

## Jusqu'au diesel, dans l'arbre des moteurs thermiques

Jacques Lethuillier

Volume 30, numéro 3, septembre 1985

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/003492ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/003492ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Les Presses de l'Université de Montréal

ISSN

0026-0452 (imprimé)

1492-1421 (numérique)

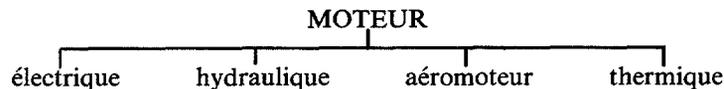
[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

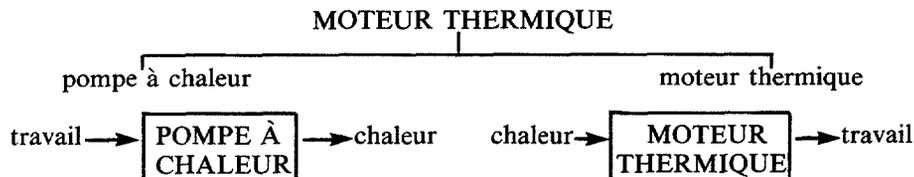
Lethuillier, J. (1985). Jusqu'au diesel, dans l'arbre des moteurs thermiques. *Meta*, 30(3), 261–273. <https://doi.org/10.7202/003492ar>

## JUSQU'AU DIESEL, DANS L'ARBRE DES MOTEURS THERMIQUES

Le moteur diesel a été inventé en 1892 par Rudolph Diesel. Très utilisé pour la propulsion et l'entraînement de grosses machines de toutes sortes, le diesel est un moteur universel. Néanmoins, faute d'un emploi généralisé sur les véhicules de tourisme, il n'a pas connu la notoriété de son cousin germain, presque demi-frère, le moteur à explosions. Mais les récentes crises de l'énergie, les progrès réalisés dans l'industrie de la construction mécanique, la préoccupation obsessionnelle des constructeurs d'équiper leurs voitures de moteurs plus économiques ont amené progressivement le diesel à talonner le moteur à essence sur son propre terrain, celui de la propulsion des véhicules de tourisme. Si, parallèlement, l'usage de la terminologie du diesel s'est développé, peu d'efforts ont été faits pour la diffuser. Nous nous proposons ici de présenter quelques aspects fondamentaux du diesel, en nous laissant guider, dans la mesure du possible, par l'organisation du système terminologique. Avant d'aborder ces concepts, toutefois, nous essayerons de préciser la place qu'occupe le moteur diesel au sein de la grande famille des moteurs thermiques.



On peut voir dans un **moteur thermique** (*heat engine*), un type particulier de moteur, c'est-à-dire de machine destinée à produire du **travail** (*work*) ou **énergie mécanique** (*mechanical energy*) à partir d'une forme d'énergie quelconque. On peut y voir aussi un type particulier de **machine thermique** (*heat engine*), une machine thermique se définissant comme un appareil permettant de convertir la chaleur en travail ou l'inverse. Selon le cas, « moteur thermique » serait donc à considérer comme un cohyponyme de **moteur électrique** (*electric motor*), de **moteur hydraulique** (*hydraulic motor*), etc., ou comme un cohyponyme de **pompe à chaleur** (*heat pump*).



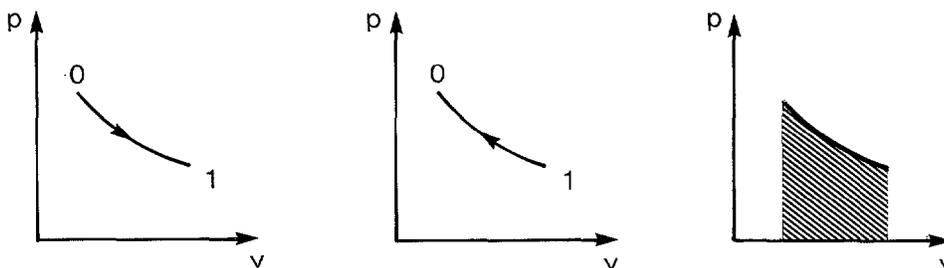
Rappelons qu'un moteur thermique sert à transformer la chaleur en force motrice. Tout moteur thermique utilise, pour réaliser une telle conversion, ce que l'on appelle un **fluide moteur** (*working fluid*). Le plus souvent, le fluide moteur est un gaz, autrement dit un corps dont l'état, susceptible d'évoluer, est défini par deux **grandeurs physiques** (*physical quantity*) indépendantes comme la pression et le volume spécifique ou la température. Au cœur du processus de conversion se trouve la **détente** (*expansion*) de fluide moteur, un type de **transformation thermodynamique** (*thermodynamic process, thermodynamic change*) obtenu grâce à un déséquilibre de pression du fluide moteur avec un élément du milieu extérieur (l'atmosphère, par exemple) ou entre deux états dans lesquels on maintient le fluide moteur.

On exploite l'écart de pression du fluide avec le milieu pour faire produire du travail au fluide. La résultante des forces de pression agit directement sur un organe mo-

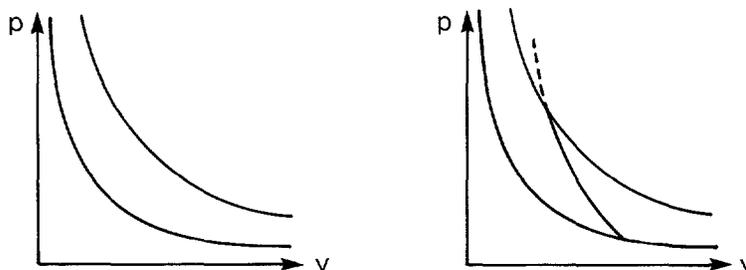
teur ou après conversion de l'énergie de pression (*pressure energy*) en énergie cinétique (*kinetic energy*) dans une **tuyère** (*nozzle*).

