

Etude d'une machine thermique : le moteur de Stirling

Avertissement : ces moteurs sont fragiles, en cas de problème, il faut **immédiatement** arrêter le chauffage du filament sur le transformateur sous les tables. Les principaux problèmes nécessitant une telle intervention sont les suivants : arrêt du moteur, fuite sur un circuit d'eau, déconnexion d'un tuyau sur ces mêmes circuits, autres incidents qui vous semblent suspects.

I Principe du moteur de Stirling :

I.1) Généralités

Les moteurs thermiques sont des dispositifs permettant de produire du travail mécanique à partir de chaleur. Ces machines sont à la source de la révolution industrielle du XIX^e siècle, ce sont elles qui ont permis l'essor de l'industrie avec d'abord les machines à vapeur, puis, à partir du XX^e siècle, les moteurs à explosion. L'enjeu colossal de ces machines a donné naissance à la branche de la physique connu sous le nom de thermodynamique. L'un de ses buts fondamentaux est de trouver et comprendre les quelques principes de bases utiles pour décrire le fonctionnement des machines thermiques, puis d'utiliser ce savoir pour améliorer et optimiser les machines réelles. De par les problèmes énergétiques actuels, la thermodynamique demeure une discipline aux enjeux cruciaux.

Bien que méconnu, le moteur de Stirling est en fait l'un des premiers moteurs thermiques conçu par l'homme, il date de 1816. Il a été conçu par l'écossais Robert Stirling, et a assez rapidement sombré dans l'oubli avec l'avènement des machines à vapeur. Il est réapparu vers 1940, et ses particularités intéressantes ont enclenchés de nouvelles recherches à son sujet : il n'y a ni explosion, ni échappement (on peut espérer un fonctionnement plus silencieux) et il fonctionne toujours avec le même gaz de travail, qui peut être un gaz quelconque tel que l'air. En outre, son fonctionnement est réversible : en supprimant la source de chaleur et en forçant la rotation de la machine avec un autre moteur (qui peut être électrique par exemple), on peut le transformer en réfrigérateur.

I.2) Principe de fonctionnement

Le principe de ce moteur est très astucieux : il se compose d'un cylindre dans lequel se déplace deux pistons (et non pas un comme dans les moteurs à explosion), il est schématisé sur le figure 1.

