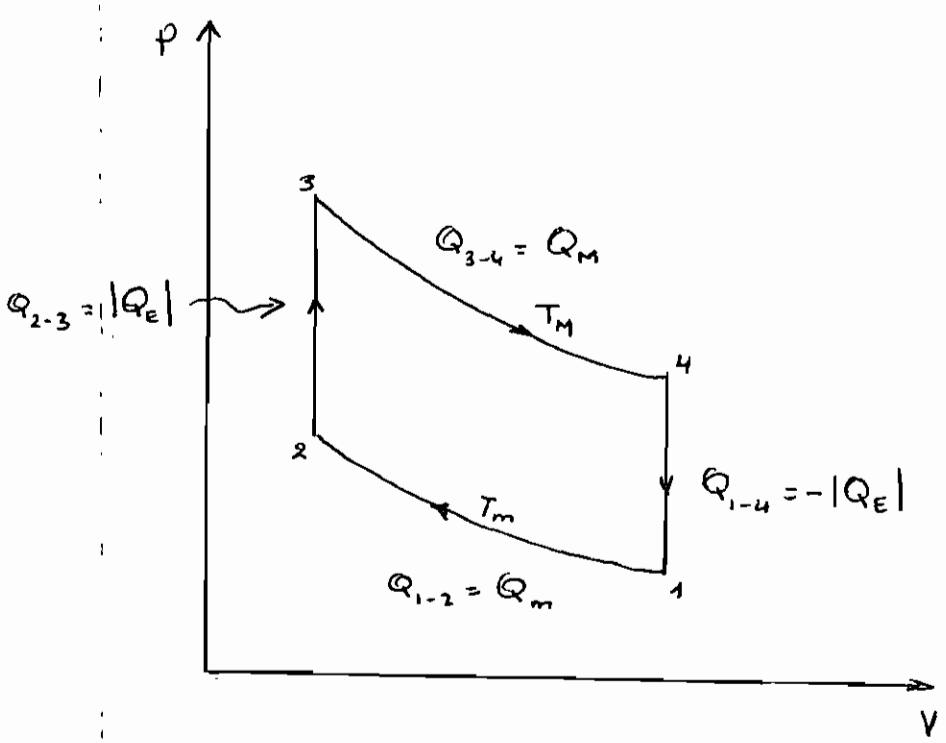
On laissera un trou au centre du miroir pour économiser les matériaux car la partie centrale est cachée au rayonnement direct par l'obstacle constitué par le convertisseur d'energie situé au plan focal. Pour conserver la surface de captation déterminée par le bilan thermique, on ajoutera une surface équivalente à celle du trou sur la périphérie du capteur.

Chapitre VI

LE CYCLE DE STIRLING

LE CYCLE DE STIRLING

Le cycle thermodynamique théorique d'une machine motrice ditherme réversible dite de stirling est la suite de quatre évolutions d'un gaz parfait entre deux sources de chaleur de températures constantes et uniformes séparé par un échangeur de chaleur isochore.



Description Le système évoluant est une masse finie de gaz parfait

1-2:compression isotherme du système en contact de la source froide de température T ,la variation d'energie interne du système est nulle car sa température demeure

coonstante.Par application du principe d'équivalence, il vient:

$U_{1-2} = 0 = \mathcal{C}_{1-2} + Q_{1-2}$ avec $\mathcal{C}_{1-2}$ travail des forces extérieures appliquées au système,ici

$$\mathcal{C}_{1-2} = \int_1^2 -PdV = -nRT_m Log \frac{V_m}{V_M}$$

donc $\mathcal{C}_{1-2} > 0$ d'ou $Q < 0$

et Q transport de chaleur entre le système et l'extérieur ,ici

$$Q = nRTLog\frac{V_m}{V_M} < 0$$

le système reçoit de la chaleur de l'extérieur et rejette de la chaleur à sa source froide

2-3: Transport de chaleur isochore de l'échangeur au système

$Q_{2-3} = |Q_E| > 0$ 3-4 : Détente isotherme du système en contact de sa source chaude de température T , la variation de l'energie interne du système est nulle

$$U_{3-4} = \mathcal{C}_{3-4} + Q_{3-4}$$

içi $$\mathcal{C}_{3-4} = -nRTLog\frac{V_M}{V_m} < 0$$

d'ou $Q_{3-4} > 0$ Le système reçoit de la chaleur de sa source chaude , et produit le travail

4-1 : transport de chaleur isochore du système à

l'echangeur $Q_{4-1} = -|Q_{\varepsilon}|$

Il vient de la sommation cyclique des transports de chaleur:

$$\Sigma Q = Q_{1-2} + Q_{2-3} + Q_{3-4} + Q_{4-1}$$

$$= -nRT \text{ Log}\frac{V_M}{V_m} + nRT \text{ Log}\frac{V_M}{V_m}$$

$$= nR(T_M - T_m) \text{Log}\frac{V_M}{V_m}$$

Soit $\Sigma Q = nR(T_M - T_m)\text{Log}\frac{V_M}{V_m} > 0$

$$\Sigma Q = -nR(T - T)\text{Log}\frac{V_M}{V_m} < 0$$

Cycliquement ,le système reçoit plus de chaleur de sa source chaude qu'il n'en verse à sa source froide; la différence est convertie en energie mécanique q'il produit sous forme de travail à l'extérieur.

Le rendement de la conversion de chaleur de chaleur effectuée s'exprime par:

$$\eta = \frac{\Sigma Q}{Q_M} = \frac{Q_M + Q_m}{Q_M} = 1 + \frac{Q_m}{Q_M}$$

avec $Q_M = Q_{3-4}$ $\quad Q_m = Q_{1-2}$

$$\eta = \frac{nR(T_M - T_m)\text{Log}\frac{V_M}{V_m}}{nRT_M \text{Log}\frac{V_M}{V_m}} = 1 - \frac{T_m}{T_M}$$

Q = Q -Le rendement du cycle thermodynamique ,dit de stirling est égal au rendement thermodynamique théorique du cycle de la machine parfaite de Carnot fonctionnant entre les deux mêmes sources de chaleur(ou entre les deux mêmes température).Ces deux rendements sont indépendants de la masse et de la nature physico-chimique du système évoluant

-Le fonctionnement d'une machine de stirling par rapport à celui d'une machine idéale de Carnot,exige l'existence d'un échangeur de chaleur et la perfection du fonctionnement de celui-çi.

Cette double sujetion explique en grande parie l'inaptitude de ce cycle à toute réalisation industrielle malgré des réelles et nombreuses tentatives,toujours sans lendemains jusqu'à la moitié du vingtième siècle.

Par ailleurs ce cycle est à rendement maximal ,cette remarquable prérogative ne lui est pas propre. En réalité , une infinité des cycles jouissent aussi de cette proprieté.Mais ils sont tous, comme lui tributaires de l'existence d'un échangeur de chaleur ;seul le cycle de Carnot échappe à cette contrainte.

ETUDE THERMODYNAMIQUE THEORIQUE DU CYCLE DE STIRLING.

Si le cycle de Stirling a suscité de nombreuses tentatives de réalisation, jusqu'à un passé proche ,il le doit à son éventualité d'un rendement maximal élevé.

Etant donné les hautes performances accomplies par les moteurs à combustion interne,il est tout d'abord nécessaire de comparer les valeurs théoriques à celles d'un moteur stirling ,sans préjuger de toute autre considération La nécessité d'un échangeur de chaleur au fonctionnement d'un tel cycle conduit encore à étudier l'influence théorique de l'efficacité de l'échangeur sur le rendement de ce cycle .

Puissance et rendement d'un cycle théorique de stirling à échangeur parfait

Le rendement d'un cycle théorique de stirling fonctionnant entre deux sources de chaleur , de température respectives T et T grâce à un échangeur parfait est: en posant le rapport des températures $\frac{T_M}{T_m} = k \quad (k \geq 1)$

il vient $\eta = \frac{k-1}{k}$.La puissance d'un tel cycle est fonction du travail cyclique et de la durée de celui-çi.La somme des travaux effectués en cours du cycle par le système est égale mais de signe opposé à la somme des travaux des forces extérieures appliquées au système:

$$\mathcal{E}\mathcal{Z} = +\int_1^2 P dV + \int_3^4 P dV$$

$$\mathcal{E}\mathcal{Z} = -nRT_m \operatorname{Log}\frac{P_2}{P_1} + nRT_M \operatorname{Log}\frac{P_2}{P_1}$$

En posant le rapport des volumes extrêmes ,

$$\frac{V_M}{V_m} = \rho \quad (\text{avec } \rho \geq 1)$$

il vient $\frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4} = \rho$

$$\mathcal{E}\mathcal{Z} = nR(T_M - T_m)\operatorname{Log}\rho = nRT_m(k-1)\operatorname{Log}\rho$$

Rapportant ce travail au volume engendré par le déplacement du piston moteur $(V_M - V_m)$;il vient la pression moyenne du cycle : $\bar{P} = \frac{\mathcal{E}\mathcal{Z}}{V_M - V_m}$

$$\bar{P} = \frac{nRT_m(k-1)\operatorname{Log}\rho}{V_M\left(1 - \frac{1}{\rho}\right)}$$

En rapportant enfin cette valeur moyenne de la pression au cours du cycle à sa pression initiale

$$\eta = \frac{\bar{P}}{P_1} = \frac{nRT_m(k-1)\operatorname{Log}\rho}{P_1 \rho V_m\left(1 - \frac{1}{\rho}\right)}$$

avec $PV_m = nRT_m$, l'expression pression spécifique moyenne adimensionnelle devient:

$$\pi = (k-1) \cdot \frac{1}{\varphi - 1} \log \varphi$$

En résumé:

*La puissance d'un cycle théorique de Stirling croît avec le rapport de température de ses deux sources et celui des volumes extrêmes du systeme.

