

Evolutions des performances des moteurs à combustion

Renaud GICQUEL
Professeur à l'Ecole des Mines de Paris

Le secteur énergétique est actuellement confronté à nombreuses évolutions technologiques, qui font suite aux recherches entreprises depuis près de 25 ans en réponse d'abord à la crise du pétrole, puis aux contraintes environnementales. Ces changements, qui concernent aussi bien la production que l'utilisation de l'énergie, proviennent d'une part des progrès réalisés dans des domaines connexes, comme les matériaux, l'automatique, la mécanique des fluides, qui ont permis d'améliorer sensiblement les technologies classiques, et d'autre part de leur intégration dans des systèmes innovants de plus en plus performants.

Citons par exemple, en matière de moteurs à combustion, la généralisation de l'injection et de la commande électronique dans l'automobile, ou bien, pour la production fixe d'énergie mécanique, les gains considérables de rendement obtenus sur les turbines à gaz à la suite des progrès réalisés sur les moteurs aéronautiques, ainsi que la mise au point des cycles combinés et des unités de cogénération.

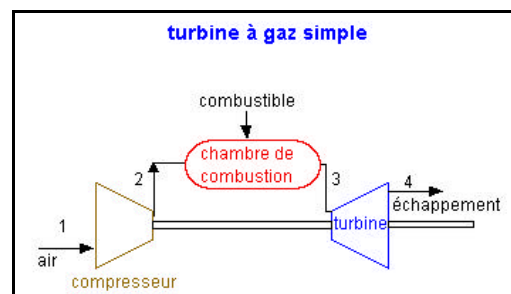
Dans ce document, après un bref rappel des principes de fonctionnement des moteurs à combustion les plus utilisés, nous présenterons leurs évolutions récentes et donnerons quelques indications sur les tendances qui se dessinent pour l'avenir. Le domaine couvert étant très large, nous nous limiterons à une présentation synthétique des choses.

Il existe deux grandes catégories de moteurs à combustion interne : d'une part les turbines à gaz, qui sont des machines à flux continu, et d'autre part les moteurs alternatifs, pour la plupart à pistons, qui comprennent les moteurs à allumage commandé (essence et gaz) et les moteurs diesel.

Les turbines à gaz

Dans sa forme la plus simple et la plus répandue, une turbine à gaz est composée de trois éléments :

- un compresseur, centrifuge ou plus généralement axial, qui a pour rôle de comprimer de l'air ambiant à une pression comprise aujourd'hui entre 10 et 30 bars environ.
- une chambre de combustion, dans laquelle un combustible gazeux ou liquide est injecté sous pression, puis brûlé avec l'air comprimé, avec un fort excès d'air afin de limiter la température des gaz d'échappement.



- une turbine, généralement axiale, dans laquelle sont détendus les gaz qui sortent de la chambre de combustion.

Sous cette forme, la turbine à gaz constitue un moteur à combustion interne à flux continu. On notera que le terme de turbine à gaz provient de l'état du fluide de travail, qui reste toujours gazeux, et non du combustible utilisé, qui peut être aussi bien gazeux que liquide (les turbines à gaz utilisent généralement du gaz naturel ou des distillats légers comme le fuel oil domestique). Il existe aussi des turbines à gaz à cycle fermé, utilisées pour des applications particulières. Bien évidemment, il s'agit alors de moteurs à combustion externe.

Pour atteindre des taux de compression de 20 ou 30, **le compresseur** est multiétagé, avec parfois une réfrigération intermédiaire destinée à réduire le travail consommé. Les rotors, généralement axiaux, sont constitués d'un empilage de disques soit montés sur un moyeu central, soit assemblés en tambour sur leur périphérie. Les matériaux utilisés vont des alliages d'aluminium ou de titane pour les premiers étages aux alliages d'acier et aux alliages réfractaires pour les derniers étages, qui peuvent supporter des températures atteignant 500 °C.

La chambre de combustion est normalement construite en alliage réfractaire. Elle doit satisfaire des contraintes sévères :

- assurer une combustion complète du combustible,
- minimiser la perte de charge (qui nécessite un surcroît de compression),

- assurer une bonne stabilité de la température d'entrée turbine,
- occuper un volume aussi réduit que possible tout en permettant un bon refroidissement des parois.

Trois types de chambre existent :

- les chambres à barillet de tubes de flammes, où six à douze tubes de ce type sont montés en parallèle autour de l'axe de la turbine à gaz. Ils sont interconnectés de manière à équilibrer les pressions et permettre la propagation de l'allumage.
- les chambres à silos : dans ce cas, les chambres, séparées de l'axe, sont de taille beaucoup plus importante, ce qui permet de mieux maîtriser la combustion, notamment en ce qui concerne les émissions de polluants (NOx).
- les chambres annulaires : la chambre comporte une seule enceinte, annulaire, le carburant étant injecté en de nombreux points. On peut ainsi obtenir une flamme plus courte et un meilleur rendement de combustion.

