

LE MOTEUR VCRI DE MCE-5

Une compression intelligente

WILLIAM FOURMENTAL, LUC NADALON^[1]

Les émissions produites par les moteurs représentent environ 1/4 des émissions des gaz à effet de serre. Augmenter le rendement des moteurs à combustion est donc l'un des défis que devront relever les constructeurs automobiles. Voici la solution d'un fabricant, basée sur la variation du taux de compression.

Les moteurs à combustion interne progressent sans cesse par adjonction de nouvelles fonctions visant à améliorer leurs performances ou leur efficacité énergétique : l'injection directe, la suralimentation par turbocompresseur, les filtres à catalyse, etc. Les normes Euro 6 imposent de nouveaux progrès aux moteurs à essence, qui doivent réduire la consommation et les émissions de CO₂, et aux moteurs Diesel, qui doivent réduire leurs émissions de polluants.

Le *downsizing*, réduction de la cylindrée avec maintien des performances, les nouveaux procédés de combustion, l'optimisation des formes de chambre de combustion, des points et systèmes d'injection, les systèmes de posttraitement des gaz sont des voies prometteuses. La société lyonnaise MCE-5 Development (www.mce-5.com) avec son moteur VCRI (*Variable Compression Ratio intelligent*) propose une autre solution, décisive, capable de coopérer avec l'ensemble des technologies actuellement disponibles pour les moteurs à essence : le contrôle du taux de compression.

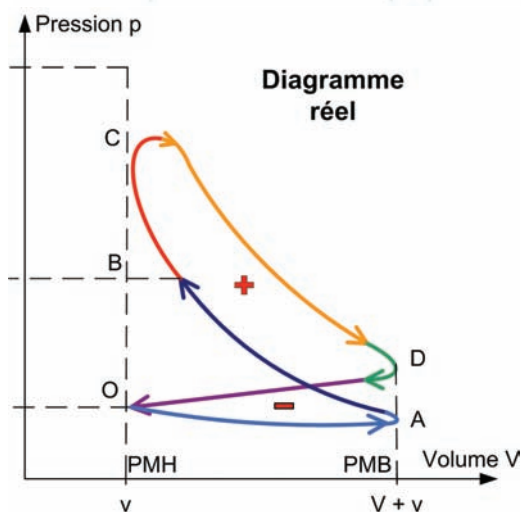
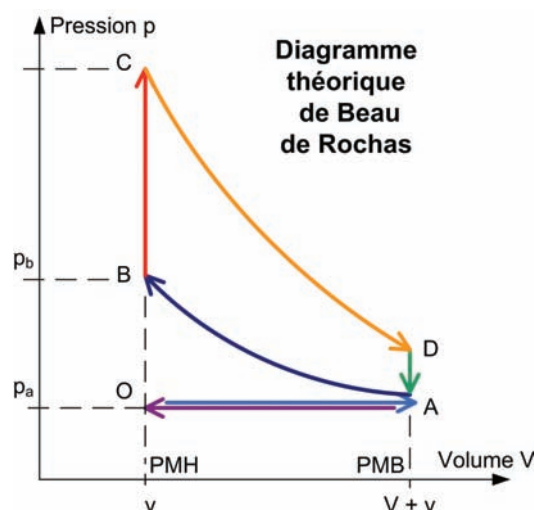
Pourquoi faire varier le taux de compression ?

Lors du cycle de fonctionnement du moteur, le piston se déplace entre deux positions extrêmes : le point mort haut (PMH) et le point mort bas (PMB) (lire les « Rappels sur le fonctionnement d'un moteur thermique à combustion interne » en encadré). Le taux de compression volumétrique (ou rapport volumétrique) correspond au rapport entre le volume $V + v$ de la chambre de combustion quand le piston est au PMB et le volume v de cette même chambre quand il est au PMH.

Le taux de compression résulte d'un calcul fait à partir de ce rapport volumétrique et des lois de comportements des

mots-clés
composants,
semi-conducteurs

Rappels



- T1 — Admission
- T2 — Compression
- T3 { — Combustion
- Détente
- T4 { — Refroidissement
- Echappement

C Le cycle thermodynamique des moteurs à essence à combustion interne

[1] Enseignants, respectivement en génie mécanique au lycée Gustave-Eiffel de Cachan (94) et en sciences industrielles au lycée Le Corbusier d'Aubervilliers (93).