*Le rendement d'un cycle théorique de stirling est indépendant des volumes extrêmes du système et croît avec le rapport des température de ses deux sources.

En conséquence le fonctionnement d'un moteur utilisant ce cycle, à des charges décroissantes, s'effectuera à consommation spécifique croissantes.

Les pressions spécifques moyennes obtenues sont

comparables à celles d'un cycle thermodynamique théorique. de Beau de Rochas des moteurs à explosions.

Puissances et rendements d'un cycle théorique de stirling à échangeur imparfait.

Le rôle de l'echangeur ,indipensable au fonctionnement d'un cycle à rendement maximal autre que le cycle idéal de Carnot,est de transporter cycliquement une quantité de chaleur Q du sytème à l'échangeur et réciproquement. Si cet échange vient à s'effectuer avec une efficacité réduite, $\alpha<1$, la source chaude de température T apporte un supplément de de quantité de chaleur $(1-\alpha)Q$ destiné à compenser la perte Q, soit

$$(1-\alpha)nC_v^o(T_M-T_m)$$

le rendement du cycle à échangeur imparfait d'éfficacité α a alors pour expression

$$\eta = \frac{\Sigma Q}{Q_M+(1-\alpha)Q} \Rightarrow \eta = \frac{Q_m+Q_M}{Q_M+(1-\alpha)Q}$$

soit

$$\eta = \frac{nR(T_M-T_m)\,Log\,V_M/V_m}{nRT_M\,Log V_M/V_m + (1-\alpha)C_v^o(T_M-T_m)}$$

et enfin

$$\eta \simeq \frac{(k-1)\mathrm{Log}\rho}{k\mathrm{Log} + (1-\alpha)(k-1)/(\tau-1)}$$

Le rendement varie en fonction de l'efficacité de l'échangeur α. L'influence de la nature chimique du sytème intervient dans ce dernier résultat par la présence de $\gamma = C_p^\circ / C_v^\circ$, rapport de chaleurs spécifiques ; un gaz monoatomique conviendra mieux que tout autre sytème.

Le rendement d'un cycle de Stirling décroît dans le même sens que l'efficacité de son échangeur. l'efficacité de l'échangeur de chaleur doit donc être élevé

La puissance spécifique moyenne du cycle de Stirling à échangeur imparfait se conserve quelle que soit l'efficacité de son échangeur, la source chaude devant rémedier à son inefficacité pour que le cycle lui-même puisse se conserver.

LE MOTEUR STIRLING

Chapitre VII

LE MOTEUR STIRLING

C'est un moteur dans lequel le travail est fourni par l'expansion d'un gaz à haute température auquel de la chaleur est fournie à travers un échangeur de chaleur. Comme le moteur à combustion interne ,le moteur stirling fournit du travail au moyen d'un cycle dans lequel le piston comprime un gaz à basse température et le détend à haute température. Dans le cas d'un moteur à combustion interne la chaleur est fournie par la combustion d'un combustible dans le cylindre alors que pour le moteur stirling la chaleur est obtenue à partir d' un combustible brûlant à l'extérieur du moteur et est tranmise au gaz par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur. En général,la variation rapide de la température est réalisé au moyen d'un second piston,appelé displacer,qui se meut de haut en bas et de bas en haut et transfère le gaz dans deux chambres l'une "chaude" et l'autre "froide". la chambre chaude est à haute température et la chambre froide à basse température.

Quand le displacer est en haut, le gaz s'écoule de la chambre chaude ,passe par les tubes du rechauffeur et ceux du refroidisseur pour aller à la chambre froide à basse température. Quand le displacer descend,le gaz

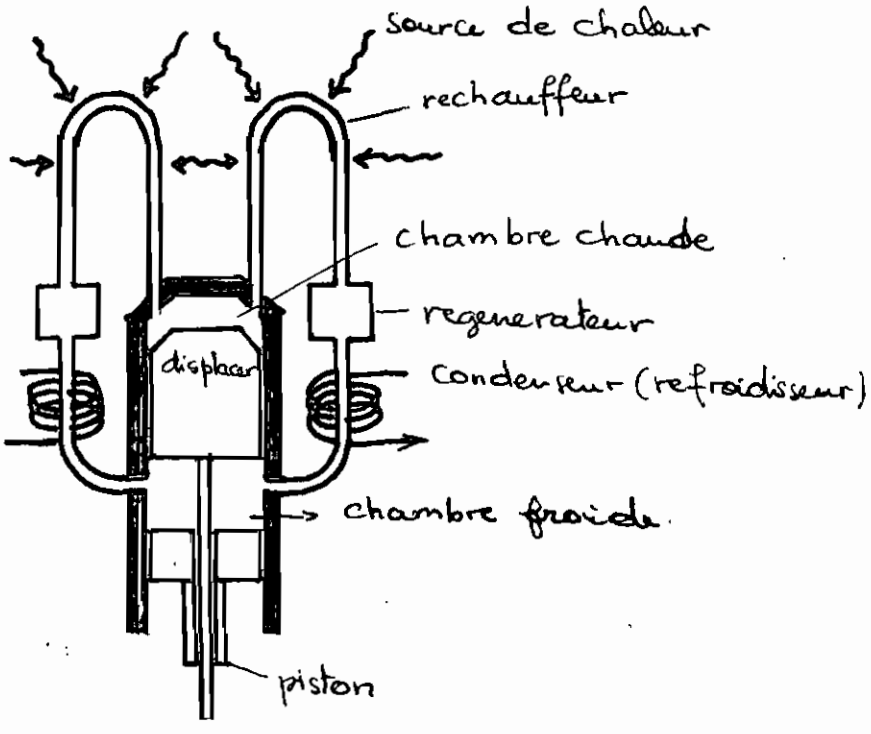
retourne à la chambre chaude par le même chemin.Durant le premier temps du transfère le gaz laisse échapper une grande quatité de chaleur au refroidisseur. Une quantité égale de chaleur doit être fournie par le rechauffeur durant le deuxième temps.

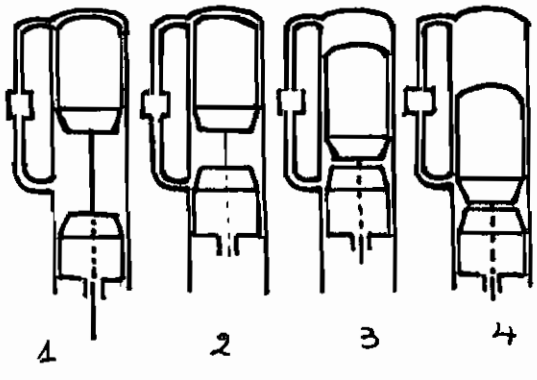
Un regénérateur est inséré entre le rechauffeur et le refroidisseur pour éviter le gaspillage de cette quantité de chaleur . C'est un espace rempli de matériaux poreux à qui le le gaz chaud laisse de la chaleur avant d'entrer au refroidisseur Le gaz refroidi retrouve la chaleur emmagasiné par le regénérateur au moment de son retour à la chambre chaude. Le mécanisme du displacer sert à rechauffer et à refroidir périodiquement le gaz.Il est associé à un piston qui comprime le gaz quand il est dans la chambre froide du cylindre et le détend quand iiest dans la chambre chaude. comme la détente a lieu à température plus élevée que la compession , elle produit un surplus de travail par rapport au travail requis pour la compression.

Cycle de Stirling

1. Le piston est à sa plus basse position et le

PRINCIPE DU MOTEUR STIRLING.





1 - Le gaz est ~~comprimé~~ dans la chambre froide
2 - Compression du gaz
3 - transfert du gaz de la chambre froide à la chambre chaude
4 - Expansion du gaz

displacer à sa plus haute position.Tout le gaz se trouve dans la chambre froide.

2. Le displacer demeure à sa position haute, le piston comprime le gaz à basse température.

3. Le piston est sa position haute ,le displacer descend et tranfère le gaz comprimé de la chambre froide à la chambre chaude.

4. Le gaz chaud est détendu et repousse le piston suivi du displacer à leurs basses positions.

Le displacer peut alors monter et faire entrer le gaz dans la chambre froide et le cycle peut recommencer.