Dans les turbines à gaz à cycle ouvert, les principales contraintes technologiques se situent au niveau des premiers étages de la **turbine de détente**, qui sont soumis au flux des gaz d'échappement à très haute température.

Comme le rendement du cycle est lui-même fonction croissante de la température, d'importants développements technologiques ont été consacrés à la mise au point, d'une part de systèmes de refroidissement efficaces des aubages, et d'autre part de matériaux résistant aux températures élevées. Depuis un demi siècle, on a ainsi pu relever progressivement (d'environ 20 K par an) le niveau de température d'entrée dans la turbine, pour atteindre aujourd'hui 1300 à 1500 °C dans les machines terrestres, et plus de 1750 °C dans certains turboréacteurs.

Les pièces les plus exposées sont en particulier les aubages du rotor, qui sont très difficiles à refroidir et de plus particulièrement sensibles à l'abrasion. Il importe donc d'utiliser un combustible très propre (absence de particules et de composants chimiques susceptibles de former des acides), et de limiter la température en fonction des caractéristiques mécaniques des aubages.

Les matériaux utilisés pour les aubages de la turbine sont des alliages réfractaires à base de nickel ou de cobalt, et on envisage de recourir à des céramiques dans l'avenir.

Deux grandes catégories de turbines à gaz sont généralement distinguées : les turbines à gaz industrielles, lourdes et robustes, mais de performances moyennes, et les turbines à gaz "dérivées de l'aviation", beaucoup plus légères et performantes, mais aussi plus chères.

En effet les turboréacteurs utilisés aujourd'hui dans l'aviation ne sont en fait que des variantes de la turbine à gaz à cycle ouvert. Le marché de l'aviation a ainsi permis de financer d'importants programmes de développement technologique sur ces moteurs, qui ont abouti à la mise au point de turbines à gaz extrêmement performantes, et permettent aujourd'hui la conception de turbines composées, comprenant des composants de turboréacteurs existants pour les sections haute pression du compresseur et de la turbine, et des pièces industrielles pour les sections basse pression. Ces turbines composées atteignent des rendements améliorés à faible coût.

Actuellement, la gamme de puissance des turbines à gaz est comprise entre quelques MW pour les plus petites et plus de 200 MW pour les plus grosses. Des constructeurs proposent aussi des unités plus petites, de 25 à 75 kW, appelées microturbines, qui pourraient devenir économiquement compétitives si leur marché se développe.

Les premières turbines à gaz ont été fabriquées au début du XX^{ème} siècle, en France par la Société Anonyme des Turbomoteurs à Paris, et en Suisse par la Société Brown Boveri à Neuchâtel. Cependant, ce n'est qu'à partir des années 30 que les applications industrielles ont vraiment commencé à se développer, grâce à l'amélioration des performances des compresseurs et des turbines.

Aujourd'hui, les turbines à gaz connaissent un très fort développement dans de nombreuses applications : transport aérien, production d'électricité, cogénération, entraînement de machines (compresseurs et pompes). Parmi les arguments en leur faveur, on peut citer leur faible encombrement, leur excellent rapport puissance/poids, leur mise en route rapide, leur bon rendement, et leurs faibles émissions de polluants.

Les coûts d'investissement s'échelonnent de 350 \$/kW pour des machines de 1 à 10 MW à environ 180 \$/ kW pour des unités de taille supérieure à 50 MW. Le prix du kW installé est cependant supérieur compte tenu des équipements annexes et de l'infrastructure. Pour la production d'électricité, il varie entre 300 et 450 \$/kW.

Leur inconvénient principal est d'utiliser des combustibles propres donc généralement coûteux. Il faut aussi noter que leurs performances dépendent sensiblement des conditions du site, et se dégradent à charge partielle et lorsque la température extérieure augmente ou lorsque la pression baisse.

Les moteurs à piston à combustion interne

Les moteurs à combustion interne les plus répandus sont les moteurs alternatifs à piston, ceci pour trois raisons principales :

- de par leur régime périodique, ces machines conviennent particulièrement bien pour des évolutions où la température atteint des valeurs élevées. Etant en contact avec le fluide à divers stades de la transformation, les parois sont soumises à une température moyenne très inférieure à la température maximum, alors que dans une machine à flux continu, certaines pièces sont en permanence soumises à cette température.
- les moteurs à combustion interne sont très employés pour la propulsion de véhicules de petite et moyenne puissance. Or la machine à piston s'adapte beaucoup mieux à cette utilisation que la turbomachine, qui n'est réalisable qu'avec des vitesses caractéristiques très élevées, et par conséquent doit tourner à des vitesses considérables lorsque la puissance est modérée, avec interposition de réducteurs fragiles et coûteux.
- les performances des moteurs à piston varient moins que celles des turbines à gaz lorsque leur fonctionnement s'écarte des conditions nominales.

