

version 1.0



Il y a près de deux siècles (1816), un pasteur écossais, nommé Robert Stirling, déposait le brevet de son moteur à air chaud.

Détrôné par la machine à vapeur, et les moteurs à combustion interne, il n'eut pas le succès escompté, malgré un bon rendement et la faculté d'utiliser n'importe quel type de carburant.

Mais la plus étonnante de ses caractéristiques est de fonctionner à partir de sources d'énergie considérées comme inexploitable : par exemple les sources thermales qui, bien qu'apportant plusieurs dizaines de milliers de Kcal par heure des profondeurs de la terre, sont parfaitement incapables de faire cuire un oeuf à la coque ou un bol de riz...

Et bien, le moteur Stirling peut, sans problème, extraire l'énergie contenue dans un peu d'eau chaude, comme le montre ce petit bricolage.

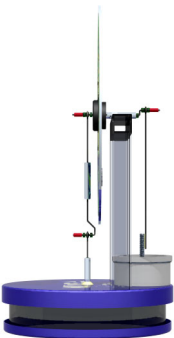
Ce premier modèle, posé sur une tasse d'eau bouillante (attention, ça brûle !) et refroidi par un cube de glace, peut tourner pendant environ 35 minutes. Sa vitesse de rotation varie de 170 t/min, peu après sa mise en route, jusqu'à 25 t/min en fin de fonctionnement. La différence de température entre la face chaude et la face froide est alors d'environ 22°C.



La puissance mécanique développée est très faible, juste suffisante pour compenser les pertes par frottements. Des mesures pratiquées par différentes méthodes, permettent d'estimer à 1 mW la puissance excédentaire fournie par ce dispositif. En admettant que l'on convertisse cette énergie mécanique en énergie électrique, avec un rendement proche de 1, et que l'on puisse la stocker sans perte pendant 1 mois, on pourrait alors alimenter une ampoule électrique basse consommation de 20W pendant 2 minutes... Ou encore, monter un poids d'1 kgf à 240 m de haut (si mes calculs sont bons... 😊)

Description générale

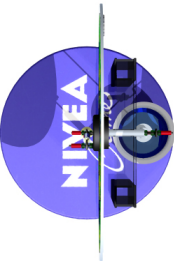
vue de droite



vue de face



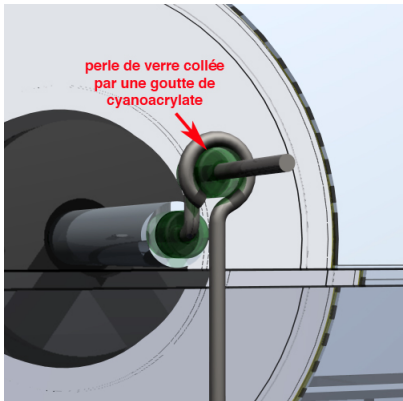
vue de dessus



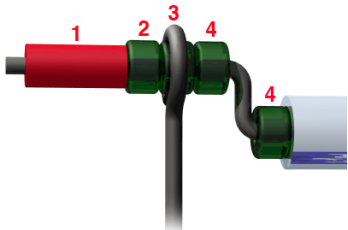
1 - animation
2 - Quicktime VR

Détails

tête de bielle / piston

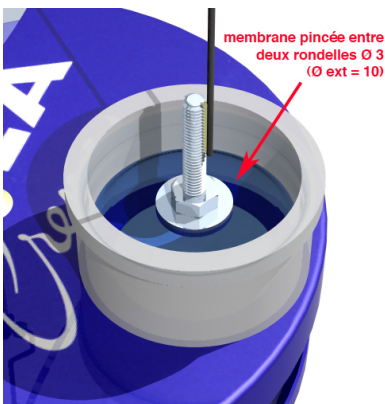


bielle-manivelle / piston

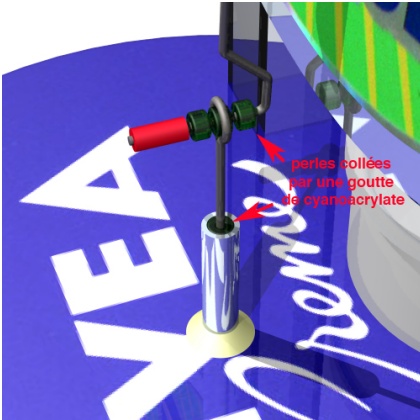


1 gaine de câble électrique
2 perle libre
3 perle collée dans la tête de bielle
4 perles collées sur la manivelle

piston moteur



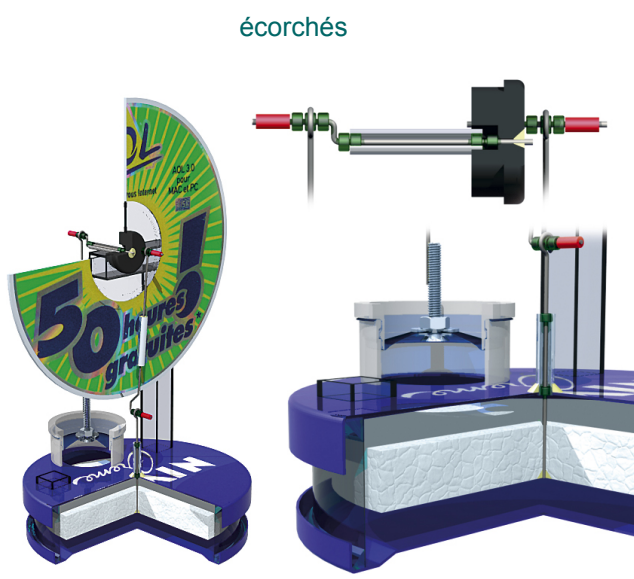
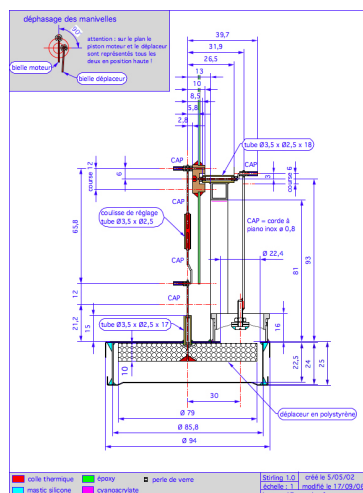
glissière / déplaceur



Matériaux (essentiellement de récupération)

- les plateaux supérieurs et inférieurs proviennent d'une boîte en aluminium Ø 94, dont je tairai la marque 😊 et de laquelle on ne conservera que le couvercle et une partie du fond
- les flancs transparents sont issus d'une bouteilles de soda de 1,5 l dont on aura prélevé une rondelle de 24 mm de haut
- le bac à glaçon (non indispensable) : morceau de tube ou de boîte en alu
- le déplaceur (piston à l'intérieur du cylindre) : morceau de dalle pour plafond en polystyrène expansé (env 10 mm d'épaisseur)
- le cylindre moteur : emballage de pellicule 24 x 36 (translucide)
- le piston moteur : un morceau de gant jetable en vinyle
- le portique : profilé plastique 10 x 10 x 1
- les bielles, axes, vilebrequin : corde à piano Ø 0,8
- les palier, glissière et coulisseau de réglage : tube laiton Ø int 2,5

Plans et écorchés



remarques :

- pour construire ce moteur, vous pouvez vous inspirer de la méthode décrite dans [cette page](#) ou bien dans [celle-ci](#)

- ce petit bricolage ne pose aucun problème particulier, et les dimensions données n'ont rien de critique ; pour des raisons pratiques, longueur des guidages et des paliers, il n'est pas conseillé de réduire la taille de cette maquette ; inversement, vous pouvez augmenter le diamètre du cylindre du déplaceur, ce qui sera tout bénéfique

- il est particulièrement conseillé de bien soigner l'étanchéité pour que ce modèle fonctionne avec de faibles différences de température, et de bien lubrifier les paliers et les guidages avec une huile assez fluide (éventuellement à base de téflon) ; l'huile a en effet une triple fonction : diminuer les frottements, assurer l'étanchéité, et empêcher la corrosion des pièces soumises éventuellement à la condensation

nota :

vous pouvez télécharger les plans 3D de ce moteur modélisés sur VectorWorks et Autodesk Inventor Fusion ainsi qu'un fichier .sat pour Pro Engineer, SolidWorks, etc. en vous rendant sur www.photology.fr

on peut se procurer sur Internet, chez American Stirling Company, [des moteurs terminés ou en kit](#) pour un prix allant de \$119 à \$429

venant du Japon, il y a aussi le [kit Otona no kagaku - Sciences & Vie](#) qui ressemble beaucoup au moteur [Stirling simplifié 1.1](#) et que l'on trouve depuis 2006 un peu partout sur le net pour environ 40 euros port compris

version 1.1

Améliorations par rapport à la version 1.0

Quicktime VR

1 - légère augmentation de la cylindrée obtenue en remplaçant la partie inférieure (emboutie) du boîtier d'origine par un disque plat en alu ep 0,5

2 - remplacement du déplaceur en polystyrène expansé par un déplaceur-régénérateur en Scotch Brite d'épaisseur 11 mm et utilisation d'un coulisseau en corde à piano inox

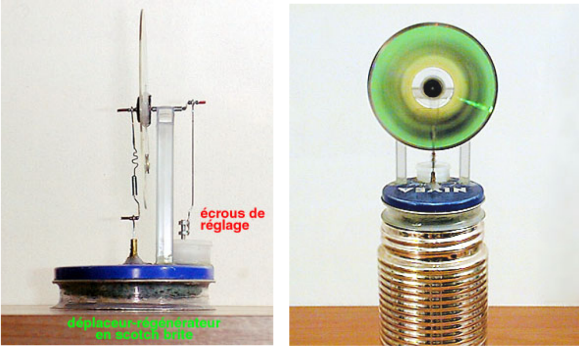
Ce déplaceur, comme le précédent, est simplement collé à la colle thermique qui, dans ce cas, résiste bien au fonctionnement répété du moteur sur une tasse d'eau bouillante - inconvénients : la tendance qu'a le Scotch Brite à s'effiloche légèrement après quelques heures de fonctionnement à "haute vitesse" - pour y remédier, on prendra la précaution d'enduire la périphérie d'une légère couche de colle néoprène transparente (les quelques fibres qui se détachent des faces supérieures et inférieures ne semblent pas être très gênantes - peut-être jouent-elles le rôle de ressorts ?)

500 t/min

3 - augmentation du diamètre des rondelles du piston moteur qui passe à 20 mm, et emploi d'une membrane thermoformée - voir FAQ (éventuellement interposition d'un joint torique d'étanchéité entre les deux rondelles)

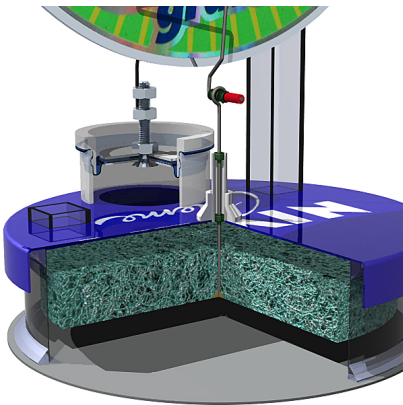
4 - adoption d'un système de réglage en longueur sur la bielle du piston moteur : cet accouplement par deux écrous soudés à l'étain permet d'équilibrer la course de la bielle par rapport au débattement de la membrane (le débattement de la membrane doit être > de 2 mm à celui de la bielle moteur)

5 - résultats : un gain en performances assez sensible, puisque la durée de fonctionnement passe de 35 min à 2 h 1/2 sur une tasse d'eau bouillante et à plus de 14 heures sur une bouteille Thermos de 0,85 litres (à droite) - la vitesse de rotation maxi passe de 170 t/min à 540 t/min - le gradient de température minimal descend de 22°C à environ 10°C - la puissance mécanique développée fait un bond "spectaculaire" 😊 puisqu'elle saute d'1 mW à environ 7 mW !

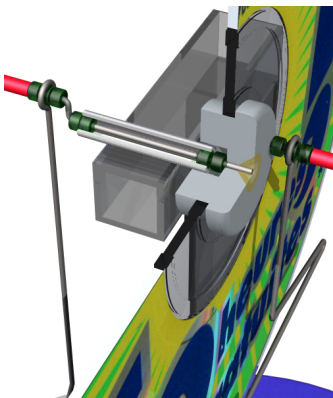


Écorchés

déplaceur et piston moteur



palier CD

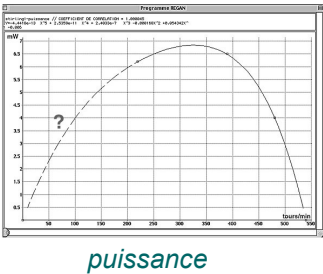
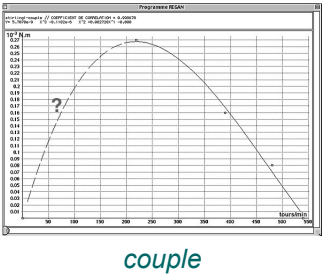
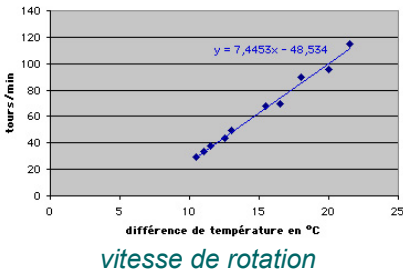


1 - animation
2 - Quicktime VR

remarque : le modèle est équipé ici de la bielle zigzag apparue, un peu plus tard, sur les moteurs 1.2 et 3.2

Mesures

ci-dessous quelques courbes montrant la vitesse de rotation en fonction de la différence de température, le couple et la puissance disponibles (manquant de relevés pour ces deux dernières, la zone entre 0 et 200 t/min est incertaine et pourrait avoir une allure sensiblement différente...)



Vidéo (cliquer sur l'image pour visionner la vidéo)

posé sur une tasse d'eau bouillante et avec deux glaçons sur le plateau supérieur, le moteur a dépassé facilement les 620 tr/min !

Pour arriver à un tel niveau de performances 😊, il a fallu d'abord remplacer le plateau inférieur de 0,5 mm, un peu trop souple, par un disque d'aluminium de 2 mm d'épaisseur. Ensuite, vous remarquerez sur la vidéo un petit disque rouge à côté du piston moteur : il s'agit d'une soupape de décharge **(1)**. Son rôle est d'éviter que la pression interne ne dépasse la pression atmosphérique. En effet, lorsque l'on place le moteur sur une source de chaleur, il en résulte une augmentation de pression qui, dans cette configuration, est néfaste au rendement. La soupape de décharge stabilise la pression moyenne du moteur à quelques gf/cm² en dessous de la pression atmosphérique et cela permet un fonctionnement plus équilibré de la membrane . L'installation de cette soupape permet de gagner environ 50 tr/min.



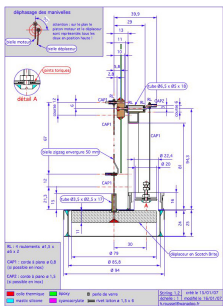
cette vidéo étant cadencée à 15 images/sec, l'analyse image par image montre que la vitesse de rotation est de l'ordre de 600 tr/min au début de la séquence, 590 tr/min pour les gros plans, et 575 tr/min lors du travelling de fin - sens de rotation horaire quand les glaçons sont au premier plan

(1) la soupape de décharge est constituée d'un rivet tubulaire percé sur lequel est collé un disque de caoutchouc découpé dans un ballon de baudruche - le disque n'est collé que sur la moitié de sa périphérie afin de lui permettre de se soulever sous l'effet de la pression et de laisser l'air s'échapper - voir les modèles [1.2](#) , [3.5](#) , [3.6](#) , [3.7](#) , [Otona no Kagaku](#), et les [FAQ](#)

version 1.2

... ou comment produire de l'électricité et de la lumière à partir d'une tasse d'eau chaude...

Modifications apportées à la version 1.1



les principaux changements consistent en l'utilisation de roulements à billes miniatures montés sur un axe en corde à piano Ø 1,5 mm, la fixation de 4 aimants permanents à la périphérie du volant, le montage de 4 bobines destinées à alimenter en énergie électrique 2 LED à faible courant.

Fournitures complémentaires

- 4 roulements (à collerette) Ø 1.5 x Ø 5 (x Ø 6,5) que l'on peut commander chez [SORB](#) réf. : (F)691X
- 4 aimants cubiques de 5 mm au Néodyme disponibles chez [Supermagnete](#) sous la référence W-05-G

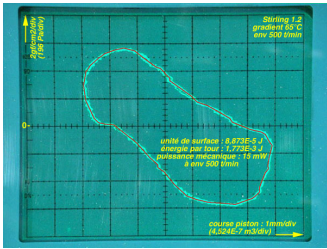


axe du volant en corde à piano
Ø 1,5 mm

environ 350 t/min
(animation Flash - en réalité les LED sont
plus lumineuses...)

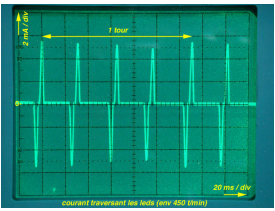
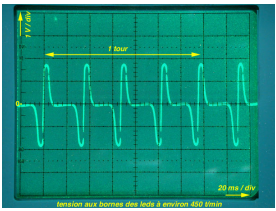
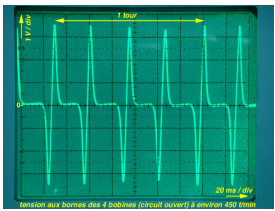
- 4 bobines à air provenant de relais 12 V pour automobiles dont on aura retiré le noyau (fil de cuivre émaillé Ø 0.2 mm, L=27 mH, R =74 ohms)
- 2 LED à faible courant (2 mA) trouvées chez [Conrad](#) sous la réf. 18 69 02-33 (LED Low-Current Ø 5 mm)

Principe



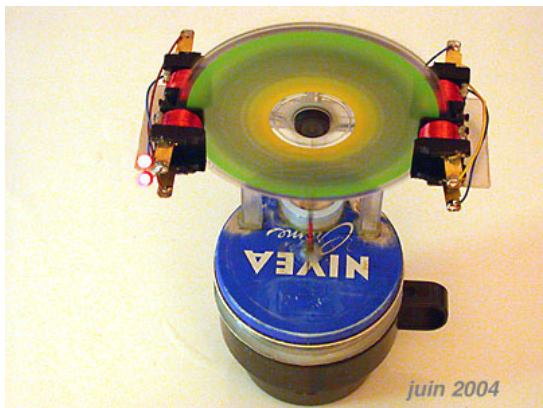
le principe est celui de la "dynamo" de vélo, qui porte mal son nom, puisqu'il s'agit en fait d'un petit alternateur : chaque fois que l'un des aimants s'approche des bobines, il y génère une force électromotrice - lorsque l'aimant s'éloigne, il crée une force électromotrice de sens inverse - (voir aussi la [version 3.7](#))

L'adaptation a été assez facile à réaliser sur ce modèle, car il combine à la fois une puissance et une vitesse de rotation suffisantes pour alimenter une ou deux LED : 15 mW à environ 500 t/min sur une tasse d'eau bouillante - (puissance mécanique convertie à laquelle il faut retrancher les pertes dues aux frottements - diagramme p, V à gauche).



Pour utiliser les deux alternances du courant, les LED sont montées tête-bêche : l'une s'allume quand la tension est positive et l'autre quand elle devient négative, la persistance rétinienne faisant le reste... En pratique les LED commencent à rayonner à partir de 250 t/min, soit une vitesse linéaire de 1.5 m/s, et produisent le maximum de lumière un peu au-delà de 500 t/min. Sur une tasse d'eau chaude, elles brillent durant une trentaine de minutes.

