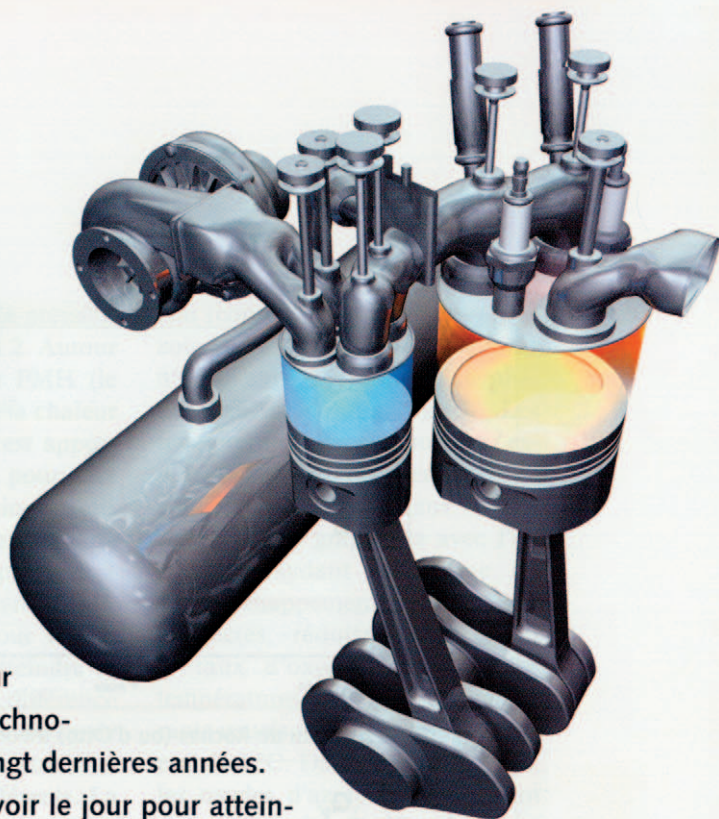


Le moteur Scuderi à cycle divisé

Les moteurs à explosion à deux ou quatre temps (fonctionnant suivant le cycle de Beau de Rochas) ont propulsé les véhicules depuis plus d'un siècle, imposant ces concepts à toutes solutions concurrentes. Les économies de carburant, la réduction des émissions polluantes comme le confort du conducteur et de ses passagers ont guidé des développements technologiques majeurs (voir *la forge* n° 45) au cours des vingt dernières années. Un nouveau concept de moteur à explosion vient de voir le jour pour atteindre des objectifs ambitieux.



Quelques données historiques

Les feux d'artifice pourraient être considérés comme les premiers appareils autopropulsés, amenant les moteurs de fusées au 13^{ème} siècle. Huygens employait la poudre à canon pour actionner les pompes des fontaines du jardin du château de Versailles au 17^{ème} siècle, créant les moteurs à pistons à combustion interne.

La fin du 18^{ème} siècle a vu les premiers développements avec différents types de carburants, mais le véritable essor est intervenu entre la seconde partie du 19^{ème} siècle et le début du 20^{ème} siècle où de nombreux inventeurs ont breveté les solutions de notre quotidien. Leur créativité était sans limite pour contourner les brevets ou profiter pleinement des avantages de techniques ou découvertes nouvelles.

Les noms et notions de 2-temps, 4-temps, Diesel, turbocompresseurs, compresseurs (voir *la forge* n° 40)... nous viennent de cette période. La première partie du 20^{ème} siècle a vu des travaux sur les moteurs à réaction, les premiers

tours des moteurs Wankel datant de 1954. Un passé plus récent montre l'importance que les solutions hybrides ou électriques pourraient tenir dans le futur.

Confort des conducteurs et des passagers, rendements, réduction des émissions polluantes (voir *la forge* n° 45), augmentation des durées de vie (voir *la forge* n° 32), allègement sont quelques-uns des objectifs des moteurs actuels et futurs. La contribution des moteurs à l'atteinte de ces objectifs s'avère très importante et des évolutions de leur conception (donc leur cycle de fonctionnement) apportent de nouveaux potentiels (voir *la forge* n° 38).

Les cycles de fonctionnement des moteurs à combustion interne

Dans le cas du moteur à 4-temps, le cycle le plus connu est le cycle de Beau de Rochas (aussi nommé cycle d'Otto) (fig. 1, page suivante). Tout en étant le plus courant, des moteurs peuvent fonctionner selon d'autres principes comme le cycle d'Atkinson

L'inventeur du concept

Carmelo J. Scuderi (1925-2002) était un ingénieur en thermodynamique diplômé de l'Uni-



versité du Massachusetts qui a passé sa carrière professionnelle dans l'industrie, principalement sous contrats gouvernementaux (dont le secteur militaire). A l'âge de 72 ans, retraité, il a passé cinq ans à mettre ses idées en pratique développant un concept qui n'était plus basé sur une conception mécanique mais sur une gestion thermodynamique des fluides.

conçu pour s'affranchir de brevets couvrant les précédents (fig. 2, page suivante). Le cycle de Miller (années 1940) est très voisin du cycle d'Atkinson (fig. 3, page suivante).

VACCARI

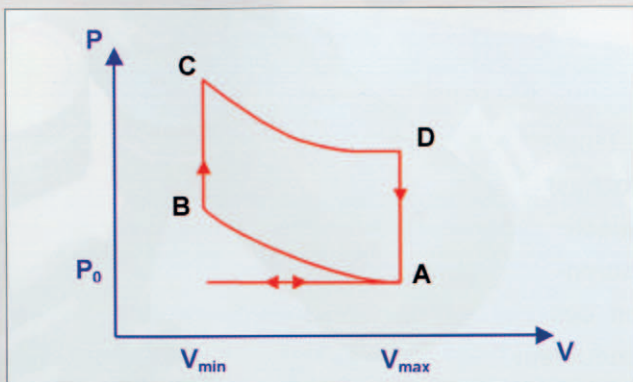


Fig. 1 : Cycle de Beau de Rochas (ou d'Otto) théorique

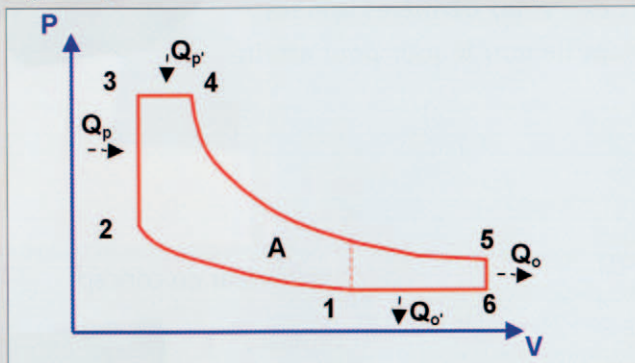


Fig. 2 : Cycle d'Atkinson théorique

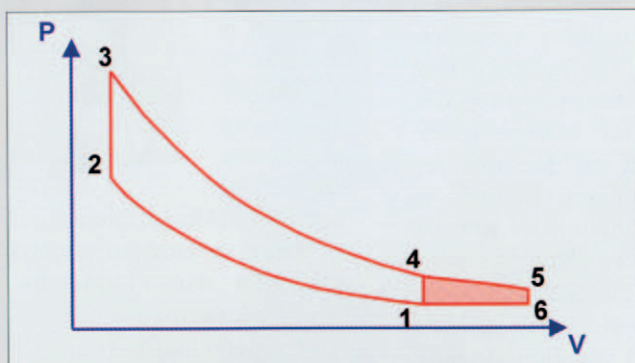


Fig. 3 : Cycle de Miller théorique

Il est aussi intéressant de citer le cycle de Brayton, très répandu en aéronautique avec les moteurs à combustion externe (fig. 4), car sa connaissance peut contribuer à la compréhension globale des autres cycles.