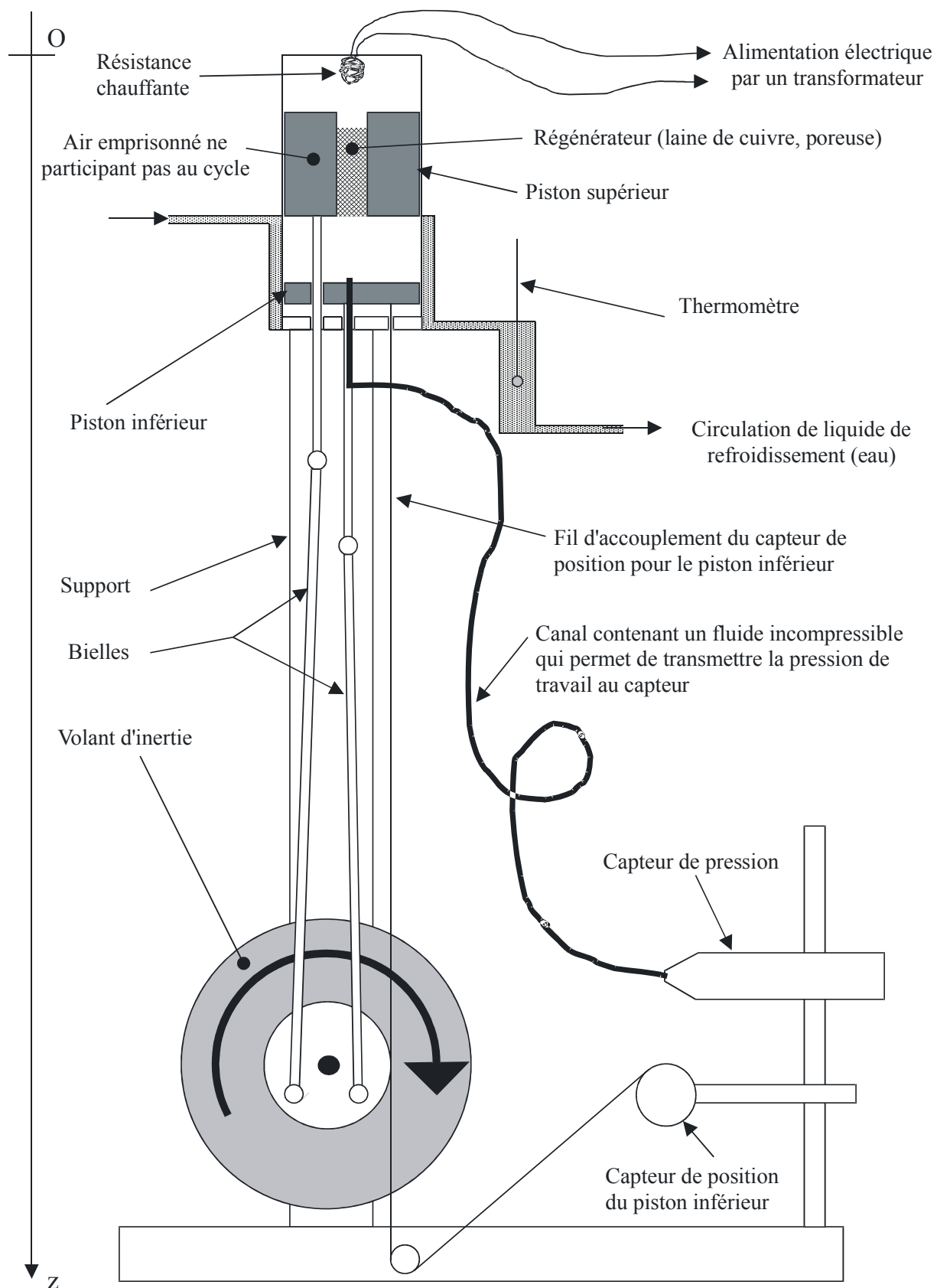


Figure 1

Toute l'ingéniosité du système repose dans un déphasage de $\pi/2$ des mouvements des deux pistons et sur le dispositif appelé régénérateur. Le gaz de travail est le gaz situé au-dessus du piston inférieur (attention à la forme du piston, qui exclut une partie du volume).

Le mouvement des pistons est schématisé sur la figure 2 : L'axe (Oz) étant orienté vers le bas, on a représenté les cotes des pistons inférieur et supérieur en fonction du temps. Le volume total occupé par le gaz est donné par la cote du piston inférieur. L'écart entre la position du piston supérieur et l'axe donne le volume de gaz chaud (V_C) et l'écart entre les deux pistons donne le volume de gaz froid (V_F)

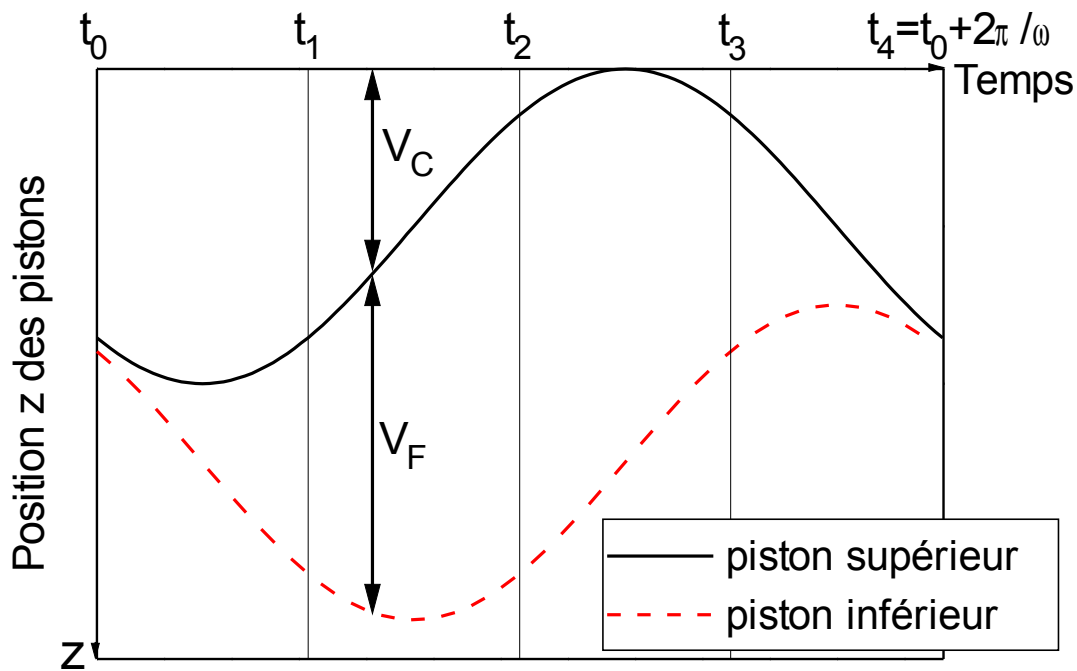


Figure 2

Le cycle peut se décomposer en 4 phases :

Phase 1, $t \in [t_0, t_1]$: tout le gaz se trouve à peu de chose près dans la zone chaude, la phase peut être considérée comme isotherme, la température du gaz est T_C , il se détend en poussant les deux pistons. Le volume final total occupé par le gaz à la fin de cette phase est V_{MAX} .