Au cours de la transformation qualifiée de détente, la « tension » entre le fluide moteur et l'élément avec lequel il est en déséquilibre tend à disparaître. Le fluide passe par une suite d'états le rapprochant de l'état caractéristique du milieu à basse pression. Il y a détente dès le moment où la suite d'états par lesquels passe le fluide entraîne une diminution de la pression et de l'accroissement du volume spécifique, c'est-à-dire du volume occupé par une unité de masse du fluide moteur. La détente s'accompagne généralement d'une baisse d'énergie interne (*internal energy*) du fluide, qui se retrouve sous la forme du travail fourni au milieu extérieur, du travail que reçoit un organe dit organe moteur.

On représente habituellement cette suite d'états sur un **diagramme P-V** (*p-v diagram, pressure-volume diagram*), encore qualifié de **diagramme de Clapeyron** ou de **diagramme dynamique**. L'intérêt d'un tel diagramme tient au fait qu'il permet d'apprécier directement le travail fourni par le fluide au milieu extérieur ou reçu du milieu extérieur. Les travaux échangés correspondent à l'intégrale de  $p(v)$  par rapport à  $v$ ; autrement dit, ils sont représentés par l'aire sous la courbe traduisant la détente.



Une infinité de détentes distinctes sont réalisables. Elles se différencient par la façon dont le fluide échange de la chaleur avec le milieu extérieur. La détente est dite **adiabatique** (*adiabatic*) lorsqu'elle s'effectue sans échange de chaleur, le fluide moteur étant isolé thermiquement. Pour qu'il en soit ainsi, la transformation doit se faire rapidement, de façon que la tension représentée par l'écart de température du fluide avec le milieu extérieur, si un tel écart existe, n'ait pas le temps de se traduire par des effets. Dans ces conditions, le fluide fournit du travail au milieu extérieur et ne reçoit pas de chaleur susceptible de compenser la diminution d'énergie interne que cela entraîne. Sa température, qui en constitue une mesure, baisse.



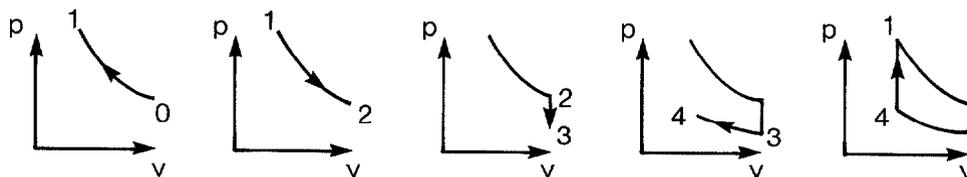
Pratiquement, seules les détente avec **apport de chaleur** (*heat addition, heat input*) ont de l'intérêt pour la production d'énergie motrice. L'apport de chaleur freine la chute de pression cependant que le volume du fluide en évolution s'accroît. Contre un surcroît de chaleur apporté au fluide, les forces de pression développent plus de travail.

Lorsque l'apport de chaleur compense juste la diminution d'énergie interne résultant de la fourniture de travail au milieu extérieur, la détente se déroule à température constante. Il s'agit d'une **détente isotherme** (*isothermal expansion*). Sur le diagramme P-V, les détente isothermes sont représentées sous la forme d'**hyperboles équilatères** (*equilateral, rectangular hyperbola*). Si l'apport de chaleur est plus important, le fluide s'échauffe et la pression diminue moins vite. À la limite, le volume peut augmenter sans que la pression ne diminue. La transformation est **isobare** (*isobaric*). Plutôt que de détente, on pourrait parler d'échauffement à pression constante. En dehors de ces cas particuliers, la détente est dite **polytropique** (*polytropic*).

Quand le fluide est passé de l'état sous pression initial à l'état complètement **détendu** (*exhausted*), sa nouvelle pression ayant atteint celle de l'élément avec lequel existait un déséquilibre, il n'est plus bon à produire de l'énergie mécanique par détente, pas plus qu'un ressort qu'on aurait fait se détendre complètement à partir de l'état comprimé. Pourtant on voudrait pouvoir le réutiliser à cette fin. Il s'agit de « restaurer » les conditions propices à la détente, autrement dit de le ramener à son état initial. Mais pas en lui faisant subir la transformation inverse, car on dépenserait la même quantité de travail que celle fournie par le fluide au cours de la transformation directe de détente et le bilan serait nul.

Le retour à l'état initial met généralement en jeu plusieurs transformations. Avec la détente, elles forment le **cycle thermodynamique** (*thermodynamic cycle*) caractérisant le fonctionnement de la machine. À l'occasion de ces transformations, la quantité de travail absorbée par le fluide moteur doit absolument être inférieure à celle qu'il a fournie au milieu extérieur pendant la détente. Pour cela, évidemment, il faut que la pression moyenne de la suite des états de retour soit plus faible que celle caractérisant la détente. Or, la seule façon de parvenir à un tel résultat, c'est d'effectuer l'évolution de retour à une température plus basse.