Note pour les lecteurs : interprétation de ces graphiques ; légendes et définitions

Un moteur fonctionne suivant des principes thermodynamiques, science physique traitant de l'énergie et du travail d'un système. Le dispositif est créé et mû par des systèmes mécaniques.

Les figures 1 à 4 sont des diagrammes de Clapeyron P-V ou T-S, présentant des cycles théoriques de gaz parfaits. Ils montrent l'évolution de deux paramètres du gaz pendant le cycle du moteur.

Légende

- P : pression du gaz (bar),
- V : volume du gaz (dm³),
- T : température (K),
- S : entropie (J/K),
- H : enthalpie (J).

Définitions

Adiabatique : sans transfert de chaleur vers ou depuis le fluide de travail.

Entropie : propriété thermodynamique employée pour déterminer l'énergie disponible pour un travail utile dans le procédé thermodynamique, tel qu'un équipement de conversion d'énergie, des moteurs ou des machines. Seule une énergie convertible peut entraî-

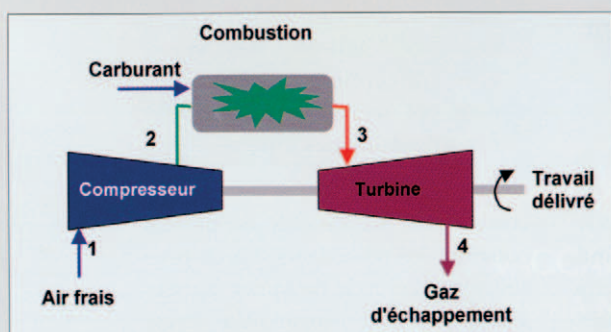
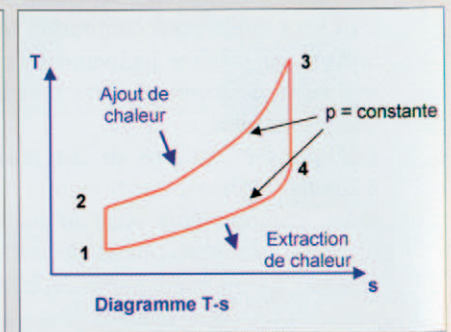
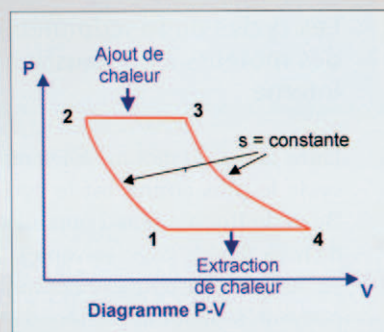


Fig. 4 : Cycle de Brayton théorique



ner ces équipements, avec une efficacité théorique maximale lors de la conversion de l'énergie en travail. Pendant ce travail, l'entropie s'accumule dans le système, mais devra être dispersée sous la forme de chaleur perdue.

Enthalpie : mesure de l'énergie totale d'un système, incluant l'énergie interne (celle requise pour créer le système) et la quantité d'énergie nécessaire au déplacement de son environnement, établissant ses données de volume et pression.

Regardons le cycle de Miller figure 3, page précédente, de plus près.

Considérant le point 6, point mort bas, comme le point de départ du cycle de travail (pour faciliter la lecture, cette explication se réduit à un moteur à deux soupapes par cylindre). La compression adiabatique du gaz débute avec la soupape d'admission restant ouverte, réduisant le volume de la chambre jusqu'à atteindre le point 1 où cette soupape se ferme. Cette étape cruciale de ce cycle se produit lorsque le piston a parcouru entre 20 et 30 % de sa course. La soupape

d'admission se ferme et la pression augmente jusqu'au point 2. Autour du point mort haut ou PMH (le volume est constant), de la chaleur (étincelle de la bougie) est apportée au système, ce qui a pour effet d'augmenter la pression pour atteindre le point 3 avant une détente adiabatique complète jusqu'au point 5 avant d'ouvrir la soupape d'échappement pour laisser chuter la pression et atteindre le point 6. Il y a là une différence majeure avec le cycle de Beau de Rochas car les taux de détente et de compression sont différents. La chute de pression du point 5 au point 6 est bien moindre qu'entre les points 4 et 1 du cycle de Beau de Rochas, symbolisés sur la figure 3. Cette zone 1-4-5-6 explique un surplus de puissance communément admis et un rejet de chaleur moindre dans les gaz d'échappement, contribuant à la réduction de NOx.

La génération de NOx

Les oxydes d'azote proviennent de la combustion de carburant carboné (gazeux ou liquide) avec de

l'air (composé d'environ 78 % d'azote et 21 % d'oxygène), *la forge* n° 35, page 15, expose ce phénomène en détails (fig. 5). Les températures de combustion/explosion des moteurs thermiques se situent typiquement dans le secteur II de ce graphique avec l'air comme oxydant (bien que les gaz d'échappement puissent être réinjectés, réduisant de ce fait le taux d'oxygène) et que les températures de flamme des carburants usuels varient entre 2 000 °C et 2 100 °C. Dans le même temps, les oxydes d'azote ne se forment pas en quantité significative avant que les flammes n'atteignent 1 500 °C (fig. 6).

Depuis des années, les concepteurs ont développé des solutions pour lutter contre ces problèmes comme la réduction catalytique (pour détruire des particules nocives dans les gaz d'échappement), tout en associant d'autres objectifs comme l'efficacité moteur et la réduction d'autres émissions polluantes (oxydes de carbone). Cet article exposera de nouvelles solutions proposées par la conception du SSC.

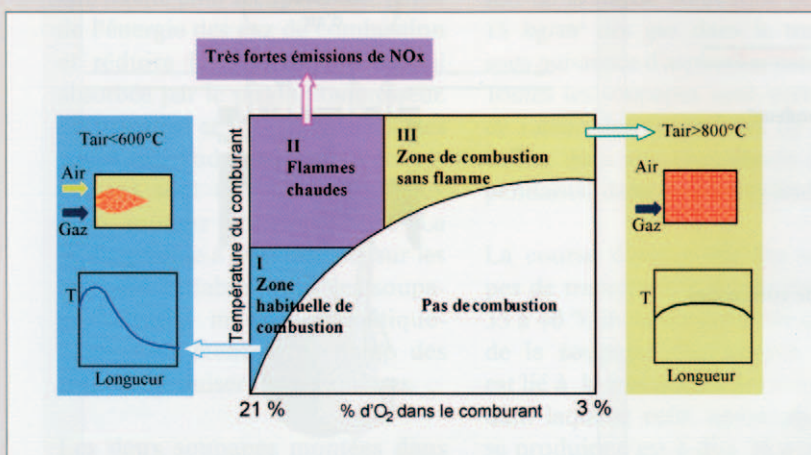


Fig. 5 : Schéma des différents modes de combustion aéro-gaz (Source GDFSuez)