Ces considérations expliquent pourquoi les moteurs alternatifs à combustion interne sont les machines thermodynamiques les plus répandues. Leur puissance s'échelonne pour les applications usuelles de moins de 1 kW à 1 MW environ, l'utilisation de ces machines ayant connu le succès le plus spectaculaire étant la propulsion des véhicules routiers.

Il existe deux grandes catégories de moteurs alternatifs à combustion interne :

- les moteurs à allumage commandé, quelquefois improprement dits à explosion, dont le principe a été défini par le français Beau de Rochas en 1860, et la première réalisation effectuée par l'allemand Otto en 1876. Dans ce qui suit, nous parlerons selon les cas de moteurs à essence ou à gaz.
- les moteurs à allumage par compression, dits Diesel, du nom de leur inventeur allemand, qui les a brevetés en 1892.

Ce qui les distingue, ce n'est pas tant le cycle théorique que les caractéristiques de la combustion, dont les cinétiques suivent des lois très différenciées selon que le combustible est volatil ou non. Une des différences principales entre moteur à essence et moteur diesel réside non dans le mode d'introduction du combustible, qui, dans certains moteurs à essence, est aussi injecté, mais dans le moment où le combustible est introduit, qui détermine la nature des gaz lorsque la réaction se déclenche.

Dans le moteur à essence classique, le combustible est introduit suffisamment à l'avance pour que le cylindre soit rempli, lorsque l'allumage se produit, d'un mélange sensiblement homogène. Dans le moteur diesel, le combustible est injecté au dernier moment, et brûle au fur et à mesure de son introduction.

Pour cette raison, en règle générale, les moteurs à essence brûlent des combustibles gazeux ou des liquides volatils, et les moteurs diesel des combustibles liquides non volatils.

L'influence d'un fonctionnement à charge partielle se traduit par des différences notables selon qu'il s'agit d'un moteur à essence ou d'un moteur diesel. Dans le premier cas, il est impossible de diminuer la richesse en deçà d'une limite inférieure dite d'inflammabilité, ce qui oblige à régler le moteur en jouant sur les pertes de charge à l'admission, au moyen d'un papillon qui vient "étrangler" le débit aspiré.

Pour les moteurs diesel, ce type de problème ne se pose pas, et on règle la puissance en faisant varier la quantité de combustible injecté. Il n'est donc pas nécessaire d'introduire une perte de charge supplémentaire, et les performances du moteur sont bien meilleures à bas régime.

Le principal problème rencontré dans les moteurs à essence est d'éviter la détonation, qui est une combustion très rapide avec ondes de choc supersoniques générant du cliquetis potentiellement destructeur. Pour cela, la solution la plus simple consiste à limiter supérieurement le rapport volumétrique de compression ρ .

Le rapport volumétrique d'un moteur à essence est ainsi limité bien en dessous des valeurs réalisables dans un moteur diesel. Comme le rendement interne η_i est fonction de ce rapport, il en résulte que sa valeur est sensiblement inférieure dans les moteurs à essence à celle des moteurs diesel. De surcroît, cette condition vient aussi limiter les possibilités d'utilisation dans les moteurs à essence des diverses dispositions permettant d'améliorer les performances des moteurs alternatifs à combustion interne (suralimentation, calorifugeage des fonds de cylindre et du piston,...).

Pour toutes ces raisons, les performances des moteurs diesel sont meilleures que celles des moteurs à essence (d'environ 20 % en moyenne). Ces derniers conservent toutefois des avantages, notamment en termes de coût, de silence et de confort de conduite qui expliquent qu'ils continuent à représenter plus des deux tiers du marché pour les véhicules légers.

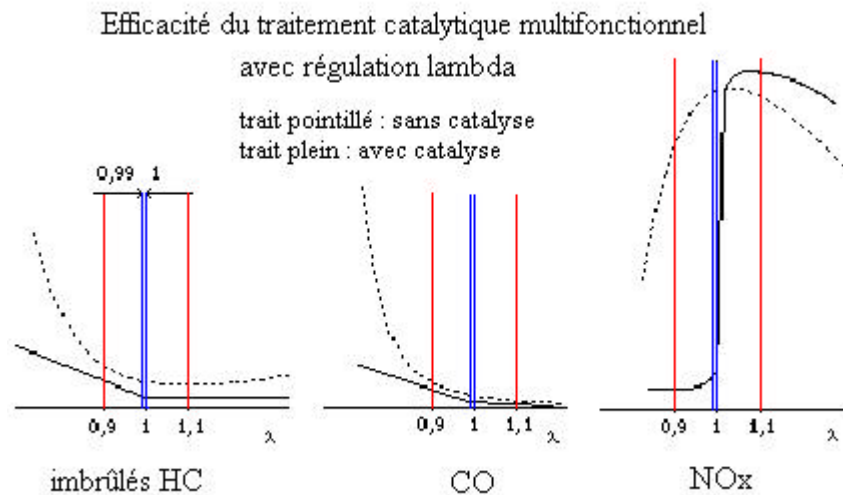
La pollution des moteurs automobiles provient d'une combustion imparfaite. En effet, si la combustion était parfaite, on ne retrouverait dans les gaz d'échappement que de la vapeur d'eau, du gaz carbonique et de l'azote, gaz totalement inoffensifs vis à vis de la pollution atmosphérique et de la santé, sauf pour ce qui concerne l'effet de serre.