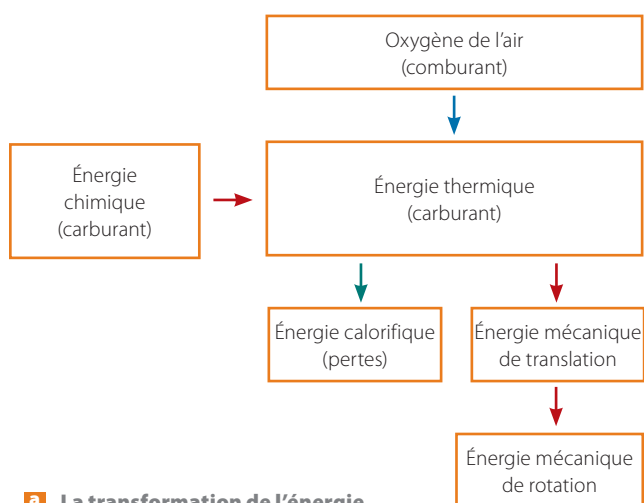
sur le fonctionnement d'un moteur thermique à combustion interne

Un moteur transforme l'énergie d'une source en énergie mécanique. Un moteur thermique reçoit de l'énergie chimique, la transforme en chaleur au cours de la combustion et la restitue sous forme de travail mécanique **a**. Ce dernier est ensuite appliqué aux roues motrices par l'intermédiaire de la transmission. La transformation en chaleur se produisant à l'intérieur même du moteur, celui-ci est appelé moteur thermique à combustion interne.

Le cycle thermodynamique pratique des moteurs d'automobile à combustion interne à allumage commandé à quatre temps peut être représenté de manière approchée par le cycle théorique défini par Beau de Rochas en 1862. Ce cycle est caractérisé par quatre temps liés aux mouvements de translation du piston : admission, compression, combustion-détente et échappement **b**.

Description du diagramme théorique du moteur à 4 temps **c**

- **Lors de l'admission** (OA), la chambre de combustion est ouverte, le piston descend du point mort haut (PMH) au point mort bas (PMB), ce qui augmente le volume de la chambre. Le mélange air + carburant est admis dans la chambre de combustion à une pression constante ; on parle de *transformation isobare* ($p = \text{Cte}$).
- **Lors de la compression** (AB), la chambre est fermée, le piston monte du PMB au PMH, le volume de chambre diminue, la pression et la température augmentent ; on parle de *transformation adiabatique* (loi de Poisson : $p V^\gamma = \text{Cte}$).
- **Lors de l'inflammation et durant la combustion** (BC), la chambre reste fermée, et le piston ne se déplace pas. La transformation de l'énergie contenue dans le carburant provoque une forte augmentation de température et de pression, c'est l'explosion ; on parle de *transformation isochore* ($V = \text{Cte}$).
- **Lors de la détente** du gaz enflammé (CD), le piston se déplace de nouveau vers le PMB, la pression chute selon une nouvelle transformation adiabatique.
- **Lors du quatrième temps, l'échappement**, les gaz brûlés sont évacués du cylindre par la remontée du piston selon une nouvelle transformation isobare (AO). L'aire de la surface ABCD représente le travail mécanique fourni par le cycle moteur.



a La transformation de l'énergie d'un moteur à combustion interne

Les écarts entre le modèle et le réel

Au cours de l'admission, l'augmentation de volume s'accompagne d'une légère chute de température, selon la loi de Gay-Lussac

$$V_A = V_0 [1 - (t / 273)] ,$$

et de pression (c'est la dépression qui permet d'admettre le fluide). De plus, l'entrée des gaz n'est pas instantanée (inertie des gaz, pertes de charge) et le temps d'ouverture de la soupape est trop court, ce qui fait que le remplissage du cylindre est inférieur à V . Il faut ouvrir la soupape plus longtemps.