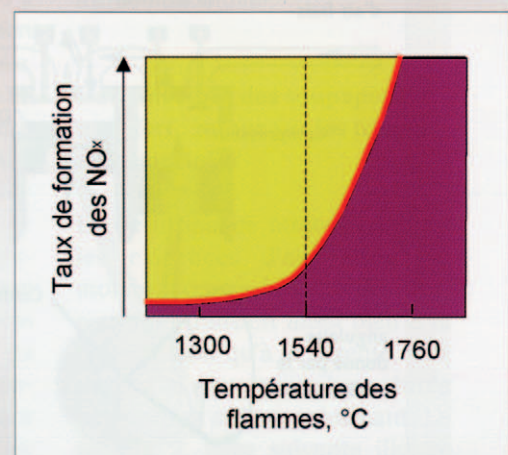


Fig. 6 : Formation des NOx selon la température des flammes

Le moteur Scuderi à cycle divisé, *Scuderi Split-Cycle (SSC)*, concept et fonctionnement

Ce moteur est inspiré du cycle de Miller, d'où force détails ci-dessus et dans l'article suivant, et a été entièrement conçu pour atteindre ses objectifs. Seul le moteur à explosion est décrit ci-après, bien que le concept puisse être étendu aux moteurs de type Diesel.

La conception à cycle divisé sépare les quatre temps d'un cycle de combustion conventionnel sur deux cylindres couplés : le premier (le compresseur) gère l'admission et la compression et le second (le détenteur) apporte les temps d'explosion et échappement, reliés par un « transfert » (fig. 7) qui tient un rôle prépondérant dans le fonctionnement global du moteur, donc son rendement. Quand la combustion des gaz est améliorée dans cette configuration, toutefois accompagnée de défis techniques, elle offre la possibilité d'une hybri-

dation pneumatique du moteur. Nous essaierons de présenter son architecture et son fonctionnement (proche du cycle de Miller, où la détente est supérieure à la compression) ou l'alimentation du détenteur par le compresseur (les courses des pistons dans les deux cylindres peuvent être potentiellement différentes).

Le transfert

Son rôle essentiel consiste à transférer des gaz sous haute pression (classiquement l'air) du compresseur vers le détenteur : la flexibilité obtenue de cette scission permet d'optimiser chaque temps du cycle moteur. Dans les moteurs à explosion, l'injection de carburant est réalisée soit au cours de ce transfert pour apporter le mélange approprié dans le détenteur, soit directement dans le cylindre (voire les deux). Quelle que soit la méthode d'injection, les réactions chimiques qui conduisent au préallumage ou aux cognements ne

peuvent se produire en raison du plus faible laps de temps pendant lequel ces conditions sont réunies.

Ce transfert est un élément caractéristique de ce moteur permettant l'adaptation de son architecture aux différents types et/ou conditions d'emploi. Par l'ajout d'un réservoir de stockage sous haute pression entre les soupapes de sortie du compresseur et d'entrée du détenteur, le concept s'étend à un fonctionnement hybride car l'air comprimé peut y être transféré, via le jeu des soupapes (fig. 8).

On pourrait parler d'« d'hybride mécanique » car il peut emmagasiner de l'énergie au cours des décélérations. Cette conception permet cinq modes de fonctionnement principaux :

- allumage normal du moteur (EF, *Normal Engine Firing*) – le moteur fonctionne sous un allumage et une circulation des fluides normaux (non hybride), sans flux de ou vers le réservoir de stockage,

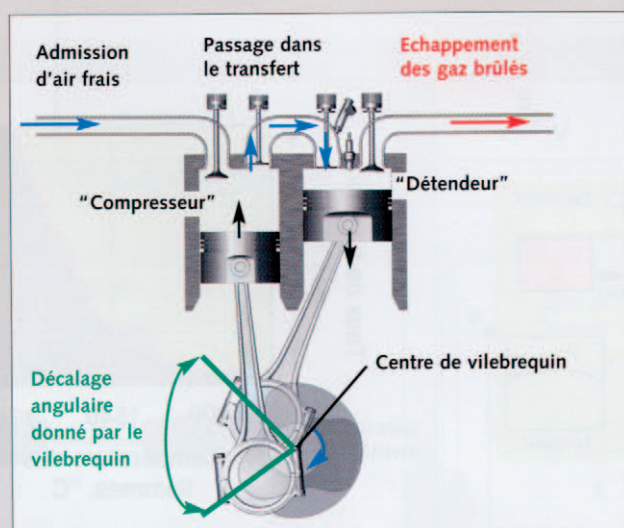


Fig. 7 : Principaux éléments constituant le moteur SSC

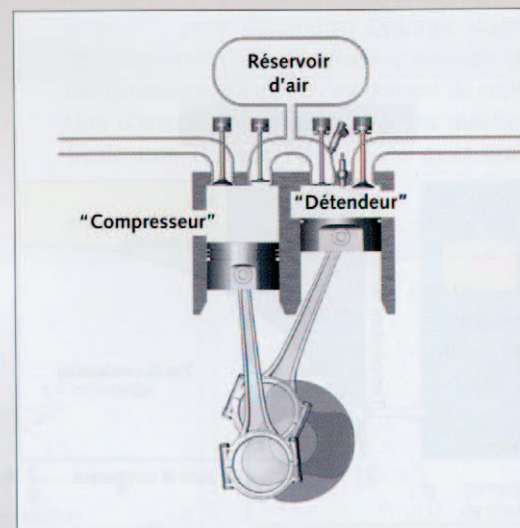


Fig. 8 : Fonctionnement mécanique hybride

■ compression d'air (AC, *Air Compressor*) – le moteur est en mode freinage, le cylindre détenteur est inopérant et le flux d'air comprimé vient charger le réservoir de stockage dans les phases de décélération ou de descente,

■ détente d'air (AE, *Air Expander*) – le cylindre compresseur est rendu inopérant et le réservoir de stockage fournit l'air comprimé dans le transfert vers le cylindre détenteur (sans injection de carburant ou de combustion),

■ allumage et chargement (FC, *Firing and Charging*) – le cylindre compresseur fournit plus d'air comprimé que nécessaire au cylindre détenteur, le transfert envoie l'excès d'air vers le réservoir de stockage,

■ détente et allumage (AEF, *Air Expander and Firing*) – le cylindre compresseur est rendu inopérant, le réservoir de stockage charge en air comprimé le transfert pour alimenter le détenteur avec du carburant pour la combustion.

Un moteur à quatre temps classique ne travaille que suivant ces deux derniers modes sans impact négatif sur l'efficacité.

Un turbocompresseur peut de plus être monté pour récupérer une partie de l'énergie des gaz de combustion et réduire la quantité de travail absorbée par le piston compresseur. Le montage et les composants des soupapes d'admission et d'échappement sont très voisins de ceux d'un moteur conventionnel. La bibliographie a montré que, sur les moteurs de laboratoire, les soupapes étaient mues pneumatiquement pour étendre le champ des tests et optimiser les paramètres.