Pour réduire les émissions de polluants, on peut :

- limiter la formation de la pollution pendant la combustion. C'est la solution qui avait été retenue jusqu'à une époque récente par les constructeurs européens, qui avaient réussi, depuis le début des années 1970, à réduire d'environ 60 % le volume des émissions spécifiques, en réalisant des économies d'énergie et en optimisant la combustion. Cette solution possède cependant ses limites, car il est impossible, du fait de la dissociation, de réaliser une combustion parfaite.
- détruire la pollution provoquée par la combustion avant de rejeter les gaz d'échappement à l'atmosphère. C'est la voie retenue depuis plusieurs années pour les moteurs à essence. On utilise pour cela un pot catalytique, c'est-à-dire un système d'épuration catalysé par des métaux précieux (platine, palladium, rhodium) qui, placé sur la ligne d'échappement, détruit la quasi-totalité des polluants. C'est aujourd'hui la voie la plus efficace, mais elle est coûteuse et a tendance à augmenter de quelques pour-cent (2 à 5) la consommation du moteur.

L'efficacité de la catalyse est mise en évidence par les courbes suivantes, qui montrent, en fonction du facteur d'air λ (l'inverse de la richesse), les réductions obtenues dans les émissions des divers polluants.

On constate que si l'on veut à la fois diminuer les émissions d'oxydes d'azote NO_x , des imbrûlés HC et de monoxyde de carbone CO, il faut impérativement que la valeur du facteur d'air soit comprise dans une bande très étroite (entre 0,99 et 1 pour une transformation de 90 % des polluants). Cela signifie une légère perte de rendement du moteur par rapport à l'optimum (obtenu pour $\lambda \approx 1,2$)



Ceci provient de ce que l'on poursuit deux objectifs a priori contradictoires : d'une part réduire les oxydes d'azote, ce qui impose de travailler en l'absence d'oxygène, et d'autre part poursuivre l'oxydation en CO_2 et H_2O des imbrûlés et du monoxyde de carbone, ce qui en demande.

Grâce aux catalyseurs, il est possible de mener de front ces différentes opérations, mais à la condition impérative de parfaitement contrôler le dosage en oxygène pour que la combustion soit stœchiométrique, ce que permet l'utilisation d'une sonde dite Lambda placée dans le collecteur d'échappement. Si la valeur de λ diminue en deçà de 0,99 ou dépasse 1, l'efficacité du pot catalytique chute rapidement : 65 % pour $\lambda = 0,98$ ou $1,01$, 40 % pour $\lambda = 0,97$ ou $1,02$.

Pour arriver à maintenir la richesse dans une plage aussi étroite, il faut pouvoir déterminer avec une précision suffisante la quantité d'air aspirée, et y mélanger la quantité de carburant correspondante. Les travaux des constructeurs ont donc dans un premier temps porté sur l'amélioration des conditions de carburation en fonction de l'état de charge du moteur.

L'utilisation d'un pot catalytique "trois voies" ne peut se justifier qu'avec une régulation extrêmement précise de la carburation et de la combustion, c'est-à-dire avec des dispositifs d'injection et de commande de l'allumage électroniques. La régulation Lambda vient ainsi compléter la commande par cartographie d'allumage, en lui associant une boucle fermée sur la teneur en oxygène des gaz d'échappement, permettant d'affiner encore les réglages pour faire travailler le moteur en maintenant λ dans la bande [0,99 - 1] désirée.

Progressivement, les systèmes de carburation autrefois les plus répandus, qui étaient les carburateurs, ont cédé la place aux systèmes d'injection dans les tubulures d'admission, évolution qui s'explique par les raisons suivantes :

- l'injection permet un dosage très précis du carburant en fonction de l'état de charge et du régime du moteur, et permet donc de mieux contrôler les émissions de polluants.
- l'injection peut être réalisée à proximité immédiate des soupapes, limitant ainsi les risques de condensation de carburant sur les tubulures d'admission. De plus, si on utilise un injecteur par cylindre (injection dite multipoints), on est certain d'obtenir une bonne répartition du mélange.
- en supprimant le carburateur, on peut optimiser les écoulements de l'air dans les collecteurs d'admission, ce qui permet d'obtenir un meilleur coefficient de remplissage, et améliore donc les performances du moteur.
- enfin, on résout avec toute la précision requise diverses difficultés comme l'apport de carburant pour les reprises, le démarrage à froid, la tenue du ralenti.