Le rendement thermique du moteur stirling est de 30 à 45% selon le rapport de température entre la chambre chaude et la chambre froide.Dans la chambre de préchauffage le gaz à 800°C est refroidi à 150°-200°C et chauffe l'air de combustion à environ 650°C.

BILAN THERMIQUE

-Chaleur utile 40%

-Chaleur perdue.....10% (radiation...)

-Chaleur regénérée.....50%

Le contrôle du moteur se fait par:

- la régulation de pression du fluide actif dans le moteur
- la température du rechauffeur est maintenue constante par des thermostats.

Les avantages du moteur stirling

1. La combustion externe continue du système fermé rend possible l'utilisation des combustibles très variés(gaz,solides,liquides)sans modification du système. Par exemple:alcool,gasoline,mazout,huile d'olive,propane butane,gaz naturel,etc...).

2. En plus la combustion se déroule de telle façon que la pollution de l'air est moins prononcé que celle due aux moteurs à combustion interne .

3. A travers un système covenable de transport de chaleur (tubes) n'importe quelle source de chaleur suffisamment à haute température peut être utilisé pour le

moteur stirling: -radioisotopes

-reacteur nucléaire

-stockage de chaleur

-rayonement solaire

-bois de chauffe

-charbon etc...

4. La variation quasi sinusoïdale de la pression dans le cylindre et le chauffage continu font que le moteur stirling est très silencieux en opération . Un moteur stirling ayant quatre cylindres ou plus donne un couple relativement constant dans un plateau de vitesses assez grand :ce qui est particulièrement un atout pour la traction. L'actuelle configuration du moteur stirling rend possible un équilibrage complet éliminant ainsi les vibrations.

Fluide actif

L'utilisation des gaz de masses moléculaires inférieures à celle de l'air a permis de réduire de façon signicative la traînée aérodynamique dans les échangeurs de chaleur,permettant ainsi d'atteindre des grandes vitesses d'opération particulièrement nécessaire pour les applications dans les automobiles.

L'hélium et l'hydrogène ont des caractéristiques de transfert de chaleur supérieures à celles de l'air, ce qui permet,en les utilisant comme fluides actifs, d'utiliser des échangeurs de chaleur plus compacts.Cependant il est plus difficile de réaliser une étancheité parfaite du système avec l'hydrogène ou l'hélium comme fluide actif. Aux basses vitesses;les fluides lourds produisent plus de puissance mécanique que les fluides légers puisque les pertes en traînée aérodynamique sont faibles et les frottements prédominent.

Pour beaucoup d'applications,spécialement dans

l'environnement maritime,l'utlisation de l'air offre des sérieux avantages sur l'hydrogène et l'hélium en terme de coût et de remplacement du fluide.Par conséquent,l'utilisation de l'air comme fluide actif pour les applications à basses vitesses et dans la marine est très attrayante.

COMBUSTIBLES

Comme nous l'avons dit plus haut, le moteur Stirling peut utiliser différentes sortes de combustibles sans changements appréciable de rendement à la seule condition que ces combustibles fournissent suffisament de chaleur(energie).Dans les pays tropicaux , et généralement sous-développés, et surtout dans les zones rurales,l'approvisionnement en combustibles liquides (dérivés du pétrole n'est pas toujours régulier et même difficile.

Dans ces zones rurales, des problèmes d'approvisionnement en eau potable pour les individus et pour le bétail se posent souvent avec acuité . Les motopompes diesel exigent non seulement un combustible non disponible sur place mais aussi un entretien particlièrement suivi. Or dans ces régions , on trouve généralement de l'energie sous forme de biomasse parfois gaspillée

,sous- utilisée ou tout simplement non exploitée. Les caractéristiques du moteur stirling permettent de l'utiliser avec des tels combustibles pour la production d'energie mécanique à moindre coût et avec une fiabilité assez élevée. l'energie mécanique produite peut être utilisée soit pour l'exhaure rurale soit pour la production d'électricité pour des communautés restreintes.

Le gisement de biomasse est considérable compte tenu des sous-produits agricoles. Le potentiel biomasse peut être divisé en trois grandes catégories:

-les déchets agricoles et forestiers, produits par la culture et les exploitations forestières actuelles.

- la végétation existante sous-utilisé

- la biomasse à but energétique

Au Sénégal, par exemple, on trouve les ressources de biomasse suivant:

-la paille de riz (Casamance)

-la melasse (Richard Toll, région de Saint-Louis)

-la bagasse (Richard Toll, ")

-coques et déchets d'egrenage de coton (Kaolack, Tambacounda , Casamance)

-Algues rouges et algues vertes (Joal, Mbour,

Dakar , Rufisque)

DIFFERENTES CONFIGURATIONS DU MOTEUR STIRLING POUR LES APPLICATIONS DOMESTIQUES

La firme américaine Sunpower Inc a developpé différentes configurations du moteur stirling pour le commerce . Ces moteurs ont été developpé pour le pompage d'eau, la génération d'energie électrique, refrigération,pompe à chaleur et différents buts pour l'utilisation de l'energie mécanique qu'ils produisent.

Ces moteurs délivrent des puissances de 100 W à 3kW ,et sont conçus de manière simple, robuste et pour une durée de vie élevé

Dans leurs conception, Sunpower a voulu profiter au maximun des forces (avantages) du moteur stirling - source de chaleur extérieur de faible coût , simplicité

mécanique , faible niveau de bruit, adaptabilité à l' habitat -tout en évitant ses inconvénients- exigences extrêmes de structures et de l'echangeur de chaleur, les problèmes d'etanchéïté etc...

MOTEUR STIRLING A AIR CHAUD A BASSE PRESSION

La plus simple manière d'éviter les problèmes de haute pression sur les segments d'étanchéïté est de les les éliminer en utilisant de l'air à basse pression. Cette solution permet de faciliter la conception du moteur en le rendant plus léger mais au détriment de la puissance. Au demeurant il permet de produire de l'energie mécanique avec des déchets comme la paille de riz , ce qui est un grand avantage pour les contrées ou l'on produit du riz et ou la demande en moulin et en eau potable existe.(Fig)

MOTEURS A CYLINDRE LIBRE

Une autre façon d'éviter le problème de haute pression sur le segment d'étanchéïté est d'inverser les râles du pisto et du cylindre. Le piston massif demeure plus ou moins stationnaire , et le léger cylindre hermétique et étanche oscillant axialement pour produire du travail en réponse aux variations cycliques de la

pression interne. Ces moteurs sont exceptionnellement fiable et robuste , simples à fabriquer , et aptes à utiliser comme pompes , moulin à farine, et si leur mouvement alternatif est converti en mouvement rotatif par un mécanisme quelconque, ils peuvent être utiliés comme source d'energie mécanique pour différents buts.(fig)

MOTEUR ALTERNATEUR A PISTON LIBRE

Comme le moteur à cylindre libre, le moteur alternateur à piston libre évite le problème d'étancheïté avec un cylindre hermétique , mais sa puissance est délivrée à un alternateur linéaire .

LE CONCEPT "STIRLING DUPLEX"

La pompe à chaleur stirling duplex commandée par la chaleur est essentiellement deux moteurs stirling ayant en commun un piston et le cylindre. Une partie agit comme moteur et fournit de l'energie à l'autr qui agit comme pompe. Dans les deux moitiés le piston décalé (displacer) reçoit sa force motrice d'une surface différentielle entre l'espace d'expansion et celui de compression logée dans le corps même de la tige du piston décalé.

La machine stirling duplex offre beaucoup

d'avantages . Elle est hermétique et utilise le même fluide actif pour ses deux moitiés (hydrogène ou hélium). Il ne comporte pas de segments d'étanchéité ,les diaphragmes sont utilisés pour contenir ou isoler le fluide actif de l'atmosphère ou d'un refrigérant. Mis à part les aubes périphériques et les pompes, la machine de base contient seulement trois parties mobiles qui peuvent être suspendues par la force hydrodynamique des gaz pour assurer une durée de vie longue.En plus cette machine est très silencieux et n'exige pas un isolement acoustique ou tout autre moyen de diminuer le bruit. \i

Chapitre VIII

RECOMMANDATIONS

RECOMMANDATIONS

Pour compléter cette étude, les travaux ultérieurs suivants devront être menés:

- la construction d'au moins deux prototypes de concentrateurs l'un en toile de fibre de verre et l'autre en aluminium.

- la mesure des différentes grandeurs en vue de la détermination des rendements.

- la comparaison de ces deux prototypes au niveau de la rigidité et de l'efficacité.

- une étude économique c'est-à-dire une analyse et une comparaison des coûts.

- la réalisation d'une monture altazimuthale et comparaison avec la monture équatoriale.

- étude approfondie de l'âme à nid d'abeille au point de vue de la rigidité.

- implantation du moteur stirling et mesure de ses rendements avec différents combustibles.

CONCLUSION

CONCLUSION

Vu les caractéristiques du moteur stirling et sa simplicité mécanique, on pourrait l'utiliser comme source d'energie mécanique dans les régions ou l'on trouve des combustibles bon marché comme la biomasse, les déchets ménagers ou l'energie solaire.