Les deux soupapes montées dans le transfert sont des soupapes à tulipe à ouverture extérieure (c'est-

Alésage du compresseur	87 mm
Course du compresseur	99 mm (81 mm TC*)
Volume déplacé par le compresseur	0,59 l (0,48 l TC*)
Taux de compression (géométrique)	96 : 1
Alésage du détenteur	87 mm
Course du détenteur	87 mm
Volume déplacé par le détenteur	0,52 l
Taux de détente (géométrique)	50 : 1
Déphasage entre compresseur et détenteur	20°
Cylindrée totale du moteur	1,11 l
Soupapes d'admission	2 x 35,1 mm (Ø ext) ouverture intérieure
Soupapes d'échappement	1 x 33,1 mm (Ø ext) ouverture intérieure
Soupapes de transfert	4 x 20 mm (Ø ext) ouverture extérieure
Bougies	2

Tableau 1 : Conditions de test de moteur SSC en laboratoire

* TC Turbocompressé

à-dire que l'ouverture se produit lorsque la soupape s'éloigne du piston, pour permettre la bonne ouverture près du point mort haut (PMH) sans risque d'interférence avec le piston ou perte de taux de compression (r_c) ou de détente (r_e) liées à l'espace disponible en tête de chaque cylindre. Leurs diamètres sont de 57 % du diamètre de la soupape d'admission (Tableau 1), en raison de la masse volumique de 10 à 15 kg/m³ des gaz dans le transfert sous puissance d'aspiration naturelle. Toutes les soupapes sont verticales en raison des contraintes de fabrication dues aux taux élevés (indépendants) dans chaque cylindre.

La course d'ouverture des soupapes de transfert représente environ 35 à 40 % de la longueur de course de la soupape d'admission. Cela est lié à la très courte période pendant laquelle cette opération peut se produire c'est-à-dire 30 à 35° de vilebrequin. La combinaison des périodes d'ouverture de soupape,

la vitesse nominale du moteur et le point haut de la soupape fait que les accélérations mesurées sur ces soupapes sont équivalentes à celles des moteurs de compétition les plus poussés.

Le transfert a fait l'objet de recherches complémentaires en mécanique des fluides dont le résultat est caractérisé par sa forme hélicoïdale.

L'architecture des soupapes de transfert : retour sur les travaux en laboratoire

La performance attendue définit les exigences d'aspiration du moteur, comme la taille des soupapes de transfert aussi bien à la compression qu'à la détente, leur instant d'ouverture, leur durée d'ouverture et leur point haut. Le tableau 2, page suivante illustre les demandes fonctionnelles sur le montage des soupapes.

	Soupape de transfert côté cylindre :	
	Compresseur	Détendeur
Hauteur maximale de course	2,8 - 3,0 mm	2,6 - 2,8 mm
Durée d'ouverture	30 - 35° CA	35 - 40° CA
Vitesse instantanée du moteur	4 000 tours/minute	
Type d'amortissement	Pneumatique	
Matériau de soupape	Titane	
Matériau de l'adaptateur de soupape	Acier à haute résistance mécanique revêtu DLC	
Matériau de la coupelle de soupape	Titane	
Matériau du culbuteur	Acier à haute résistance mécanique revêtu DLC	
Matériau de la tige d'amortisseur pneumatique	Aluminium revêtu DLC	
Matériau de l'arbre à cames	100Cr6	
CA : angle de vilebrequin		

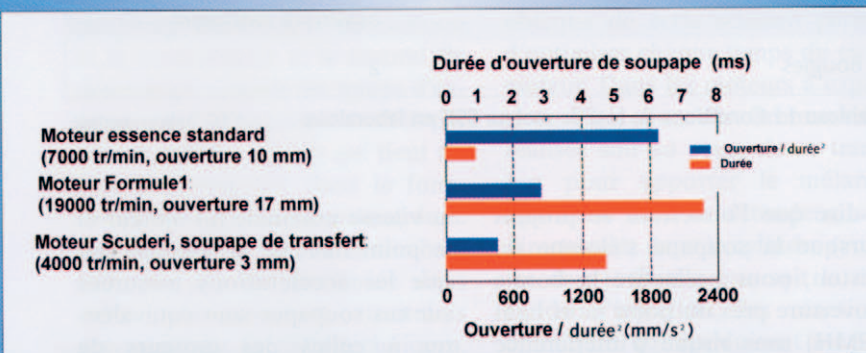


Tableau 2 : Caractéristiques des soupapes de transfert sur moteur de laboratoire et comparaison de leurs paramètres de fonctionnement avec d'autres moteurs

La figure 9 montre l'entraînement des soupapes de transfert sur un moteur de développement en laboratoire. Le choix d'ouverture extérieure a impliqué l'emploi de culbuteur, avec une extrémité en fourchette pour passer la tige de soupape et monter la coupelle par dessous, coupelle reliée à la soupape par entretoise.

Les fortes accélérations ont contraint à réduire à un minimum les masses en mouvement et à rigidifier la chaîne cinématique pour transmettre le mouvement de la came vers la soupape avec les vibrations minimales. Pour ce faire, les soupapes ont été réalisées en titane, montées avec un ressort pneumatique (en lieu et place de ressort en acier). Le ressort pneumatique est placé directement au bout de la queue de soupape, pour des questions d'allègement. Cette solution permet aussi de moduler leur tarage suivant la vitesse moteur avec des pressions plus faibles à faible vitesse, d'où des frottements réduits. Les exigences de fiabilité du moteur initial ont conduit à employer des aciers à haute résistance ($R_m > 2\,000$ MPa) pour l'arbre à cames, le culbuteur et la coupelle, capables de supporter d'importantes contraintes de contact en fonctionnement. Le culbuteur et la coupelle étaient aussi revêtus en surface de DLC (*Diamon-Like Carbon*, revêtement carbone aussi dur que du diamant) pour réduire le coefficient de frottement à sec et améliorer le comportement tribologique aux limites de conditions élasto-hydro-dynamique.

Une autre caractéristique marquante de cette conception est l'importante dimension du lobe de came, puisque le rayon de son cercle inscrit est supérieur à 40 mm. Elle s'explique (en comparaison avec les moteurs conventionnels) par la combinaison des différentes contraintes citées ci-dessus et de la faible amplitude du culbuteur (pour augmenter sa résistance).

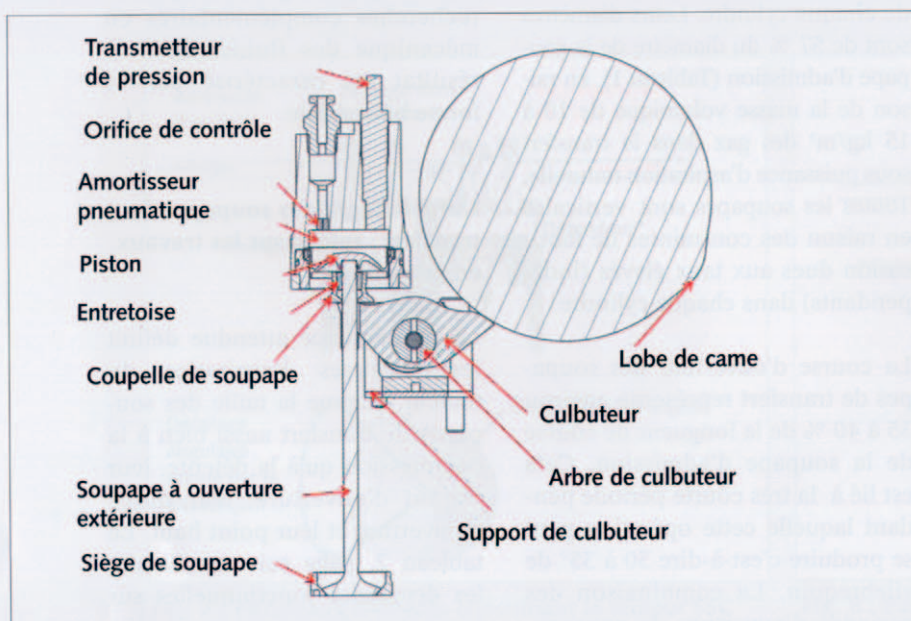


Fig. 9 : Entraînement initial des soupapes de transfert sur moteur de laboratoire