On peut imaginer un moteur très simple qui serait réalisé au moyen d'une pompe à bicyclette. Un gramme d'air est emprisonné entre le piston et le fond du cylindre. L'air joue le rôle de fluide moteur. On vient de le comprimer (transformation 0 → 1) grâce au piston et il occupe le volume  $V_{min}$ . Sa pression est donc supérieure à celle de l'atmosphère, mais sa température est celle de l'ambiance, un équilibre thermique ayant eu le temps de s'établir après la compression. À partir de cet état initial on laisse le fluide se détendre (transformation 1 → 2), assez lentement toutefois pour que la transformation soit isotherme. Du travail est produit, que l'on recueille sur le piston. L'air dans le cylindre ne se refroidit pas, car à mesure que son énergie se transforme en travail, de la chaleur lui est fournie par le milieu extérieur de façon à juste compenser la baisse d'énergie interne. Quand la pression à l'intérieur de la pompe est égale à celle de l'atmosphère, le fluide moteur ne peut plus fournir de travail. Il est complètement détendu. Son volume spécifique est maximal, sa pression et sa température sont celles de l'atmosphère.



Nous voulons maintenant le ramener à l'état initial, au point de départ, mais de telle façon qu'il absorbe moins de travail pendant l'évolution de retour qu'on va lui faire subir, qu'il n'en a cédé au milieu extérieur pendant la détente. Supposons que nous soyons chaudement vêtu et que nous disposions d'une chambre froide, très froide (à la température  $T_f$ ). Entrons-y avec la pompe. Au bout de quelques instants, l'air de la pompe, qui occupe le volume  $V_{\max}$ , est en équilibre thermique avec la nouvelle ambiance. Il a subi un refroidissement à volume constant (transformation  $2 \rightarrow 3$ ) au cours duquel il a cédé  $c(T_a - T_f)$  calories à la chambre froide,  $c$  désignant la chaleur spécifique à volume constant du fluide. La pression est tombée à  $P_f$ . C'est la pression la plus basse qu'il soit possible d'atteindre, compte tenu des circonstances.

Dans ces conditions, le retour au volume initial  $V_{\min}$  obligera à vaincre des forces de pression plus faibles que si l'on exécutait la compression en dehors de la chambre froide. Pour limiter davantage encore le travail fourni au fluide moteur durant le processus, la compression (transformation  $3 \rightarrow 4$ ) est réalisée très lentement. Ainsi, la compression est isotherme. À mesure qu'il s'échauffe sous l'effet de la compression, donc de l'énergie mécanique reçue, l'air de la pompe cède des calories à l'environnement que représente la chambre froide. De la sorte, la pression est maintenue au plus bas niveau possible et, finalement, le travail que l'on aura fourni au fluide moteur pour le ramener au volume de départ aura été minimal.

Quand le fluide a retrouvé son volume initial  $V_{\min}$ , nous avons fait la moitié du chemin. Il reste à lui faire retrouver sa température et sa pression initiales. Pour cela, nous n'avons qu'à sortir de la chambre froide en maintenant le piston dans sa position. Au contact de l'air ambiant chaud, le fluide moteur emprisonné s'échauffe à volume constant (transformation  $4 \rightarrow 1$ ) et sa pression reprend la valeur qu'elle avait juste avant la détente. Il reçoit de l'atmosphère, pour passer de  $T_f$  à  $T_a$ , la même quantité de chaleur que celle qu'il a cédée à l'air de la chambre froide quand on l'y a introduit après la détente.

On aurait pu poser le problème autrement et se demander comment, après avoir comprimé lentement le fluide moteur dans l'atmosphère (donc de façon isotherme), il faudrait procéder pour que ce dernier « rende » par détente au milieu extérieur plus de travail qu'il n'en a reçu de lui à la compression. En le plaçant dans un milieu chaud dont la température serait maintenue artificiellement à un niveau supérieur à celui de l'atmosphère, puis en le faisant s'y détendre lentement, aurait été la réponse.

Ainsi, la mise en œuvre d'un cycle thermodynamique par le biais duquel de la chaleur sera convertie en travail (comme le cycle de Stirling qui vient d'être décrit, inventé en 1816 par un pasteur écossais auquel il doit son nom), exige que l'on puisse faire évoluer un fluide moteur entre deux sources thermiques, pour employer le jargon de la thermodynamique. Une **source thermique** (*heat source*), ou **thermostat**, est un élément du milieu extérieur au système représenté par le fluide moteur, qui peut échanger avec ce dernier, sans modification de sa température, des quantités de chaleur quelconque. Le plus souvent, on définit le **milieu extérieur** (*external world, surroundings*) comme tout ce qui n'est pas le fluide moteur. Idéalement un tel élément devrait posséder une capacité thermique infinie. L'une de ces sources est appelée **source chaude** (*hot body, hot reservoir*) et l'autre **source froide** (*heat sink, heat absorber, cold body, cold reservoir*). Toutes deux font partie du milieu extérieur.

Dans le cas de notre machine fonctionnant suivant le cycle de Stirling, si l'air de l'atmosphère jouait le rôle de source froide, c'est la compression et non la détente qui s'y trouverait exécutée. Après la compression on ferait remonter au fluide l'échelle des températures en le mettant au contact de la source chaude, de façon à assurer le passage sur l'isotherme supérieur. Le fluide s'échaufferait à volume constant. Une fois l'équilibre

thermique atteint, il serait prêt pour la détente. Celle-ci produirait d'autant plus de travail que la pression, donc la température de la source chaude serait élevée. Elle produirait aussi d'autant plus de travail que l'on se rapprocherait d'une évolution isotherme en s'arrangeant pour préserver l'équilibre thermique entre la source chaude et le fluide moteur. Pour boucler la boucle, à la suite de la détente, il resterait à ramener le fluide moteur à l'isotherme inférieur, à lui faire redescendre l'échelle des températures, en le refroidissant à volume constant par contact avec l'air ambiant.