Dans un premier temps il faudra s'intéresser aux basses puissances pour les besoins des communautés restreintes dans les contrées ou l'approvisionnement en carburants petroliers pose des problèmes et ou l'on trouve des combustibles de substitution (biomasse, déchets etc...).

L'utilisation des configurations économiques du moteur stirling (moteur à air à basse pression, moteur à cylindre libre, moteur duplex) permettra de résoudre économiquement des problèmes de pompage d'eau, de broyage de certains aliments (farines) et même de production d'energie électrique (basses puissances)

On pourra, après étude de faisabilité du projet, se lancer dans la fabrication des parties ou de l'ensemble du moteur. Il faudra envisager la transformation des certains moteurs diesel en moteurs stirling de Ringbom.

ANNEXES

DIMENSIONNEMENT DU REFLECTEUR PARABOLIQUE

Le bilan énergétique au niveau du convertisseur permet d'écrire :

$$P_a = P_u + P' \quad (W/m^2)$$

P_a = puissance incidente du rayonnement absorbée par unité de surface
P_u = Puissance utile
P' = pertes thermiques

$$P_a = E \rho C \tau \alpha$$

E_i = éclairement energétique au niveau du capteur
α = absorptivité des surfaces aborbantes
τ = transmissité des parois protectrices
ρ = reflectivité des surfaces réfléchissante.

$$P_u = \frac{P_{st}}{\eta_{st}}$$

P_{st} = puissance du moteur Stirling
η_{st} = rendement global du moteur stirling

$$P' = C_p (\theta_s - \theta_e)$$

C_p = Conductance des pertes thermique au convertisseur.

θ_s = température du fluide à la sortie du convertisseur

θ_e = température du fluide à l'entrée du convertisseur

d'où

$$E C \rho \tau \alpha = \frac{P_{st}}{S_c \eta_{st}} + C_p (\theta_s - \theta_e).$$

C = concentration géométrique moyenne

S_c = surface apparente du convertisseur

Cette équation peut encore s'écrire, en tenant compte de $C = \frac{S_r}{S_c}$

(S_r = Surface apparente du réflecteur).

$$E S_r \rho \tau \alpha = \frac{P_{st}}{\eta_{st}} + C_p (\theta_s - \theta_e) S_c$$

Pour une puissance de moteur stirling donné, on peut calculer le diamètre de la surface apparente du réflecteur.

En effet $S_r = \frac{\pi D^2}{4}$

d'où

$$E \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} \rho \tau \alpha = \frac{P_{st}}{\eta_{st}} + C_p (\theta_s - \theta_e) S_c$$

$$D = \sqrt{\frac{\frac{P_{st}}{\eta_{st}} + C_p (\theta_s - \theta_e) S_c}{E \times \frac{\pi}{4} \times \rho \times \alpha \times \tau}}$$

où $E = 800 \text{ W/m}^2$ (valeur normalisée).

Ainsi connaissant la conductance des parois C_p, la température à l'entrée et à la sortie du convertisseur, on peut calculer le diamètre du réflecteur.

Pour l'aluminium poli :

$\rho \cong 0,96$

$\alpha \cong 0,93$

Dans le cas où il n'y a pas des parois protectrices (notre cas), $\tau = 1$

Calcul de la conductance G_p des pertes.

$$G_p = h_r + h_{cv} + h_{ar}$$

$$h_{cv} = 7,5 + 4V \quad (0 < V \leq 4 \text{ m/s})$$
$$= 7,3\, V^{0,80} \quad (4 < V < 40 \text{ m/s})$$

à Thiès, la vitesse moyenne des vents est d'environ 4 m/s (valeur moyenne).

d'où

$$h_{cv} = 7,5 + 4 \times 4 = 23 \text{ W/m}^2\,^\circ\text{C}$$

$$h_r = \varepsilon_a \sigma \frac{(T_{moy}^4 - T_a^4)}{T_{moy} - T_a}$$

$$T_{moy} \simeq 773 \text{ K} \quad (500^\circ\text{C})$$
$$T_a \simeq 303 \text{ K} \quad (30^\circ\text{C})$$

d'où $h_r = 5,68 \times 10^{-8} \dfrac{773^4 - 303^4}{773 - 303} \cdot 0,9 = 37,8 \text{ W/m}^2\,^\circ\text{C}$

$$h_{ar} = \frac{S_r}{S} \cdot \frac{\lambda_{ar}}{e} \frac{\theta_{moy} - \theta_{ar}}{\theta_{moy} - \theta_a}$$

$$= 3 \cdot \frac{0,041}{0,10} \cdot \frac{500 - 100}{500 - 30}$$

$$h_{ar} \simeq 1,2 \text{ W/m}^2$$

$$C_p = h_{cv} + h_r + h_{ar}$$
$$= 23 + 37{,}8 + 1{,}2 = 62 \ W/m^2\,°C$$

$$C_p = 62 \ W/m^2\,°C$$

En revenant au bilan thermique.

$$E \cdot S_c \cdot \rho \cdot \tau \cdot \alpha = \frac{P_{st}}{\eta_{st}} + C_p (\theta_{moy} - \theta_a) \cdot S_a$$

$$P_{st} = \eta_{st} \left[E \cdot \pi \frac{D^2}{4} \rho \tau \alpha - C_p (\theta_{moy} - \theta_a) \frac{\pi d^2}{4} \right]$$

$D = 2{,}5$ m (diamètre du capteur).
$d = 0{,}093$ cm (diamètre de l'image au plan focal).

d'où $$P_{st} = \eta_{st} \left[800 \times \pi \times \frac{2{,}5^2}{4} \times 0{,}96 \times 1 \times 0{,}93 - 62 (700 - 30) \pi \times \frac{0{,}093^2}{4} \right]$$

$$P_{st} = \eta_{st} \times (3224)$$

pour un rendement η_{st} de l'ordre de 25%. Ce miroir pourra faire fonctionner un moteur stirling de.

$$P_{st} = 0{,}25 \times 3224 \approx 800 \ W$$

Pour un rendement de 30%

$$P_{st} \approx 1 \ kW$$

Il y a moyen de diminuer les pertes selon les procédés enumérés plus hauts, pour augmenter la puissance disponible utilisable au foyer par le moteur stirling.

Rayonnement de seuil

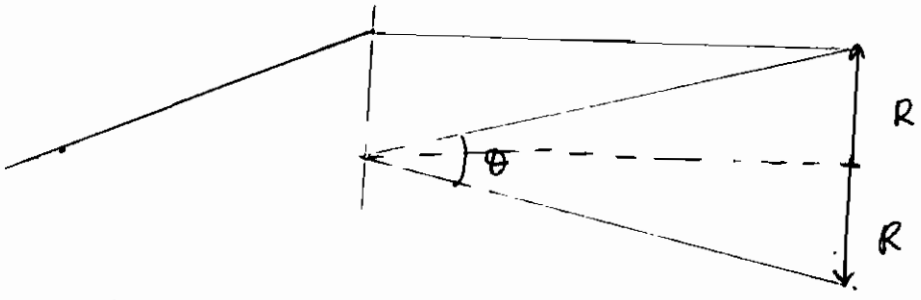
$$E_S = \frac{C_p(\theta_s - \theta_a)}{\rho \tau \alpha C}$$

$$E_S = \frac{62\,(700 - 30)}{0{,}96 \times 1 \times 0{,}93 \times 700} =$$

$$E_S = 66{,}5\ W/m^2$$

Théoriquement, en-dessous de cette valeur d'éclairement, le rendement global instantané devient nul. On évitera alors d'utiliser le capteur pour des valeurs d'éclairement inférieures à la valeur du rayonnement de seuil.
La valeur calculée est une valeur théorique (on a considéré les pertes théoriques). Pour connaître la valeur (les valeurs) réelle il faudra procéder aux mesures et tracer les courbes de rendement en fonction de l'éclairement $\eta = f(E)$.

Détermination de l'image théorique du soleil au plan focal.



Le soleil a un rayon moyen de $6,96 \times 10^8$ m il est situé à une distance de $1,49 \times 10^{11}$ m de la terre. Un observateur terrestre voit donc le soleil sous un angle θ (en radian)

$$\theta = \frac{2 \times R}{D} = \frac{2 \times 6,96 \times 10^8 \text{ m}}{1,49 \times 10^{11} \text{ m}}$$

$$\theta = 0,0093 \text{ rad} \simeq 16' \text{ (minutes)}$$

Pour une distance focale f, la grandeur de l'image formée au foyer est donnée par

$$d = f\theta$$

pour une focale de 1,5 m

$$d = 1,5 \times 0,0093$$
$$d \simeq 1,5 \times 10^{-2} \text{ m}$$
$$d = 1,5 \text{ cm} \quad \text{(Image théorique).}$$

Détermination de la distance focale et de la grandeur maximale de l'image au plan focal.