Cette forte taille est essentiellement due aux fortes contraintes de pression sur la came, en raison de ses faibles rayons de courbure, ainsi qu'aux angles de pression élevés et aux contraintes de fabrication. L'approche « fiabilité » avait conduit à ce choix, avec une marge de sécurité substantielle sur la lubrification et les contraintes de contact que les matériaux peuvent supporter. Elle a ouvert la possibilité de concevoir de futurs profils avec des accélérations plus brutales sans évolution majeure de la conception. L'axe de culbuteur est excentrique pour permettre des réglages et présente des trous d'huile pour être lubrifié sous pression.

La figure 10 montre que la soupape de transfert côté compression (nommée XovrC) travaille sous des différences de pression de 16 bars (pour résister à l'ouverture) puis 5 bars (pour assister la fermeture). La résistance à l'ouverture est créée par la pression résiduelle dans le transfert (générée lors du dernier tour moteur) : la soupape doit débuter son ouverture avant que la pression du cylindre compresseur n'atteigne la pression dans le transfert sinon elle ne pourrait pas s'ouvrir suffisamment au début du transfert de masses. Dans le cas de la soupape de transfert côté détente (nommée XovrE), ces différences de pression sont de 27 bars (résistance à l'ouverture), et de 9 à 15 bars (résistance à la fermeture, suivant le point de fermeture de soupape exact). Le ressort de soupape tient le rôle particulier de forcer la soupape à suivre le mouvement imposé par la came, de la plaquer contre son siège et d'assurer l'étanchéité contre l'excès de pression de compression ou de combustion. Le montage de la soupape XovrE a été vérifié expérimentalement.

Les pistons

Ils sont conçus différemment car seul le cylindre compresseur fonctionne avec une admission d'air frais alors que le cylindre détenteur n'évolue pas sous ce type d'admission. Quand les deux pistons pourraient tout à fait présenter des longueurs de course différentes, le diamètre du piston compresseur peut être plus petit que l'autre pour aussi réduire le travail

négatif de compression. Par construction, le point mort haut du compresseur est déphasé de 20° après le détenteur.

Le fonctionnement (Figure 11)

Le cycle divisé définit de nouveaux paramètres que sont :

- l'angle de phase entre les cylindres de compression et de détente,

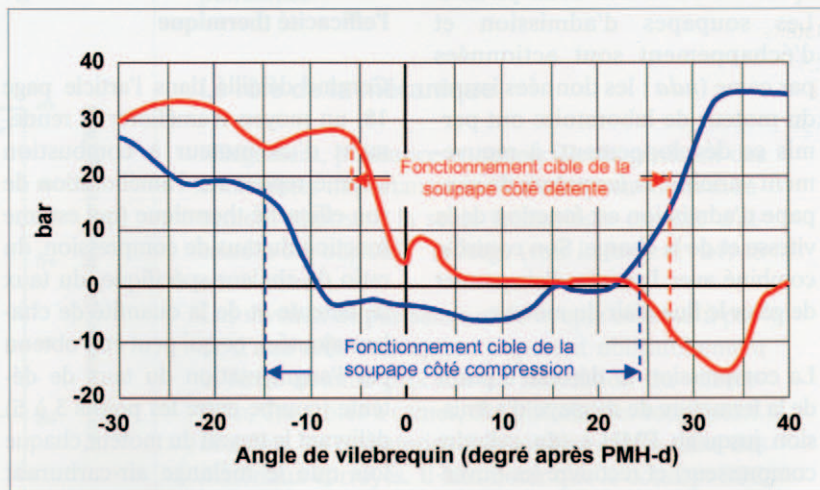


Fig. 10 : Différences de pression sur les soupapes de transfert côtés compression et détente, à pleine charge moteur 4000 tours/min

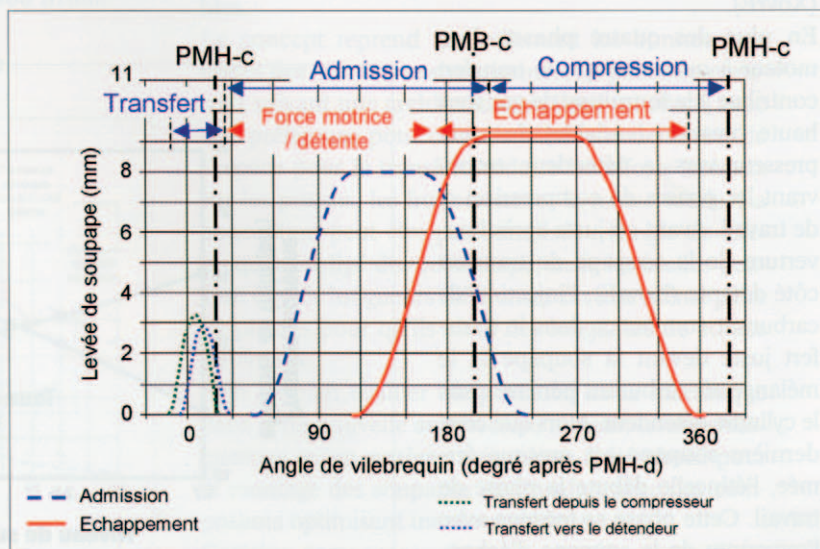


Fig. 11 : Événements principaux de combustion et levées de soupapes

- le transfert de fluide de travail entre ces deux mêmes cylindres après le point mort haut (PMH-d) du détendeur,
- la combustion après PMH et,
- le flux à vitesse sonique de transfert vers le cylindre détendeur, sur la plus grande partie des gammes de vitesse et charge.

Le cycle débute à l'ouverture de la soupape d'admission du compresseur, cette soupape se fermant après les PMB des deux pistons. Les soupapes d'admission et d'échappement sont actionnées par came (*nda* : les données issues du moteur de laboratoire ont permis ce développement) à mouvement variable, la fermeture de soupape d'admission est fonction de la vitesse et de la charge. Son contrôle combiné avec l'arrivée d'air permet de gérer le flux d'air du moteur.

La compression se déroule à partir de la fermeture de soupape d'admission jusqu'au PMH-c (du cylindre compresseur) et recouvre les ouvertures de soupapes de transfert, aussi bien à la fin de la compression (*XovrC*) qu'à la fin de la détente (*XovrE*).