Les systèmes de commande électronique de l'injection ont ainsi permis d'effectuer des gains significatifs en matière de réduction des polluants (baisse d'un facteur 50 en 30 ans, et 10 au cours des douze dernières années), mais ils se révèlent insuffisants pour faire face aux nouvelles exigences imposées par les réglementations internationales (nouvelle baisse d'un facteur 2 environ d'ici 2005).

Pour aller plus loin, les travaux actuels s'orientent vers un contrôle encore plus poussé de la combustion, à la fois dans les diesel et dans les moteurs à essence, la solution la plus prometteuse paraissant dans les deux cas être l'injection directe.

Signalons en passant que les performances de l'électronique de contrôle de la combustion acquièrent ainsi une importance critique : en cas de perturbations, dues par exemple à des interférences ondulatoires, la sécurité du moteur peut être mise en cause.

Injection directe diesel

L'injection directe n'est pas un concept nouveau, loin s'en faut. La plupart des moteurs diesel semi rapides ou lents y ont recours. Dans les moteurs rapides, on avait dû y renoncer jusqu'à récemment car elle présentait divers inconvénients (émissions de particules dues à l'hétérogénéité de la répartition du combustible, bruits du moteur...), et ne permettait pas d'accélérer suffisamment la combustion. La solution retenue était d'utiliser des pré-chambres, qui augmentaient les pertes par les parois et par étranglement.

Les travaux sur l'injection directe ont dans un premier temps porté sur les diesel, l'objectif étant d'éviter les problèmes qui existaient auparavant lorsqu'elle était utilisée dans les moteurs rapides. La solution qui s'impose aujourd'hui comme étant le meilleur compromis sur le plan technico-économique est la technologie du Common Rail. Schématiquement, elle consiste à distribuer le carburant dans une canalisation de distribution commune à tous les injecteurs, et à piloter ceux-ci grâce à des dispositifs électromagnétiques. La pression très élevée du "rail" (1300 - 1500 bars), et le très petit diamètre des trous des injecteurs (moins de 200 microns) permettent de réaliser une pulvérisation extrêmement fine du carburant, qui se vaporise immédiatement et brûle dans l'air bien mieux que ne le permettaient les systèmes classiques

On peut ainsi optimiser la combustion grâce à une injection séquentielle en trois phases :

- une pré-injection dite injection pilote de 1 à 2 mm³ de carburant en quelques microsecondes avec une avance d'environ 20° d'angle, permettant une élévation progressive de la température avant l'injection principale, afin d'obtenir une combustion plus silencieuse
- l'injection principale,

- et une post-injection à 200° d'angle environ destinée à améliorer la catalyse deNOx lorsqu'elle est installée.

L'utilisation du Common Rail conduit aujourd'hui à des performances grandement améliorées pour le diesel. L'adoption de filtres à particules (micro-sphérules de carbone de diamètre voisin de 0,05 micron) devrait permettre dans les prochaines années de réduire les émissions de particules à la limite du mesurable. C'est dans cette technologie que le groupe PSA a le plus investi au cours des dernières années, son nouveau moteur HDI équipant déjà certaines de ses voitures comme la 607, et de nouveaux moteurs étant en chantier à la fois pour ses besoins propres et dans le cadre de son accord avec Ford. Les performances de ce moteur sont nettement améliorées par rapport à celles des moteurs à injection indirecte de la génération précédente :

- 20 % de réduction de consommation (et donc d'émissions de CO₂)
- baisse de 40 % du CO, de 50 % des hydrocarbures imbrûlés et de 60 % des particules, à niveau de NOx constant.
- Gains en agrément de conduite (plus de 50 % d'augmentation du couple à bas régime), bruit et vibrations réduits.

Ces progrès sont imputables pour partie à l'injection directe, et pour partie à l'allègement du moteur (12 % environ) et à la réduction des frottements internes (gains de consommation de 1,5 à 2 % à bas et moyen régime).

Injection directe essence

A l'instar des développements réalisés dans le diesel, l'injection directe est en train de se développer pour les moteurs à essence, deux technologies étant en concurrence : les moteurs à mélange pauvre (lean burn) et à charge stratifiée, tels que ceux développés au Japon depuis 1997 par Mitsubishi et Toyota, et les moteurs stœchiométriques à forte recirculation des gaz d'échappement, qui correspondent au choix effectué par Renault, les premiers modèles ayant équipé des Mégane depuis 1999.

L'objectif n'est pas seulement ici d'optimiser les performances nominales du moteur, mais aussi de réduire les pertes à bas régime dues au pompage dont on a vu qu'elles proviennent de l'impossibilité, dans un moteur à essence classique, d'assurer une combustion stable en dessous du seuil d'inflammabilité du mélange comburant (ratio air/carburant voisin de 22/1, alors que la stœchiométrie est réalisée pour 14,6/1). L'idée est de contourner cette difficulté en réalisant, grâce à l'injecteur, un mélange hétérogène dans la chambre, mais de composition convenable à proximité de la bougie, la combustion se propageant ensuite au reste de la chambre.