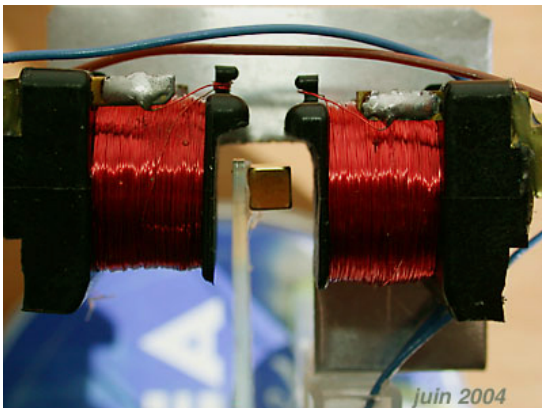
Quelques mauvaises images de cette évolution du moteur Stirling simplifié



moteur en rotation : la lumière émise par les LED apparaît en blanc rosé sur cette photo surexposée...



les 4 bobines sont montées en série afin d'obtenir une tension aussi élevée que possible

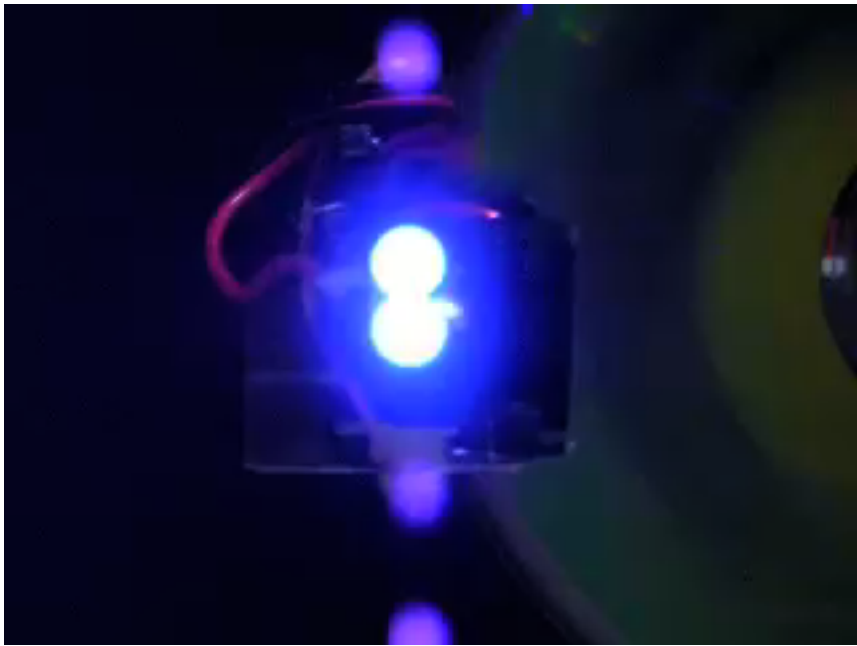


gros plan sur un aimant au moment où il passe entre les bobines

Vidéo (cliquer sur l'image pour visionner la vidéo)

il s'agit ici d'une version équipée d'un plateau inférieur ep 2 mm, d'un axe Ø 2 mm et d'une soupape de décharge (voir les modèles [1.1](#) , [3.5](#) , [3.6](#) , [Otona no Kagaku](#) , et les [FAQ](#))
les LED rouges sont remplacées par des LED blanches (1) produisant une lumière plus agréable, par exemple, pour lire son journal (2)...

posé sur une tasse d'eau bouillante et avec deux glaçons sur le plateau supérieur,
il tourne à environ 500 tr/min et produit une puissance électrique de l'ordre de 30 mW



les vibrations visibles sur cette vidéo sont probablement dues à l'interaction des aimants avec les bobines et à un équilibrage approximatif
elles sont amplifiées par l'empilement des différents éléments : plateau tournant + tasse d'eau chaude + moteur Stirling, et par le déplacement du centre de gravité vers le haut (bobines)

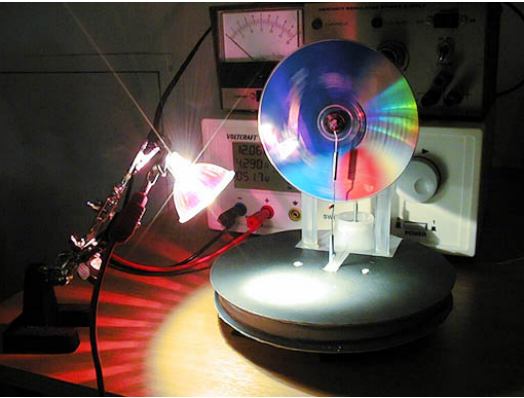
séquence cadencée à 30 images/sec
(d'autres moteurs Stirling en version générateur de courant : [3.7](#) , [Otona no Kagaku](#) , [JAXA](#))

(1) LED rouges ou blanches ?... la réponse est dans les [FAQ](#)

(2) l'éclairement produit est de 1,5 lux, réparti à peu près uniformément sur toute la surface du journal, ce qui correspond à 10 fois celui de la pleine lune au zénith

version 3.1

nota : de même conception ultra simple que le précédent, ce moteur Stirling, grâce à son diamètre de cylindre un peu plus important, peut tourner facilement à partir de sources de chaleur modérées comme par exemple [celle de la main](#), ou celle produite par le rayonnement d'une petite lampe halogène, et bien entendu sous [le rayonnement solaire](#).



Sur l'image de gauche, on le voit tourner éclairé par une lampe halogène de 50W (12V) à environ 60 t/min. Pour cela, le moteur est équipé d'un capteur solaire très rudimentaire, constitué d'une simple feuille d'aluminium d'épaisseur 0,6 mm, découpée à la forme et peinte en noir mat.



Sur l'image de droite, en plein soleil (55.000 lux), équipé du même capteur, il tourne à 85 t/min - (dans les même conditions d'éclairement, une [version plus récente](#) tourne à présent à 170 t/min et en produisant de l'électricité...)

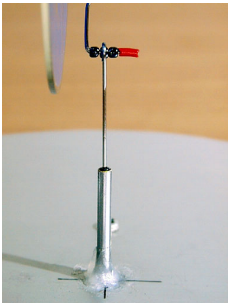
Bien que sa fabrication ne pose pas de problèmes particuliers, elle demande tout de même un peu plus de précision que pour le modèle précédent, en particulier pour tout ce qui concerne la géométrie (parallélisme, perpendicularité, etc.). S'il s'agit de votre première réalisation, je vous conseille plutôt de commencer par vous faire la main sur [le modèle simplifié](#).

Description

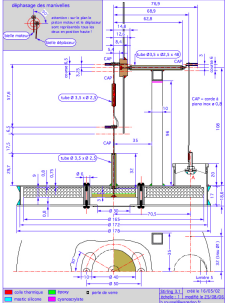
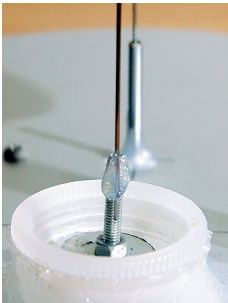
vue d'ensemble



coulisseau et glissière



cylindre et piston moteurs



Matériaux

- cylindre : fonds tôle d'aluminium ep 0,8, flanc Rhodoïd ep 0,5
- entretoises : tige cylindrique Ø 6 en matière plastique, Nylon ou Delrin (marque sous laquelle DuPont commercialise de la résine acétale)
- déplaceur (piston à l'intérieur du cylindre) : morceau de dalle pour plafond en polystyrène expansé (env. 9 mm d'épaisseur), contreplaqué ep 3
- cylindre moteur : emballage de pellicule 24 x 36 (translucide)
- membrane du piston moteur : morceau de gant jetable en vinyle (éventuellement thermoformé en demi-tore)
- portique : profilé plastique 10 x10 x 1
- bielles, axes, vilebrequin : corde à piano Ø 0,8
- palier, glissière et coulisse de réglage : tube laiton Ø int 2,5
- divers : visserie, rondelles, perles de verre Ø ext env. 2,3 - Ø int env. 0,9 // colle cyanoacrylate, colle thermique, colle néoprène, mastic silicone
- volant d'inertie : un CD bien coloré, c'est plus joli...😊

Construction de la structure principale

- 1 - sur une feuille d'aluminium d'épaisseur 0,8 mm, commencez par tracer le contour du plateau supérieur (a). Puis tracez un axe central (b), et à partir de là, les axes des trous de fixation des entretoises (c), le contour du cylindre moteur et sa découpe en demi-lune (d), et enfin la position des pieds du portique (e).
- 2 - à l'aide d'une cisaille découpez le contour du plateau, puis percez tous les trous. La demi-lune pourra être facilement découpée avec une fraise scie de quelques mm de Ø (modélisme), sinon, percez plusieurs trous tangents, que vous ouvrirez avec une petite lime ou une petite fraise cylindrique.
- 3 - dans du tube laiton de Ø 2,5 mm intérieur, coupez un morceau de 32 mm (f).
- 4 - avec une goutte de colle Cyanoacrylate collez à chaque extrémité une perle de verre, qui sera choisie présentant un jeu de 0,1 mm maximum par rapport au diamètre de la corde à piano Ø 0,8 mm.
- 5 - collez à l'époxy le tube ainsi préparé au centre du plateau, en vérifiant qu'il est parfaitement perpendiculaire.
- 6 - après avoir coupé, à 20 mm en partant du haut du bouchon, un emballage de pellicule 24 x 36 (h), le collez en place sur le plateau, soit avec du mastic au silicone appliqué assez largement, soit, ce qui est mieux, avec de la colle cyanoacrylate "Super Plastic" de Loctite qui semble adhérer assez bien sur le polypropylène (à condition, toutefois, de le dépolir à la toile abrasive - sur ses modèles, N. Vivet utilise avec succès de l'Ara métal.
- 7 - découpez les éléments du portique (e) dans un profilé plastique de 10 x 10 x 1, et assemblez les à plat à la colle cyanoacrylate. Puis quelques minutes plus tard, lorsqu'il est suffisamment rigide, le coller en place sur le plateau avec de la colle époxy, en contrôlant l'équerrage.
- 8 - coupez un morceau de 48 mm dans du tube laiton de Ø 2,5 mm intérieur (i).
- 9 - avec une goutte de colle Cyanoacrylate collez à chaque extrémité une perle de verre, sélectionnée pour présenter un jeu de 0,1 mm maxi par rapport au diamètre de la corde à piano (Ø 0,8 mm).
- 10 - collez à la colle thermique le tube ainsi préparé au centre de la potence, en vérifiant qu'il est bien centré, bien horizontal et correctement aligné.
- 11 - tracez puis découpez dans une feuille de Rhodoïd ep 0,5 mm, une bande de 17 mm de large par 560 mm de long (k). Raccordez les deux extrémités avec du mastic silicone en les faisant se chevaucher de 20 mm. Laissez polymériser plusieurs heures en maintenant le joint serré par une pince à linge...😊
- 12 - une fois le joint solidifié collez la bande en place sous le plateau, à l'aide d'un cordon continu de mastic silicone lissé avec le doigt mouillé (ou la classique tranche de pomme de terre !...)

Fabrication du déplaceur

- 1 - dans un morceau de dalle pour plafond en polystyrène expansé de 9 mm d'épaisseur découpez avec un fil chaud un disque de Ø 165 mm (n)
- 2 - dans du contreplaqué ep 3 mm, découpez un disque de Ø 40 mm (o).
- 3 - évidez l'emplacement correspondant dans une des faces du disque de polystyrène, et dans l'autre, faire un

petit creux cylindrique pour laisser la place à l'extrémité du tube de guidage (Ø 5 mm x 3 mm par exemple).
4 - collez en place le disque de contreplaqué avec de la colle époxy
5 - découpez à chaud (par exemple avec le nez d'un pistolet à colle thermique) les deux lumières (p) permettant le passage des entretoises, en vous guidant sur le bord du disque en contreplaqué.

Fabrication du plateau inférieur

Tracez et découpez dans une feuille d'aluminium ep 0,8 mm le fond du cylindre (q), sans oublier la petite trappe de visite (r) qui vous permettra d'intervenir par la suite sur la fixation du coulisseau (et éventuellement son remplacement)

Fabrication du volant d'inertie

Rien de particulier à signaler, sinon qu'il faut trouver ou fabriquer une pièce en plastique (s) rentrant sans jeu dans le CD (t), et la coller à la colle thermique. Percez ensuite un trou de 1 mm bien au centre, et un deuxième, à 3,25 mm du premier, destiné à recevoir l'axe où viendra s'accrocher la bielle du déplaceur.

Fabrication des axes, bielles et coulisseau

Rien de particulier non plus, sinon que ces éléments sont façonnés à partir de corde à piano Ø 0,8 mm qu'il conviendra éventuellement de redresser, si, comme moi, vous l'avez achetée conditionnée en rouleau.

Fabrication de la membrane

Dans un premier temps, elle sera simplement découpée dans la partie la plus fine d'un gant jetable en vinyle (u) , et pincée entre deux rondelles Ø 16 mm par un petit boulon de Ø 3 mm. Plus tard, si vous voulez améliorer un peu le rendement de votre moteur, vous pourrez assez simplement réaliser une membrane thermoformée - voir FAQ - qui aura un peu l'allure de deux demi-tores concentriques (voir à la page suivante).

Assemblage du coulisseau et du déplaceur

(pour vous faciliter le futur équilibrage, vous pouvez, avant de les assembler, peser l'ensemble coulisseau/déplaceur sur un pèse-lettre mécanique, ou mieux digital, donnant le 1/10 de g notez le poids de l'ensemble, et pendant que vous y êtes pesez aussi la membrane avec sa vis et les rondelles)

Déposez (important) une couche d'huile fine sur toute la longueur du coulisseau (v), sauf sur le dernier centimètre qui est destiné à être collé dans le disque en contreplaqué (o). Introduire le coulisseau dans la glissière (f) depuis l'extérieur de façon à ce qu'il dépasse d'environ 2 cm dans le cylindre, puis enfoncez le déplaceur sur le coulisseau jusqu'à ce qu'il vienne en appui sur le fond. Reculez un peu le coulisseau pour qu'il affleure la face supérieure du déplaceur. Centrez bien les entretoises au centre des lumières, et orientez la bille de verre selon l'axe principal. Quand tout est aligné, immobilisez à la colle thermique, laissez refroidir complètement et vérifiez que le tout se déplace librement - voir aussi l'assemblage par rivet de la version 3.4

Fermeture du cylindre

Vous pouvez à présent fermer le cylindre. Vissez la plaque inférieure (q) sur les deux entretoises, puis collez-la avec du mastic au silicone. Lissez et laissez polymériser. (ne collez la trappe de visite (r) qu'en tout dernier lieu, quand vous aurez effectué tous les réglages)

Derniers assemblages et réglages

- 1** - collez à la colle thermique le CD (t) sur son axe, en tenant compte du déphasage de 90° entre la manivelle du déplaceur et celle du piston moteur. Au cours du refroidissement, vérifiez que le CD tourne rond. Tant que la colle n'est pas complètement froide, vous pouvez encore parfaire son alignement.
- 2** - assemblez la bielle du déplaceur (w) et réglez la pour avoir 5/10 mm de jeu au point mort haut et au point mort bas. Fixez-la sur les axes avec un petit morceau de gaine électrique.
- 3** - pincez la membrane (u) entre le couvercle évidé de la boîte de pellicule (h) et le corps du boîtier de façon à laisser un débattement de 1 à 2 mm supérieur à la course de la manivelle. Passer la bielle moteur (x) sur la manivelle et collez-la à la colle thermique sur la vis (y) passant au centre de la membrane. Fixez la bielle avec un petit morceau de gaine électrique.
- 4** - collez la trappe de visite (r) avec de la colle néoprène, de façon à pouvoir la démonter en cas de besoin. Laissez sécher complètement en ne touchant plus au moteur !
- 5** - assurez l'étanchéité au niveau des 4 vis qui fixent les entretoises (m) en laissant s'infiltrer une goutte de colle cyanoacrylate (liquide) entre la la tête de vis et la surface du plateau
- 6** - déposez une dernière goutte d'huile à l'endroit où le coulisseau (v) pénètre dans la glissière (f)

Équilibrage statique

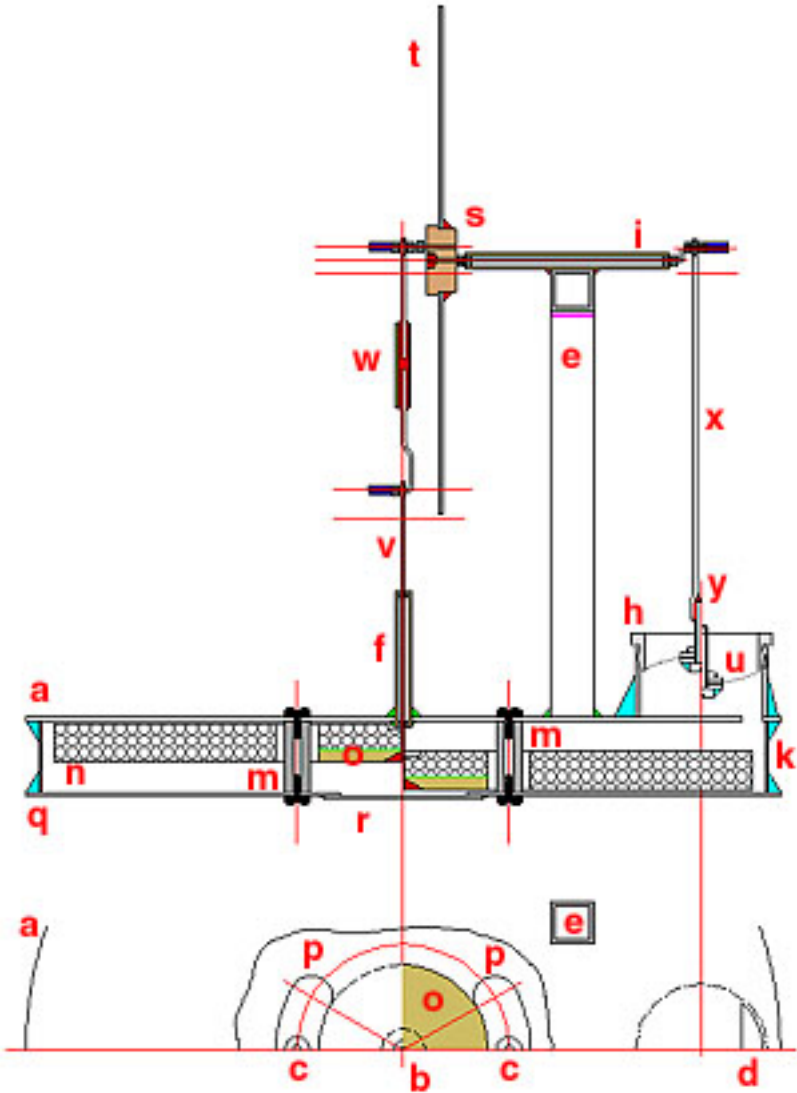
Si vous avez pesé les différents éléments avant de les assembler, il suffit par exemple pour équilibrer statiquement le déplaceur de faire le total de tout ce qui est suspendu à l'axe de la manivelle, et, en faisant ensuite le rapport des bras de levier vous calculerez facilement le poids (et la distance) de la masse d'équilibrage qui sera naturellement placée à l'opposé de l'axe de la manivelle - voir FAQ -

Plus simplement, le moment dû à la masselotte d'équilibrage doit avoir la même valeur, et être de sens opposé à celui dû au poids de l'équipage mobile du déplaceur. Par exemple : si le déplaceur + le coulisseau + la bielle pèsent 10 g, si la manivelle a un débattement total de 7 mm, et si l'on veut utiliser une masselotte de 1 g, on la placera à 10 * 3,5 / 1 = 35 mm de l'axe du CD.

Et vous n'aurez plus qu'à faire la même chose du côté de la bielle et du piston moteur.

Vidéo (cliquer sur l'image pour visionner la vidéo)

sur cette vidéo, il s'agit en fait de la version 3.6 équipé du capteur solaire en aluminium peint en noir et de la soupape de décharge des modèles 1.1 , 1.2 , 3.5, Otona no Kagaku, et les FAQ - ce moteur tourne ici à 214 tr/min sous un éclairement d'environ 60.000 lux



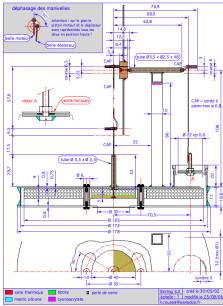


séquence cadencée à 15 images/sec - sens de rotation antihoraire lorsque le moteur se présente comme ceci

en complément, vous pouvez également consulter [la notice de montage pour moteur Stirling LTD](#)

version 3.2

Améliorations par rapport à la version 3.1



Sans toucher à la structure et en modifiant seulement quelques éléments, il est possible d'améliorer sensiblement le rendement de ce petit moteur, le seuil de fonctionnement passant alors d'un gradient de température de moins de 10°C, à un gradient inférieur à 6°C.

Cela représente une amélioration du rendement de 60% environ et ça lui permet à présent de tourner à température ambiante pendant près d'une heure, alimenté en énergie par seulement 4 cubes de glace. Presque aussi bien que les modèle N-92 et P-19 construit par le [Docteur Senft](#) pour la NASA...😊 - (extraits du livre "An Introduction to Low Temperature Differential Stirling Engine", par James R. Senft, 1996, Moriya Press - disponible en principe sur [amazon.com](#))



liste des modifications

- 1 - augmentation de la dimension des rondelles du piston moteur, dont le diamètre est porté à 22 mm. Comme c'est loin d'être standard, elles seront découpées dans une feuille d'aluminium ep 0,6 mm
- 2 - parallèlement, l'utilisation d'une membrane thermoformée - [voir FAQ](#) - évitera sensiblement la formation de plis, et par là même, les frottements à ce niveau. On se rapprochera alors des performances d'un piston rigide, mais sans les problèmes liés à la fabrication.
- 3 - l'étanchéité entre la membrane et les rondelles sera assurée par deux joints toriques concentriques de section Ø 1 mm ([détails sur le plan ci-dessus](#))
- 4 - l'étanchéité générale sera particulièrement soignée, et le corps du cylindre moteur en polypropylène sera fixé à la colle cyanoacrylate "Super Plastic" (pour ses modèles, N. Vivet utilise avec succès de l'Ara métal - voir [www.photology.fr](#)). Il est possible qu'il soit alors nécessaire d'adjoindre un trou de décompression Ø1 mm afin de stabiliser la pression au démarrage. En fonctionnement, ce trou sera obturé par un morceau de ruban adhésif collé à plat.
- 5 - accessoirement, la biellette réglable du déplaceur pourra être remplacée par une biellette élastique, ce qui permettra, en théorie d'augmenter la course jusqu'au contact avec les plateaux supérieurs et inférieurs. Mais surtout, cela présente l'avantage d'absorber les petites dilatations de la structure, lors par exemple du passage d'une source chaude à une source froide, ou de l'exposition au soleil. Pour le fonctionnement avec des glaçons, il est préférable de monter un coulisseau en corde à piano inox (problèmes de corrosion due à la condensation interne).

membranes thermoformées (2)



piston moteur (1,2,4)



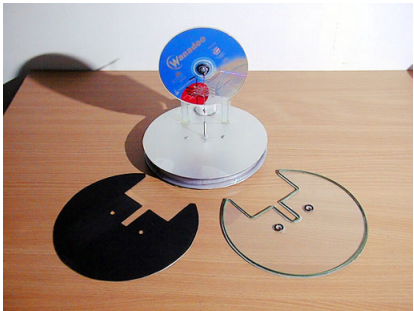
biellette (5)



6 - dans l'optique d'une utilisation solaire, on pourra compléter le capteur (feuille d'aluminium peinte en noire) par une plaque de plastique transparent. Les matières plastiques étant en général, et contrairement au verre, transparentes dans l'infrarouge, je ne pense pas que l'on ait un effet de serre très marqué. Cependant, en surélevant cette plaque de 3 à 4 mm par un joint d'étanchéité périphérique, on crée une couche d'air intermédiaire qui joue le rôle d'isolant .