En plus des quatre phases d'un moteur à quatre temps, le transfert contribue à la fourniture de gaz sous haute pression (variable) du compresseur vers le détendeur, recouvrant les phases de compression et de travail. Avant ou juste après l'ouverture de la soupape de transfert côté détente (*XovrE*), l'injection de carburant commence dans le transfert juste devant la soupape et le mélange air-carburant pénètre dans le cylindre détendeur. Alors que cette dernière soupape est presque fermée, l'étincelle débute la phase de travail. Cette phase se termine avec l'ouverture de la soupape d'échappement ; cette dernière se ferme juste avant le PMH-d, concluant

le cycle de Scuderi. Les paramètres d'admission et d'échappement, comme les instants d'ouverture et fermeture des soupapes varient complètement selon la vitesse et la charge pour optimiser la performance. L'injection de carburant, le mélange avec l'air et son mouvement se déroulent en 1 à 1,5 milliseconde à 4 000 tours/minute, c'est-à-dire 25 à 30° du vilebrequin.

Amélioration de l'efficacité thermique

Comme détaillé dans l'article page 18, un moyen d'améliorer le rendement d'un moteur à combustion interne repose sur l'amélioration de son efficacité thermique (qui est une fonction du taux de compression, du ratio de chaleur spécifique, du taux de détente et de la quantité de chaleur ajoutée), ce qui peut être obtenu par l'augmentation du taux de détente (courbe entre les points 3 à 5) délivrant le travail du moteur chaque fois que le mélange air-carburant détonne. Cela ne pourrait se produire efficacement dans les moteurs conventionnels où les taux de com-

pression et de détente sont identiques : un haut taux de compression génère une combustion anormale d'où des cognements. Comme les moteurs à cycle de Miller, on peut imaginer les moteurs SSC avec une course de détente plus longue.

Par conception, toutefois, la combustion se produit dans un cylindre détendeur où les températures maximales sont sensiblement inférieures à un moteur conventionnel réduisant significativement la formation de NOx. Tous les échanges gazeux et les événements thermodynamiques se répètent à chaque tour, c'est-à-dire deux temps par cylindre, ce qui conduit à voir le SSC comme un moteur à quatre temps fonctionnant simultanément sur deux cylindres à deux temps.

Les pertes qui peuvent être réduites dans un moteur à cycle divisé sont celles dues au pompage à travers le transfert et ses soupapes ainsi que les pertes thermiques à travers les parois du transfert. Alors que le cylindre compresseur a deux temps frais et que le compresseur a, lui, deux temps plus chauds, il est délicat de gérer cette charge thermique.

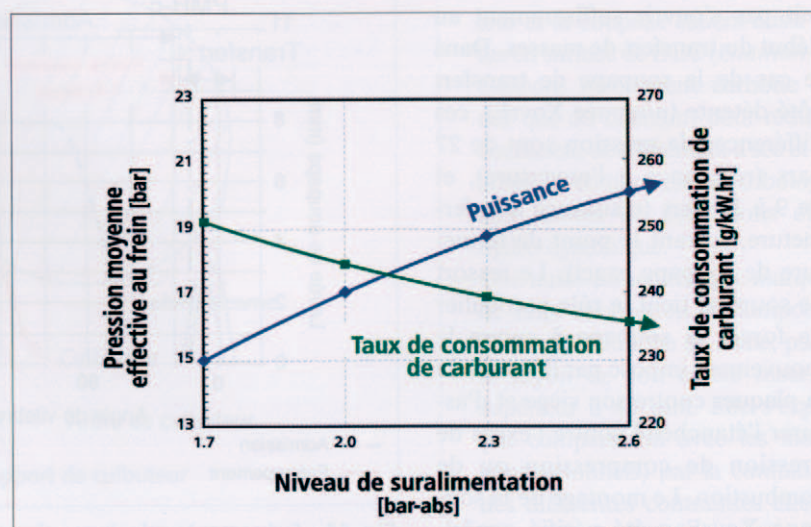


Fig. 12 : Rendement du moteur Scuderi

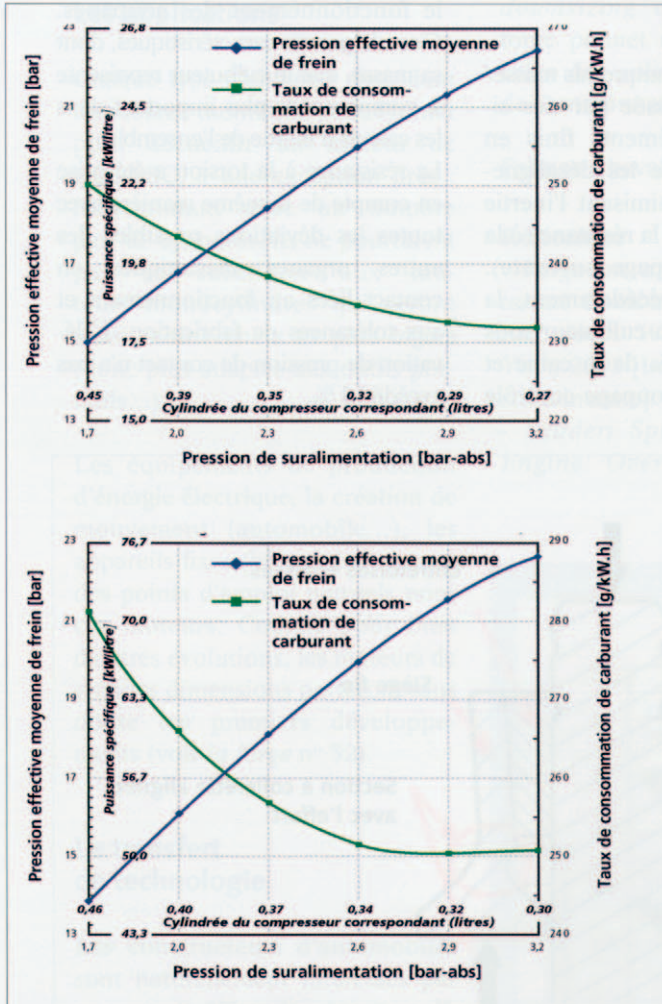


Fig. 13 : Moteur SSC : charge maximale de 1 400 tr/min (haut) et 4 000 tr/min (bas)
(Marge de cognement constante : 40 % de l'efficacité turbo)

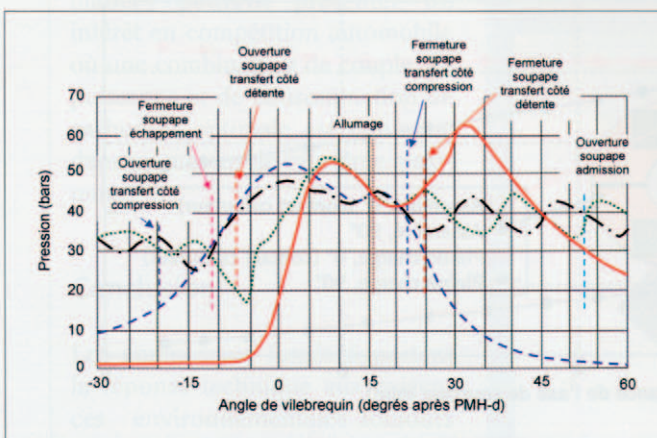


Fig. 14 : Cycles des pressions des soupapes de transfert et des cylindres à 4 000 tours/min, aspiration atmosphérique, pleine charge

La performance du moteur (figures 12 à 14)

L'objectif de cet article n'est pas de s'étendre sur les performances du moteur Scuderi à cycle divisé, mises à disposition par ce constructeur et les références bibliographiques. La compréhension de son fonctionnement et quelques données résumant les objectifs de son concepteur : puissance délivrée de 100 cv/litre à 4 000 tours/minute, un couple équivalent à celui d'un moteur Diesel...