Sans nul doute, la technologie japonaise est celle qui conduit aux gains de rendement les plus importants : 30 à 40 % de réduction de la consommation à bas régime, 25 % sur les cycles de tests japonais, alors que l'injection directe stœchiométrique ne permet pas de dépasser 15 à 20 % de baisse de consommation. Dans les deux cas, les pertes de pompage sont fortement diminuées grâce à une forte recirculation des gaz d'échappement (EGR), qui permet, tout en réduisant les émissions de NOx, de limiter la dépression causée par le papillon placé dans les tubulures d'admission. Dans les deux cas aussi, le taux de compression peut être sensiblement augmenté sans risque de détonation (12,5 en mélange pauvre, 11,5 en stœchiométrique, contre 10,5 dans un moteur à injection multipoints).

Cependant, la technologie japonaise présente l'inconvénient d'être incompatible avec les catalyseurs trois voies actuellement disponibles. Dans ces conditions, même si les émissions de polluants sont très réduites par rapport à un moteur à essence sans post traitement des gaz, elles sont très supérieures aux normes européennes. Ceci explique que Renault ait fait le choix de l'autre technologie, se réservant d'ailleurs la possibilité de mettre en œuvre des moteurs à mélange pauvre quand les catalyseurs deNOx correspondants seront disponibles.

Sur les gros moteurs alternatifs, les développements technologiques se poursuivent dans deux directions complémentaires :

Moteurs à gaz

On assiste depuis plusieurs années au développement de moteurs diesel au gaz de puissances accrues, la gamme allant des diesel gaz rapides de quelques centaines de kW à des machines semi-rapides dont la capacité atteint 6 MW et devrait être portée à 10 MW prochainement. L'allumage peut être soit commandé par bougie comme dans un moteur à essence, soit effectué par injection pilote de fuel.

Les moteurs à allumage commandé utilisés dans des installations de cogénération travaillent généralement en mélange pauvre, à l'instar de ce qui est recherché dans les moteurs à injection directe d'essence japonais. Pour la production d'énergie, la combustion de mélange stœchiométrique conduit à une densité de puissance plus faible et à des émissions plus abondantes nécessitant une catalyse trois voies.

L'allumage est assuré par des bougies placées directement dans la chambre de combustion pour les petits moteurs jusqu'à 1 MW, et, pour les moteurs plus puissants, dans une pré-chambre dont la conception détermine le niveau des émissions et la température les limites de la puissance atteinte compte tenu des risques d'apparition du cliquetis dans la chambre principale.

Pour les moteurs à gaz les plus puissants, l'allumage est réalisé par injection pilote de fuel en quantité inférieure à 1 % de la consommation totale de gaz. Le fuel s'enflamme par effet diesel et dégage suffisamment d'énergie pour enflammer des mélanges air/gaz très pauvres.

Enfin, des progrès significatifs ont été réalisés en matière de commande des installations, afin de prendre en compte la composition des gaz et leur pouvoir calorifique, qui ne sont pas constants.