#### Quel est le bilan des opérations formant un tel cycle ?

Pendant la détente à haute température,  $Q$  disparaît de la source chaude pour réapparaître sous la forme d'un travail équivalent,  $T$ . Pendant la compression à basse température, le milieu extérieur fournit le travail  $t$  (prélevé sur  $T$  dans une machine pratique), qui est absorbé par le fluide moteur et réapparaît sous forme d'une quantité de chaleur équivalente,  $q$ , cédée à la source froide. Si la chaleur reçue par le milieu extérieur à l'occasion du refroidissement peut être récupérée pour assurer l'échauffement à volume constant qui ramène le fluide à l'isotherme supérieure, il n'y a pas lieu d'en tenir compte dans le bilan, car ces deux transformations à volume constant font intervenir des échanges de chaleur avec le milieu extérieur se compensant exactement.

À la fin d'un cycle, pour le fluide moteur, c'est comme si rien ne s'était passé. Ce n'est pas la même chose pour le milieu extérieur. Il y a eu disparition de la quantité de chaleur  $Q-q$  et un travail utile équivalent,  $T-t = Q-q$ , est apparu.

On peut considérer que la mise en œuvre d'un tel cycle permettrait d'obtenir que la fraction  $Q-q$  de la quantité de chaleur cédée par la source chaude soit convertie en travail. La quantité de chaleur dépensée n'en est pas moins  $Q$ , car la quantité de chaleur  $q$  restituée au milieu extérieur, plus précisément à la source froide, n'est récupérable d'aucune façon en principe. Elle n'a pas disparu, mais ne présente plus d'intérêt du fait qu'elle se retrouve sous la forme d'un accroissement de l'énergie interne de la source froide. Aussi dit-on que le rendement du cycle est égal au rapport de ce que l'on obtient, à savoir  $T-t = Q-q$ , à ce que l'on a dépensé pour l'obtenir, c'est-à-dire  $Q$ . Autrement dit, le rendement est égal à  $(Q-q)/Q = 1-q/Q$ .

Ce que nous avons décrit est un **cycle théorique** (*theoretic cycle*). Une infinité de cycles sont imaginables. Néanmoins, pour que du travail puisse être recueilli, la détente doit se dérouler à une pression supérieure à celle des transformations ramenant le fluide à son état initial. En outre, pour qu'un cycle offre un rendement élevé, les transformations qui le composent doivent se rapprocher le plus possible des conditions de la réversibilité.

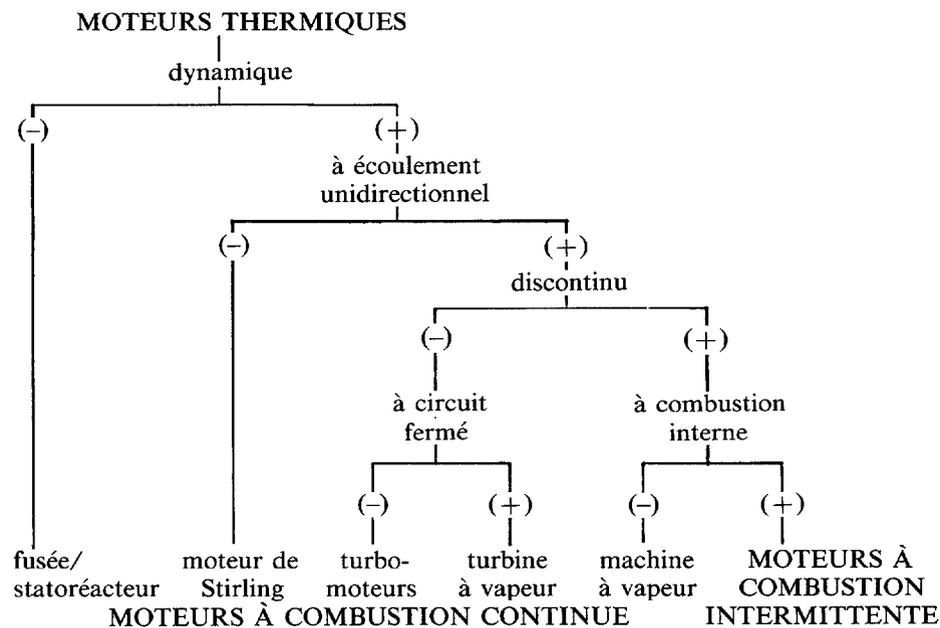
Une transformation est **réversible** (*reversible*) si, à chaque instant, l'état du système en évolution coïncide avec l'un des états d'équilibre thermodynamique possibles. Il s'agit là d'une condition très difficile à réaliser, d'un idéal que l'on n'atteint jamais dans les **transformations réelles** (*actual change*) et duquel on s'efforce de se rapprocher. Dans le cas très courant où le fluide moteur évolue entre deux sources thermiques, par exemple, on cherche à réaliser des détentes et des compressions adiabatiques ou isothermes. Rappelons que « isotherme » veut dire « à température constante » et « adiabatique » signifie « sans échange de chaleur avec le milieu extérieur ». Si les conditions de la réversibilité étaient atteintes, la fraction de la chaleur prélevée à la source chaude qui serait convertie en travail au cours d'un cycle serait maximale. La conversion de la chaleur en travail se ferait avec le **rendement de Carnot** (*Carnot fraction*), encore appelé **rendement théorique maximal** ou **rendement thermodynamique théorique** (*maximum theoretical efficiency, availability factor*).

Il existe un nombre limité de cycles thermodynamiques classiques, dont les noms se confondent le plus souvent avec les noms des savants les ayant imaginés. Parfois, on ne s'entend pas sur la paternité d'un cycle et le nom varie selon la langue. Ainsi le Brayton's cycle, qui est le cycle théorique dont se rapproche le plus le cycle réel caractérisant le fonctionnement de la **turbine à gaz** (*gas turbine*), n'est pas autre chose que notre cycle de Joule. À ces termes éponymiques presque totalement démotivés, correspondent des désignations descriptives beaucoup moins lexicalisées. Par exemple, le **cycle de Beau de Rochas** (*Otto's cycle*) est parfois désigné par l'expression explicative « cycle (à combustion) à volume constant ». De la même façon le cycle diesel peut être dénommé « cycle (à combustion) à pression constante » ou « cycle de Joule tronqué ».