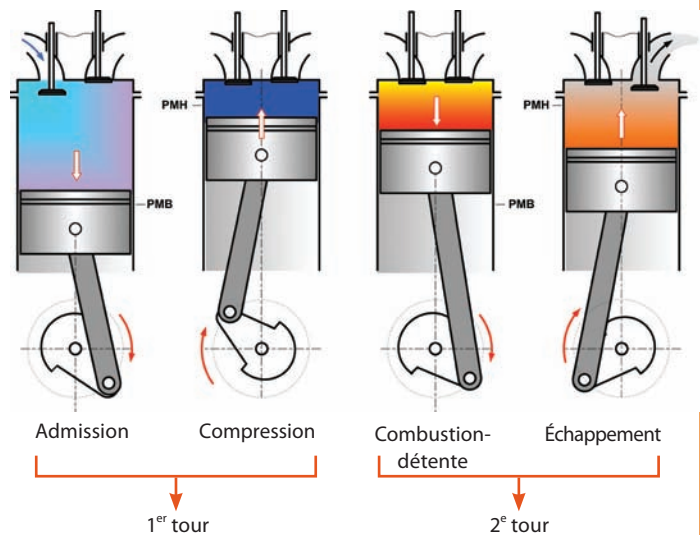
Durant la compression, la température augmente légèrement, selon la loi de Charles :

$$p_C = p_B [1 + (t / 273)] .$$

En raison de l'insuffisant remplissage du cylindre, la pression maximale est inférieure à celle du diagramme théorique.

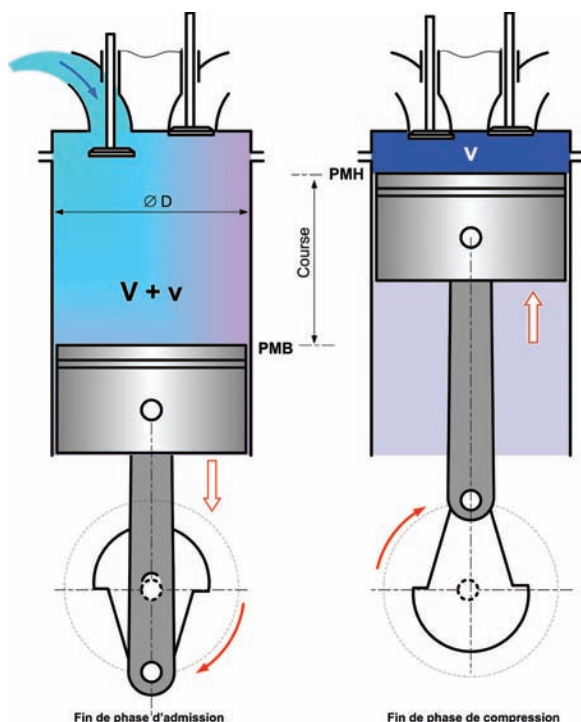
L'inflammation des gaz ne se fait pas à volume constant. Elle n'est pas instantanée (la vitesse de combustion est de 20 à 30 m/s), et, la pression maximale sur la tête du piston devant avoir lieu juste après le PMH, il faut que l'étincelle ait lieu avant le PMH.

La soupape d'échappement ne s'ouvre pas assez longtemps pour évacuer tous les gaz brûlés. La pression résiduelle des gaz brûlés s'oppose à la remontée du piston (CPE, Contre-Pression Échappement), et fournit un travail résistant (négatif). La cinématique du piston conditionne le remplissage du cylindre, mais aussi la turbulence dont la flamme a besoin pour se propager rapidement dans le volume de la chambre de combustion. Le temps passé par le piston au point mort haut détermine le développement de la combustion avant que les gaz ne soient détendus. Celui passé au point mort bas permet de laisser les gaz brûlés sortir du cylindre (échappement) en produisant le minimum de contre-pression (travail négatif indésirable).



b Le cycle à 4 temps

Taux de compression et rapport volumétrique



a Les positions extrêmes du piston

La **course** c est la distance comprise entre le point mort haut (PMH) et le point mort bas (PMB) **a**.

La **cylindrée** V est le volume balayé par les pistons d'un moteur exprimé en centimètres cubes ; c'est le produit de la section de l'alésage du carter cylindre, de la course du piston dans le cylindre et du nombre n de cylindres du moteur :

$$V_i = n \pi (D^2 / 4) c.$$

Le **taux de compression** correspond au rapport des pressions en fin et en début de phase de compression :

$$\epsilon_p = p_B / p_A.$$

Dans le cadre d'une compression adiabatique parfaite, on peut écrire que

$$\epsilon_p = (p_B / p_A)^\gamma = V_A / V_B.$$

Le **rapport volumétrique de compression** peut alors être défini :

$$\epsilon_v = V_A / V_B = (V + v) / v.$$

Le **rendement thermodynamique théorique** η d'un moteur à allumage commandé est le rapport du travail mécanique fourni par le moteur lors de la phase de détente sur le travail thermique reçu lors de la phase de combustion du carburant. On détermine ce rendement par la formule

$$\eta = -W / Q = 1 - (1 / \epsilon_v^{1-\gamma}).$$

La courbe **b** illustre son évolution en fonction du rapport volumétrique.