J'ai pu constater que ce dispositif favorisait la montée en température et son maintien au passage des nuages - spécialement au début de l'été lorsque le soleil est assez haut dans le ciel (juin, juillet). Par contre dès l'automne (fin octobre, début novembre), le soleil ne s'élève plus aussi haut sur l'horizon et ses rayons nous arrivent sous un angle de plus en plus rasant. Une partie non négligeable du rayonnement est alors réfléchi par la feuille de plastique et le gain apporté par ce dispositif semble beaucoup moins intéressant...

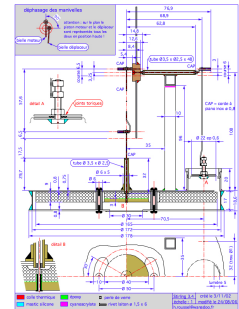
capteur solaire (6)



120 t/min sous env. 20.000 lux / plan horizontal
(voir aussi la [version 3.7](#))

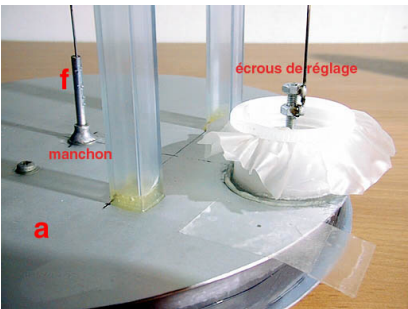
version 3.4

Améliorations par rapport à la version 3.2



1 - malgré son aspect bricolé, ce petit moteur Stirling est finalement plus résistant et endurant qu'on pourrait le croire à priori... Cependant, à force de le manipuler, de le bousculer et de le rattraper d'extrême justesse avant qu'il ne tombe, j'ai fini par décoller la glissière (f) fixée sur le plateau supérieur (a). C'est vrai aussi que cette liaison n'était pas très mécanique...

Pour améliorer les choses, on peut fabriquer un petit manchon épaulé constitué d'une bague de Ø 5 ou Ø 6 soudée à l'étain sur une rondelle de Ø ext 10. Une fois réalisé, on le collera avec de la colle cyanoacrylate ou de l'époxy à l'extrémité de la glissière. On prendra la précaution de laisser dépasser cette dernière d'1 ou 2 mm afin d'assurer le centrage de l'ensemble dans le plateau supérieur. (voir plan ci-contre).



2 - de même, afin de répartir de façon plus harmonieuse les contraintes entre le déplaceur en polystyrène (mou) et le coulisseau en corde à piano (dure), on pourra glisser, dans la chaîne des éléments qui les relient, un petit rivet en laiton Ø1 x Ø1,5 x 6 mm. On le collera à l'époxy dans le disque en contreplaqué d'épaisseur 3 mm, lui-même déjà assemblé de cette façon avec le déplaceur. Toujours fidèle à la même technique, on fixera à l'aide de colle thermique le coulisseau dans le rivet (voir plan échelle 1) - ce procédé permet, s'il le faut, de démonter facilement l'ensemble des pièces guidant le déplaceur - si la colle thermique se révélait insuffisante, par exemple lors d'une utilisation solaire un jour de canicule, il est possible aussi de braser les deux pièces à l'étain.



3 - pendant que l'on fait un peu de mécanique, on pourra aussi modifier la liaison de la bielle moteur avec l'extrémité de la vis qui porte la membrane. Il suffit de souder à l'étain l'extrémité de la corde à piano sur deux écrous M3 espacés de 5 à 7 mm. Cela permettra de régler à 5/10 près la longueur de la bielle afin de la centrer au mieux par rapport au débattement de la membrane (...brute de thermoformage et non détournée sur l'image au-dessus, à droite...)

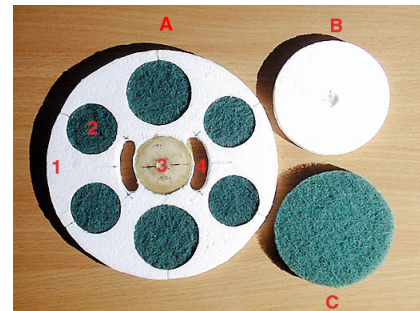
Est-ce dû à ces petites améliorations, à une meilleure étanchéité, ou à d'autres facteurs, mais la limite de fonctionnement est à présent inférieure à 5°C. A ce niveau, les mesures de température deviennent plus délicates, et bien que j'aie mesuré une fois un gradient inférieure à 4 °C, c'est plutôt autour des valeurs de 4,5° C ou 4,6°C que se situe la limite de fonctionnement.

* Installé sur la partie non ventilée d'un decodeur satellite, cette version tourne jours et nuits sans interruption depuis des semaines (la température du decodeur est d'environ 10° C supérieure à la température ambiante). Pour améliorer les échanges thermiques, j'ai posé sur la face froide quelques radiateurs pour transistors de puissance, mais ça fonctionne aussi sans cela.

** Avec un becher rempli de cubes de glaces (Ø 65 x 85 - bricolé en collant au mastic silicone un tube en plastique souple sur un plateau d'aluminium 0,5), j'obtiens une durée de fonctionnement de deux heures (animations Flash ci-contre).

Avec son P-19, le Docteur Senft ne fait guère mieux... 😊

C'est vrai aussi qu'au bout de 2 heures, et indépendamment des performances du moteur, la totalité des glaçons se sera transformée en eau et que la température du liquide contenu dans le becher ne sera pas très éloignée de la température ambiante (sur cette vue du P-19, on remarquera le dispositif d'équilibrage du déplaceur qui lui permet de fonctionner avec une différence de température inférieure à 1° C...)



*** On peut aussi envisager d'adjoindre une fonction régénératrice au déplaceur (A) en y insérant par exemple des parties en Scotch Brite (2). J'ai fait l'essai et je dois malheureusement avouer que, dans ce cas, ce n'est pas très concluant...

Il est possible que cela apporte un gain en performances pour les modèles équipés de roulements à billes, ou pour le modèle simplifié qui utilise un déplaceur léger de petite taille - (B) ou (C) ci-contre.

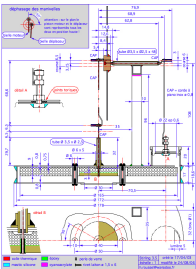
Mais avec la technique des paliers lisses employée ici, les forces de frottement au niveau des axes de rotation étant directement proportionnelles au poids des éléments suspendus, le gain apporté par les inserts en Scotch Brite se trouve probablement annihilé par l'augmentation de poids.

L'effet est même l'inverse de celui escompté : équipé du déplaceur (A), le moteur refuse de tourner posé sur la main comme il le faisait auparavant !

Conséquences de cette conception simple : pour obtenir un bon rendement, il est préférable que tout ce qui bouge (déplaceur, piston, bielles, volant d'inertie) soit aussi léger que possible...

version 3.5

Modifications et ajouts par rapport à la version 3.4

- 
- pour diminuer la composante horizontale transmise par la bielle, et par conséquent les forces de frottements, le coulisseau fixé au déplaceur a été raccourci de 11 mm *(et la bielle rallongée d'autant)*.
 - du coté froid, la plaque supérieure est recouverte d'une pièce de tissu humide (*blanc*) dont une partie en forme de mèche trempe dans un gobelet d'eau. Par capillarité, l'eau monte dans la mèche et diffuse dans le tissu sur l'ensemble de la surface - *lors des premiers essais, j'utilisais une feuille de mousse (noire) visible sur les images de droite*.
 - du coté chaud, un support servant d'échangeur de chaleur avec l'air ambiant, constitué de six radiateurs pour transistors de puissance, d'une plaque d'aluminium ep 0,8 mm, et de 4 pieds en plastique.

L'origine de l'idée

Après avoir visité les pages précédentes, [Dominique Saussereau \(1\)](#) m'a, un jour de 2003, informé que l'on pouvait faire un rapprochement entre les tables psychrométriques et le faible gradient de température de certains moteurs Stirling - *vous avez peut-être, comme moi, oublié à quoi pouvaient ressembler ces tables et quelle était leur utilité : voilà [un exemple](#)*

À quoi servent donc ces tables ? En deux mots, elles permettent, par comparaison de deux thermomètres dont l'un est mouillé et l'autre sec, de mesurer le taux d'humidité de l'air. Ce qu'il y a d'intéressant dans ces tables, c'est qu'elles sont réversibles. L'on s'aperçoit alors que sous certaines conditions, la différence de température entre les deux thermomètres dépasse nettement le niveau nécessaire au fonctionnement d'un moteur Stirling et qu'il est donc possible d'utiliser l'évaporation de l'eau, à température ambiante, pour le faire fonctionner !

Les précurseurs

Comme chacun sait, l'eau en s'évaporant produit du froid. Ce phénomène naturel a d'ailleurs été utilisé pour concevoir un jouet bien connu de nos parents et de nos grands-parents. Il s'agit de " l'oiseau plongeur", appelé aussi "oiseau pic-pic", ou encore en anglais "drinking bird" (ci-contre - en vente chez [Edmund Scientifics](#)).

Placé à proximité d'un récipient, il se balance d'avant en arrière, aussi longtemps que son bec continue à atteindre l'eau.

Comment ça marche ? L'oiseau utilise le froid produit sur son bec par l'évaporation de l'eau pour aspirer, comme avec une paille, le liquide qu'il a dans le ventre et déplacer ainsi son centre de gravité.

Premières tentatives

Donc, si ce jouet fonctionne, il était concevable qu'un moteur Stirling puisse tourner lui aussi à partir de la même source d'énergie, c'est à dire de l'eau 😊
Non, soyons sérieux, *il ne tourne qu'en prélevant une petite partie du flux thermique généré par l'évaporation de l'eau...*

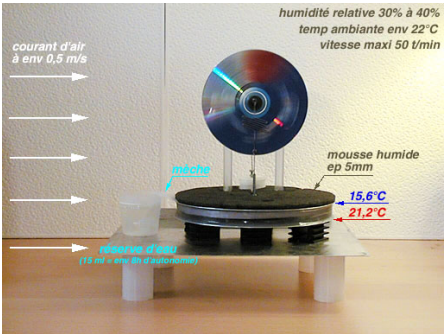
En fait, j'avais essayé avec le modèle solaire 3.4, mais je m'étais heurté à son gradient de température trop élevé. Pensant bêtement qu'il n'était pas assez sensible, je n'avais pas insisté davantage.

Mais aujourd'hui l'examen des tables psychrométriques montrent au contraire que c'est faisable si l'on respecte certaines conditions d'humidité et de température - **ci-contre >>>**

Ces conditions n'ont rien d'exceptionnelles, et correspondent sensiblement à celles que l'on trouve en été dans nos régions : température supérieure à 21°C, taux d'humidité relative inférieur à 40%, légère brise de l'ordre de 0,5 m/s.

Cette mi-avril 2003 nous offrant justement un avant-goût de l'été, journées ensoleillées et températures frôlant les 26°C, j'en ai profité pour effectuer quelques tests à l'extérieur. Placé à l'ombre, dans des conditions de vent presque nul, le moteur a bien voulu atteindre 60 t/min au milieu de l'après-midi et continuer à tourner jusqu'à la nuit. Lorsqu'il s'est arrêté, le taux d'humidité était remonté à un peu plus de 40% et la température était légèrement inférieure à 19°C.

Il est probable que les modèles du commerce, de conception plus mécanique (mais aussi bien plus coûteux...), soient capables de fonctionner dans une pièce à température ambiante, sans que l'on ait besoin de les ventiler - *la ventilation ne sert qu'à évacuer la couche d'air superficielle saturée d'humidité, et on pourrait très bien imaginer qu'un ventilateur, entraîné par le volant moteur, remplace la brise printanière...*



Ça progresse lentement...

Après quelques modifications (voir [version 3.6](#)), j'ai pu noter une amélioration sensible des performances, en particulier du côté du seuil de fonctionnement et de la vitesse de rotation. Par exemple le 22/06/03, on était pas loin des 100 t/min ! C'est vrai que ce jour-là les conditions climatiques étaient particulièrement favorables au fonctionnement des "moteurs à eau" : 31 °C à l'ombre, taux d'humidité de 25% (*ci-contre*)



voir aussi le moteur à eau générateur de courant ([version 3.7](#))

Ça progresse très lentement... 😊



Le 15 juillet 2007, la température ambiante avoisinait les 34 °C et le taux d'humidité relative était de 27%.

Ces conditions ont permis au moteur de tourner à plus de 130 tr/min pendant plusieurs heures.

Il était équipé de la soupape de décharge, à membrane en vinyle ep 0,08 mm, décrite dans les [FAQ](#) (vous trouverez d'autres exemples d'utilisation de la soupape de décharge sur les modèles [1.1](#) , [1.2](#) , [3.6](#) , [3.7](#) et [Otona no Kagaku - Sciences & Vie](#))

Le Dr Senft



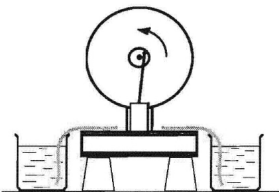
Dans ce court extrait d'un documentaire diffusé par "Planète Future", le Dr Senft nous explique comment la NASA lui a passé commande du N-92, un moteur Stirling de démonstration capable de fonctionner à la chaleur de la main.

Le modèle le plus performant qu'ait jamais réalisé le Dr Senft reste sans doute le P-19, un moteur dont le seuil de fonctionnement n'est que d'un demi degré Celsius (le schéma et les photos proviennent du livre "An Introduction to Low Temperature Differential Stirling Engine", par James R. Senft, 1996, Moriya Press, disponible sur [amazon.com](#))

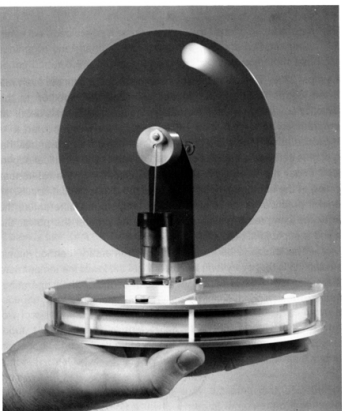


The P-19 engine is shown here running from the heat of the hand of astronaut David C. Burchdick on a recent visit to the University of Minnesota at Twin Falls. The reactor on the right is the heater. Unlike other Stirling engines we used, the P-19 easily runs at over 100 rpm when hand held. If the engine is placed on an insulated pad, it continues to run on the thermal energy in its warm plate for about 10 minutes.

le Dr Senft avec un astronaute tenant le P-19

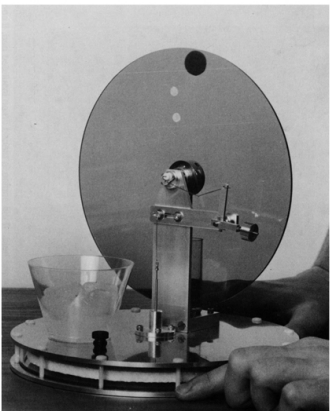


Il me faut malheureusement terminer sur une mauvaise nouvelle : avec Dominique Saussereau, nous avons cru découvrir le principe du moteur Stirling à eau, mais je me suis aperçu, il y a peu, que le Dr Senft avait lui-même expérimenté cette idée, dans les années 90, sur son fameux moteur P-19. En le recouvrant d'un tissu maintenu humide, il avait réussi à le faire fonctionner pendant plus de 16 jours consécutifs... Depuis, je déteste le Dr Senft !... 😊



The N-92 engine running on the heat of a hand. (Photo by NASA - Lewis Research Center)

modèle N-92



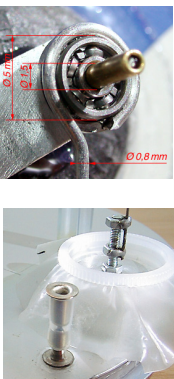
A cold drink placed on the upper plate of the P-19 engine is enough run it for an hour or so.

modèle P-19

(1) Dominique Saussereau a créé sur Yahoo! [un groupe de discussion](#) consacré au développement de ce type de moteur - si vous avez des questions, des remarques, des suggestions, que vous soyez francophones ou anglophones, vous êtes tous les bienvenus !

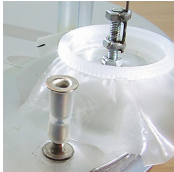
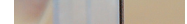
version 3.6

Modifications par rapport à la version 3.5



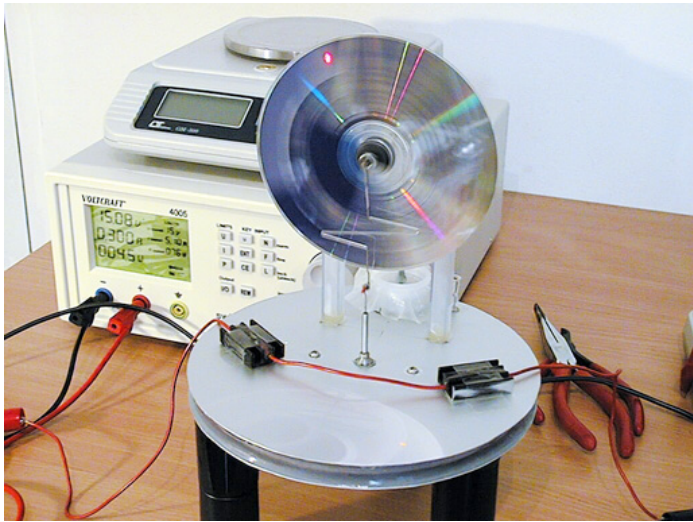
- l'épaisseur du déplaceur a été ramenée par abrasion à environ 7 mm, sa course à 4 mm, et la hauteur du cylindre à 12 mm (*le but recherché étant de diminuer autant que possible la vitesse linéaire du déplaceur et donc l'énergie pour le mouvoir*)

- afin de profiter au maximum du volume restant et de pouvoir aller pratiquement au contact des deux plateaux, l'axe de la bielle est maintenant réglable. Une petite pièce en alu coulisse à la surface du CD, permettant un réglage à 1/10 ou 2/10 près - en cas d'erreur, la bielle élastique évite de forcer sur certains éléments (*et un petit coup de pince permet d'ajuster sa longueur...*)



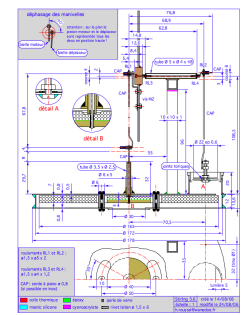
- tous les axes de rotations sont équipés de roulements à billes miniatures à faible frottement (Ø int 1,5 , Ø ext 4 ou 5 mm). En fait, je crois que j'ai réalisé cette modification essentiellement pour me faire plaisir. 😊 Avec des pièces légères comme celles employées ici, les roulements n'apportent pas de gain sensible. En dessous de 10 gf de charge radiale, et avec des axes en corde à piano de Ø 0,8 mm, les paliers lisses sont plus avantageux. Le seul endroit où ce soit vraiment intéressant, c'est pour le palier situé près du centre du CD qui supporte une charge d'une vingtaine de grammes. Aux faibles températures, et aux vitesses de rotation atteintes, les autres paliers sont soit aux alentours de 10 gf (côté piston moteur), soit en dessous.

- le trou de décompression est à présent surmonté d'un embout permettant de relier le moteur à un manomètre à eau ou à un capteur de pression. Cet aménagement favorise grandement la mise au point en permettant, entre autres, de vérifier l'étanchéité du moteur et de mesurer son taux de compression : dans le cas présent, la diminution de la hauteur du cylindre a fait passer le taux de compression de 1,004 à 1,006...



en cours de test, alimenté par deux résistances de 2W

Performances



L'ensemble de ces modifications a permis d'abaisser sensiblement le seuil de fonctionnement du moteur, puisqu'il tourne à présent à 40 t/min avec une différence de température de 3°C seulement, et à 120 t/min pour une différence de 6°C - poussé dans ses derniers retranchements (2,5°C), le moteur accepte de descendre jusqu'à 24 t/min, mais fonctionnant alors à la limite de ses possibilités, il s'arrête au bout de quelques minutes - *pour fixer les idées, un écart de 3°C peut être obtenu en soutenant le moteur du bout des doigts, et 6°C en le posant à plat sur la main*

Mais il est plus pratique d'utiliser des résistances électriques pour faire varier la température et c'est ce qui a été fait pour établir les relevés ci-contre :

- dans cette plage d'utilisation restreinte, la vitesse de rotation apparaît comme étant liée d'une façon sensiblement linéaire à la différence de température entre les deux plateaux.

- si l'on prolonge la courbe de régression, on voit qu'elle coupe l'axe des X entre 1°C et 2°C. Au niveau d'évolution actuel, il semble difficile de faire fonctionner ce moteur sous le seuil symbolique de 1°C...

- je me suis amusé à remplacer l' **air** par différents gaz que j'avais sous la main : d'abord par ce que je pense être du **ballonium** , un mélange d'hélium et d'azote utilisé pour gonfler les ballons de baudruche et qui, pour un gradient de température donné, améliore la vitesse de rotation de 40 %. Ensuite, ce que j'appelle du **butane** (en fait, là aussi, un mélange de 60 % de butane et de 40 % de propane), qui au contraire fait chuter les performances d'environ 20 %. Et enfin, du gaz provenant d'une bombe dépoussiérante de marque **hama** , dont je ne connais pas la composition, et qui est le moins performant de tous puisqu'il divise la vitesse de rotation du moteur par deux .