Les moteurs sont des machines mécaniques qui créent périodiquement ou entretiennent les conditions propices à la détente d'un fluide moteur et le font ainsi évoluer selon un cycle thermodynamique réel aussi voisin que possible d'un cycle théorique donné. Ces machines se distinguent donc par le cycle théorique qu'elles sont censées faire accomplir au fluide moteur. Mais elles se distinguent davantage encore par les modalités d'exécution du cycle. En fait il n'existe pas de lien absolu entre un cycle particulier et les conditions de sa mise en œuvre. Le lien est plutôt circonstanciel.

Par exemple, tel type de machine, la turbine à gaz, s'est révélé adapté pour la mise en œuvre du cycle de Joule. On a pourtant d'abord essayé de réaliser le cycle au moyen d'une machine à pistons, très différente mécaniquement, mais les difficultés pratiques rencontrées ont obligé à chercher dans une autre direction.

Du point de vue de leur réalisation pratique ou, si l'on préfère, de la mise en œuvre concrète des cycles qu'elles sont censées faire exécuter au fluide moteur, les machines motrices thermiques se distinguent par le choix qui est fait pour quelques paramètres importants, se rapportant à des modalités d'ordre mécanique. L'arbre ci-dessous est un essai de classement des moteurs thermiques d'après cinq caractères fondamentaux, à chacun desquels se trouvent associées deux valeurs contraires.



Les machines thermiques sont dynamiques ou statiques. On entend par là que la mise en œuvre d'une détente selon un processus continu, son entretien et la récupération de l'énergie mécanique engendrée peut faire intervenir ou non des pièces mobiles. Les machines statiques, que représentent la fusée et le statoréacteur, ne comportent aucune pièce en mouvement. Leur intérêt est surtout grand pour la propulsion des véhicules spatiaux. Dans leur principe, les moteurs thermiques de type statique sont des machines motrices d'une extrême simplicité. Il est à noter que le caractère « statique » implique la propulsion par réaction. Cela n'empêche pas toutefois que l'entraînement par réaction puisse caractériser des machines de type dynamique (turboréacteur, turbo-propulseur, etc.).

Les moteurs thermiques les plus répandus sont du type dynamique. Toutes les machines de cette classe sont à circulation. Dans un cas plutôt exceptionnel, celui du **moteur de Stirling** (*Stirling engine*), qui à lui seul forme une classe, la circulation est bidirectionnelle. Le fluide moteur (qui est réutilisé indéfiniment) passe alternativement d'une zone maintenue chaude où il se détend à une zone froide où il subit une compression à basse température. Entre les deux zones, un milieu récupérateur emmagasine les calories cédées par le fluide moteur lors du refroidissement consécutif à la détente. Il les lui restitue après que la compression est terminée, au cours du transvasement de retour.

Si l'on met à part le moteur de Stirling, tous les moteurs sont des machines à écoulement unidirectionnel. On peut imaginer plusieurs appareils spécialisés qui seraient disposés en cascade, chacun accomplissant une transformation du cycle thermodynamique suivant lequel fonctionne la machine. L'ensemble constitue un circuit, au cœur duquel se trouve un **appareil de détente** (*expanding unit, expander*) et où circule, toujours dans le même sens, le fluide moteur. Le circuit peut être ouvert (turbomoteurs) ou fermé (turbine à vapeur).

À propos des machines de cette grande classe, on peut se poser deux questions. L'écoulement du fluide moteur à travers l'organe de détente est-il continu ou au contraire discontinu ? Et la combustion se déroule-t-elle dans l'organe de détente ou à l'extérieur ? Les réponses à ces questions précisent chacune un caractère que possède nécessairement la machine. Au total, cela donne quatre combinaisons de valeurs possibles et autant de sous-classes mutuellement exclusives en lesquelles se divise la famille des machines à écoulement unidirectionnel.

Se demander si l'écoulement du fluide moteur est continu ou non revient à s'interroger sur le type d'appareil choisi pour réaliser la détente. S'agit-il d'une turbine ouverte, c'est-à-dire communiquant aussi bien en amont qu'en aval avec les appareils qui forment le reste du circuit ? Ou bien s'agit-il d'une capacité demeurant fermée au cours de la détente, qui affecte généralement la forme d'un cylindre où se meut un piston ?

Dans le premier cas, l'écoulement est continu, comme la détente. Le moteur est du type turbomachine. On parle de **moteur cinétique** (*non-displacement type engine*). L'écoulement cesse d'être continu si la détente se produit à l'intérieur d'une capacité fermée. Le **moteur** est alors de **type volumétrique** (*displacement-type engine*). On emploie aussi, mais plus rarement, les dénominations concurrentes **moteur à capsulisme** ou **moteur à capacité variable** pour préciser cette caractéristique.

MOTEUR THERMIQUE	DÉTENTE DANS CAPACITÉ FERME
Moteur volumétrique / à capsulisme	+
Moteur cinétique / de type turbomachine	-

La deuxième question se rapporte aux modalités de la combustion. Elle amène à se demander si le fluide moteur est utilisé non seulement pour la conversion de chaleur en travail, mais aussi pour la production de chaleur. Si c'est le cas, l'air doit jouer ce rôle. Lorsque l'air sert de fluide moteur et participe en outre à la combustion devant assurer l'apport de chaleur, la machine est un **moteur à combustion interne** (*internal combustion engine, i.c. engine*). C'est qu'en effet un pareil choix conduit à implanter le « foyer de combustion » dans la partie de la machine où s'opère à proprement parler la conversion de la chaleur en travail, c'est-à-dire l'organe de détente. Seul l'emploi de l'air permet une disposition aussi « ramassée ». Avec les autres fluides moteurs, l'apport de chaleur est indirect. Il se déroule dans un foyer disposé nécessairement à l'extérieur du **moteur proprement dit** (*prime mover*) que représente l'organe de détente. On qualifie de **moteurs à combustion externe** (*external combustion engine*) les machines ainsi organisées.