Néanmoins, son concept et ses cinq modes de fonctionnement permettent une réduction substantielle de la consommation de carburant et des émissions polluantes.

Le rôle de la mécanique

Allègement, puissance et couple élevés génèrent des contraintes importantes sur les composants en mouvement imposant la seule technologie capable d'atteindre ces objectifs : la forge (voir *la forge* n° 24, 45 entre autres).

Les niveaux de puissance et de couple obtenus à partir d'une telle conception imposent obligatoirement la forge comme procédé de fabrication du vilebrequin, des arbres à cames, des pistons, des soupapes... et même les tuyauteries doivent être créées dans des matériaux corroyés. Il faut noter que le concept SSC s'appuie sur les évolutions menées sur les moteurs à cycle Beau de Rochas et emploie, dès ses premiers développements, les meilleures techniques disponibles.

Le concept reprend naturellement les bonnes pratiques des moteurs conventionnels : il peut être construit suivant une architecture en ligne ou en vé, avec une préférence pour cette dernière afin de laisser de l'espace pour le transfert, réduire les efforts latéraux sur les pistons, les frottements et la masse totale. La conception peut être personnalisée : l'angle de vilebrequin est figé dès cette étape, mais les bielles peuvent être de longueurs différentes sur une même paire de pistons pour qu'ils aient des longueurs de course différentes.

Afin de bien évaluer l'importance de la mécanique dans cette nouvelle architecture moteur, nous remarquerons qu'un système mécanique a été choisi pour le montage des soupapes de transfert avec des composants optimisant inertie et raideur.

Certains composants tiennent un rôle particulièrement important, leurs particularités sont détaillées ci-après.

La coupelle de soupape

Nommé adaptateur, cet ensemble reprend le rôle d'une coupelle et de la clavette de soupape. Sa conception vise deux objectifs : le premier consiste à s'assurer que les chocs issus de la fermeture des têtes de soupapes contre leurs sièges à grande vitesse ne feront pas sauter les entretoises des coupelles, le second vise à proposer une surface plane face à la forme en fourchette du culbuteur et permettre ainsi des défauts d'alignement mineurs (fig. 15). Le premier objectif a été atteint via l'emploi de titane (à coefficient de frottement élevé) pour réaliser les collets et d'une jonction par cône d'angle faible (4°). Cet ensemble a été conçu pour encaisser les contraintes d'assemblage avec des entretoises relativement épaisses tout en conservant une épaisseur de paroi constante et assez fine dans la zone de contact entre coupelle et entretoise (pour s'affranchir de tout jeu né de déformations de composants dues à toute vibration ou éventuelle surcharge). La procédure d'assemblage inclut aussi un sertissage.

Le dimensionnement de la partie de l'adaptateur en contact avec l'entretoise a permis de répondre au second objectif, afin de préserver son alignement avec la surface inférieure en contact avec le culbuteur (calcul mené sur les diamètres moyens) et présenter une zone fine face à l'entretoise pour permettre certaines déformations généralisées en travail. Des simulations par éléments finis du dimensionnement et des conditions de fonctionnement (interaction entre le culbuteur et la coupelle) ont contribué au dimensionnement et à la vérification de la tenue en fatigue (cyclique) de l'ensemble.

Le culbuteur

L'optimisation du compromis masse/rigidité a été poussée par des simulations par éléments finis en prenant en compte les désalignements tout en minimisant l'inertie sans compromettre la résistance à la flexion (fig. 16, page suivante). Comme illustré précédemment, la tenue en flexion du culbuteur sous les efforts combinés de la came et de la coupelle de soupape contrôle

le fonctionnement des soupapes. C'est de par ses caractéristiques, dont sa masse, que le culbuteur représente le composant le plus important dans les calculs d'inertie de l'ensemble.

La résistance à la torsion a été prise en compte de la même manière avec toutes les déviations possibles des autres organes mécaniques en contact liées au fonctionnement et aux tolérances de fabrication. L'élévation de pression de contact n'a pas excédé 10 %.

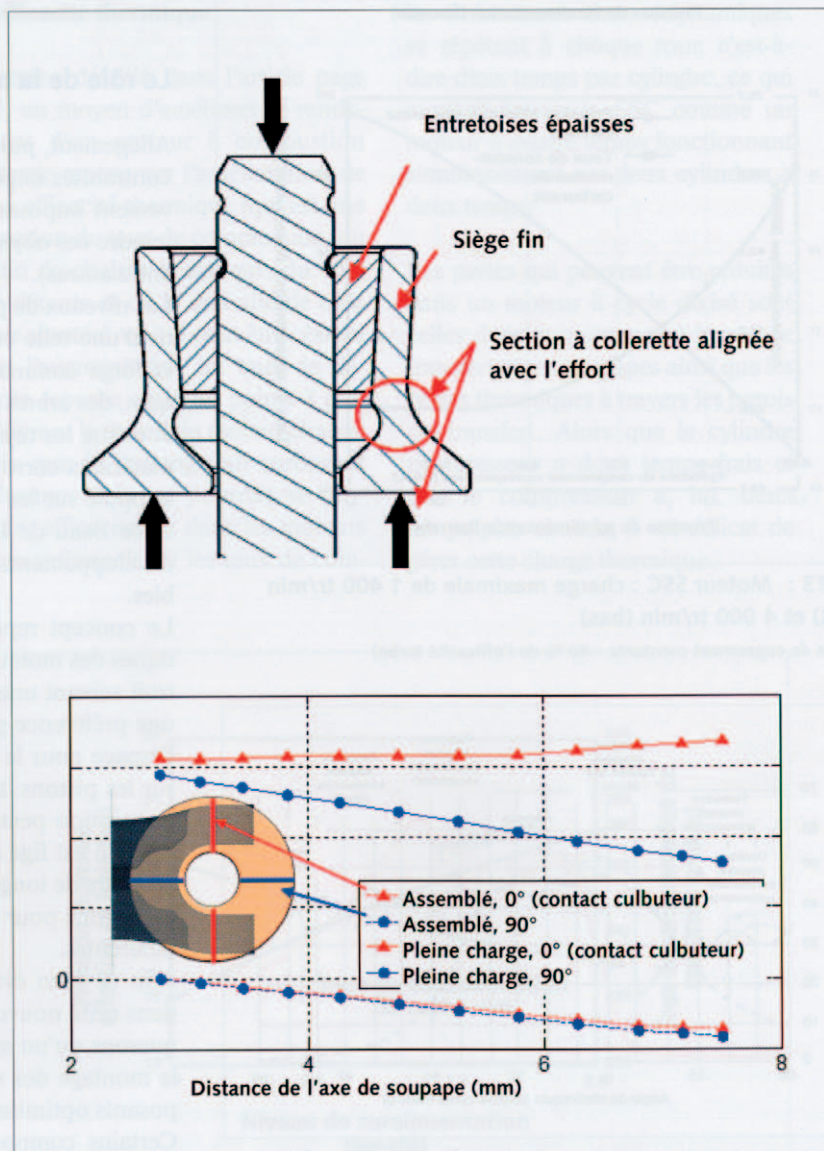


Fig. 15 : Détail de conception du montage de soupape et simulation numérique de cet assemblage. Caractéristique de la coupelle de soupape

Les applications

Chaque type d'appareil possédant un moteur thermique peut évoluer pour accueillir un moteur de type SSC, à une exception près : fonctionnant avec un nombre pair de cylindres, ils ne pourraient pas se substituer aux moteurs monocylindres qui seront aussi moins chers et plus légers (donc plus adaptés aux outils portatifs...).