Le facteur de concentration géométrique est donné par l'expression

$$C = \frac{\sin^2 \beta}{4 \gamma_t^2}$$

β étant l'angle d'ouverture du miroir
$2\gamma_t$ l'erreur angulaire maximale permise acceptable

Pour une géométrie idéale (concentration géométrique maximale), β doit être égal à 90° et pour la gamme des température choisi (500 - 700° C), un facteur de concentration de 700 à 1000 suffit.

d'où $$2\gamma_t = \frac{\sin \beta}{\sqrt{C}} = \frac{\sin 90°}{\sqrt{700}} = 0{,}038 \text{ rad}$$

Cette erreur angulaire comprend les erreurs angulaires suivantes :

- erreur de pointage
- erreur sur les courbures et les états de surface.

Pour une géométrie optimale ($\beta = 90°$) et en tenant compte de l'équation de la parabole génératrice $y^2 = 4fx$.

On trouve un rapport $\frac{D}{f} = \frac{4+\sqrt{32}}{16} = 0{,}603$

Pour un diamètre de 2,5 m.
on a une distance focale de $2{,}5 \times 0{,}603 = 1{,}51$ m.

La grandeur de l'image est alors donnée par

$$W' = \frac{4f}{\left(1+\cos\frac{\beta}{2}\right)\cos\frac{\beta}{2}} \tan 2\gamma_t$$

$$W' = \frac{4 \times (2,5 \times 0,603)}{(1+\cos 45°)\cos 45°} \tan 0,038$$

$$W' = 0,0949 \text{ m}$$

$$W' = 9,5 \text{ cm}$$

Le facteur de concentration réel est donné par

$$\frac{D^2}{W'^2} = \frac{2,5^2}{0,0949} = 694$$ ce qui est très proche de la valeur fixée 700.

Table 1 Characteristics of duplex Stirling demonstrator

Bore	3.35 cm
Piston Stroke	2.0 cm
Cold Displacer Stroke	2.0 cm
Cold Displacer Phase Angle	100 degrees
Charge Pressure	16 bar
Frequency	35 Hertz
Heater Head Temperature	650°C
Lowest Achieved Cold Head Temperature	202°K
Heat Lifted	75 watts (at 245°K)
Engine P-V Power	100 watts
COP	.75 (at 245°K)