Si le rapport volumétrique ϵ_v croît, la pression de fin de compression croît et influe sur les performances globales :

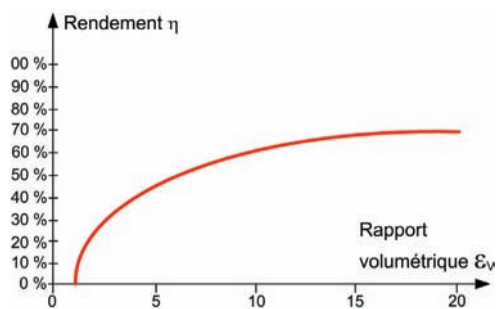
Rapport volumétrique	7:1	9:1
Pression de compression	10 bars	16 bars
Pression de combustion	30 bars	42 bars
Pression à l'ouverture de la soupape d'échappement	4 bars	3 bars
Puissance	/	+ 10 %
Consommation	/	- 10 %

On peut aussi établir la formule du travail produit par le moteur :

$$|W| = \eta Q = [1 - (1 / \epsilon_v^{1-\gamma})] m q.$$

Elle montre que pour augmenter les performances d'un tel moteur on peut jouer sur :

- le rapport volumétrique (objet de cet article) ;
- le coefficient polytropique γ (lui-même fonction de la proportion combustible / carburant appelée richesse r du mélange) ;
- la masse m de mélange air + carburant en améliorant le remplissage de la chambre de combustion ;
- l'énergie spécifique q (J/kg) du carburant.



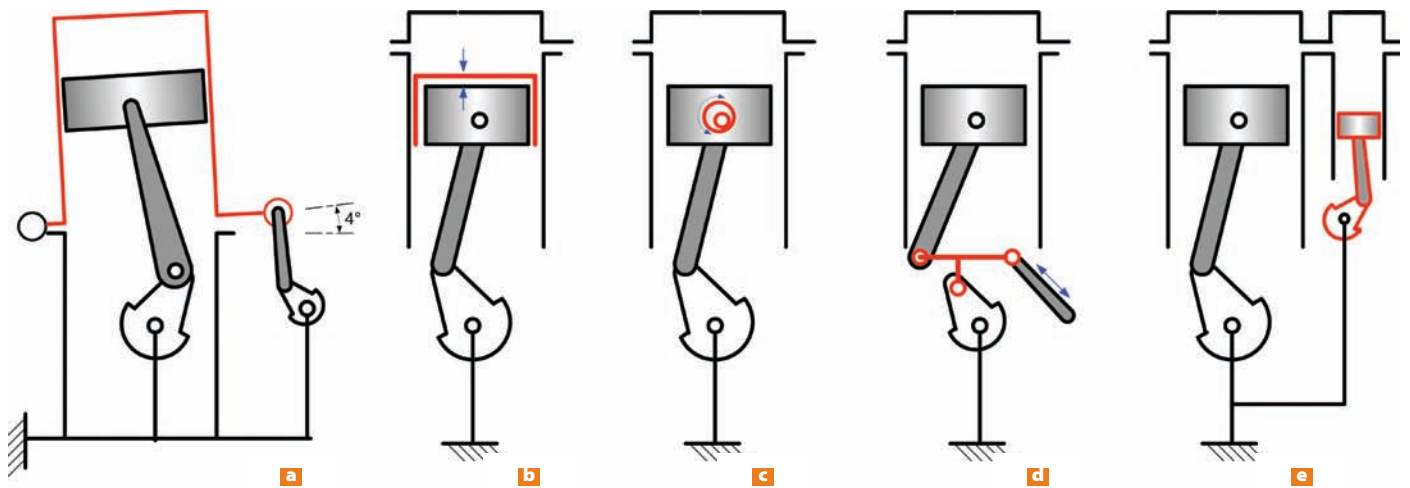
b L'évolution du rendement en fonction du rapport volumétrique

gaz (lire « Taux de compression et rapport volumétrique » en encadré). Il conditionne directement le rendement énergétique, les émissions polluantes et les performances en couple et en puissance des moteurs à combustion interne. Le rendement thermodynamique d'un moteur s'améliore avec l'élévation de son taux de compression : plus forte est la pression du mélange air-essence, plus grande est la force qu'il produit lors de sa détente.