MOTEUR THERMIQUE	COMBUSTION DANS L'ORGANE DE DÉTENTE
Moteur à combustion interne	+
Moteur à combustion externe	-

Une machine à écoulement donnée possède comme attributs l'une des deux valeurs possibles pour le premier caractère évoqué ci-dessus (type d'écoulement) et l'une des deux valeurs possibles pour le second caractère (modalités de combustion). Elle aura le trait « volumétrique » ou son contraire. Et elle aura le trait « à combustion interne » ou son contraire. Le tableau ci-dessus fait ressortir les quatre combinaisons de valeurs possibles. Chacune de ces combinaisons définit une sous-classe de la famille des moteurs dynamiques du type à écoulement unidirectionnel.

MOTEUR THERMIQUE À ÉCOULEMENT	à combustion interne	à combustion externe
volumétrique	moteurs à pistons	machine à vapeur alternative
cinétique	turbomoteurs	turbine à vapeur

La sous-classe correspondant à la réunion des traits « cinétique » et « à combustion externe » est représentée par la turbine à vapeur, type de moteur dont l'emploi se limite au domaine des fortes puissances. La combinaison « cinétique » et « à combustion interne » caractérise les turbomoteurs, surtout utilisés pour la propulsion aérienne. Au doublet « volumétrique » et « à combustion externe » se trouve associée une sous-classe de machines désuètes, qu'illustre la machine à vapeur alternative. Seule la dernière combinaison, en fait, définit une sous-classe de machines universelles, où l'on retrouve notamment tous les types de **moteurs à pistons** (*piston engine, reciprocating engine*) imaginables.

On aurait pu s'intéresser à un autre attribut des moteurs thermiques : le caractère continu ou discontinu de l'apport de chaleur.

En tant que critère de classement, ce caractère présente une particularité. Une relation logique le lie aux deux critères précédents. Elle s'exprime de la façon suivante : si un moteur thermique est à la fois de type à combustion interne et de type volumétrique, il est obligatoirement de type à combustion intermittente. Pour toutes les autres combinaisons de valeurs des caractères composants, la machine est à combustion continue. En effet, dans le cas où au moins une de ces conditions n'est pas satisfaite (combustion hors de l'organe de détente ou détente dans capacité ouverte), la combustion périodique ne s'impose plus. Comme cette dernière représente un inconvénient sans contrepartie, on n'y a pas recours et le moteur est forcément du type à combustion continue. Le tableau ci-dessous traduit ces constatations.

MOTEUR THERMIQUE À ÉCOULEMENT		COMBUSTION DANS ORGANE DÉTENTE	DÉTENTE DANS CAPACITÉ FERME
C O M B U S T I O N C O N T I N U E	Turbine à gaz	+	-
	Turbine à vapeur	-	-
	Machine à vapeur	-	+
MOTEUR À COMBUSTION INTERMITTENTE		+	+

Une observation s'impose, à l'examen de ce tableau. Les moteurs à combustion intermittente, bien qu'ils groupent exclusivement des machines d'emploi universel, représentent les types de réalisation des moteurs thermiques les plus compliqués qu'on puisse imaginer au plan de la mécanique.

Avec les turbines à vapeur et à gaz, l'apport de chaleur est associé à un processus continu et le fluide moteur s'écoule en continu dans l'organe de détente. Même pour la turbine à gaz où l'apport de chaleur à l'air jouant le rôle de fluide moteur se déroule pratiquement dans l'organe de détente, l'alimentation de ce dernier ne pose pas de problème de synchronisation puisqu'il est ouvert.

Les choses se compliquent un peu lorsqu'on passe à la machine à vapeur alternative. L'apport de chaleur est encore associé à un processus continu, mais la détente ne l'est plus, puisqu'elle se produit à l'intérieur d'une capacité fermée. Il faut admettre la vapeur (fluide moteur) dans la capacité (cylindre), donc ouvrir cette capacité, et lui permettre de s'en échapper après la détente. Un mécanisme de distribution assure l'admission et l'échappement de la vapeur en synchronisme avec le mouvement du piston qui reçoit l'énergie mécanique résultant de la transformation par détente de la chaleur en travail.

Les choses se compliquent davantage encore si l'on combine le trait « à combustion dans l'organe de détente » au trait « détente dans une capacité fermée » (moteur volumétrique) pour réaliser la disposition caractéristique des moteurs à combustion intermittente. Le fonctionnement de ces machines s'écarte radicalement de celui des autres machines à écoulement. Il n'est plus question d'entretenir les conditions de la détente dans ce genre de machine. On est amené à les recréer à l'occasion de chaque cycle. La grande différence tient au fait que les transformations dont se compose le cycle ne se déroulent plus dans des appareils distincts formant un circuit. Un seul organe polyvalent les accomplit séquentiellement. Il est conçu pour pouvoir jouer successivement le rôle de compresseur, de foyer de combustion et de chambre de détente. Le fluide moteur est admis dans la capacité fermée qui constitue cet organe avant d'être prêt à fournir du travail par détente, avant notamment d'avoir reçu la chaleur susceptible de l'amener dans un état où il pourra fournir du travail. Pour que la détente soit possible, il doit d'abord participer à une réaction de combustion à l'intérieur de la capacité fermée. La combustion devra être amorcée au bon moment par rapport au mouvement de l'organe moteur (piston). Elle se poursuivra par la détente, et les produits de la combustion seront évacués en fin de détente de façon à laisser la place libre pour une nouvelle charge (air mélangé au combustible devant brûler). On voit qu'il ne suffit plus de synchroniser l'admission et l'échappement du fluide moteur avec le mouvement de l'organe recevant l'énergie mécanique (piston), il faut en outre synchroniser l'amorçage de la combustion.