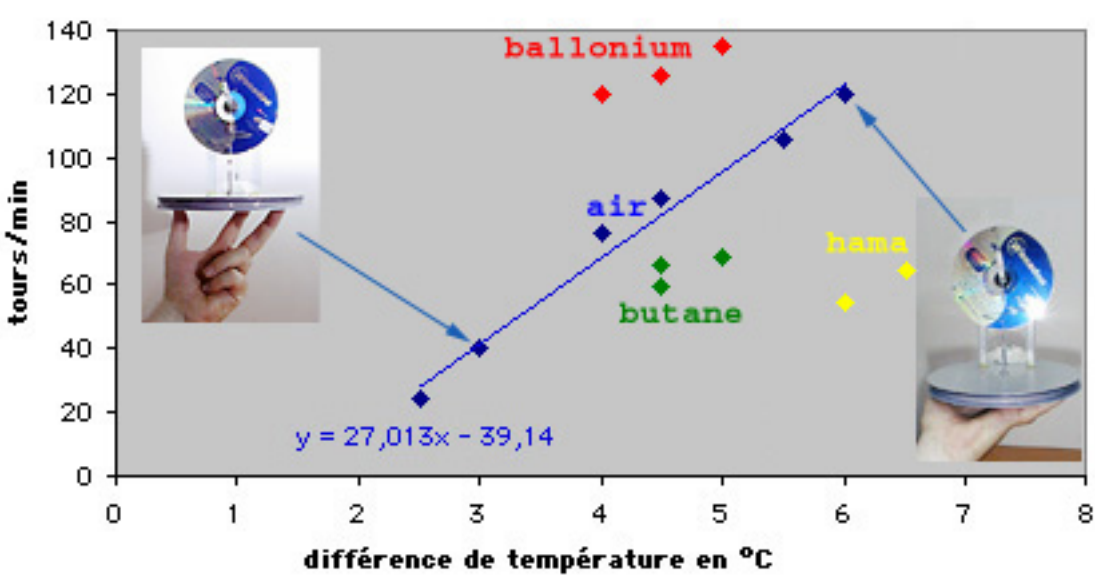
Ces essais rapides confirment, s'il en était besoin, qu'il est préférable d'utiliser un gaz dont la masse moléculaire est faible - en supposant que le ballonium contienne 75 % d'hélium et 25 % d'azote, la masse moléculaire moyenne du mélange doit se situer autour de 10 (contre 29 pour l'air) - le mélange butane/propane se situe probablement vers 55 - enfin, compte tenu de ses performances médiocres, le gaz mystérieux utilisé dans la bombe dépoussiérante pourrait avoir une masse moléculaire de l'ordre de 100 à 150 : un bon candidat serait le **tetrafluoroéthane** (C2H2F4), avec une masse moléculaire de 102 g/mole.

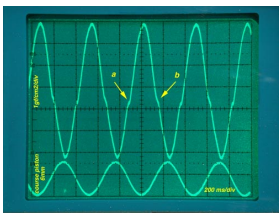
Voici une application inattendue de ces petits moteurs qui peuvent donc servir, une fois étalonnés, à estimer grossièrement la masse moléculaire d'un gaz inconnu...

Évaluation du rendement, tracé du diagramme (p,V)

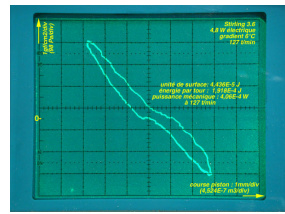
(la méthode employée est la même que celle décrite à la fin de la page du [Blue LTD Stirling](#))

Conditions de mesure : plateau supérieur chauffé par deux résistances électriques totalisant une puissance de 4,8 W - différence de température de 6°C (36°C - 30°C) entre les deux plateaux - vitesse de rotation 127 t/min

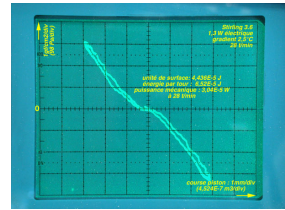




- graphe représentant l'évolution de la pression et de la position du piston moteur en fonction du temps : on observe un déphasage d'environ 8 degrés entre la position basse du piston et la pression maximale - les repères a et b indiquent un palier dans l'évolution de la pression, probablement dû au changement d'appui de la membrane d'une rondelle à l'autre - on retrouve ces irrégularités amplifiées sur le diagramme (p,V)



- diagramme de travail (p,V), établi dans les conditions décrites plus haut - étant donné la faible différence de température, les variations de pressions sont modérées et le diagramme se présente sous une forme aplatie - la puissance relevée est d'environ 0,4 mW, alors que la formule du rendement idéal donne 46 mW (*en supposant que 50 % de l'énergie des résistances soient dissipés vers l'extérieur et que seulement 2,4 W participent au fonctionnement du moteur - la membrane ayant un Ø de 27 mm et les rondelles un Ø de 22 mm, c'est un Ø moyen de 24 mm qui a été retenu pour les calculs*)



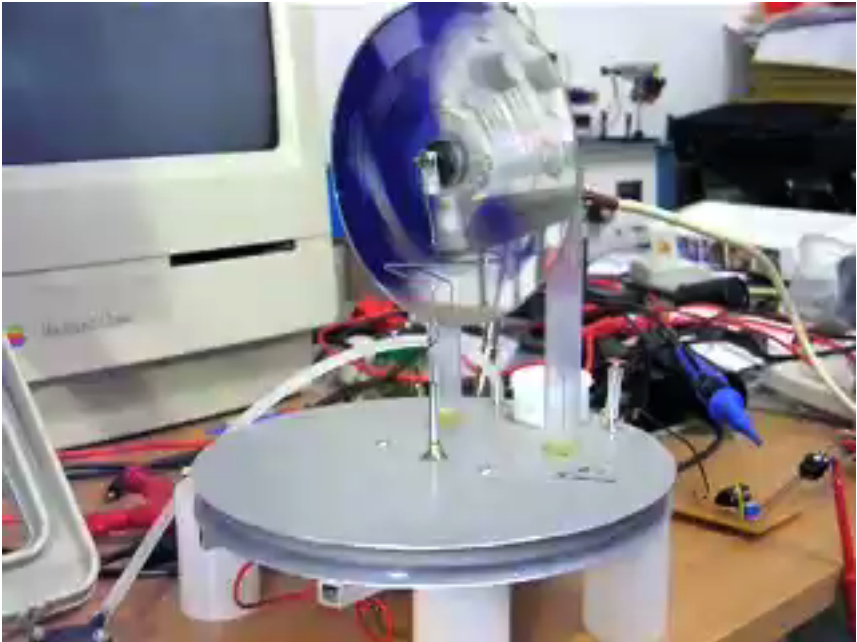
- ce palier présente au moins un avantage, celui de faciliter le réglage de la bielle pour que le débattement de la membrane soit équilibré . En utilisant ce procédé, j'ai constaté une petite amélioration, puisque le moteur tourne maintenant de façon stable à 28 t/min avec un gradient de 2,5°C. Les mouvements du déplaceur étant lents, il est fort probable que le travail mesuré (*6,5E-5 J par tour*), corresponde essentiellement aux frottements mécaniques - *la différence avec les 1,92E-4 J du diagramme précédent (env. les 2/3), s'expliquant alors par la quantité d'énergie plus importante absorbée par le déplaceur (vitesse x 4,5 = résistance de l'air x 20 = énergie x 20... en simplifiant* 😊

Vidéo montrant une méthode différente pour relever le diagramme (p,V)

le capteur de déplacement est constitué ici de deux éléments : un aimant mobile solidaire de la bielle moteur et un capteur fixe à effet Hall
le signal issu de ce capteur ne peut pas être exploité directement et doit être traité par un amplificateur à réponse logarithmique

le moteur est équipé de la soupape de décharge des modèles [1.1](#) , [1.2](#) , [3.5](#), [3.7](#), [Otona no Kagaku - Science et Vie](#)
qui fait baisser la pression interne et améliore le fonctionnement de la membrane

vous trouverez dans ce clip un comparatif des performances
avec, ou sans, la soupape en question...



bien que ce système soit plus simple en apparence, il nécessite de régler correctement la linéarité du signal de déplacement
plus d'infos à la fin des [FAQ](#)

version 3.7

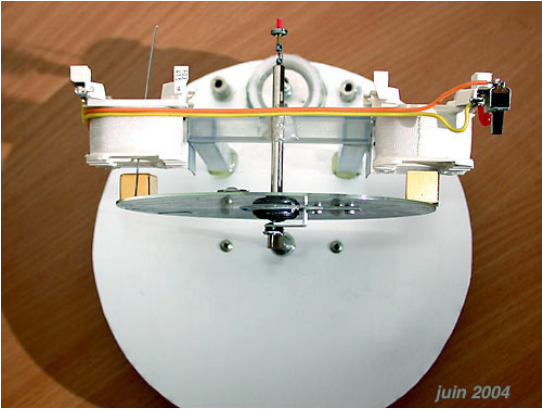
... produire des flashes lumineux à partir de l'énergie thermique dégagée par la main...

Modifications apportées à la version 3.6

les principaux changements consistent en la fixation de 2 aimants permanents au Néodyme à la périphérie du volant et au montage de 2 bobines destinées à alimenter une LED à faible courant. - l'axe du volant est maintenant en corde à piano Ø 1,5 mm - la bielle du déplaceur, précédemment en corde à piano, est remplacée par une pièce en matériau non magnétique (tôle d'aluminium épaisseur 0,5 mm)

Fournitures complémentaires

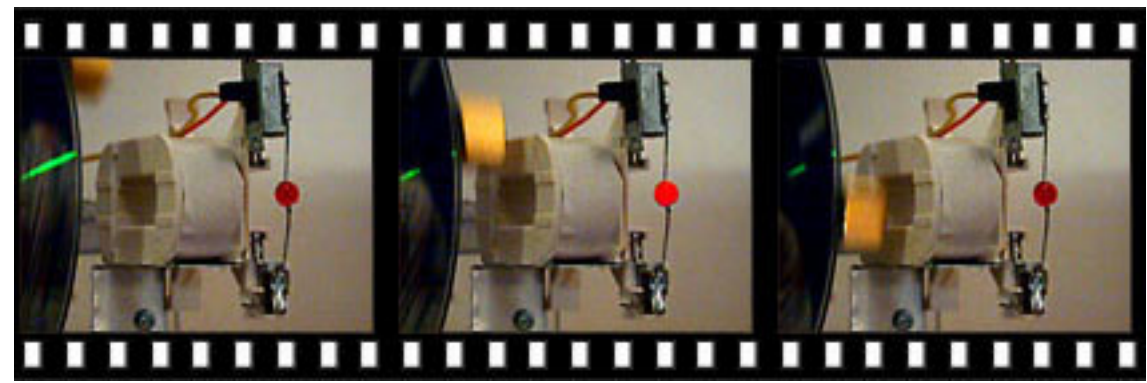
- 2 aimants cubiques de 12 mm au Néodyme disponibles chez [Supermagnete](#) sous la référence W-12-G
- 2 bobines télémechanique réf. LXD1V7 (L=1,36 H, R=1600 ohms)
- 1 LED à faible courant (2 mA) trouvée chez [Conrad](#) sous la réf. 18 69 02-33 (LED Low-Current Ø 5 mm)



vue plongeante sur le générateur

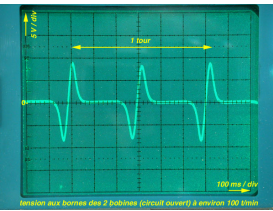
environ 60 t/min
(animation Flash - en réalité la LED est plus lumineuse...)

Principe

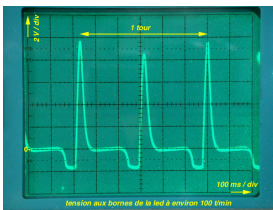


le principe est identique à celui du moteur [version 1.2](#) : chaque fois qu'un aimant s'approche d'une bobine, il y génère une force électromotrice - lorsque l'aimant s'éloigne, il crée une force électromotrice de sens inverse - (ci-contre : la courbe 1 a été relevée avec une différence de température d'environ 6° C - en alimentant la diode, le tracé des courbes 2 et 3 a nécessité une différence de température de 13° C pour maintenir une vitesse de rotation de 100 t/min)

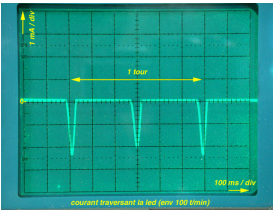
Par contre, l'adaptation s'est révélée un peu plus difficile, car d'une part la vitesse de rotation est nettement plus faible, et d'autre part, la puissance mécanique convertie (0,4 mW pour une différence de température de 6°C) est bien inférieure aux 4 mW nécessaires pour faire briller une LED en régime continu - voir [diagramme \(p.V\)](#) du moteur [version 3.6](#) - voir les [FAQ](#)



1



2

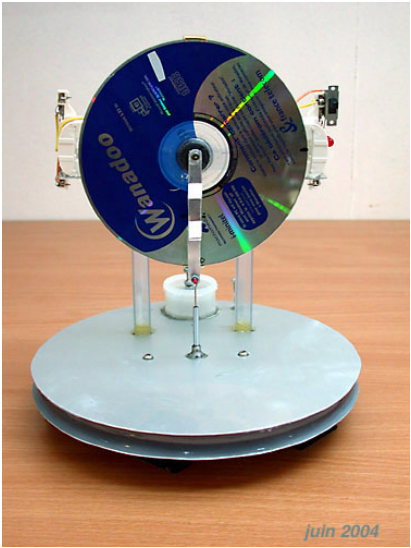


3

Pour palier la faible vitesse de rotation et contourner le manque de puissance, il a fallu à la fois utiliser des bobines et des aimants plus performants, et se contenter d'une seule LED émettant deux flashes lumineux par tour.

Ainsi transformé, le moteur produit de la lumière à partir de la seule chaleur de la main (env. 60 t/min), éventuellement secondé, en cette période estivale, par un petit glaçon ou un tissu humide posé sur le plateau supérieur - le commutateur au dessus de la LED permet de l'alimenter par une ou deux bobines en fonction de la puissance disponible...

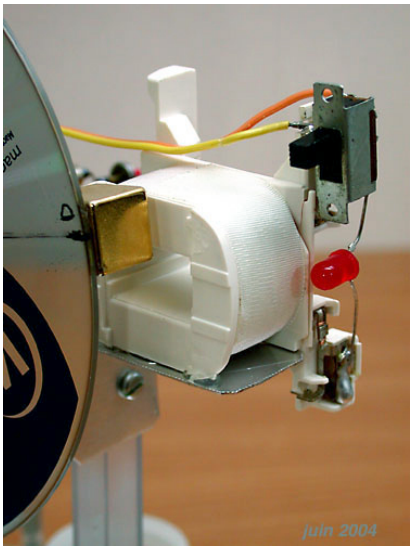
Quelques images de cette évolution du moteur Stirling 3.6



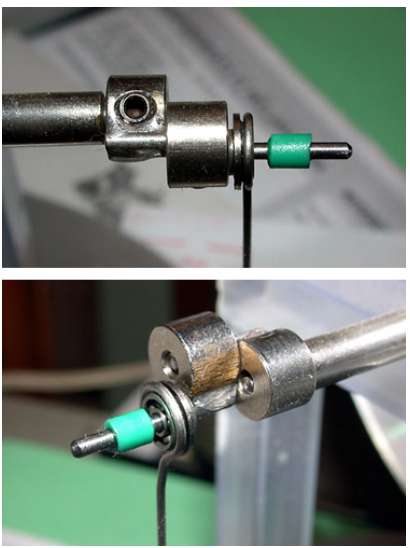
vue de face du moteur



une autre vue...



aimant, bobine, commutateur et LED

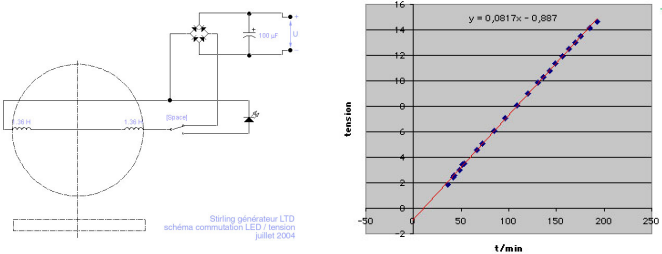


manivelle réglable côté piston moteur - voir [FAQ Stirling](#)

Utilisé en tant que générateur solaire

170 t/min
sous un
éclairage
de 45.000
lux,
ramené au
plan
horizontal

En remplaçant la LED par un pont redresseur couplé à un condensateur de filtrage de 100 µF, et en l'équipant du capteur ayant servi aux versions 3.1 et 3.2, le moteur parvient, grâce au soleil, à créer une force électromotrice continue de 13 V - (pour passer facilement d'un mode à l'autre, ci-contre, un schéma ultra-simple qui se passe de commentaires...)

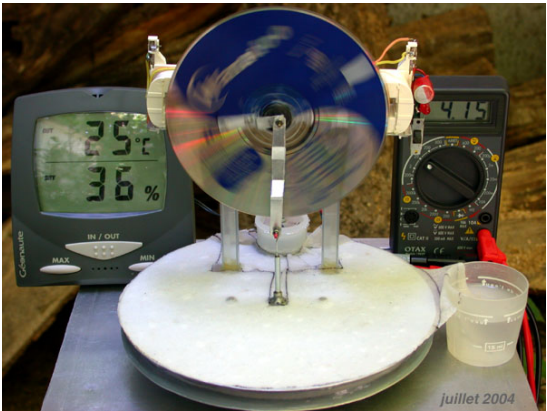


La tension mesurée aux bornes du générateur semble liée de façon linéaire à la vitesse de rotation - la courbe de régression (à droite) ne passe pas par l'origine probablement à cause du seuil des diodes constituant le pont redresseur - une fois établie, elle permet à l'aide d'un simple voltmètre de déterminer la vitesse du moteur.

A noter que la résistance d'entrée du multimètre étant assez élevée, de l'ordre de 10⁶ Ohms, l'intensité et la puissance électrique produites sont, dans ce cas, très faibles...

Utilisé en tant que générateur à eau

H2O +
temp de
25°C +
36%
d'humidité
relative
= 4.15 V
(...)



Bien que l'été ait un peu de mal à s'installer au nord de la Loire (surtout en ce qui concerne les températures), ce brave petit moteur a bien voulu, en cette fin juillet 2004, fournir un peu d'électricité en tirant son énergie du flux thermique généré par l'évaporation de quelques grammes d'eau...

La méthode est celle du tissu humide utilisé par le moteur à eau version 3.5 .

Disposé à l'ombre, et malgré une brise pratiquement nulle, la rotation du moteur s'est stabilisée assez rapidement à 60 t/min, produisant une force électromotrice continue d'environ 4 V.

Étonnant, non ? ...aurait conclu Monsieur Cyclopède... 😊

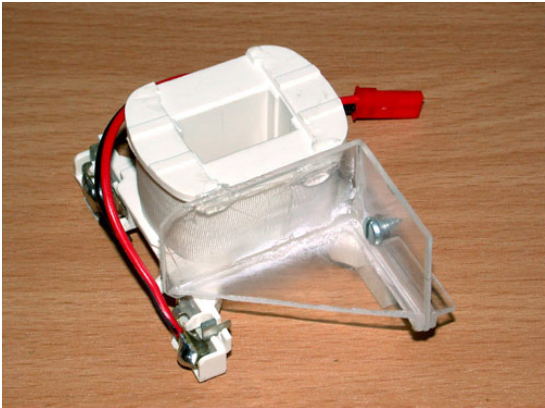
Remarque

Ce dispositif est particulièrement sensible aux courants de Foucault créés dans les pièces métalliques situés près du passage des aimants, et cela provoque un effet de freinage non négligeable - (le phénomène est d'autant plus marqué que l'on conjugue ici des champs magnétiques relativement intenses et une puissance mécanique modérée).

J'ai notamment constaté que les équerres en aluminium supportant les bobines étaient une cause importante de ralentissement : en remplaçant ces deux équerres par des pièces en polystyrène, la vitesse de rotation augmente d'une bonne dizaine de tours/min, ce qui permet de gagner environ 1 V sur les valeurs indiquées plus haut...

Des courants de Foucault se développent certainement aussi dans d'autres pièces métalliques (visserie, bielles, etc.), mais celles-ci étant de taille plus réduite, ils sont moins pénalisants.

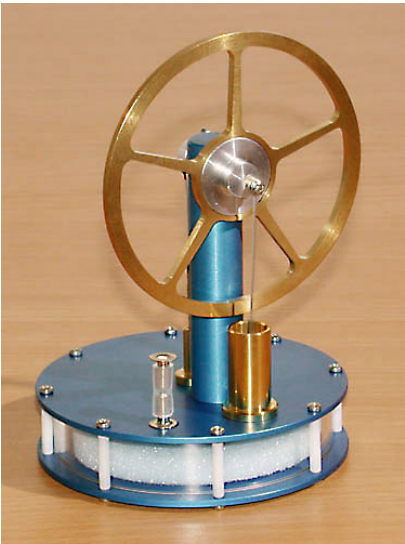
Reste le problème des deux plateaux en aluminium qui présentent au flux magnétique une surface importante : bien qu'étant situés à une certaine distance du volant moteur, ils freinent malgré tout un peu sa rotation - et je ne vois pas bien par quoi je pourrais les remplacer...



Vidéo (cliquer sur l'image pour visionner la vidéo)



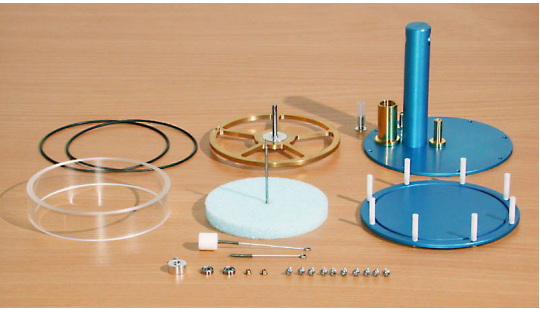
la LED blanche tire son énergie uniquement de la chaleur de la main
la température extérieure était de 16° C en ce matin d'août 2007 et le moteur tournait à environ 70 tr/min
d'autres moteurs Stirling en version générateur de courant : 1.2 , Otona no Kagaku , JAXA
LED rouges ou blanches ?... la réponse est dans les FAQ



C'est sans doute très amusant de construire soi-même son moteur Stirling à faible gradient de température, mais il faut bien avouer que ça prend un peu de temps et que ça ne fonctionne pas forcément du premier coup comme on le voudrait... 😊

On trouvait encore ces dernières années sur Internet ce modèle bien réalisé, aux performances honorables et à un prix sympa : le Blue LTD Stirling Engine. Il existe aujourd'hui une évolution de ce moteur, le [KS90 Black LTD](#), pourvu d'un cylindre en Pyrex et d'un piston en graphite, vendu £86.00.