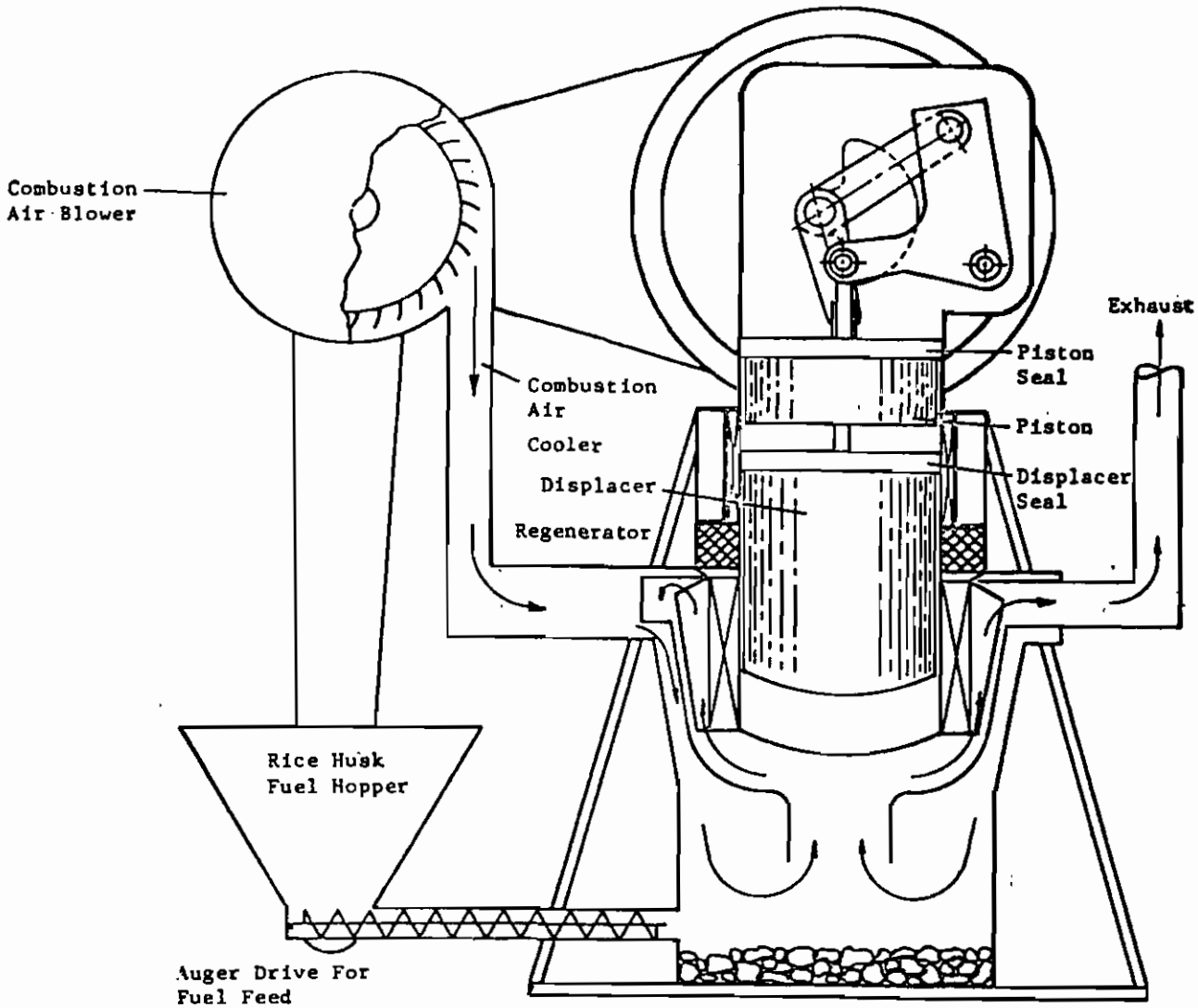


Fig 1 Typical low pressure air engine designed to burn rice husks

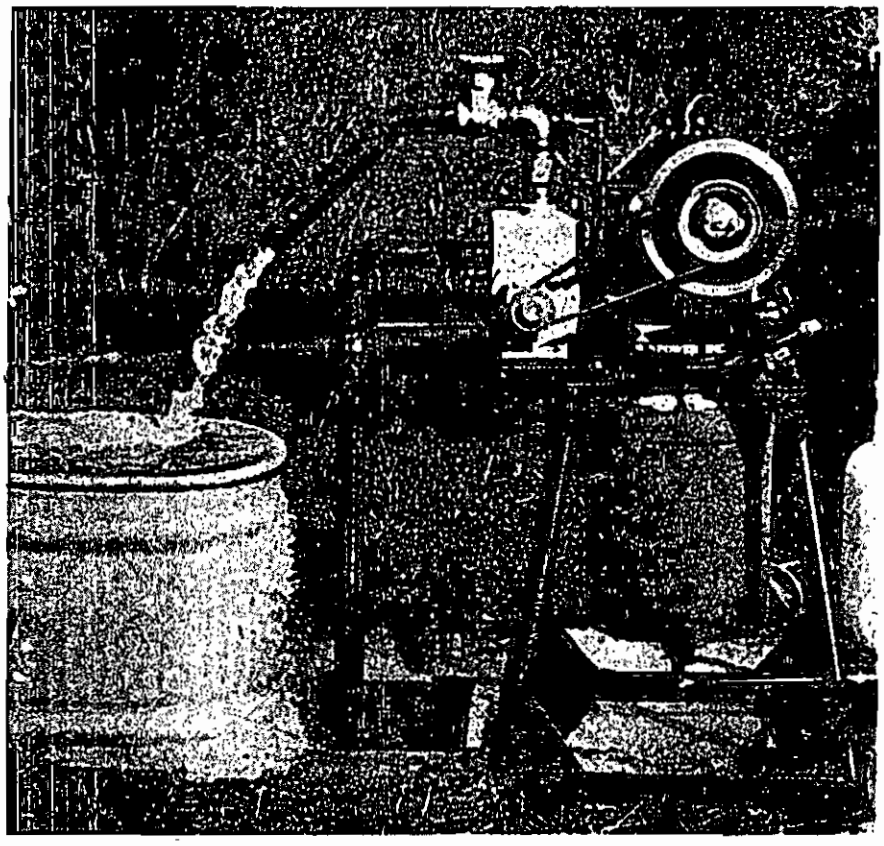


Fig 2 Sunpower's first hot air engine prototype in action pumping water

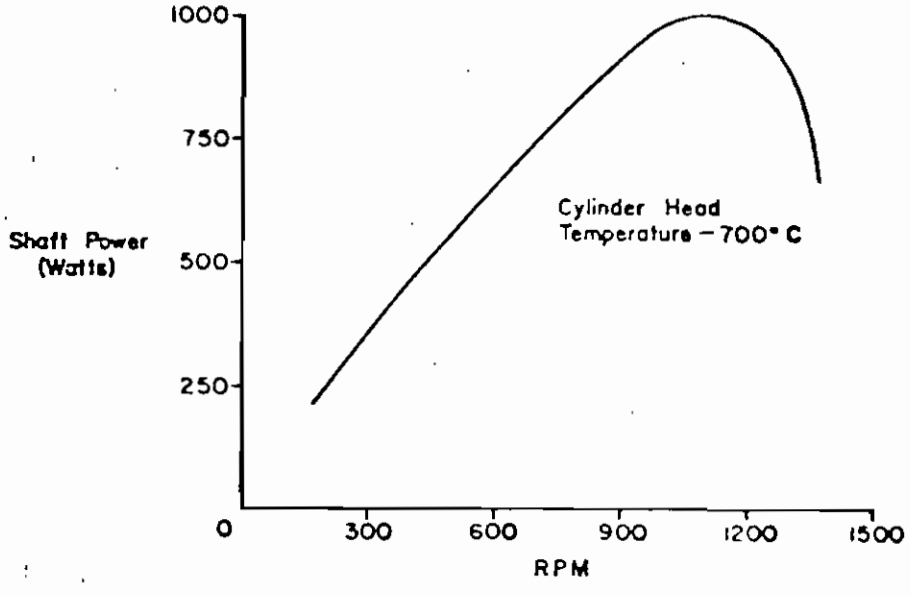


Fig 3 Performance of atmospheric air engine

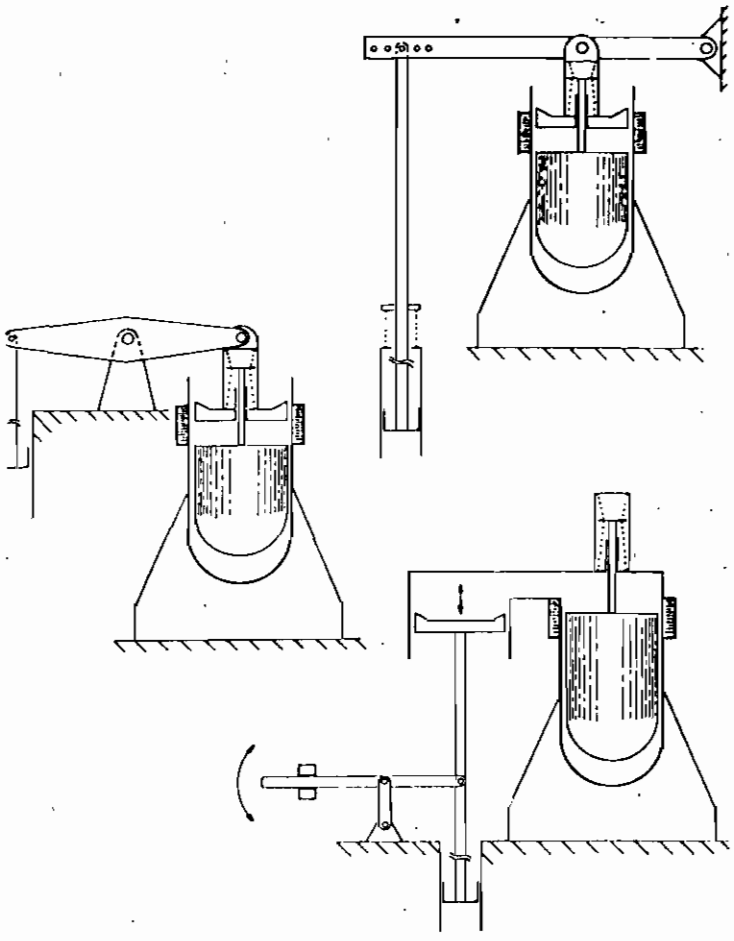


Fig 4 Alternative layouts of water pumping hot air engines to be fuelled by biomass