Phase 2, $t \in [t_1, t_2]$: le volume total occupé par le gaz est sensiblement constant et égal à V_{MAX} (cette phase est modélisée par une transformation durant laquelle le volume est constant, elle est dite isochore), le gaz est transféré de la zone où il règne la température T_C à la zone où il règne la température T_F . Dans le cas idéal, cette phase ne consomme pas de travail mécanique, puisqu'il n'y a pas de variation de volume (autre façon de voir : l'inertie du gaz étant très faible, le travail à fournir pour le pousser d'un côté du piston à l'autre est négligeable). Lors de cette phase, le gaz traverse le régénérateur, qui est un échangeur-accumulateur de calories : c'est un dispositif très important, côté chaud il est à la température T_C et côté froid à la température T_F . Lors de la traversée (pour la phase 2), le gaz doit progressivement abandonner de la chaleur, de telle sorte que sa température soit à T_F à la sortie du régénérateur, ce qui évite une surchauffe du circuit de refroidissement de la partie froide. Les calories cédées au régénérateur lors de cette phase seront rendues au gaz lors de la phase 4, quand il est renvoyé dans la zone chaude.

Phase 3, $t \in [t_2, t_3]$: tout le gaz se trouve à peu de chose près dans la zone froide, la phase peut être considérée comme isotherme, la température du gaz est T_F , il subit une compression jusqu'au volume V_{MIN} . Le travail à fournir est inférieur au travail récupéré lors de la phase 1, car la température du gaz est plus faible. Ce travail est fourni par l'inertie de la roue couplée au moteur. Notons que sans cette roue, on ne disposerait d'énergie mécanique pour assurer cette compression et le moteur ne pourrait pas fonctionner.

Phase 4, $t \in [t_3, t_4]$: le volume total occupé par le gaz est sensiblement constant et égal à V_{MIN} , le gaz est transféré de la zone où il règne la température T_F à la zone où il règne la température T_C . Comme pour la phase 2, dans le cas idéal, cette phase ne consomme pas de travail mécanique. Avec un régénérateur idéal, le gaz récupère les calories qu'il a cédé à ce dispositif lors de la phase 2, et il arrive dans la zone chaude à la température T_C , sans que l'utilisateur ait à lui fournir de l'énergie thermique.

I.3) Rendement théorique du moteur de Stirling

Le rendement théorique ρ_{th} du moteur de Stirling idéal peut très facilement se calculer grâce aux principe de la thermodynamique. Il se définit de la manière suivante :

(1)

On suppose que le cycle est décrit de manière quasi-statique réversible et que le gaz de travail est un gaz parfait. On considère ce qui se passe durant un cycle. Pour ce calcul, il faut se placer du point de vue du gaz de travail : nous considérerons le travail algébrique W reçu par le gaz (qui doit être négatif, puisque le gaz fournit du travail) et la chaleur algébrique Q reçue par le gaz. Dans ces conditions, le travail récupéré par l'utilisateur s'identifie à $-W$.

Pour un cycle idéal, le travail est nul durant les deux phases isochores :

$$W_2 = 0 \text{ et } W_4 = 0 \quad (2)$$

Durant les phases isothermes, le travail peut se calculer aisément :

$$W_1 = \int -P dV \quad (3)$$

Le cycle étant décrit de manière quasi-statique réversible, l'équation d'état du gaz est vérifiée à tout instant :

$$P = nRT_C/V \quad (4)$$

Après avoir substitué P par son expression dans l'intégrale (3), l'intégration est immédiate :

$$W_1 = nRT_C \ln(V_{\text{MIN}}/V_{\text{MAX}}) \quad (5)$$

De même, on peut calculer W_3 :

$$W_3 = nRT_F \ln(V_{\text{MAX}}/V_{\text{MIN}}) \quad (6)$$

D'où, le travail total $-W$ récupéré par l'utilisateur vaut :

$$-W = nR(T_F - T_C) \ln(V_{\text{MAX}}/V_{\text{MIN}}) \quad (7)$$

Le bilan calorifique est plus rapide : le régénérateur est supposé parfait, il en résulte qu'il n'est pas nécessaire de chauffer ou de refroidir le gaz lors des phases isochores.