Le Blue LTD Stirling Engine a des dimensions à peu près identiques au modèle simplifié 1.1. Sa conception plus mécanique lui assure de meilleures performances. Toutes les pièces sont réalisées avec précision, en laiton ou en aluminium anodisé. L'axe principal est monté sur roulements à billes, et le piston en polyamide est appairé avec le cylindre moteur pour garantir un jeu réduit. Comme on le voit sur l'image de droite, l'étanchéité du cylindre principal est assurée par deux joints toriques. Je ne suis pas allé plus loin dans le démontage, mais le concepteur de ce moteur assure que le pilier central, le cylindre moteur et la glissière du déplaceur sont finement filetés et vissés dans le plateau supérieur, et que l'étanchéité est, là-aussi, réalisée par des joints toriques.



contrairement à ce que pourrait suggérer cette image, le moteur est livré entièrement monté et prêt à fonctionner !

la petite buse à gauche n'est pas d'origine - elle a été ajoutée par la suite pour y connecter un manomètre.
taux de compression mesurés:
1,007 en statique
1,012 en dynamique (1)

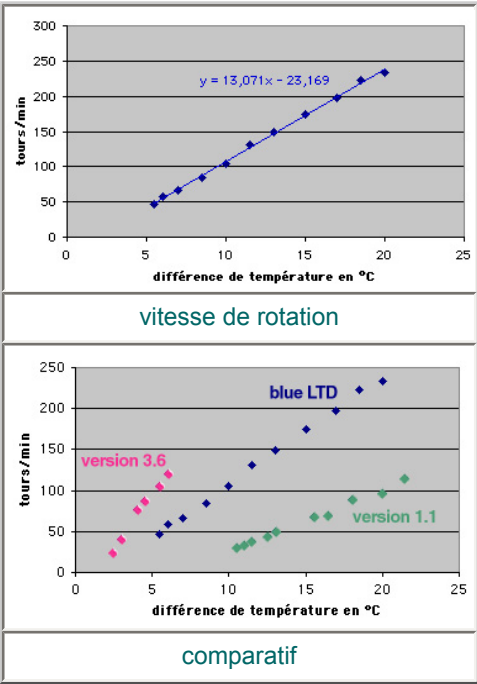
Soumis aux mêmes tests que les modèles précédents, ce moteur s'avère à la fois très sensible et très rapide. Il accepte aussi bien de tourner posé sur le plat de la main que de dépasser 430 t/min sur une tasse d'eau bouillante.

Cependant, les premiers essais effectués avec ce Stirling m'ont permis de mettre en évidence quelques petites faiblesses (*il ne peut pas avoir que des qualités...* 😊) :

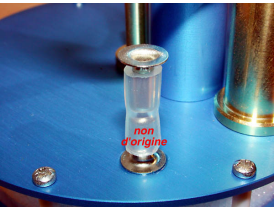
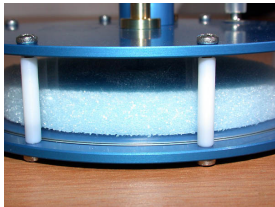
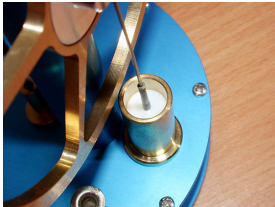
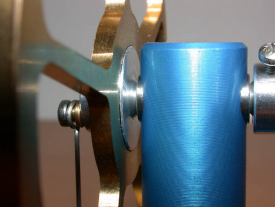
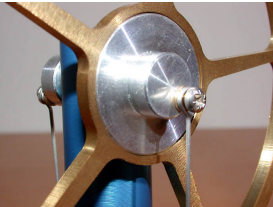
- d'abord, sous peine d'avoir à démonter complètement le moteur, il ne faut absolument pas lubrifier la tige du déplaceur. La moindre molécule d'huile à cet endroit, j'exagère à peine, fait instantanément chuter de moitié la vitesse de rotation - et cela quelle que soit la fluidité de l'huile employée (*vous pouvez me croire, je l'ai démonté et nettoyé 3 fois...* (2) - un avantage, l'entretien est réduit au minimum...

- ensuite, ce moteur a été conçu pour fonctionner avec de faibles différences de températures, comme celles qui sont obtenues en le posant sur la paume de la main, et le bon sens voudrait que l'on ne s'écarte pas trop de ces conditions de fonctionnement. Malgré ça, lors de certains tests, je n'ai pas hésité à appliquer des résistances électriques directement sur le plateau supérieur. Ces résistances chauffent beaucoup, et peuvent même devenir brûlantes si l'on n'y prend garde, et j'ai pu constater que dans ces conditions bien particulières, il pouvait arriver que le piston en polyamide serre et que le moteur s'arrête - *en fait, ce n'est pas grave, il suffit de laisser refroidir le moteur pour qu'il reparte : en utilisation normale, cela ne se produit pas.*

Si l'on veut s'amuser au jeu des comparaisons, on peut estimer que ses performances le situent entre les modèles 1.1 et 3.6. Ce qui est le plus étonnant, c'est que malgré sa taille réduite, il fonctionne de façon stable à partir d'une différence de température de seulement 5,5°C et environ une minute après l'avoir posé sur le plat de la main - *à noter la modestie des concepteurs qui, dans la notice, parlent d'un seuil de fonctionnement de 12-15°C et d'un délai possible de 5-10 minutes avant qu'il ne commence à tourner...*



Ces deux petites restrictions mises à part, on peut considérer qu'il s'agit d'un modèle sympathique, assez sensible, et surtout particulièrement réussi du point de vue esthétique !



Évaluation du rendement, tracé du diagramme (p,V)

- plus d'informations sur le matériel utilisé dans la page [FAQ Stirling](#)

Quelle est la fraction de quantité de chaleur transformée en énergie mécanique ?

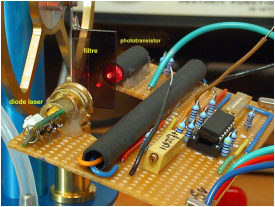
La formule du rendement idéal des moteurs thermiques peut s'écrire sous la forme : $1 - T_f / T_i$, avec T_i = température initiale, et T_f = température finale du gaz utilisé.

On voit tout de suite la difficulté que représente la mesure de la température d'un gaz variant continuellement et rapidement à l'intérieur du cylindre d'un moteur. Dans une première approximation, on assimilera donc T_i et T_f aux températures des plateaux inférieurs et supérieurs, étant bien conscient que, de cette façon, le rendement idéal sera sans doute surestimé de 30% à 50% - voir commentaire image 5

La mesure de la quantité d'énergie réellement produite, obtenue en traçant le diagramme de travail (p,V), sera probablement plus précise. Ce diagramme qui représente les volumes en abscisse et les pressions en ordonnée est en général une courbe fermée, et le travail fourni

$$W = \oint p \, dV$$

est égal à l'aire de cette courbe (*lorsque le tracé est parcouru dans le sens des aiguilles d'une montre*).

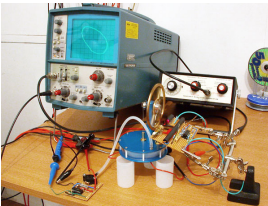


Pour effectuer ces relevés, le plateau inférieur est chauffé par deux résistances électriques totalisant une puissance de 4,8 W. La différence de température entre les deux plateaux s'établit à 21°C (54°C - 33°C) et la vitesse de rotation à 198,6 t/min.

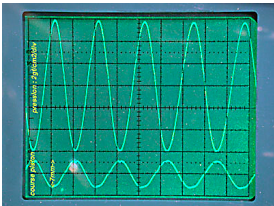
La pression est mesurée par un capteur piézorésistif MPX2010 de Motorola, et la position du piston moteur au moyen d'une diode laser, d'un filtre dégradé linéaire gris neutre, et d'un phototransistor (*donc sans prélèvement d'énergie mécanique*)

Ci-dessous :

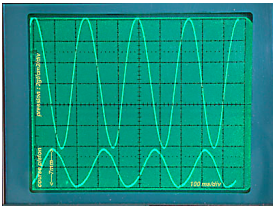
- 1 - l'ensemble du dispositif qui fera sans doute sourire quelques professeurs de métrologie... 😊
- 2 - variations de pression interne et course du piston moteur, à froid, en faisant tourner le moteur à la main - *quand le piston est en bas, la pression est maximale et les deux courbes sont parfaitement en phase.*
- 3 - moteur tournant à 240 t/min alimenté en énergie thermique par les résistances électriques - *on remarque un déphasage d'environ 70 degrés entre la position basse du piston et la pression maxi.*
- 4 - le moteur, ralenti à la main, ne tourne plus qu'à environ 100 t/min. L'air a plus de temps pour se réchauffer, la pression augmente de 30 %, et tend à être en phase avec le mouvement du déplaceur. Le déphasage est de près de 80 degrés avec le piston moteur - *les repères "a" et "b" montrent un arrêt momentané dans le mouvement du piston - en "a", la pression interne dépasse le poids de l'ensemble piston-bielle et le jeu passe de la partie inférieure de l'axe, à la partie supérieure - en "b" c'est l'inverse - en "c", probablement de petites vibrations que l'on retrouve amplifiées sur le diagramme (p,V)*
- 5 - tracé du diagramme de travail (p,V), dans les conditions décrites plus haut. La puissance relevée est d'environ 1 mW, alors que la formule du rendement idéal donne 150 mW (*en supposant que 50 % de l'énergie des résistances soient dissipés vers l'extérieur sous forme de rayonnement, par convection, etc., et que seulement 2,4 W participent au fonctionnement du moteur*)
- 6 - diagramme tracé alors que le moteur est à la limite du fonctionnement (*gradient de 5,5°C, vitesse de rotation d'environ 20 t/min*). Tournant à vide, le travail mesuré ($2,46E-4$ J par tour), correspond principalement aux frottements internes - *à comparer avec les $6,5E-5$ J par tour mesurés dans des conditions semblables sur la [version 3.6](#), , et qui laissent supposer que les pertes par frottement (guidage déplaceur, piston, bielles) sont 4 fois supérieures sur le Blue Stirling... ;o)*



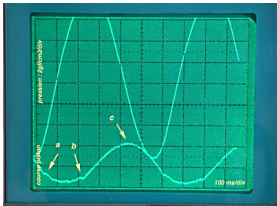
- 1 -



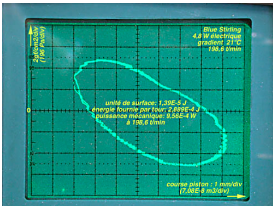
- 2 -



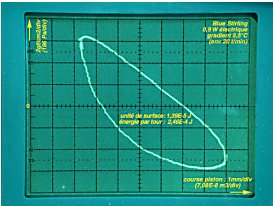
- 3 -



- 4 -



- 5 -



- 6 -

(1) au cours d'un cycle, la pression interne varie de + 6 gf/cm² à - 6 gf/cm² par rapport à la pression atmosphérique, soit une amplitude de 12 gf/cm² : le taux de compression peut donc être considéré comme étant de 1,012

(2) s'il vous arrive d'avoir à démonter et remonter votre moteur, resserrez doucement, et sans forcer, les vis qui maintiennent les deux plateaux : d'abord les entretoises en polyamide sont assez fines et il serait dommage de les endommager, ensuite la pression interne n'étant que de quelques grammes, l'étanchéité sera tout aussi bien assurée de cette façon !

A partir des fêtes de fin d'année 2005 on pouvait trouver sur ebay un moteur Stirling qui, à plus d'un titre, m'avait paru intéressant. Il se présentait sous la forme d'un kit inclus dans le n° 10 de la revue "Otona no kagaku" qui, comme chacun sait, veut dire en Japonais "Sciences pour adultes" (vous pouvez visiter la boutique [Men's Gangu](http://www.mensgangu.com) ou bien vous adresser à la librairie Junku www.junku.fr qui commercialisent ces revues)



Le n° 10 de la revue "Otona no kagaku" étant à présent épuisé, la commercialisation de ce moteur a été reprise par de nombreuses sociétés, dont la très connue revue de vulgarisation scientifique " [Science & vie](http://www.science-et-vie.com) " dans sa boutique en ligne, pour la modique somme de 45,00 €.

Donc, j'ai découvert avec amusement en 2005 que ce kit reprenait certaines dimensions et caractéristiques des moteurs Stirling simplifiés 1.0 et 1.1 dont les plans ont été publiés ici dès 2002 ! En particulier, toutes les parties actives, le cylindre principal, le déplaceur, semblent d'un point de vue dimensionnel rigoureusement identiques (diamètres, hauteurs et course, au mm près). On peut également trouver des analogies du côté de l'utilisation d'un CD comme volant moteur ou de la membrane moulée ayant le même diamètre utile de 26 mm (version 1.1) !

Je tiens à préciser que je n'ai jamais touché la moindre royalty de la société "Otona no kagaku" et que je n'espère rien non plus de " Science & Vie " 😊

chauffé par 2 résistances électriques totalisant 7,1 W le moteur tourne ici à 45 tours/min, pour une différence de température de 32°C

Pour revenir à la conception de ce moteur, des solutions comme la liaison souple entre la bielle et le déplaceur, les plateaux démontables maintenus par 8 entretoises, l'étanchéité par joints toriques, font plutôt penser à celles adoptées sur le Blue Stirling (publié ici aussi en 2003...).



une version automobile à 3 roues...

Autres différences :

- le système de paliers à perles de verre n'a pas été conservé, et l'axe du volant (Ø 1mm) tourne librement dans une pièce moulée en polyamide. Le palier est d'ailleurs livré monté, le déphasage des moyeux préreglé à 90°, ce qui simplifie la mise au point.
- le déplaceur n'est pas en Scotch Brite comme sur la [version 1.1](#), mais réalisé dans une mousse souple.
- l'axe du déplaceur coulisse simplement dans un tube en laiton que l'on peut lubrifier légèrement (ne pas mettre trop d'huile car le faible jeu, à cet endroit, est prévu pour équilibrer les pressions)



- comme sur le Blue Stirling, les axes des têtes de bielles sont constitués de simples vis présentant une partie lisse sous la tête  qui demandent aussi à être lubrifiées pour améliorer le fonctionnement (*attention à ne pas les confondre avec celles qui sont entièrement filetées, il n'y a que 2 vis comme celles-ci dans le kit*)

déballage du kit

nous sommes habitués à trouver des CD en encarts dans les revues, mais au Japon, ce sont des kits complets : le principe de Pif Gadget revisité... (à noter la qualité des éléments qui ont nécessité la fabrication de plusieurs moules d'injection, ainsi que d'outils de découpe et d'emboutissage)



le kit...



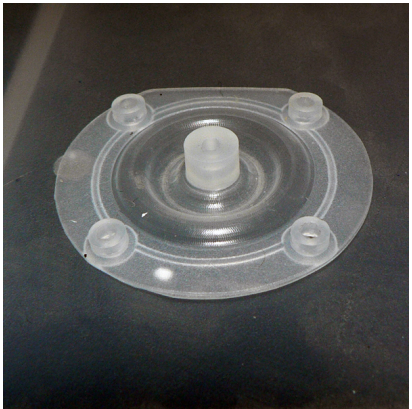
... inséré dans la revue,



on trouve à l'intérieur...



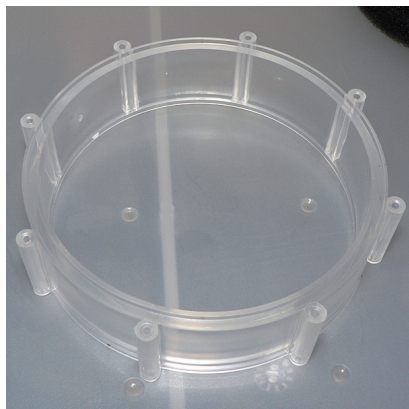
... toutes les pièces,



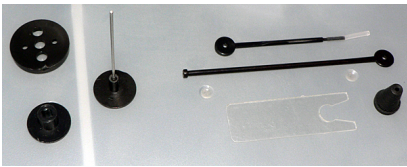
la membrane moulée...



... et sa fixation,



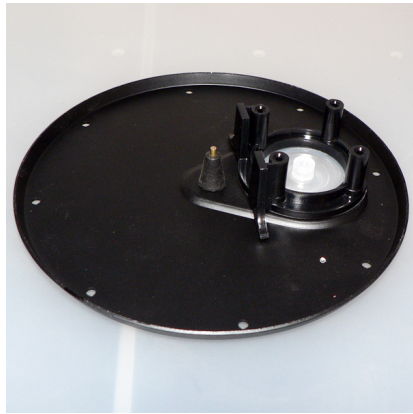
le cylindre injecté,



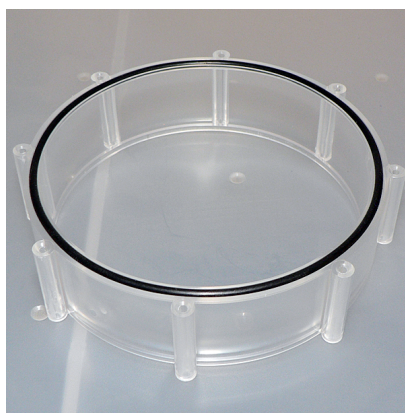
les bielles, les axes, etc.

l'assemblage (1/2 heure)

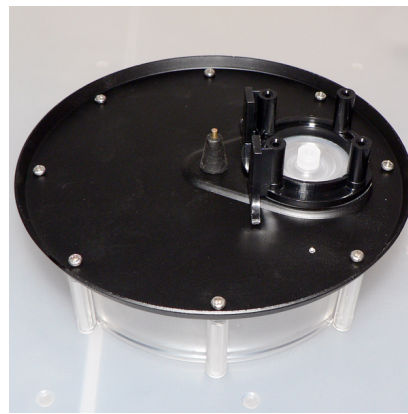
l'assemblage du moteur ne présente aucune difficulté particulière et nécessite seulement un petit tournevis cruciforme



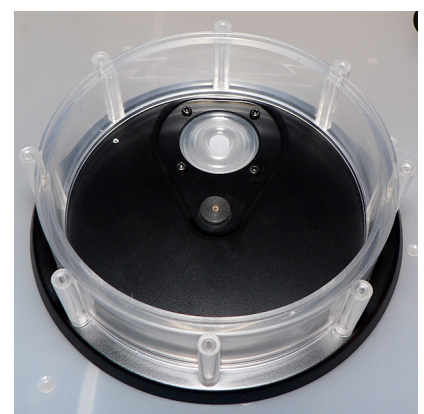
fixation de la membrane et du tube de guidage du déplaceur



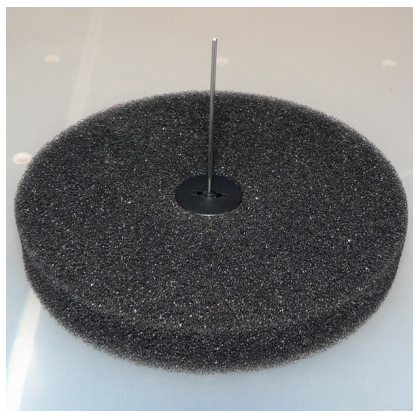
insertion du joint torique dans la rainure supérieure du cylindre



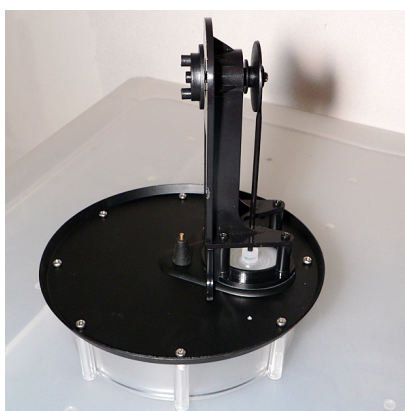
pose du plateau supérieur sur le cylindre



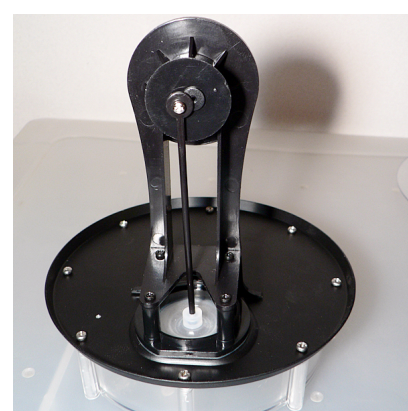
vue de l'intérieur



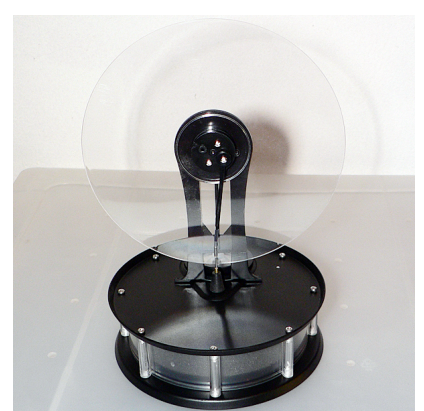
montage de l'axe du déplaceur



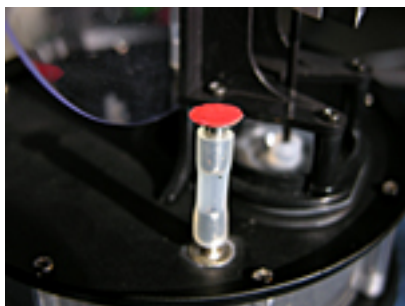
vissage de la potence sur le plateau supérieur...