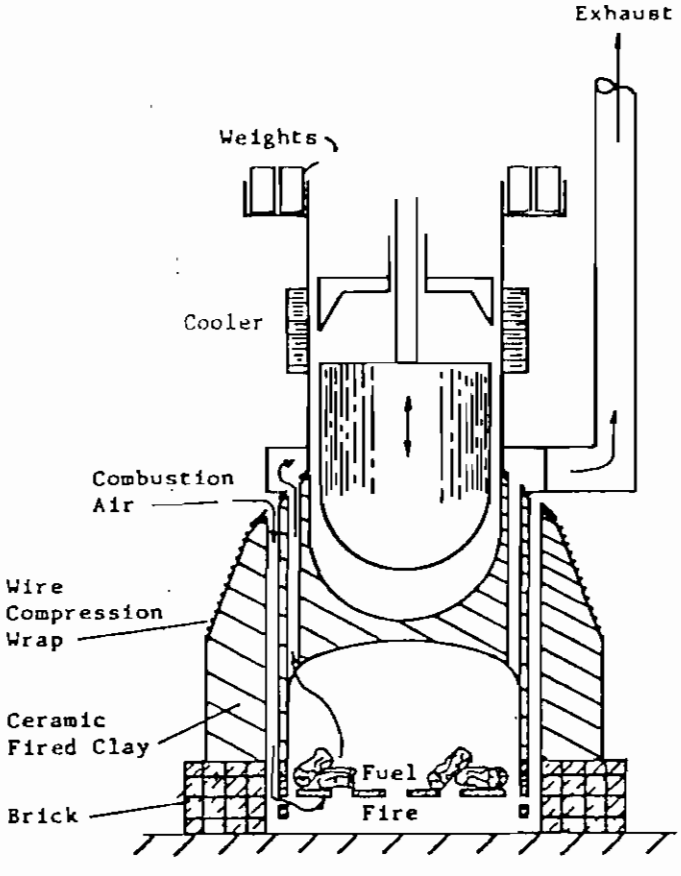


Fig 5 Ceramic firebox and heater head for atmospheric air engines

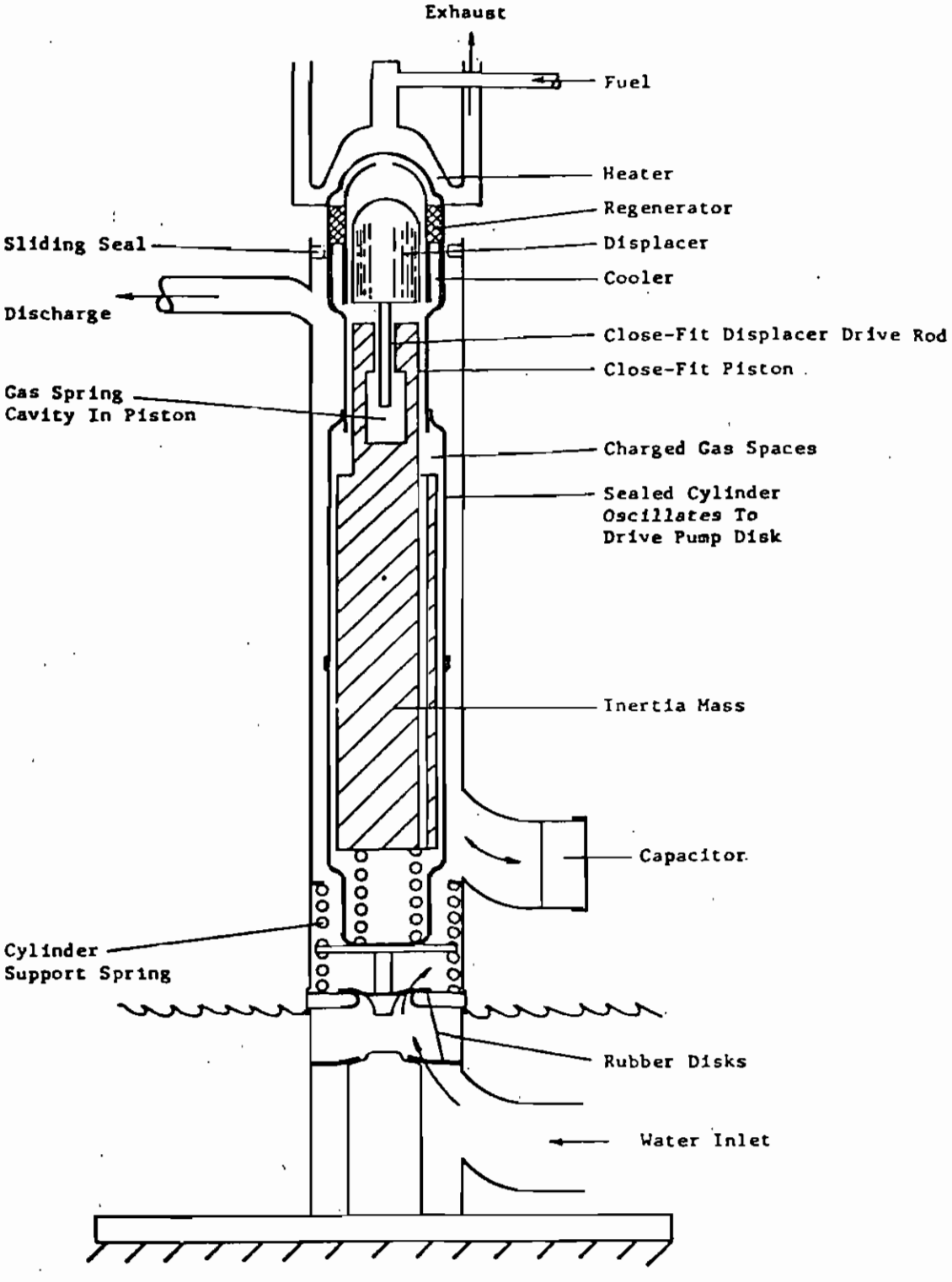


Fig 6 Free cylinder Stirling engine with inductance pump

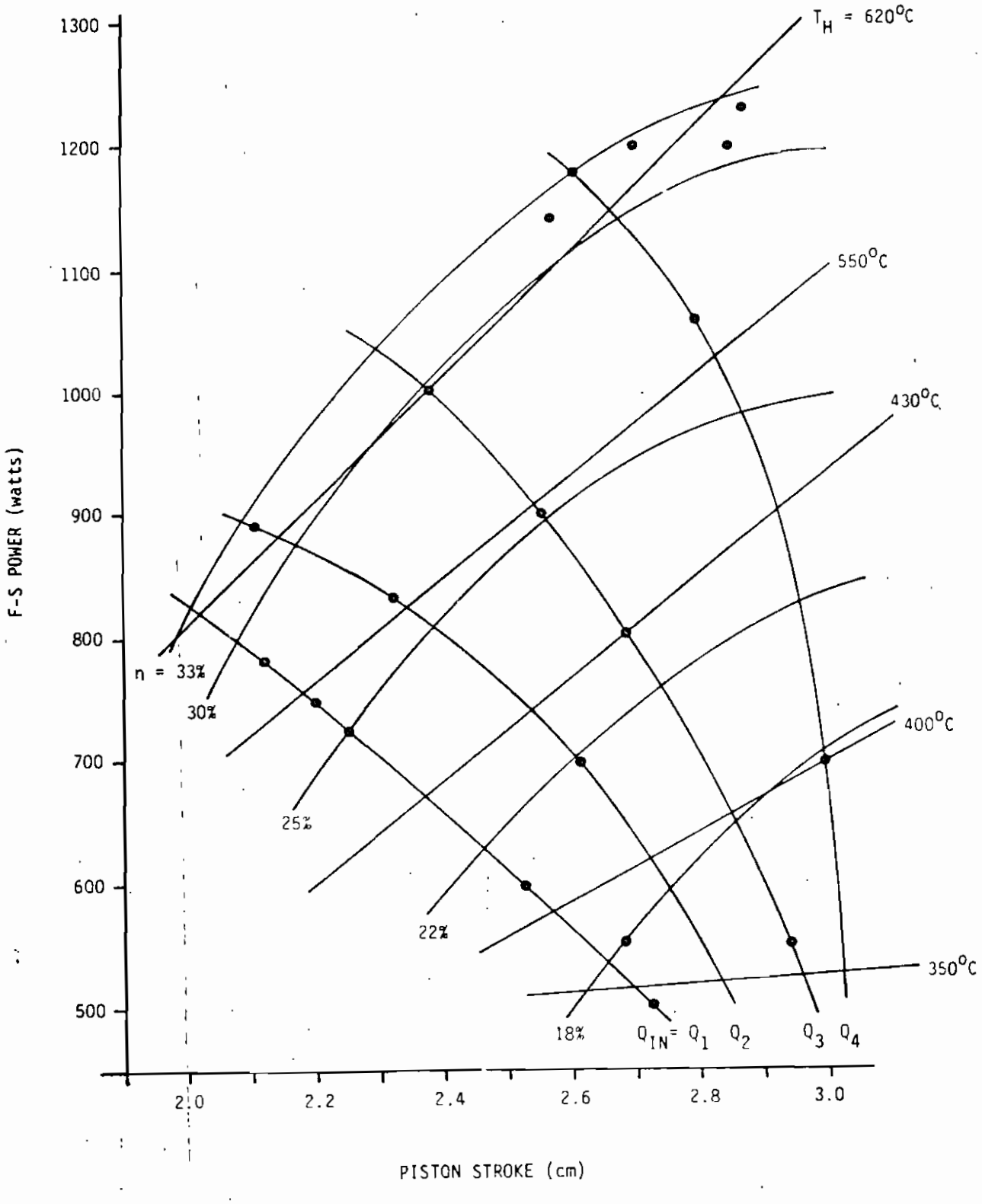


Fig 9 Performance of RE 1000 research engine

STIRLING HEAT ENGINE

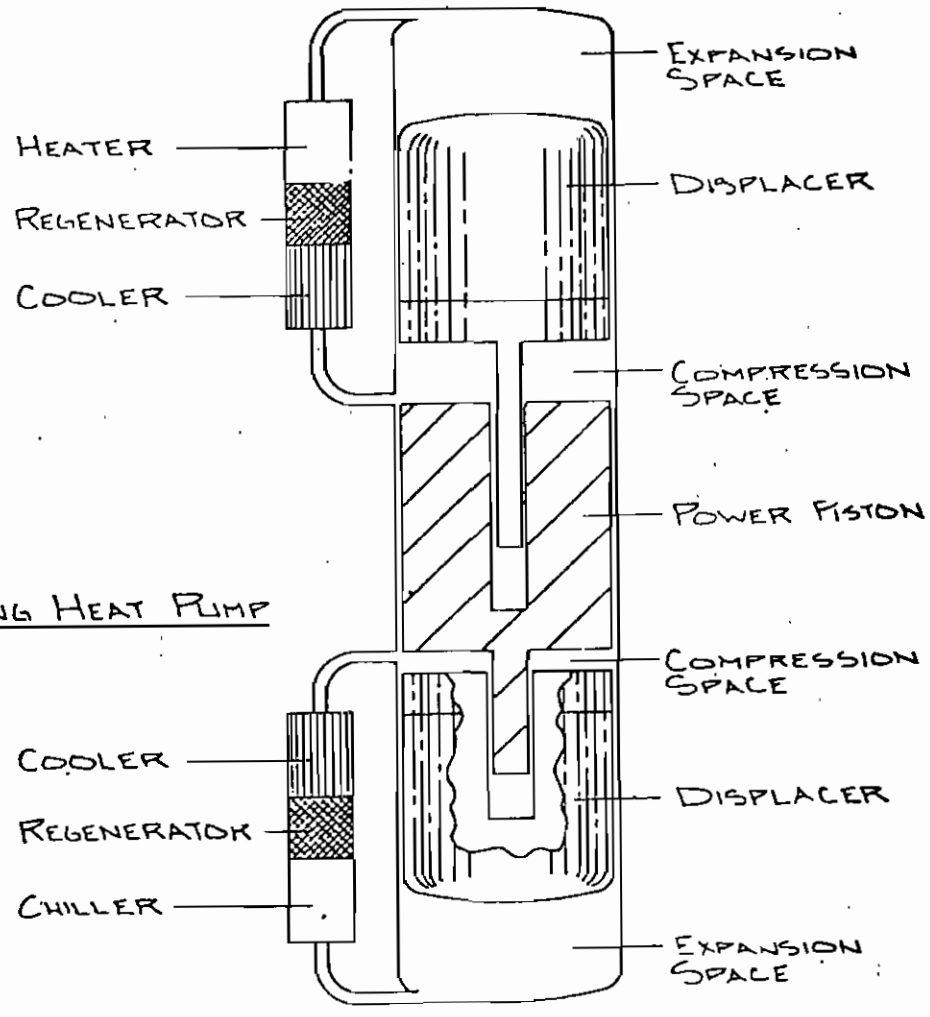
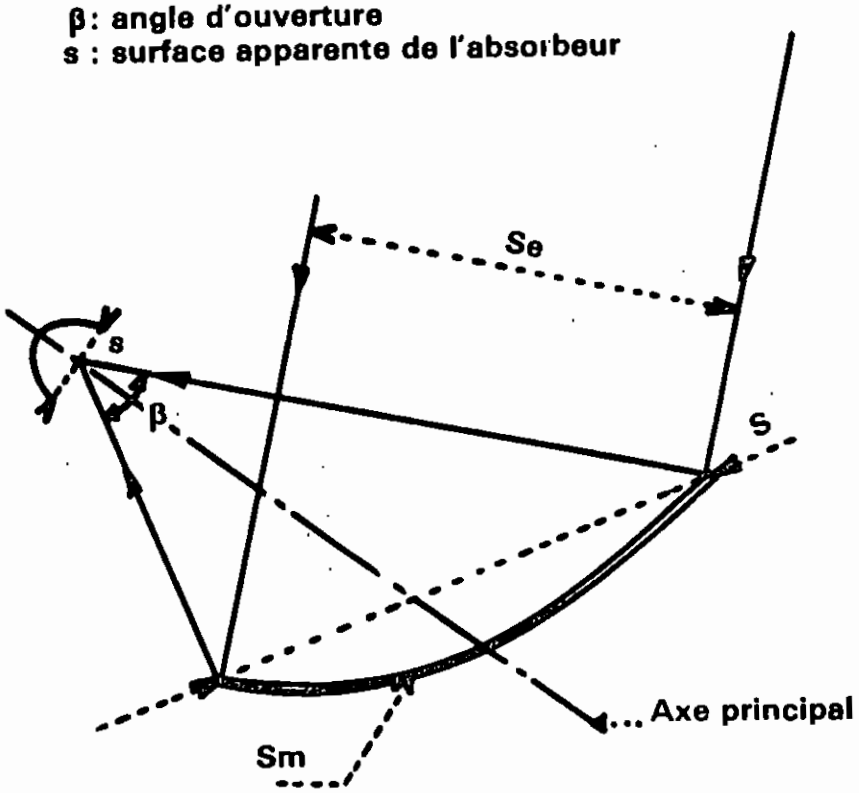