$$Q_2 = 0 \text{ et } Q_4 = 0 \quad (8)$$

Les seules phases où il y ait échange de chaleur sont donc les phases 1 et 3. La phase 1 est celle où le gaz récupère l'énergie thermique que lui fournit l'utilisateur. Lors de la phase 3, le gaz est refroidie (il est nécessaire de refroidir à un moment le moteur, sinon la température

divergerait...), ce sont des calories perdues, on ne peut malheureusement rien en faire. Finalement, l'énergie fournie par l'utilisateur s'identifie à Q_1 . La définition du rendement prend donc l'expression suivante :

(9)

Le calcul de Q_1 est très facile grâce au premier principe de la thermodynamique (principe de conservation de l'énergie) :

$$\Delta U_1 = W_1 + Q_1 \quad (10)$$

Or le gaz est supposé parfait. Donc son énergie interne U ne dépend que de T . La phase 1 étant isotherme, il en résulte que $\Delta U_1 = 0$ et on en déduit immédiatement Q_1 :

$$Q_1 = -W_1 \quad (11)$$

En utilisant les expressions (5), (7) et (11), l'expression (9) du rendement se simplifie de façon sympathique :

(12)

II Démarrage du moteur

II.0) Travail préliminaire (à faire **avant** la séance de TP)

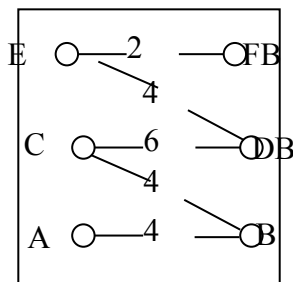
Tracer le cycle décrit ci-dessus sur les diagrammes (P,V) et (T,S).

II.1) Matériel

On dispose d'un certain nombre d'éléments :

- Moteur proprement dit, avec ses capteurs (figure 1)
- Transformateur situé sous la table : c'est lui qui fournit l'intensité nécessaire à l'alimentation de la résistance chauffante. Attention, l'intensité étant très forte, les fils électriques utilisés ne sont pas des fils standards, ce sont des fils à gros diamètre, qu'il ne faut pas mélanger avec les autres fils. La tension d'alimentation V_0 (valeur efficace) se choisit de façon approximative sur le transformateur en connectant les fils aux bornes adéquates :

Arrière du transformateur



Bornes	V_0 (V)	Bornes	V_0 (V)	Bornes	V_0 (V)
A-B	4	B-C	4	C-E	10
A-C	8	B-D	10	C-F	12
A-D	16	B-E	14	D-E	4
A-E	18	B-F	16	D-F	6
A-F	20	C-D	6	E-F	2

Figure 3

- Multimètre : on l'utilisera pour déterminer la puissance que l'on fournit au moteur (l'énergie fournie par l'utilisateur est initialement sous forme électrique, elle est intégralement convertie sous forme de chaleur grâce à la résistance chauffante). Attention, la tension fournie par le transformateur est alternative et l'intensité peut être très élevée (le multimètre ne doit être utilisé qu'en mode voltmètre AC).

- Disque de couplage : c'est un disque percé de dix trous, doté d'un aimant en son centre qui lui permet de se coller sur l'axe du moteur. Il peut éventuellement être utilisé pour déterminer la vitesse de rotation du moteur. Il est utile pour
- Oscilloscope numérique : il récupère les données issues des capteurs et permet une visualisation rapide des cycles grâce au mode XY.
- Ordinateur : il récupère les données de l'oscilloscope, avec lesquelles on peut tracer proprement le diagramme (P,V).
- Frein de Prony : c'est une pince en bois qui vient serrer l'arbre moteur pour le freiner par frottement.
- Dynamomètre : il permet de déterminer le couple (c'est-à-dire moment) qu'exerce le frein de Prony sur l'arbre moteur.

II.2) Démarrage

Avant le démarrage, on doit précéder aux opérations suivantes :

- Graissage (**opération à laisser faire par l'enseignant**)
- Mise en route de la circulation de l'eau de refroidissement, vérifier que l'eau coule normalement (le débit doit rester faible)

Ces opérations préliminaires étant faites, on peut démarrer le moteur : ceci est à faire **avec** l'enseignant

- Sélectionner une tension de chauffage suffisante (12 ou 14V)
- Mettre l'interrupteur en position marche
- Démarrer **immédiatement** le moteur à la main (si le démarrage n'est pas immédiat, la résistance chauffante n'est pas refroidie et peut griller). **Attention, il faut tourner dans le bon sens!**
- Attendre quelques minutes que le régime permanent soit bien établi. Si le moteur s'arrête, le relancer immédiatement. Si il ne veut vraiment pas tourner tout seul, arrêter le chauffage au niveau du transformateur.
- Lorsque le moteur est bien chaud, mettre en place le frein de Prony, avec le dynamomètre. On peut éventuellement changer la tension d'alimentation de la résistance chauffante. On bénéficie pour cela de l'inertie thermique de celle-ci : il est inutile d'arrêter le moteur et de refaire une procédure de démarrage, il suffit de faire la commutation très rapidement (c'est-à-dire 2-3 secondes), le moteur n'a alors pas le temps de s'arrêter. Le nouveau régime permanent ne s'établit pas immédiatement, il faut bien entendu attendre un peu après la commutation avant de commencer les mesures.