... et accrochage de la bielle moteur



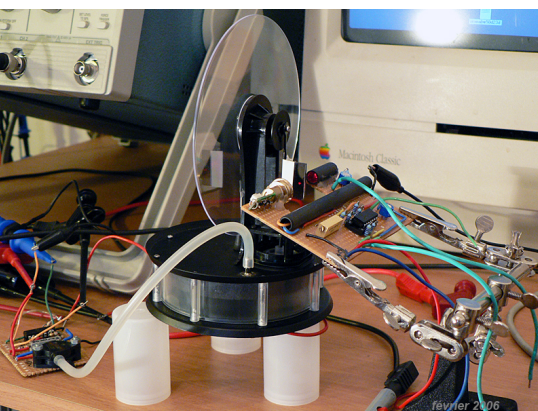
pose du plateau inférieur, montage du volant et de la bielle déplaceur



Sur une tasse d'eau bouillante, avec deux glaçons sur le plateau supérieur, la vitesse de rotation peut atteindre 270 tr/min^{*}, soit des performances intermédiaires entre celles du Stirling 1.0 et celles du Stirling 1.1 - la notice indique une différence de température minimale de fonctionnement de 20°C, donc assez proche des 22°C constatés sur le moteur Stirling 1.0

^{*} équipé de la soupape de décharge installée sur les dernières versions des moteurs [1.1](#) , [1.2](#) , [3.5](#) et [3.6](#), il dépasse même les 370 tr/min... (voir aussi les [FAQ](#))

quelques mesures

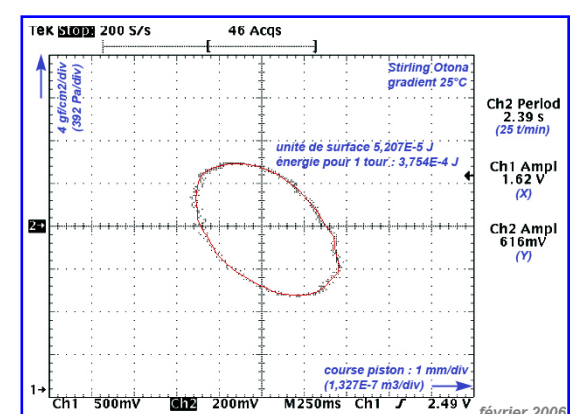


Les premières mesures réalisées sur ce modèle montrent un seuil de fonctionnement de l'ordre de 25°C, donc un peu plus élevé que les 20°C indiqués par la notice. On en est pas très loin et il est possible, après une période de rodage, que le seuil s'abaisse sensiblement.

Dans ces conditions limites, le moteur tourne à environ 25 tours/min. L'apport de chaleur est réalisé par deux résistances électriques qui totalisent 5.5 W, et l'on considère (arbitrairement) que seulement 50% de cette énergie, soit 2,75 W, sont utilisés par le moteur (le reste est dissipé vers l'extérieur).

La vitesse de rotation étant très faible, les pertes dues aux frottements aérodynamiques sont négligeables et l'on peut admettre que l'énergie de 3,754E-4 J pour 1 tour, donnée par la surface de la courbe (p,V), correspond à celle qui est

nécessaire pour vaincre les frottements mécaniques. En comparaison, le [Blue Stirling](#) n'a besoin que de 2,46E-4 J par tour, et le [moteur Stirling version 3.6](#) de seulement 6,5E-5 J (près de 6 fois moins). Le diamètre extérieur de la membrane est de 26 mm, mais c'est un diamètre de 13 mm, équivalent à l'action d'un piston mécanique, qui a été pris en compte pour les calculs. Vous trouverez dans les [FAQ Stirling](#), plus de détails concernant le matériel utilisé pour établir le diagramme (p,V)



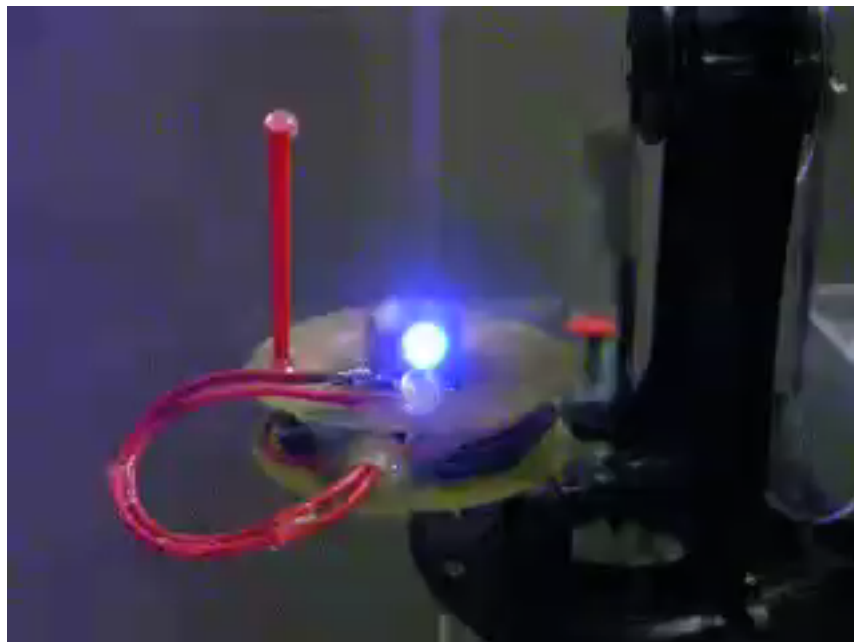
On remarquera aussi que la forme de la courbe obtenue avec cette membrane est finalement assez proche de celle produite par un piston rigide, comme celui du [Blue Stirling](#).

vidéo 1 : version de base



posé sur une tasse d'eau chaude et avec deux glaçons sur le plateau supérieur, le moteur tourne ici à quelque chose comme 220 tr/min

vidéo 2 : version générateur de courant

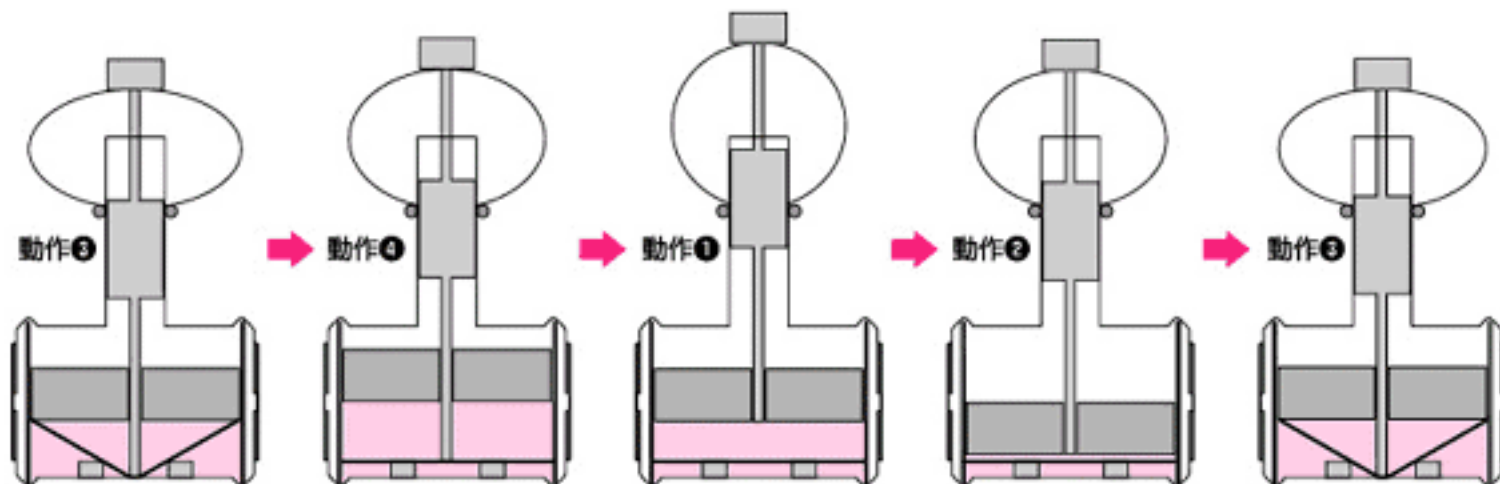


*vidéo du moteur Stirling Otona dans sa version générateur de courant
toujours posé sur une tasse d'eau chaude, sa vitesse de rotation varie entre 330 tr/min et 360 tr/min selon les passages de la séquence*

*je dois cette adaptation à Claude Bonello qui m'a aimablement signalé utiliser avec succès une bobine de moteur Crouzet sur l'une de ses [réalisations](#)
la bobine que l'on voit ici provient d'un moteur de programmeur de machine à laver (inductance 4,4 H, résistance 9,8 k Ω)
l'aimant $\varnothing$ 12 mm est de type Néodyme et sa course de 4 mm suffit à faire briller les deux LED blanches - voir les [FAQ](#)
(d'autres moteurs Stirling en version générateur de courant : [1.2](#) , [3.7](#) , [JAXA](#))*

Conclusion : *si vous souhaitez construire un premier moteur, relativement économique et qui fonctionnera dès la dernière vis serrée, c'est sans doute la solution....*

On peut trouver sur Internet, pour quelques dizaines de dollars, des modèles "Made In Japan" utilisant le principe du piston libre.
Par exemple ce modèle économique à piston libre proposé en kit par "Concept+" que vous trouverez, sur ebay, à la boutique [Men's Gangu](#).
Le déplaceur en mousse grise est situé à la partie inférieure et le piston moteur en laiton à la partie supérieure.



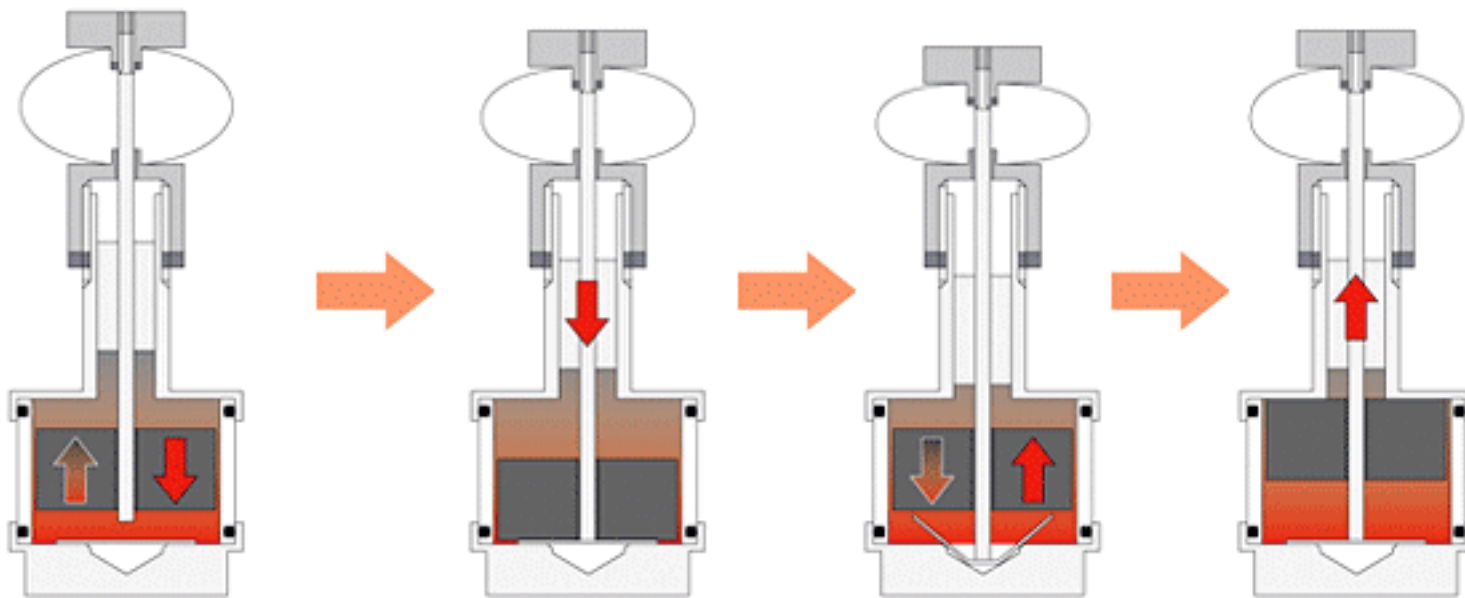
Je me suis procuré un exemplaire : le montage ne demande que quelques minutes et ne présente pas de difficultés.
On démarre le moteur en soulevant la masselotte supérieure ou bien en tapotant légèrement dessus.
Sans doute mal réglé, il ne fonctionne qu'environ 3 minutes, posé sur une tasse d'eau bouillante.
(la notice parle d'une durée de fonctionnement pouvant atteindre 1 heure...)

vidéo



un autre moteur à piston libre

Il existe chez Concept+ un second modèle "JAXA", un peu plus sophistiqué et plus performant, mais aussi un peu plus coûteux. Il est possible de se le procurer directement au Japon ou en Angleterre chez gyroscope.com.



Courant 2007, Claude Bonello l'a astucieusement transformé en générateur électrique.

Un aimant au Néodyme remplace la masselotte supérieure.
Son mouvement alternatif crée un courant qui alimente les deux LED blanches.
La bobine provient d'un moteur synchrone Crouzet de programmeur 220 V.

vidéo



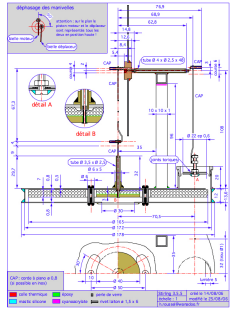
Le moteur, tel qu'il est équipé ici, peut fonctionner pendant environ 20 minutes à la fréquence de 10 Hz.

voir aussi les moteurs Stirling générateurs de courant [1.2](#), [3.7](#) et [Otona no Kagaku](#) - [Sciences & Vie](#)

c'est la version 3.5.5 qui a été retenue pour illustrer cette page,
mais la méthode peut s'appliquer à tous les moteurs de la série 3

Description de la version 3.5.5 :

[1 - animation](#)
[2 - Quicktime VR](#)



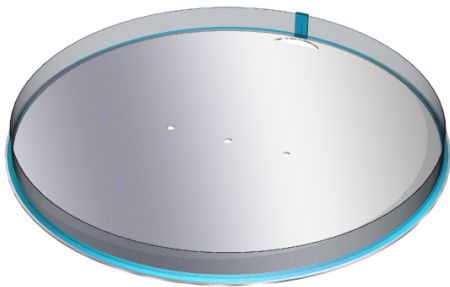
Comme son numéro de version l'indique, il s'agit d'un modèle intermédiaire entre le moteur de [type 3.5](#) et le moteur de [type 3.6](#). Il m'a semblé intéressant de lui consacrer une page car il permet de construire, avec des moyens simples et peu coûteux, un moteur Stirling LTD flirtant avec le seuil des 3°C. En contrepartie, n'étant pas équipé de roulements à billes, il sera difficile de le faire évoluer vers le modèle de [type 3.7](#), générateur de courant.

L'ordre d'assemblage diffère un peu de celui décrit [dans la page consacrée au modèle 3.1](#) car on suppose, ici, que toutes les pièces ont été fabriquées avant le début de l'opération. Les deux pages sont donc complémentaires. En cas de doutes, n'hésitez pas à vous référer à la première...

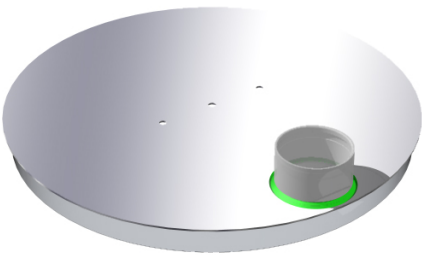
Sauf indications contraires, les colles utilisées correspondent aux codes de couleurs affichés à droite.



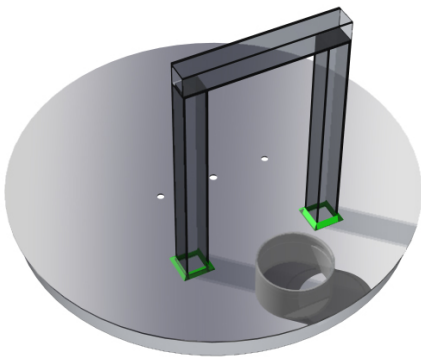
vous pouvez cliquer sur les vignettes pour les agrandir



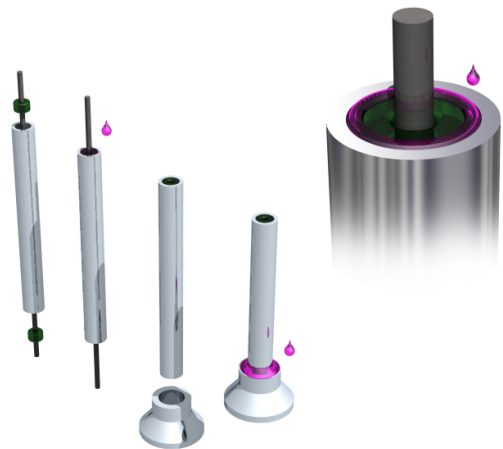
1 collez le ruban de Rhodoïd de 12 mm x 560 mm sous le plateau supérieur, en le maintenant en place par de petits morceaux d'adhésifs



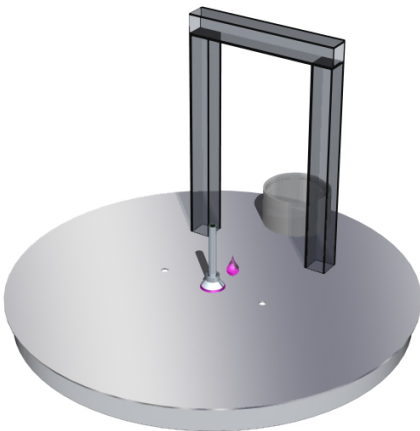
2 après l'avoir dépoli à la toile émeri sur quelques mm, collez le cylindre moteur (portion d'emballage de pellicule 24 x 36) sur le plateau supérieur



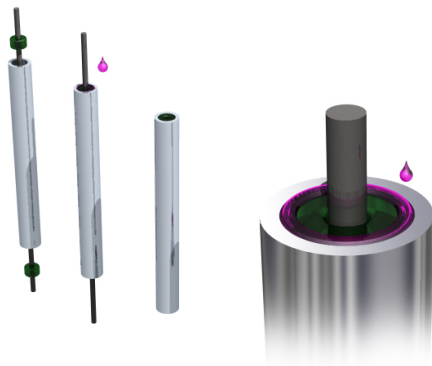
3 le portique, assemblé au préalable avec de la colle cyanoacrylate, est fixé parfaitement d'équerre sur le plateau supérieur



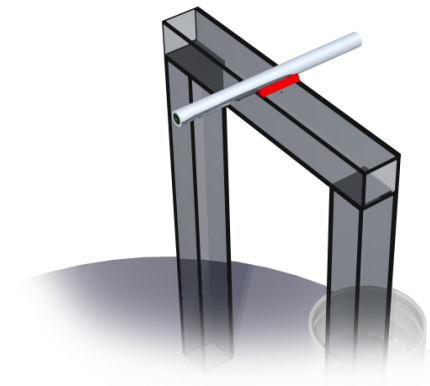
4 passez un morceau de corde à piano Ø 0,8 au travers de la glissière du déplaceur, insérez les 2 perles de verres et immobilisez les avec une goutte de colle - ensuite, collez l'embase



5 la glissière terminée peut à présent être fixée au centre du plateau supérieur



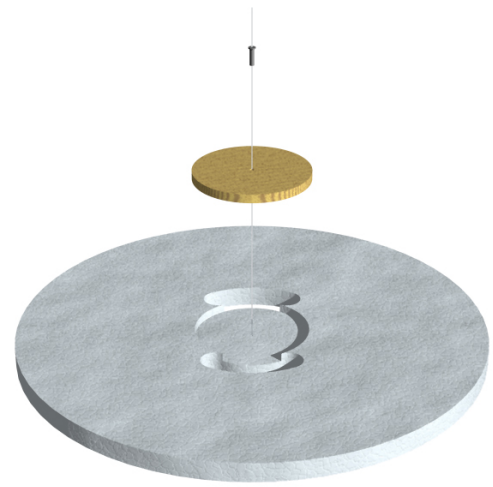
6 préparez le palier du volant moteur de la même façon qu'en **4**



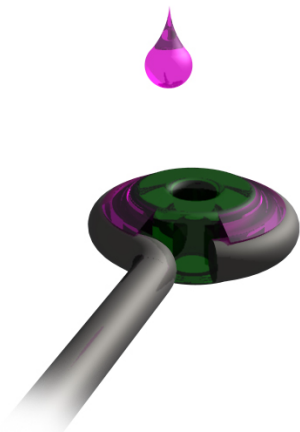
7 fixez le palier sur la potence avec de la colle thermique et vérifiez sa position - au besoin, vous pourrez rectifier l'alignement au cours du refroidissement



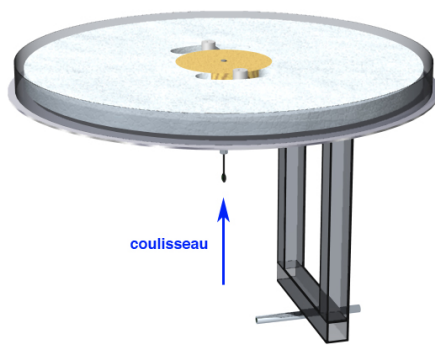
8 vissez les deux entretoises



9 à l'aide d'époxy rapide installez le disque de contreplaqué (ep 3 mm) dans le déplaceur - enduisez ensuite l'extérieur du rivet de la même colle et placez-le au centre du disque



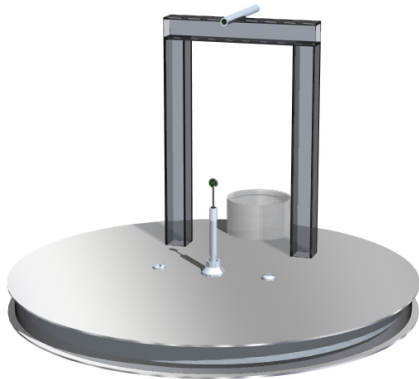
10 avec une goutte de colle, fixez une perle de verre dans l'anse du coulisseau



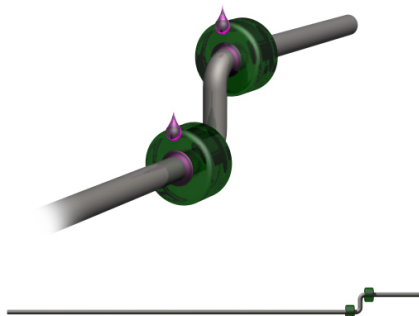
11 assemblez le déplaceur et le coulisseau, soit avec de la colle thermique, soit en brasant à l'étain le coulisseau et le rivet - attention à respecter l'orientation - n'oubliez pas une petite goutte d'huile fine



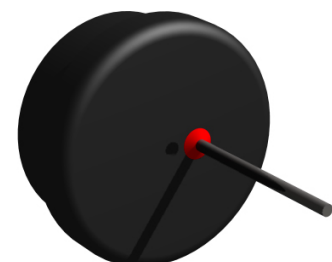
12 vous pouvez à présent fermer le cylindre principal en vissant le plateau inférieur - le collage définitif et l'étanchéité ne se feront qu'à la fin de l'assemblage, après vérifications...