Fig 10 Schematic of duplex Stirling heat driven heat pump

β : angle d'ouverture
s : surface apparente de l'absorbeur

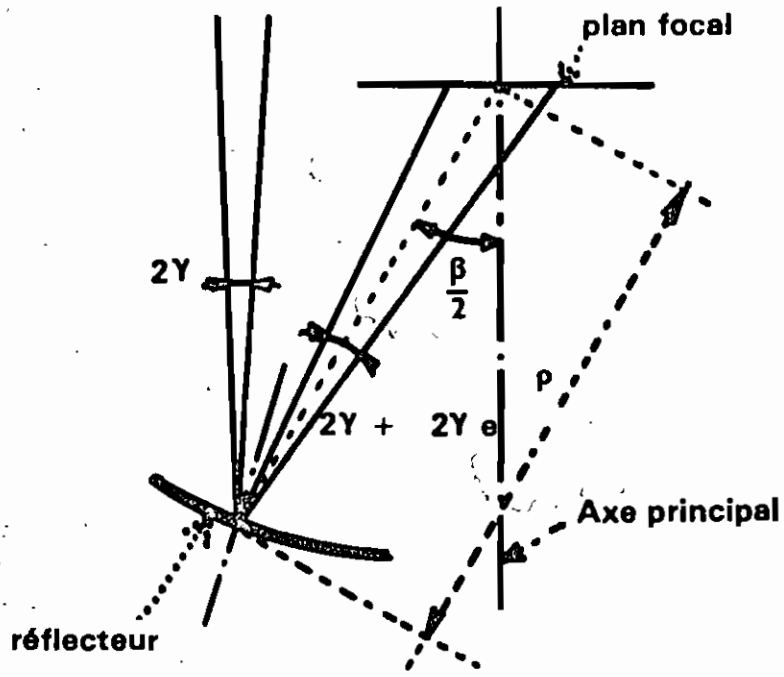


Se : surface efficace
S : surface de captation
Sm : surface de miroirs

1. Définition d'un concentrateur à miroirs

ρ : rayon vecteur

$\frac{\beta}{2}$: demi-angle d'ouverture



2Y : diamètre apparent du soleil
2Y e : erreur angulaire du réflecteur

2. Paramètres géométriques d'un concentrateur

LES VALEURS DE LA DECLINAISON SOLAIRE

	JANVIER	FEVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	OCTOBRE	NOVEMBRE	DECEMBRE
1	-23.01	-17.52	-8.29	4.02	14.90	22.04	23.12	18.17	8.10	-3.82	-15.06	-21.97
2	-22.93	-17.25	-7.91	4.41	15.21	22.17	23.05	17.91	7.72	-4.22	-15.36	-22.11
3	-22.84	-16.97	-7.53	4.81	15.52	22.30	22.97	17.65	7.34	-4.61	-15.67	-22.24
4	-22.75	-16.69	-7.15	5.20	15.82	22.42	22.89	17.38	6.96	-5.01	-15.96	-22.36
5	-22.65	-16.40	-6.76	5.60	16.11	22.54	22.80	17.11	6.57	-5.40	-16.26	-22.48
6	-22.54	-16.11	-6.38	5.99	16.40	22.65	22.70	16.83	6.18	-5.79	-16.55	-22.59
7	-22.42	-15.82	-5.99	6.38	16.69	22.75	22.59	16.55	5.79	-6.18	-16.83	-22.70
8	-22.30	-15.52	-5.60	6.76	16.97	22.84	22.48	16.26	5.40	-6.57	-17.11	-22.80
9	-22.17	-15.21	-5.20	7.15	17.25	22.93	22.36	15.96	5.01	-6.96	-17.38	-22.89
10	-22.04	-14.90	-4.81	7.53	17.52	23.01	22.24	15.67	4.61	-7.34	-17.65	-22.97
11	-21.90	-14.59	-4.41	7.91	17.78	23.09	22.11	15.36	4.22	-7.72	-17.91	-23.05
12	-21.75	-14.27	-4.02	8.29	18.04	23.15	21.97	15.06	3.82	-8.10	-18.17	-23.12
13	-21.60	-13.95	-3.62	8.67	18.30	23.21	21.83	14.74	3.42	-8.48	-18.42	-23.18
14	-21.44	-13.62	-3.22	9.04	18.55	23.27	21.67	14.43	3.02	-8.86	-18.67	-23.24
15	-21.27	-13.29	-2.82	9.41	18.79	23.31	21.52	14.11	2.62	-9.23	-18.91	-23.29
16	-21.10	-12.95	-2.42	9.78	19.03	23.35	21.35	13.78	2.22	-9.60	-19.15	-23.34
17	-20.92	-12.62	-2.02	10.15	19.26	23.39	21.18	13.45	1.81	-9.97	-19.38	-23.37
18	-20.73	-12.27	-1.61	10.51	19.49	23.41	21.01	13.12	1.41	-10.33	-19.60	-23.40
19	-20.54	-11.93	-1.21	10.87	19.71	23.43	20.82	12.79	1.01	-10.69	-19.82	-23.42
20	-20.34	-11.58	-0.81	11.23	19.93	23.44	20.64	12.45	0.61	-11.05	-20.03	-23.44
21	-20.14	-11.23	-0.40	11.58	20.14	23.45	20.44	12.10	0.20	-11.40	-20.24	-23.45
22	-19.93	-10.87	.00	11.93	20.34	23.45	20.24	11.75	-0.20	-11.75	-20.44	-23.45
23	-19.71	-10.51	0.40	12.27	20.54	23.44	20.03	11.40	-0.61	-12.10	-20.64	-23.44
24	-19.49	-10.15	0.81	12.62	20.73	23.42	19.82	11.05	-1.01	-12.45	-20.82	-23.43
25	-19.26	-9.78	1.21	12.95	20.92	23.40	19.60	10.69	-1.41	-12.79	-21.01	-23.41
26	-19.03	-9.41	1.61	13.29	21.10	23.37	19.38	10.33	-1.81	-13.12	-21.18	-23.39
27	-18.79	-9.04	2.02	13.62	21.27	23.34	19.15	9.97	-2.22	-13.45	-21.35	-23.35
28	-18.55	-8.67	2.42	13.95	21.44	23.29	18.91	9.60	-2.62	-13.78	-21.52	-23.31
29	-18.30		2.82	14.27	21.60	23.24	18.67	9.23	-3.02	-14.11	-21.67	-23.27
30	-18.04		3.22	14.59	21.75	23.18	18.42	8.86	-3.42	-14.43	-21.83	-23.21
31	-17.78		3.62		21.90		18.17	8.48		-14.74		-23.15

BIBLIOGRAPHIE

1.Jacques DESAUTEL,*Les capteurs héliothermiques*,PYC-Edition,1979

2.DUFFIE & BECKMAN,*Solar Energy thermal processes*,John Wiley&Sons, 1974

3.*Stirling Engines-progress towards reality*,Institution of mechanical engineers,I Mech 1982

4.*Applications thermiques de l'energie solaire dans le domaine de la recherche et de l'industrie*,CNRS,1958

5.KREITH F.,BLACK W.Z,*Basic heat transfer*,Harper&Row Publishers, New York 1980

6.E.U.CONDON,H.ODISHAW,*Handbook of Physics*,2d edition,Mc Graw-Hill,

7.MILES V.KLEIN, *Optics*,John Wiley & Sons, 1970

8.Encyclopédie de la pléiade,*Astronomie*,Gallimard,1962

9.B.S LO,*Récuperation des déchets ménagers sous forme de combustibles solides en vue d'un usage domestique et industiel*,*Projet de fin d'etudes,Ecole Polytechnique de Thiès*,1986

10.Jacques DESAUTEL,*Le capteur héliothermique pseudo-parabolique à facettes réflechissantes planes,THEK:l'expérience THEK1*,Thèse de docteur-Ingénieur, Université de Provence,juillet 1983

11.E. HUGO,\La sucrerie des cannes,DUNOD,1970