Les équipements de production d'énergie électrique, la création de mouvement (automobile...), les appareils fixes (bétonnière...) sont des points d'emploi naturels pour ces moteurs. Comme pour bien d'autres évolutions, les moteurs de grandes dimensions porteront sans doute les premiers développements (voir *la forge* n° 32).

Le transfert de technologie

Les constructeurs d'automobiles sont naturellement intéressés par ce concept. L'étendue de ses applications potentielles lui permettra l'accès à de nouveaux marchés. Dans le même temps, ses performances peuvent présenter un intérêt en compétition automobile où une combinaison de couple, de puissance et de consommation de carburant optimale est contenue dans un moteur de cylindrée maximum.

Conclusion

Les composants forgés apportent la réponse technique aux exigences environnementales toujours plus contraignantes : en plus de l'excellent bilan carbone de ses *process* et des possibilités de

downsizing qu'elle autorise, la forge permet aux concepteurs de créer des solutions respectueuses de l'environnement. ■

Fabrice Chevaleyre

Références

- *Ferguson and Kirkpatrick, Internal Combustion Engines, 2nd Ed., John Wiley & Sons New York, 2001* [Les moteurs à combustion interne].
- *Scuderi Split Cycle Research Engine: Overview, Architecture*

and Operation [Le moteur Scuderi à cycle divisé de laboratoire : présentation, architecture et fonctionnement], Ford Phillips, Ian Gilbert, Jean-Pierre Pirault and Marc Megel, Southwest Research Institute, Copyright © 2011 SAE International

- *Scuderi Split Cycle Fast Acting Valvetrain: Architecture and Development*

[Le système de commande des soupapes du moteur Scuderi à cycle divisé : architecture et fonctionnement], Riccardo Meldolesi,

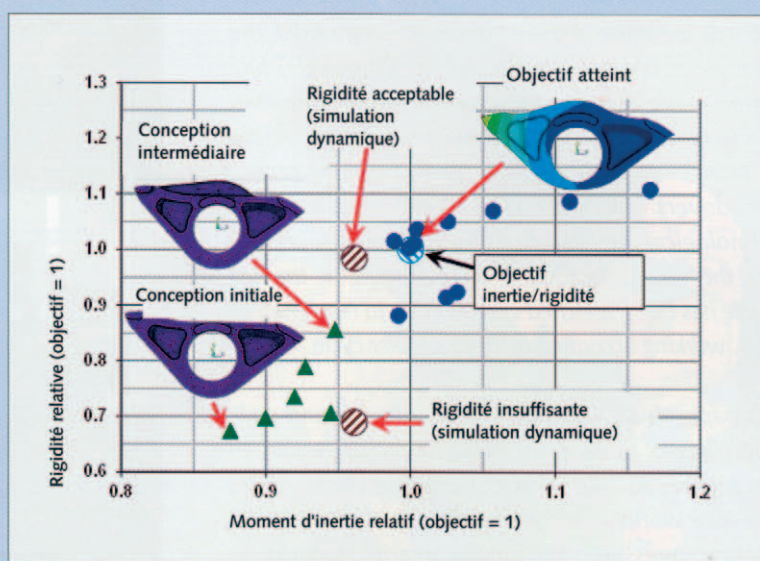


Fig. 16 : Etude et conception finale issue de simulations numériques

George Bailey, Clive Lacy, Ian Gilbert, Jean-Pierre Pirault and Anthony Perkins, Southwest Research Institute

- Cours de thermodynamique dispensés à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de St-Etienne (1^{ère} année 1989-90)
- Documents Scuderi Group, LLC, Inc.

Remerciements

Salvatore Scuderi, CEO de Scuderi Group, LLC Inc. et l'équipe d'encadrement du Groupe
 Stephen Scuderi, Vice-President and Patent Attorney de Scuderi Group, LLC Inc.
 Angela Hepburn, Be-SR SARL Media Relations.

ENGLISH

Scuderi Split Cycle Engine

Thermal 2-stroke and 4-stroke (working under the principle of the Beau de Rochas aka Otto cycle) fuel engines have been used to propel cars for more than a century, imposing these concepts over competing solutions. Fuel savings, pollutant emissions reduction, drivers' and passengers comfort led to major technological developments (ref. la forge n° 45) over the last 2 decades. A new concept of thermal engine has been launched very recently to reach further goals, working according to 1940's Miller cycle.

This paper deals with SSC engine concept and operation based upon a thermodynamic approach of fuel combustion. The 4-stroke are split over 2 cylinders (one working in cool conditions inlet and adiabatic compression, the second bearing the explosion and extended adiabatic expansion), these cylinders being connected by a specific crossover port. The engine can therefore operate upon 5 different ways. Pollutant emissions, notably NOx, can be severely reduced thanks to smaller heat rejection in exhaust gas.

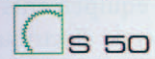
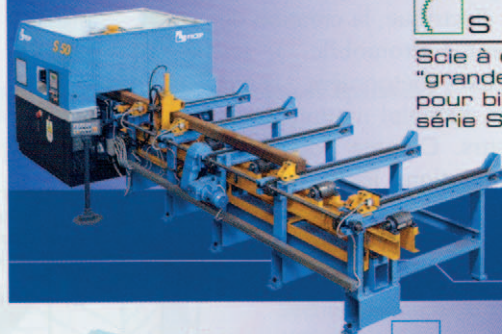
Light weight, performance targets, high power and torque highly stress components in motion imposing the only technology capable of reaching these goals : forge. Besides its excellent process carbon footprint and the possibilities of downsizing it offers, it also enables designers to launch new environment friendly solutions.



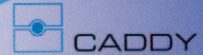
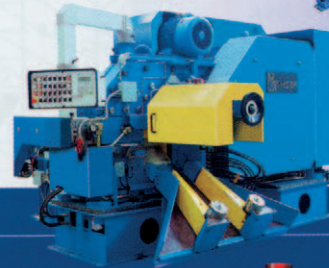
STEEL THINKING



Presses à vis à moteur linéaire rotatif DD



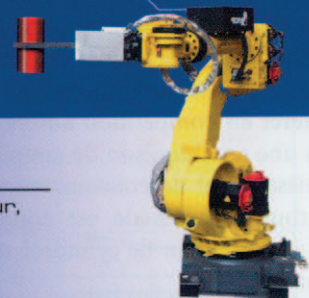
Scie à disque "grande vitesse" pour billettes, série S



Cisaille mécanique à froid pour billettes, série CADDY



Robot manipulateur, série RF



Z.I. "Les Platanes" - B.P. 20
 33360 CAMBLANES - FRANCE
 Tel. +33 (0) 556.20.15.55
 Fax +33 (0) 556.20.15.56
 www.ficep-france.fr
 E-mail: ficep@ficep-france.fr