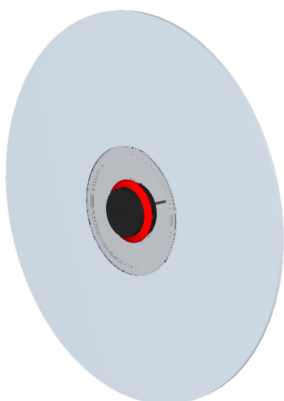
13 à ce stade, votre moteur pourrait ressembler à peu près à cela !



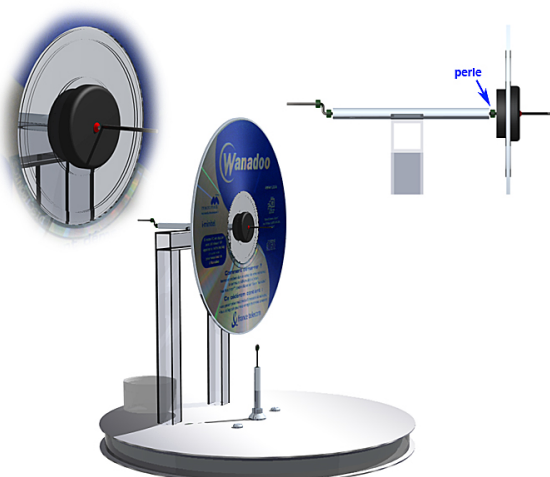
14 immobilisez avec une goutte de colle 2 perles de verre sur la manivelle



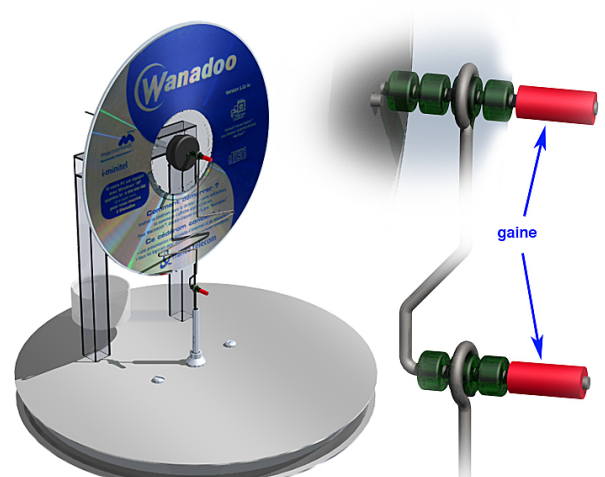
15 préparer le moyeu du CD en y insérant l'axe de bielle



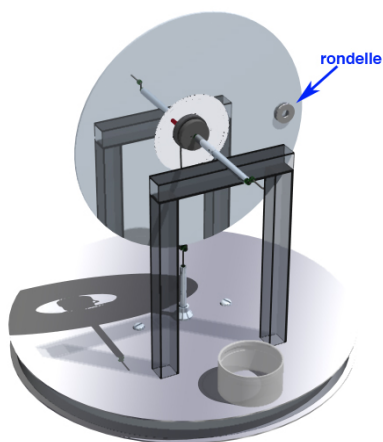
16 collez le moyeu au centre du CD



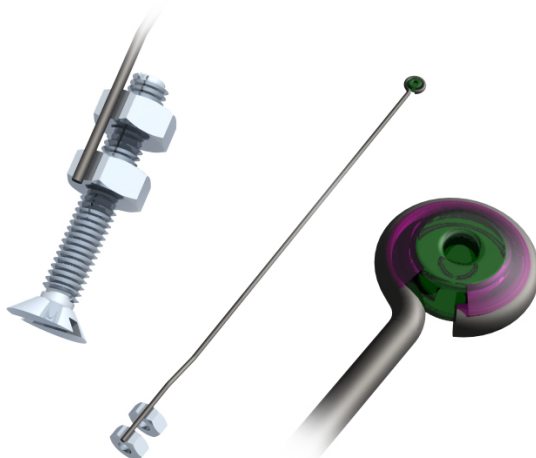
17 montez l'axe du CD dans le palier, insérez une perle de verre, puis le CD que vous immobilisez à la colle thermique - vous avez quelques secondes pour ajuster le déphasage



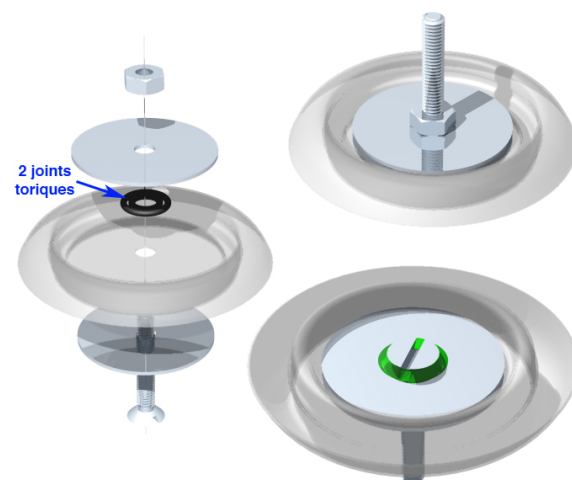
18 accrochez la bielle zigzag à son axe et au coulisseau, sans oublier les perles de verre - bloquez le tout avec un morceau de gaine de fil électrique



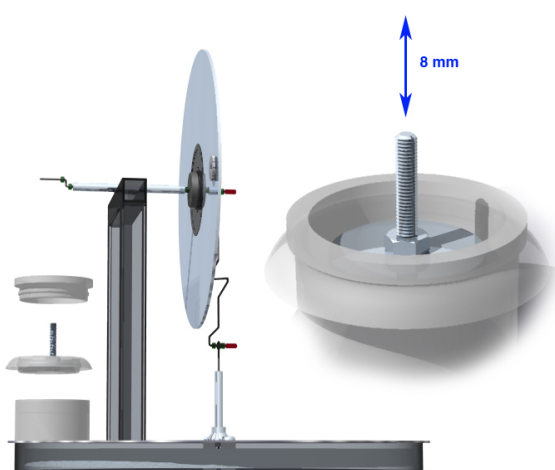
19 cette position n'est pas stable : le volant tourne, entraîné vers le bas par le déplaceur - vous pouvez l'équilibrer avec une rondelle fixée à l'opposé de l'axe de la bielle du déplaceur



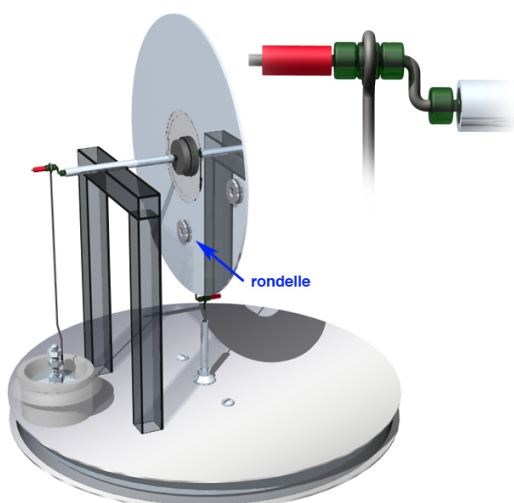
20 préparez la bielle moteur en brasant à l'étain une tige de CAP Ø 0,8 sur 2 écrous positionnés sur une vis M3 - de la même façon qu'en **10**, collez une perle de verre dans l'anse de la bielle



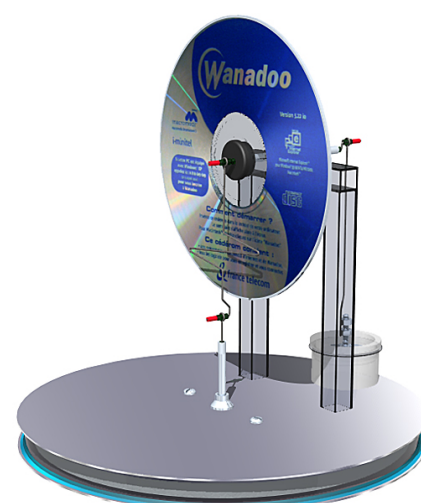
21 piston moteur : glissez sur la vis M3 une rondelle Ø22, la membrane, 2 joints toriques, la seconde rondelle, et serrez modérément le tout avec un écrou - rendre étanche la tête de vis avec un cordon de colle époxy



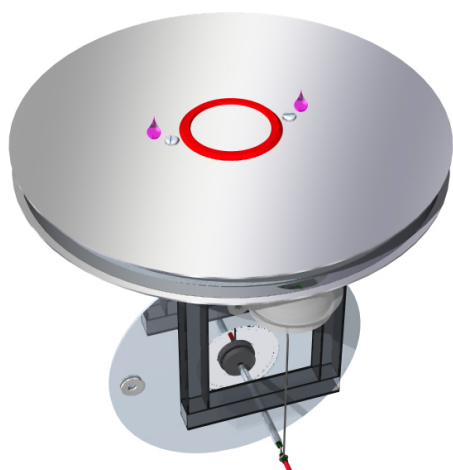
22 placez le piston moteur équipé de sa membrane sur le cylindre et immobilisez-le avec le bouchon évidé selon le plan - vérifiez que le débattement du piston est de l'ordre de 8 mm



23 vissez la bielle moteur sur le piston, et accrochez-la à la manivelle - procédez à l'équilibrage du piston moteur en collant une 2ème rondelle sur le volant



24 après avoir vérifié que le moteur tourne librement à la main, et qu'il n'y a pas de point dur, appliquez un cordon de silicone à la jonction du plateau inférieur et de la paroi du cylindre du déplaceur



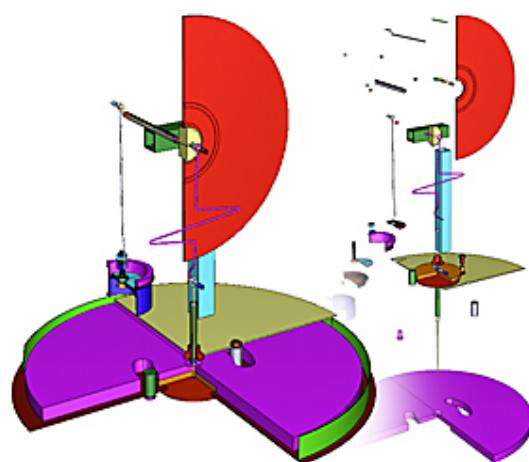
25 il ne reste qu'à fermer la trappe de visite, soit avec de la colle thermique, soit avec de la colle au néoprène transparente, et à déposer 4 gouttes de colle pour étanchéifier les 4 têtes de vis des entretoises



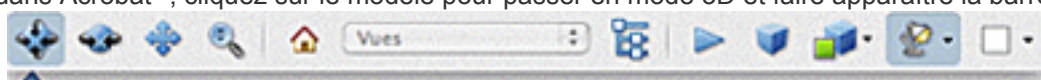
26 pour terminer, vous pouvez réaliser cet écorché en découpant soigneusement votre modèle à l'aide d'une bonne cisaille (non, non, je plaisante... 😊)

27 [1 - animation](#)
[2 - Quicktime VR](#)

[éclaté Acrobat 3D](#) - démontez et remontez l'écorché, examinez chaque pièce en gros plan et sous tous les angles



une fois dans Acrobat *, cliquez sur le modèle pour passer en mode 3D et faire apparaître la barre de menu



suivante :

de gauche à droite vous trouverez les outils de : rotation, toupie, déplacement, zoom, vue par défaut, arborescence, lecture et arrêt de l'animation, perspective, rendu, luminosité, couleur du fond

vous pourrez sélectionner l'un des éléments par un clic gauche de souris puis, avec un clic droit, lui appliquer un certain nombre de modifications : masquer, isoler, rendre transparent, zoomer (la pièce zoomée devient le centre de rotation de toute la scène)

* Adobe Reader 8 ou Adobe Acrobat 8 (ou ultérieurs) conseillés

> mon moteur ne fonctionne pas !

Normalement, en suivant les plans et en respectant les matériaux indiqués, ça devrait fonctionner, mais...

Si ce n'est pas le cas lors de la première mise en route, essayez de créer une différence de température importante entre les deux plateaux

Par exemple, vous pouvez placer votre moteur au dessus d'un récipient d'eau très chaude et disposer des cubes de glace sur le plateau supérieur, puis lancer doucement le volant à la main dans un sens et dans l'autre - en effet le sens de rotation dépend du déphasage de + ou - 90° que vous avez réglé entre le piston et le déplaceur (*une indication toute bête, mais peut-être pas inutile, ces petits moteurs, pas plus que ceux des voitures, ne démarrent tout seuls : il faut obligatoirement les lancer à la main !*)

Si dans ces conditions il ne tourne toujours pas, c'est qu'il y a vraiment un problème...

Cela peut provenir de :

1 - l'étanchéité :

Pour vérifier l'étanchéité, vous pouvez par exemple, après avoir déconnecté la bielle du piston moteur, vous assurer que sur une source de chaleur modérée, la membrane se soulève et s'abaisse d'elle même lorsque vous bougez le déplaceur d'un plateau à l'autre.

Un moyen un peu plus "scientifique" consiste à confectionner un manomètre à eau simplifié avec 1 m de durite silicone (*Ø 2 mm int - magasins de modélisme*)

Sans appliquer de source de chaleur, en connectant à nouveau la bielle du piston moteur et en tournant le volant à la main, on peut voir le liquide se déplacer de quelques cm de part et d'autre du point d'équilibre (*1 cm de différence entre les niveaux correspond à une pression d'environ 1 gf/cm2*)

Si on arrête le volant au PMH (*piston moteur en position haute*), la différence entre les niveaux est à son maximum, et on peut alors vérifier l'étanchéité du moteur en observant le temps que met le manomètre pour retourner au point d'équilibre (*pression = 0*)

Selon l'étanchéité du moteur, la durée peut varier de quelques secondes à plusieurs minutes, mais pour qu'il fonctionne, il est nécessaire que ce retour à l'équilibre soit assez nettement supérieur à la durée d'une révolution : pour un moteur susceptible de tourner à 60 t/min, comptez entre 5 et 10 secondes

n'oubliez pas :
- d'assurer l'étanchéité au niveau des 4 vis qui fixent les entretoises (m) en laissant s'infiltrer une goutte de colle cyanoacrylate (liquide) entre les têtes de vis et la surface du plateau
- de déposer une dernière goutte d'huile à l'endroit où le coulisseau (v) pénètre dans la glissière (f)
([repères page 3.1](#))

2 -les frottements :

La puissance fournie par ce type de moteur étant très faible (*15 mW convertis en énergie mécanique sur le 1.2*) il faut que les frottements soient aussi réduits que possible au niveau du coulisseau et des paliers.

Un test simple consiste à débrancher toutes les bielles et à lancer le volant à la main : le CD doit tourner une cinquantaine de tours avant de s'arrêter, qu'il soit équipé de roulements ou de billes de verre.

Si vous utilisez des paliers en perles de verre, il est très important d'utiliser un axe en corde à piano de Ø 0,8 mm - si vous utilisez un axe fait dans un autre matériau, ou bien il ne sera pas assez rigide, ou bien vous devrez augmenter son Ø et les forces de frottement seront trop élevées.

Si vous avez monté l'axe du volant sur des roulements, l'axe peut avoir dans ce cas une section plus importante - mais je vous conseille cependant de continuer à utiliser de la corde à piano Ø 0,8 mm et des perles de verre pour le guidage vertical du déplaceur - ce dispositif, une fois huilé, assure une bonne étanchéité et des frottements réduits.

3 - le déphasage :

Très important, avez-vous bien respecté le déphasage de 90° entre le mouvement du déplaceur et celui du piston moteur ? C'est vrai que pour favoriser le couple ou la vitesse de rotation, on peut jouer un peu sur cette valeur, mais pour les premiers tests conservez 90°.

4 - les entretoises (uniquement pour les moteurs de la série 3.x) :

Les plateaux de la série 3.x, réalisés dans des feuilles d'alu de 0.8 mm ne sont pas assez rigides par eux-mêmes - si l'on omet d'installer les 2 entretoises indiquées, au lieu que ce soit le piston moteur qui se déplace, ce sont les plateaux qui se déforment de quelques 1/10 de mm, et bien sûr, le moteur ne tourne pas...

Important : les 2 entretoises doivent impérativement être réalisées en matière plastique (polyamide, résine acétale, etc.) afin d'éviter de créer un pont thermique entre les deux plateaux - pour la même raison, elles seront fixées par 2 vis indépendantes et non par un boulon traversant

> comment réaliser la membrane thermoformée ?



Ce n'est pas très compliqué : il faut fabriquer la forme que l'on souhaite obtenir dans du bois ou de la résine de carrossier (*photo de droite*), puis la coller sur une feuille de carton ou de contreplaqué, et enfin la percer de petits trous de Ø 1 mm

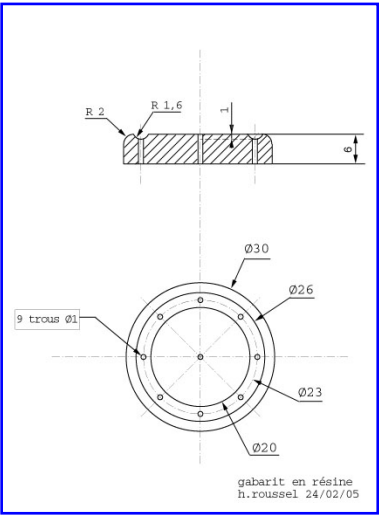
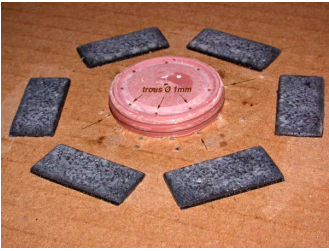
Ensuite, tout en maintenant la membrane en position (*avec de l'adhésif*), on la chauffe à bonne température avec un pistolet thermique





Lorsqu'elle est assez chaude, les petits plis de surface disparaissent, et il suffit alors d'aspirer par en dessous (*avec un aspirateur*) et de laisser refroidir le tout en continuant d'aspirer

Sur la photo de droite, les rectangles noirs sont des pastilles d'adhésif double face qui servent à maintenir la membrane en position - elles présentent le défaut de ne fonctionner qu'une ou deux fois, aussi il faut les recharger avec de la colle repositionnable entre chaque opération



Attention, cette méthode n'est valable qu'avec des membranes en vinyle (*morceaux prélevés dans des gants jetables*), et la forme représentée ne convient qu'aux emballages transparents de pellicules 24 x 36 (*... et pas du tout aux boîtiers noirs avec bouchons gris...*)

> où peut-on trouver les billes de verre ?

Dans tous les bons magasins de bricolage, au rayon consacré aux loisirs artistiques : dessin, modelage, peinture - il y a toujours dans un coin des sachets de perles de verre destinées, je pense, à réaliser des colliers ou des bracelets...

> comment réalise-t-on l'équilibrage statique ?

La méthode la plus directe consiste à peser les éléments accrochés à chaque manivelle (côté déplaceur et côté piston moteur), puis à faire un rapport de bras de leviers, et compenser par des poids d'équilibrage

Une autre méthode, qu'autorise le déphasage à 90°, c'est d'équilibrer séparément, et par tâtonnement, les deux équipages mobiles : en plaçant le piston moteur au PMH ou PMB, la tête de bielle du déplaceur se trouve sur un axe horizontal passant par l'axe du volant et l'entraîne vers le bas - il suffit alors de placer à l'opposé une petite masse qui l'équilibre dans cette position - et on recommence la manip pour la bielle moteur...

C'est d'ailleurs un bon moyen de vérification de la première méthode, mais il faut bien sûr que le volant tourne très librement...

> quel débattement la membrane moteur doit elle avoir ?

La bielle moteur ne doit pas forcer la membrane : un débattement supplémentaire de 1 mm de part et d'autre des points morts haut et bas me semble être un bon compromis.