Le trait « à combustion intermittente » n'impose pas un type de réalisation unique. Des choix peuvent être faits quant à des traits moins fondamentaux. Ils conduisent à la définition de machines plus spécifiques, auxquelles se trouvent associées des nomenclatures particulières. Le moteur diesel constitue l'une de ces machines spécifiques. Avec le classique moteur à explosions, dont la terminologie a fait l'objet de nombreuses études et recensements sous des formes variées, il a forcément beaucoup en commun. Aussi vouloir explorer et présenter la terminologie propre au diesel oblige à commencer par établir de la façon la plus claire possible en quoi les deux machines se distinguent.

Ce sont en fait les choix se rapportant aux cycles thermodynamiques qui sont à l'origine de grandes différences au plan de la réalisation mécanique entre les variantes les plus classiques de moteurs à combustion interne, et partant, entre les nomenclatures créées pour les décrire.

L'un de ces choix ne présente plus aujourd'hui qu'un intérêt historique, c'est celui de savoir si le fluide moteur, avant de participer à la combustion et après avoir été admis dans la capacité fermée, doit être comprimé ou non. Autrement dit, de savoir si le cycle doit être à compression préalable ou non. Le cycle de Lenoir ne comportait pas de compression préalable du fluide moteur, mais il n'a pas survécu à son inventeur. De nos jours, tous les moteurs à combustion intermittente utilisent la compression préalable du fluide moteur, de sorte que ce trait n'est pas distinctif. Il ne donne pas lieu à des variantes de machines et n'est donc jamais évoqué dans les désignations spécifiques. On adopte systématiquement la combustion préalable du fait qu'elle conduit à des rendements très supérieurs.

La compression préalable est donc une caractéristique omniprésente des moteurs à combustion intermittente. On en saisirait mieux la portée si le rapport qu'elle entretient avec un aspect plus global des cycles était précisé. Il s'agit de la façon dont sont créées, à l'occasion de chaque nouveau cycle, les conditions de la détente.

Trois voies sont possibles : la voie exclusivement thermique du cycle de Lenoir, qui exclut toute compression préalable ; la voie purement mécanique du cycle idéal de Carnot, qui se confond avec le projet de moteur rationnel dont rêvait Diesel ; et la voie du compromis que concrétise le moteur à explosions.

Dans le moteur à explosions, qui fonctionne suivant le cycle de Beau de Rochas, le fluide moteur est d'abord comprimé rapidement, de façon adiabatique. Mais si la compression le rapproche de l'état à partir duquel s'opérera la détente, elle ne l'amène pas dans cet état. Une combustion à volume constant, ou **combustion isochore** (*isometric combustion*), prend le relais. C'est donc grâce à un processus thermique qu'est atteinte finalement la pression élevée devant permettre une détente efficace. La compression n'intervenant pas seule, elle n'a pas besoin d'être très forte.

Diesel ne visait rien moins que réaliser un moteur à air qui fonctionnerait suivant le cycle de Carnot. Cela supposait notamment faire se détendre le fluide moteur à partir d'une pression élevée qui serait atteinte par des moyens mécaniques exclusivement, c'est-à-dire par une très forte compression, et lui apporter de la chaleur par une combustion isotherme. Les machines réelles nées du projet de Diesel n'ont jamais eu qu'un lointain rapport avec le cycle idéal de Carnot : aucun artifice n'aura permis de faire brûler un combustible dans le fluide moteur même, sans que la température de ce dernier augmente de façon très appréciable. Elles en ont toutes retenu cependant une caractéristique qui encore aujourd'hui représente un trait distinctif fondamental : la très forte compression.

Ainsi, les moteurs à combustion intermittente sont tous à compression préalable. Mais ils se distinguent par l'importance du rôle joué par la compression dans le cycle. Le **rapport volumétrique de compression** ou **taux de compression** (*pressure ratio*) mesure cette importance. Il correspond au rapport entre le volume occupé par le fluide moteur avant compression et son volume en fin de compression. Sa valeur est comprise entre 10 et 12 pour les moteurs à explosions ; elle peut aller jusqu'à 22 pour les moteurs diesel.

Du choix fait pour ce facteur découle des particularités au plan de la réalisation mécanique. Se trouvent définis, notamment, dans une large mesure, la façon de réaliser l'amorçage de la combustion, c'est-à-dire l'**allumage** ou **inflammation** (*firing, ignition*), ainsi que les conditions dans lesquelles le combustible est incorporé au fluide moteur, autrement dit l'alimentation en combustible.

La très forte compression, dans le cas du diesel, permet de se passer d'une source d'énergie auxiliaire pour l'allumage. Elle entraîne un échauffement suffisant du fluide moteur pour qu'il y ait **autoinflammation** (*self-ignition*). Aussi dit-on du diesel qu'il est

un **moteur à allumage par compression** (*compression ignition engine*). (On notera que ce syntagme ne s'emploie pas dans les mêmes circonstances que le mot « diesel », bien qu'il soit quasi synonyme et réfère à la même réalité technique. Si, par exemple, quelqu'un vous demandait quel type de moteur équipe votre voiture, jamais vous ne répondriez : « un moteur à allumage par compression », cela va sans dire. Par contre, dans les discours à caractère pédagogique, l'emploi de ce terme, qui évoque une caractéristique distinctive, peut se justifier parfaitement en dépit de sa longueur, compte tenu de sa plus grande motivation.)