III Travail à faire

III.1) Mesurer la puissance fournie (sous forme électrique, tout est transformé en énergie thermique) au moteur grâce à un multimètre. La tension et le courant alimentant la résistance chauffante seront déterminés grâce à un multimètre (ne pas oublier de le mettre en position "AC"). Pour la détermination de l'intensité du courant, on pourra mesurer la tension sur les câbles d'alimentation de la résistance chauffante : les câbles utilisés doivent porter la référence "60V, 32A" à l'extrémité, avoir une section hors tout de diamètre 4mm et une longueur de 2m. La résistance de ces câbles est de 0.014Ω .

III.2) Utiliser l'oscilloscope pour visualiser le cycle du moteur. Déterminer la vitesse de rotation du moteur. Calculer le travail fourni par le moteur, en déduire le rendement réel du moteur. La pression sera mesurée grâce à un capteur Keller PAA-23S (voir annexe I pour le principe de son fonctionnement). La position du piston est déterminée grâce au potentiomètre tournant couplé au moteur par le fil. Les bornes extrêmes de ce potentiomètres doivent être alimentées en 12V, le mouvement est détecté en prenant la tension entre la borne de masse et la borne intermédiaire du potentiomètre. Attention, il peut y avoir un offset important. En outre, il y a une calibration à faire entre le signal électrique et la position du piston inférieur.

III.3) Transférer les courbes sur un ordinateur via le logiciel "OpenChoice". Tracer le cycle à l'aide de Kaleidagraph ou Excel (voir annexe II, III et IV pour l'utilisation de ces logiciels), puis déterminer l'aire du cycle. Comparer cette aire au travail réel produit par le moteur durant un cycle.

Pour déterminer l'aire du cycle, on peut, par exemple, imprimer le cycle et mesurer son aire manuellement en le décomposant en polygones adéquats.

Attention : le capteur de position donne la position du piston et non le volume occupé par le gaz. Il ne faut pas oublier de multiplier l'aire obtenue sur le graphe par la section du piston pour se ramener au volume. Le diamètre intérieur du piston est 6 cm.

III.4) Refaire III.1-3) pour plusieurs valeurs de chauffage et/ou de freinage.

Tracer ω en fonction de la puissance et le rendement en fonction de la puissance (facultatif, à faire pour les binômes rapides)

III.5) Analyse du rendement réel :

Le rendement pratique est souvent très loin du rendement théorique, du fait des nombreuses imperfections du moteur :

Régénérateur : ce dispositif est un compromis délicat. Si l'on veut avoir une bonne thermalisation (ce qui évite d'avoir à fournir de la chaleur supplémentaire pour réchauffer un gaz trop froid à la fin de la phase 4), il faut avoir un échangeur thermique assez long. Mais cela risque d'induire une impédance, c'est-à-dire une différence de pression entre l'amont et l'aval de l'échangeur. Or, une telle situation nécessite de fournir un travail pour transférer le gaz (alors que dans le cas idéal, la phase de transfert étant isochore, ce transfert ne nécessitait pas d'apport d'énergie mécanique). Dans les deux cas, il s'ensuit une chute du rendement.

Forces de frottements : le moteur idéal suppose qu'il n'y a pas de frottement entre les pistons et le cylindre, ce qui n'est bien entendu pas le cas. Cela induit une énergie mécanique à fournir pour vaincre cette force parasite, qui n'arrive pas à l'arbre de sortie du moteur.

Pertes de chaleur vers l'extérieur : les pistons et le cylindre sont supposés adiabatiques, ce qui n'est pas le cas. Une partie de la chaleur fournie par l'utilisateur pour la partie chaude du moteur est perdue vers l'extérieur du moteur via des fuites thermiques.

Influence de la taille du moteur : les pertes augmentent en général moins vite que le volume du moteur (par exemple, les frottements du piston sont proportionnels au diamètre du cylindre et non à leur section). Ceci fait qu'en pratique plus le moteur est gros, meilleur risque d'être le rendement.