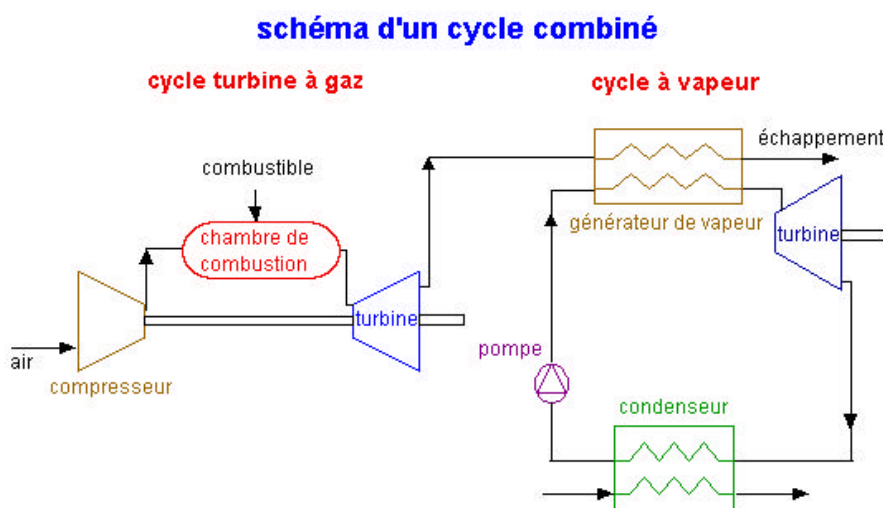
Moteurs diesel lourds

Depuis le début des années 70, la consommation des moteurs diesel lourds a été réduite de 15 % et leur puissance augmentée de 35 %. Par ailleurs, pour développer la technologie des cycles combinés diesel (voir plus loin), les constructeurs ont cherché à augmenter la température de fonctionnement des moteurs diesel. Les essais pour introduire les céramiques s'étant révélés infructueux, ils se sont tournés vers de nouveaux alliages, de nouvelles conceptions et de nouveaux modes de fabrication, comme l'utilisation du laser pour le traitement des surfaces. Il en est résulté une profonde transformation du cylindre : nouvelle couronne de piston non refroidie, bague anti-polissage isolante, soupapes et sièges de soupape beaucoup plus résistants, structure composite de la culasse... Pour ces deux types de moteurs, les coûts d'installation s'échelonnent entre 300 et 350 \$/kW

Cycles combinés

Dans les turbines à gaz modernes, où la pression dépasse 15 ou 20 bars et la température atteint 1700 K, l'enthalpie résiduelle des gaz d'échappement peut être valorisée comme source chaude pour un deuxième cycle de production d'énergie mécanique. Les **cycles combinés** correspondent à cette nouvelle génération de centrales thermiques.

Le principe d'un cycle combiné consiste à faire fonctionner en cascade une ou plusieurs turbines à gaz, suivies d'une centrale à vapeur dont la source chaude est la source froide des turbines à gaz (voir schéma ci-dessus).



Dans ces conditions, les gaz d'échappement de la turbine à gaz sont dirigés dans une chaudière de récupération où l'on produit de la vapeur qui est ensuite détendue dans une turbine à condensation. Le cycle combiné ainsi obtenu est un mariage particulièrement réussi dans la recherche de l'amélioration du rendement thermique : avec

les matériels disponibles actuellement, les rendements atteignent 60% et sont donc largement supérieurs à ceux que l'on peut espérer, même à moyen terme, des futures centrales à vapeur les plus avancées.

Dans un cycle combiné simple du type de celui présenté ci-dessous, la turbine à gaz fournit les deux tiers de la puissance totale. La turbine à vapeur, alimentée en vapeur surchauffée à des conditions de 85-100 bars et 510-540 °C, fournit le tiers restant.

Les rendements très élevés auxquels conduisent les cycles combinés expliquent l'enthousiasme suscité par ces centrales, et le rapide développement de leur marché : la plus grosse centrale de ce type en fonctionnement, celle de Futtsu au Japon, a une puissance installée de 2 000 MW. La machine la plus performante est aujourd'hui le modèle MS7001H de General Electric, qui devrait entrer en service en 2001 à Baglan Energy Park à côté de Cardiff. Elle développera en cycle combiné une puissance de 500 MW, avec une température d'entrée turbine de 1430 °C, et un rendement global de 60 %.

Dans les années à venir, les rendements devraient continuer à augmenter, le programme Vision 21 (voir plus loin) se fixant comme objectif de dépasser 75 %, et les prix baisser encore, augmentant ainsi la compétitivité économique de ces machines.

Parmi les avantages supplémentaires des cycles combinés, il faut citer :

- comme les turbines à gaz, les cycles combinés sont normalement conçus de manière standardisée et modulaire, de telle sorte que les différents composants sont construits en usine et assemblés rapidement sur site, alors qu'une centrale à vapeur doit être calculée au cas par cas.
- de ce fait, les cycles combinés ne bénéficient presque pas d'effet d'échelle. Il n'est pas nécessaire de construire d'un seul coup de grandes centrales : on peut commencer par de petites unités, et en ajouter d'autres au fur et à mesure que la demande croît.
- du fait des excellents rendements que l'on atteint, et aussi de l'utilisation de combustibles à basse teneur en soufre et en azote, l'impact environnemental de ces technologies est bien moindre que celui de leurs concurrentes : les émissions de CO₂ sont seulement égales à 40 % de celles des centrales à vapeur au charbon, et elles nécessitent trois fois moins d'eau de refroidissement.
- de la même manière, l'emprise au sol des cycles combinés est voisine de 80 m²/MW, contre environ 200 m²/MW pour une centrale à vapeur. Il est donc plus facile de les implanter à proximité des lieux de consommation.

Une des principales limitations est que les turbines à gaz requièrent l'emploi d'un combustible propre donc cher, comme du gaz naturel ou des distillats légers, ce qui exclut l'utilisation du fuel lourd ou du charbon, combustibles de base traditionnels des centrales électriques. Toutefois le développement de la gazéification du charbon permettrait à cette source d'énergie d'alimenter des cycles combinés performants.

Cycle combiné diesel

L'augmentation des températures du moteur diesel dont il a été parlé précédemment a permis d'obtenir les gains suivants, particulièrement propices à leur utilisation en cycle combiné :

- rendement mécanique augmenté de 45 % à 47 %
- enthalpie des gaz d'échappement passant de 27 % à 32 %
- réduction des pertes de refroidissement de 24 % à 16 %

Aujourd'hui, un cycle combiné diesel de moins de 100 MW à base de moteurs semi-rapides atteint un rendement global de 55 %, ce qui le rend compétitif avec la turbine à gaz, pour des unités de moins de 100 MW.