Je procède comme ça : je déconnecte la tête de bielle et je vérifie que sous le poids de la bielle, du piston et de la membrane, l'axe de la tête de bielle descend d'environ 1 mm sous celui de la manivelle au PMB - ensuite je retourne le Stirling de 180°, je fais pivoter la manivelle pour qu'elle se positionne au PMH, et je contrôle que l'axe de la tête de bielle est de 1 mm sous l'axe de la manivelle

... je ne sais pas si j'ai été très clair... 😊

Alors pour résumer : le débattement libre de la membrane doit être supérieur de 2 mm à la course de la manivelle.

> comment faire pour évaluer la puissance ?

- 1 - si l'on veut mesurer la puissance mécanique disponible, une méthode assez simple consiste à poser le moteur sur une balance électronique sensible au 1/10 gf et à freiner plus ou moins le volant avec deux cotons-tiges - ils seront placés de part et d'autre du volant, dans le plan horizontal passant par son axe, de façon à obtenir une composante verticale - on utilise ensuite la formule classique : puissance (W) = couple (m.N) x oméga (radians/s)

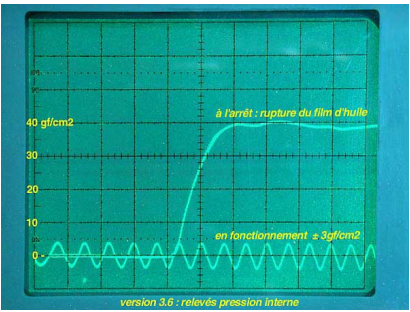
(si on en a la possibilité, on peut enregistrer la scène en vidéo, en énonçant les variations de poids lues sur la balance - ensuite, en repassant le film image par image, on récupère les valeurs du couple associées à chaque vitesse de rotation - du fait de l'inertie du volant et de la faible puissance disponible, la vitesse de rotation varie assez lentement, et il suffit de quelques tours pour qu'elle se stabilise et pour lire la variation de poids sur la balance)

(j'ai réalisé aussi quelques tests rapides avec le [moteur version 1.2](#), et il semble possible d'utiliser le générateur de courant pour évaluer la puissance produite - après avoir redressé et filtré le courant, on pourra mesurer la puissance électrique et en déduire la puissance mécanique - mais cette méthode ne semble pas applicable aux faibles vitesses de rotation, car en court-circuitant les bobines, le moteur tourne encore à plus de 100 t/min)

- 2 - s'il s'agit de mesurer la part de l'énergie thermique convertie en énergie mécanique, la méthode classique est celle du tracé du diagramme (p,V), décrite en détails dans la page du [Blue Stirling](#) et [plus bas](#)

(la différence entre les mesures 1 et 2 permet d'évaluer la puissance mécanique dissipée en frottements)

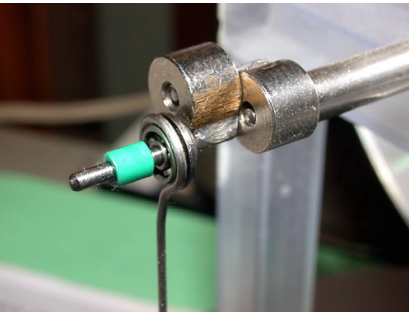
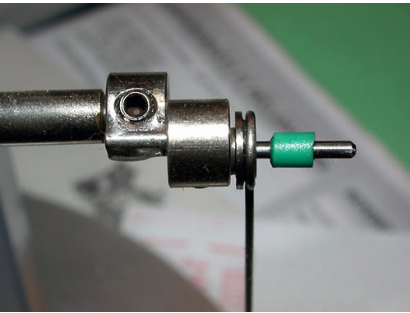
> comment est réalisée l'étanchéité au niveau du guidage de l'axe du déplaceur ?



La viscosité du film d'huile est suffisante pour assurer l'étanchéité jusqu'à une pression de l'ordre de 40 gf/cm² - la pression courante dans un modèle 3.X ne dépasse guère 3 gf/cm²...

La méthode employée pour relever la courbe est assez rudimentaire : sur l'une des canules, on connecte le manomètre, et sur l'autre on branche un tuyau dans lequel on souffle... lorsque le film d'huile se rompt sous l'effet de la pression, on entend distinctement le bruit de petites bulles d'air qui éclatent à la surface... il suffit ensuite de maintenir la pression juste à la limite de l'apparition des bulles...

> comment fabriquer une manivelle dont la course soit réglable ?



M'inspirant des solutions d' André Maberto, j'ai bricolé un jour ce système d'excentriques qui permet à la fois le réglage de la course, de 0 mm (peu d'intérêt) jusqu'à 15 mm, et le réglage du déphasage à un angle quelconque.

Utilisé sur [la version 3.7](#), il est réglé ici pour une course de 6 mm du piston moteur, et un déphasage de 90° - le moteur conserve ainsi les mêmes performances, quel que soit le sens de rotation, que la source de chaleur soit située d'un côté ou de l'autre...

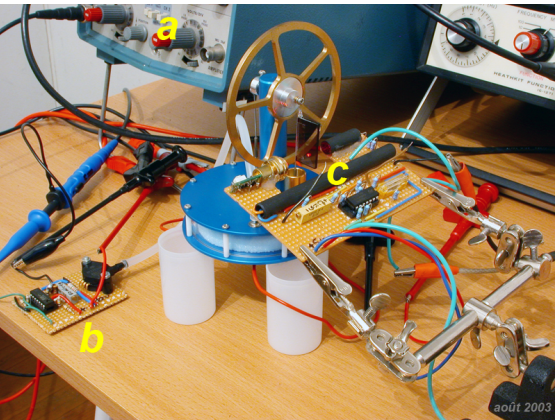


L'ensemble est construit à partir de deux bagues d'arrêt en laiton nickelé que l'on trouve en sachet dans les boutiques de modélisme (à droite)

Les dimensions de ces bagues sont les suivantes : Ø int 2 mm, Ø ext 7 mm, haut 5 mm - percées d'origine à un Ø 2 mm, elles permettent malgré tout d'utiliser de la CAP de Ø 1,5 mm, une fois la petite vis BTR bien serrée...

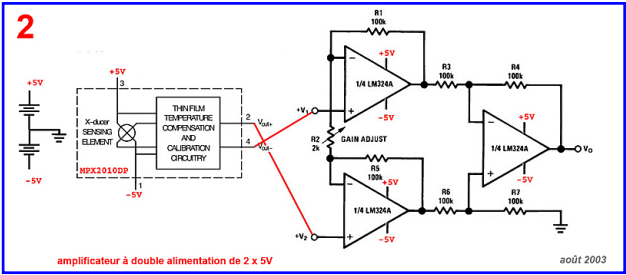
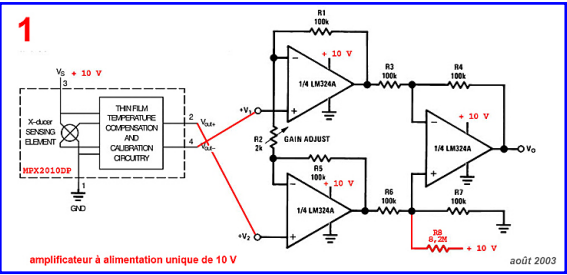
Méthode de fabrication : un morceau de CAP maintenu perpendiculairement dans le mandrin d'une perceuse à colonne, pendant qu'on le soude à l'étain, tangentiellement à la bague...

> pouvons-nous avoir plus d'explications concernant la méthode utilisée pour établir le diagramme (p,V) du [Blue Stirling](#) ?

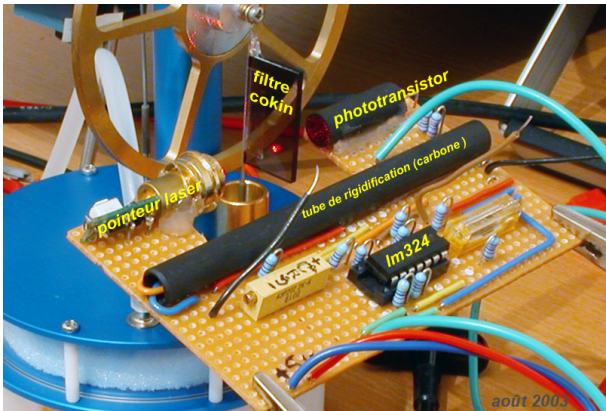


(a) - pour visualiser la courbe, il faut au minimum disposer d'un oscilloscope possédant le mode XY, si possible à mémoire : sur l'entrée X on applique le signal correspondant au déplacement du piston moteur, et sur l'entrée Y celui correspondant à la pression interne du moteur.

(b) - la pression interne est convertie en tension électrique par un circuit associant un capteur de pression Motorola MPX2010DP à un amplificateur à base de lm324



Ci-contre, deux versions possibles : la première (1) à alimentation unique de 10 V et résistance d'offset fournit un signal de sortie toujours positif, la seconde (2), à alimentation symétrique (+5 V et -5 V), donne un signal de sortie positif pour une pression > à la pression atmosphérique, et négatif dans le cas contraire. Les deux schémas de l'amplificateur correspondent sensiblement à celui donné à la page 16 de la note technique .pdf du lm324. Si vous ne disposez pas d'une alimentation symétrique, vous pouvez la remplacer par deux piles de 4,5V connectées en série. La consommation des lm324 étant faible, elles vous assureront une autonomie suffisante. Autrement, le montage à alimentation unique fonctionne correctement, mais vous serez limité à des pressions négatives de quelques gf/cm². Enfin, vous n'aurez pas de surprise avec ces montages : les caractéristiques, tant du capteur que du lm324, étant parfaitement définies, ils devraient fonctionner immédiatement.



(c) - étant donné la faible puissance mécanique développée par ces petits moteurs, le problème qui se pose, pour mesurer le déplacement du piston moteur, est de trouver un dispositif prélevant le moins d'énergie possible. Il m'a semblé que la meilleure solution serait d'utiliser un système sans liaison mécanique. Un faisceau lumineux provenant d'un pointeur laser traverse un filtre optique dégradé linéairement (et fixé à la bielle moteur) dans lequel il est plus ou moins absorbé en fonction de la position du filtre. Il est ensuite converti en courant électrique par le phototransistor Q1 placé au fond d'un petit tube de carbone de Ø 8 mm x 25 mm pour éviter les lumières parasites. Le filtre (Cokin A 121 F *) en résine se divise facilement en marquant le trait de coupe au cutter, puis en le cassant comme on le ferait pour une vitre.



Le schéma électrique est dérivé aussi de celui fourni dans la note technique du LM324, et ne présente pas de difficultés particulières. Cependant, il est possible que vous soyez amené à modifier la valeur de certains composants, par exemple la résistance variable R1, en fonction du pointeur, du filtre ou du phototransistor que vous utiliserez (le pointeur laser est un modèle courant, alimenté par 3 piles boutons, et qui s'accommode d'être connecté en 5V).

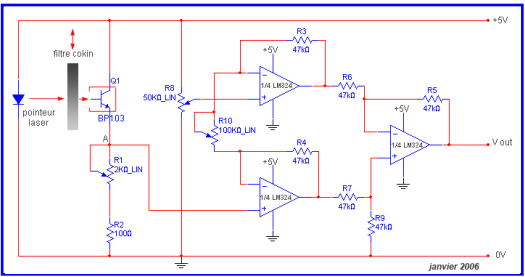
- R1 est réglée de façon à avoir 2,5 V au point A, le piston moteur étant au milieu de sa course entre le PMH et le PMB, le faisceau laser passant au centre du filtre orienté avec sa partie la plus foncée vers le haut. En fonction des composants utilisés et des possibilités de votre oscilloscope, vous pourrez éventuellement visualiser le signal directement au point A, sinon utilisez la sortie Vout. La résistance variable R1 n'apparaît pas sur les photos de gauche, elle était alors remplacée par une résistance fixe.

- R8 sert à régler l'offset du signal de sortie et peut être positionnée à mi-course dans un premier temps.

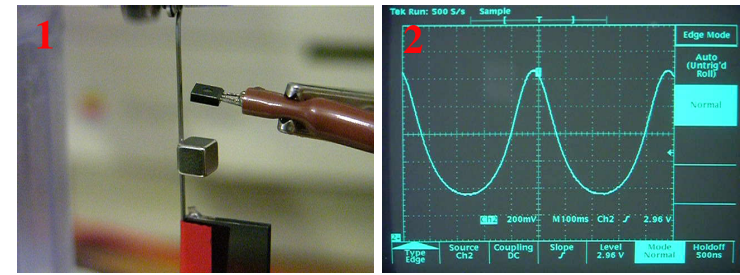
- R10 définit le gain de l'ampli. Pour un gain de 1 : R10 = 100 Kohms, pour un gain de 10 : R10 = 10 Kohms, etc., selon la formule de la note technique.

(voir aussi : [Blue Stirling](#), [Stirling 3.6](#), [Stirling Otona - Sciences & Vie](#))

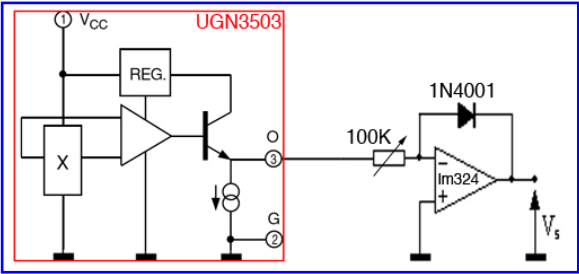
* on peut se procurer le filtre Cokin A 121 F pour 22,90 euros chez A.M.C Photo, 93-95 bd Beaumarchais, 75003 Paris, tél. 01 42 71 60 90



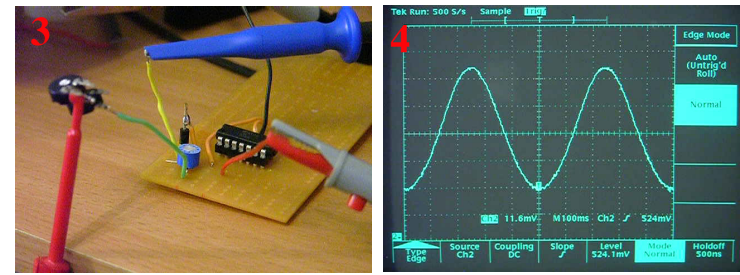
////////



Une autre méthode consiste à mesurer, avec un capteur à effet Hall type UGN3503, l'intensité du champ magnétique produit par un aimant permanent en fonction de sa distance (1).



La fonction est loin d'être linéaire, peut-être du genre 1/r² dans l'axe NS de l'aimant, et le signal obtenu est fortement déformé (2).

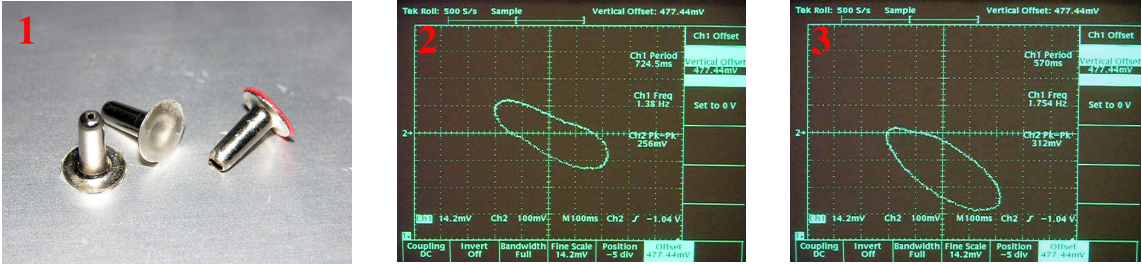


Toujours est-il qu'en utilisant cet amplificateur logarithmique rudimentaire (3), après avoir défini la distance de mesure et effectué le réglage de linéarité avec la résistance de 100 kΩ, on obtient un signal acceptable (4)

L'avantage de ce dispositif très compact, c'est qu'il peut être rendu solidaire du moteur. Les mesures restent ainsi possibles à vitesses "élevées", même si le moteur est sujet à des vibrations. C'est plus difficile avec le dispositif à diode laser.

En [vidéo](#) sur le modèle 3.6.

> comment fonctionne la soupape de décharge et comment la réaliser ? Vidéo



La soupape de décharge est constituée simplement d'un rivet tubulaire Ø 3 x 9 mm, percé à son extrémité, et sur lequel est collée partiellement une membrane souple (1).

La membrane rouge que l'on voit sur le rivet de droite (1) est en latex de 0,2 mm et provient d'un ballon de baudruche. Les membranes transparentes qui équipent les deux rivets de gauche sont en vinyle d'épaisseur 0,08 mm et sont tirées d'un gant jetable.

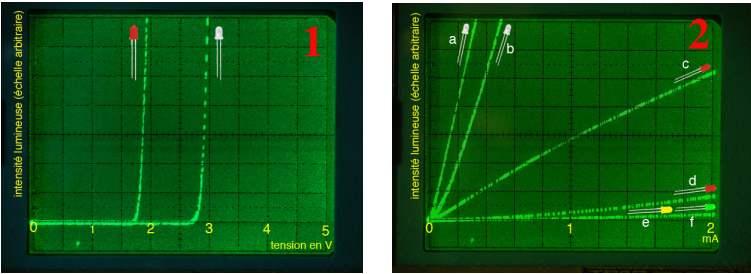
En (2), le diagramme (p,V) a été relevé sur le moteur Stirling 3.6 sans soupape de décharge : la courbe est sensiblement équilibrée de part et d'autre de la pression atmosphérique (axe des X au centre, 2 gf/cm² par division).



En (3), le moteur est équipé de la soupape de décharge avec une membrane en vinyle ep 0,08 mm : la courbe se situe presque entièrement dans le domaine des pressions négatives, ce qui a pour effet de maintenir la membrane constamment en tension. Le rendement s'en trouve amélioré, ce que confirme la surface du diagramme (p,V) en augmentation de 30 % et le gain de vitesse de 21 %.

En contrepartie, le dispositif présente un inconvénient : le fonctionnement du moteur à une pression moyenne négative d'environ - 3 gf/cm² provoque un effet de succion sur le piston moteur qui perturbe l'équilibrage et ne favorise pas les faibles vitesses de rotation...

> avec un moteur Stirling générateur de courant, faut-il utiliser des LED rouges ou des LED blanches ?



Cela dépend des caractéristiques des bobines utilisées...

En mesurant la luminosité produite par les deux types de LED rouges et blanches en fonction de la tension (écran 1), on constate que les LED rouges présentent une plage d'utilisation se situant entre 1,7 V et 1,9 volts, alors que pour les LED blanches la plage d'utilisation se situe plus haut, entre 2,8 V et 3 V. Conséquence : si vous utilisez des bobines de faible impédance, comme celles de relais 12 V ou 24 V qui ont du mal à fournir des tensions élevées, les LED rouges sont préférables.

Si l'on s'intéresse maintenant à la luminosité produite par ces mêmes LED en fonction de l'intensité du courant les traversant et que l'on y ajoute d'autres LED jaunes et vertes (écran 2) , on s'aperçoit que les LED blanches nécessitent beaucoup moins de courant, jusqu'à 10 fois moins (*) que par exemple la LED rouge repère c. Les LED blanches s'accommoderont donc mieux de bobines à forte impédance produisant une tension plus élevée et un faible courant, comme celles de relais 220 V ou 380 V ou de celles provenant de petits moteurs

synchrones type Crouzet équipant les programmeurs 220 V des machines à laver.

(*) Les résultats de ces mesures photométriques réalisées dans l'axe optique des LED sont assez délicats à interpréter, surtout en terme de rendement. Si l'on s'intéresse, par exemple, au rendement énergétique global, il faudrait faire intervenir l'angle de rayonnement qui peut varier fortement d'un modèle à l'autre. Les LED blanches **a** et **b** ont un angle de rayonnement réduit, de l'ordre de 20°, voire moins. La LED rouge **c** présente un angle de peut-être 60°. Les LED **d**, **e**, **f**, un angle encore supérieur (elles sont du type "diffusantes"). Une LED avec un angle de rayonnement de 60° produira (en théorie) dans son axe, une intensité lumineuse environ 10 fois plus faible qu'une LED ayant un angle de 20°. Les performances remarquablement faibles des LED jaunes et vertes (**e**, **f**) sont probablement dues au cumul d'un angle de rayonnement important et d'un rendement assez bas.

Étonné par les résultats de mesures réalisées en 2003 qui indiquaient que les LED rouges présentaient un rendement 2 à 3 fois supérieur à celui des LED blanches, j'ai contacté l'administrateur du site. Il m'a aimablement répondu que le rendement des LED blanches avait évolué depuis ses mesures de 2003. On peut considérer qu'il est aujourd'hui assez proche de celui des LED rouges : 50 lm/W pour les LED blanches contre 60 lm/W pour les LED rouges.

- Par ordre décroissant de luminosité, les LED de l'écran 2 sont les suivantes :
- a : LED blanche transparente provenant d'une lampe torche actuellement commercialisée en grandes surfaces
 - b : LED blanche transparente de chez Conrad (référence interne 078162-62)
 - c : LED rouge standard de chez Conrad
 - d : LED rouge diffusante à "faible courant" de chez Conrad (référence interne 186902-62)
 - e : LED jaune diffusante de chez Conrad
 - f : LED verte diffusante de chez Conrad

Curiosité :



à l'aide de ce petit spectroscopie gradué en carton, que l'on peut se procurer chez [Pierron](#) pour 13,20 euros, il est possible de visualiser le spectre d'une LED blanche **(1)**

en décalant la LED vers le bas de la fenêtre du spectroscopie, on obtient ce spectre bizarre qui repose à sa partie inférieure sur une droite horizontale et dont le profil supérieur semble être lié à l'intensité du rayonnement pour une longueur d'onde donnée **(2)**



il est possible que ce soit ça car le profil souligné en blanc **(3)** ressemble curieusement à cette courbe de réponse spectrale extraite d'un article de [Wikipedia](#) sur les LED