À l'inverse, le moteur à explosions, dont le cycle met en jeu une compression relativement faible, impose de recourir à une source d'énergie auxiliaire pour l'allumage. Ce type de moteur comporte nécessairement un **circuit d'allumage** (*ignition system*) qui assure l'inflammation de la charge en faisant jaillir dans la chambre de combustion une étincelle électrique à un instant précis au cours de chaque cycle. Cela explique qu'on emploie parfois l'expression « **moteur à allumage par étincelle** » (*spark-ignited engine*) ou « **moteur à allumage commandé** » (*ignition-controlled engine*) pour désigner le moteur à explosion.

Le choix fait pour le cycle ne conditionne pas seulement le mode d'allumage, mais encore les modalités d'alimentation.

Sur les moteurs à explosion, le faible taux de compression rend possible d'incorporer le combustible au fluide moteur avant que celui-ci n'ait été comprimé. En effet, la pression en cours de compression n'atteindra jamais en principe une valeur susceptible de provoquer un allumage intempestif, c'est-à-dire non contrôlé. Cette façon de faire étant beaucoup plus simple mécaniquement, elle est toujours adoptée. Une alternative existe, néanmoins. Le combustible peut être ajouté à l'air en dehors du moteur proprement dit et admis ensuite à l'intérieur. C'est la **carburation préalable** ou **carburation externe** (*external carburetion*). Il peut aussi être introduit directement dans le moteur, en même temps que l'air y est admis. C'est la **carburation interne** (*internal carburetion*) ou **injection**. (*fuel injection*).                      arburation interne

MOTEURS À COMBUSTION INTERMITTENTE		allumage par étincelle électrique	carburation avant compression	carburation à l'extérieur du moteur
E S S E N C E	à carburation externe	+	+	+
	à injection	+	+	-
DIESEL		-	-	-

Les forts taux de compression permettent de se passer de l'allumage électrique, ils n'obligent à le faire. Si l'on ne tire pas avantage de cette possibilité, cela veut dire que

l'on peut toujours incorporer le combustible au fluide moteur dans les conditions simples qui caractérisent le moteur à explosion, c'est-à-dire avant la compression. Mais il faudra alors recourir à un **mélange pauvre** (*lean mixture*), qui ne s'enflammera pas en cours de compression. Le travail à dépenser pour la compression sera important et le rendement en souffrira. Néanmoins, certains types de diesels lourds très particuliers fonctionnent ainsi.

La grande majorité des diesels utilisant l'allumage par compression, en apparence plus simple que l'allumage électrique, ils peuvent brûler des mélanges moins pauvres. Toutefois, ce mode d'allumage n'est pas sans inconvénient au plan de la réalisation des machines. Il rend difficile l'incorporation du combustible au fluide moteur. Le combustible en effet doit être introduit dans l'air après que celui-ci a été fortement comprimé. Il faut ouvrir la capacité où l'air est emprisonné et l'y injecter sous une pression supérieure à la pression interne déjà très forte. Un ensemble mécanique complexe, le **circuit d'injection** (*injection system*), remplit cette fonction. Comme c'est le processus d'injection qui amorce la combustion, on doit faire en sorte qu'il soit synchronisé avec le mouvement du moteur. À cet égard, le circuit remplit une fonction dévolue au circuit d'allumage sur les moteurs à explosions.

Ainsi, l'originalité de la nomenclature diesel tient en grande partie à la présence sur ce type de machine d'un circuit d'injection complexe capable d'assurer les fonctions évoquées ci-dessus.

Mais là ne s'arrêtent pas les différences avec le moteur à explosion. La **combustion diesel** (*diesel combustion*), par exemple, représente une autre caractéristique distinctive dont la description met en jeu un vocabulaire original. Notons à ce sujet une légère incohérence de la terminologie. On qualifie de moteurs à explosion les moteurs à combustion interne fonctionnant suivant le cycle de Beau de Rochas, c'est-à-dire suivant un cycle à combustion isochore. Une explosion est une **combustion vive** (*rapid combustion*) se déroulant hors de tout équilibre. Il se produit bien des explosions dans un tel moteur, mais des explosions d'un type particulier. Le **front de flamme** (*flame front*) se déplaçant à une vitesse subsonique, il s'agit en fait de **déflagrations** (*deflagration*). Par ailleurs, ce sont aussi des explosions qui se produisent dans un moteur diesel. Cependant, le front de flamme se propage alors à une vitesse supersonique et les explosions sont du type **détonation** (*detonation*). Ainsi, plutôt que de moteurs à explosion, on devrait parler, en toute rigueur, de **moteur à déflagration**. Et, comme synonyme de moteur diesel, on pourrait employer le terme « moteur à détonation ». « Moteur à explosion » prendrait la place qui lui revient dans le système notionnel et concurrencerait « moteur à combustion intermittente », au lieu duquel d'ailleurs la plupart des auteurs utilisent le terme « moteur à combustion interne », dont l'extension est plus grande puisqu'il englobe les moteurs à combustion continue comme la turbine à gaz en circuit fermé.

D'autres particularités distinguent encore le diesel du plus classique moteur à essence et donnent naissance à des terminologies originales. On pourrait citer notamment : la régulation (qui ne se fait pas naturellement comme dans le cas du moteur à essence et oblige à recourir à des automatismes), le combustible utilisé, ou la configuration de la chambre de combustion, qui doit satisfaire des exigences spéciales.

JACQUES LETHUILLIER