Cogénération

La cogénération est la production simultanée de chaleur et d'énergie mécanique ou d'électricité à partir de la même installation. Elle présente l'avantage de conduire à des rendements globaux dépassant 80 %. Parmi les moteurs à combustion interne, comme pour les cycles combinés, ce sont essentiellement les turbines à gaz et les moteurs à gaz qui sont les mieux adaptés pour la cogénération.

Compte tenu de leurs performances et de leurs coûts, les moteurs à gaz sont aujourd'hui devenus un des constituants de base des systèmes de cogénération, faisant de la concurrence aux systèmes basés sur les turbines à gaz pour des puissances de plus en plus élevées (jusqu'à 60 MW ou 100 MW).

Perspectives d'évolutions technologiques

Pour l'avenir, deux grandes tendances peuvent sembler-t-il être identifiées : d'une part la poursuite de l'amélioration des performances de chacun des types de moteurs que nous avons considérés, avec un accent particulier mis sur la limitation de leur impact sur l'environnement, et d'autre part leur insertion dans des systèmes complexes de plus en plus intégrés, comme les cycles combinés ou les unités de cogénération.

Moteurs automobiles

En dehors des travaux sur l'injection directe dont il a été fait état plus haut, de nombreux constructeurs cherchent à disposer d'une plus grande souplesse dans la commande des ouvertures des soupapes, soit grâce à des dispositifs mécaniques, soit grâce à des dispositifs électromagnétiques (systèmes dits Camless).

Même s'il est peu probable que cette solution voie le jour avant l'adoption d'une tension de 48 V pour le système électrique continu, elle se révèle particulièrement séduisante, car elle permettrait de gérer les ouvertures des soupapes selon des protocoles actuellement irréalisables, comme par exemple de by-passer certains cylindres à bas régime. On pourrait ainsi avoir des moteurs de cylindrée variable inconcevables aujourd'hui.

D'autres recherches sont parallèlement effectuées sur le remplacement du démarreur et de l'alternateur par des systèmes permettant une meilleure gestion de l'électricité (Alternateur Démarreur Intégré au Volant d'Inertie (ADIVI), Stop and Go), l'amélioration des turbocompresseurs...

Les véhicules hybrides associant une motorisation thermique et une propulsion électrique restent aussi à l'ordre du jour. Il n'est toutefois pas possible de développer ce point dans le cadre de cette présentation.

Gros moteurs gaz et diesel

Le rendement des gros moteurs devrait continuer à être amélioré de quelques pour-cent dans les années à venir, tandis que leur densité de puissance, particulièrement celle des moteurs à gaz, continuera à croître d'environ 2 % par an.

Turbines à gaz

Les performances des turbines à gaz devraient encore croître dans les années à venir, du fait des transferts de technologie en provenance de l'aéronautique et des importants programmes de R&D en cours dans le domaine, notamment aux Etats Unis.

Le plus ambitieux programme énergétique actuel, le programme Vision 21 du Département de l'Energie des Etats Unis affiche des objectifs très élevés pour l'année 2015 : 60 % de rendement sur PCS (pouvoir calorifique supérieur) en génération électrique à partir de charbon, et plus de 75 % sur PCI (pouvoir calorifique inférieur) à partir de gaz naturel, production simultanée d'électricité, de chaleur (85-90 % de rendement en cogénération) et de carburants de synthèse ou d'hydrogène, modularité et flexibilité...

Pour cela, ce programme identifie comme l'un de ses cinq axes prioritaires le développement de méthodes avancées d'intégration système et d'analyse des systèmes. Un autre axe concerne les technologies clés à développer : membranes de séparation pour l'oxygène et l'hydrogène, échangeurs de chaleur à haute température, gaséification flexible, purification des gaz, systèmes de combustion avancés, turbines à gaz multi-combustibles, piles à combustible, développement avancé de carburants et produits chimiques, matériaux à haute température résistant à des atmosphères corrosives, démonstration virtuelle et modélisation numérique avancée, commande et mesure avancée, notamment dans le domaine environnemental, modularisation et fabrication avancées.

Références

Vision 21 Program Plan, Clean Energy Plants for the 21st Century, Federal Energy Technology Center, Office of Fossil Energy, US Department of Energy

Dossier "Production d'énergie électrique, Revue de la Société des Electriciens et des Electroniciens, décembre 1999, Paris.

Revue des Ingénieurs de l'Automobile, nombreux dossiers "moteur"

GICQUEL R., Systèmes Energétiques, Tomes 1 et 2, Presses de l'Ecole des Mines de Paris, février et novembre 2001.