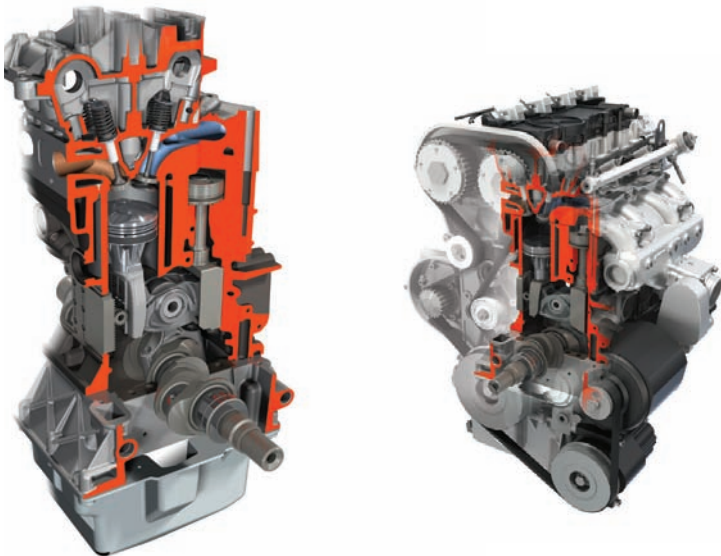
La variabilisation du taux de compression se justifie par la recherche d'un fonctionnement optimal du moteur : schématiquement, la combustion dans les chambres se déroule d'autant mieux qu'elles sont « bien remplies », et il faut que la compression du gaz emprisonné dans le

cylindre apporte suffisamment de chaleur pour préparer l'explosion. Si l'on démarre la compression avec un cylindre rempli à la moitié de sa capacité (cas d'une faible demande de puissance), il faut doubler le taux de compression pour se retrouver dans des conditions optimales de combustion en fin de compression.

Sur un moteur « standard », le volume est déterminé pour un bon fonctionnement à pleine charge (de manière à éviter le cliquetis) ; ce volume est fixe. Or, la très grande majorité des conducteurs utilisent leur moteur à environ 40 % de sa puissance sur autoroute et 15 % en ville (cas de véhicules de milieu de gamme). La chambre de combustion du moteur à taux fixe ne présente donc pas



1 Différentes façons de faire varier le rapport volumétrique



2 Le bloc VCRi intégré dans un moteur PSA

des conditions optimales d'utilisation. Variabiliser le taux permet de fonctionner avec une chambre « bien remplie » dans toutes les conditions d'utilisation, pour un gain de consommation de carburant pouvant aller jusqu'à 30 % à puissance égale. Ces meilleures conditions de combustion permettent de réduire les émissions de polluants.

Près de 750 brevets de concepts de moteurs à compression variable existent. La plupart ont été déposés par des particuliers, et seuls quelques-uns ont passé le cap de l'application industrielle. Parmi ceux-ci, il est possible de dégager de grands principes de variation : l'articulation entre le haut et le bas moteur (Saab SVC et Hara) **1a**, la variation de la hauteur du piston (Bicera, Ford) **1b**, l'utilisation d'une excentrique sur une articulation de la bielle (FEV, Audi, Gomecsys) **1c**, l'ajout de levier (PSA, Nissan) **1d**, l'ajout d'un autre piston faisant varier le volume de la chambre de combustion au sein de la culasse (PSA Froumajou, Volvo-Alvar) **1e**, et enfin celui de MCE-5 **2** : la modification de la cinématique bielle-manivelle.

Le moteur VCRi

La solution développée pour le VCRi rompt avec l'architecture classique des moteurs de ce type **3**. La liaison pivot située habituellement entre le piston et la bielle est supprimée. Le piston est monté en liaison encastrement avec une crémaillère (lire « Les procédés d'obtention de la crémaillère de piston » en encadré), et l'ensemble est entraîné par une roue de transmission **4** en liaison avec la bielle, qui plaque la crémaillère contre un galet denté qui roule sur une piste du carter et dans le même temps engrène sur une crémaillère réalisée dans ce dernier. Cela permet d'assurer le guidage de piston et de lui conférer un déplacement rigoureusement rectiligne selon l'axe du cylindre.

La variation du rapport volumétrique

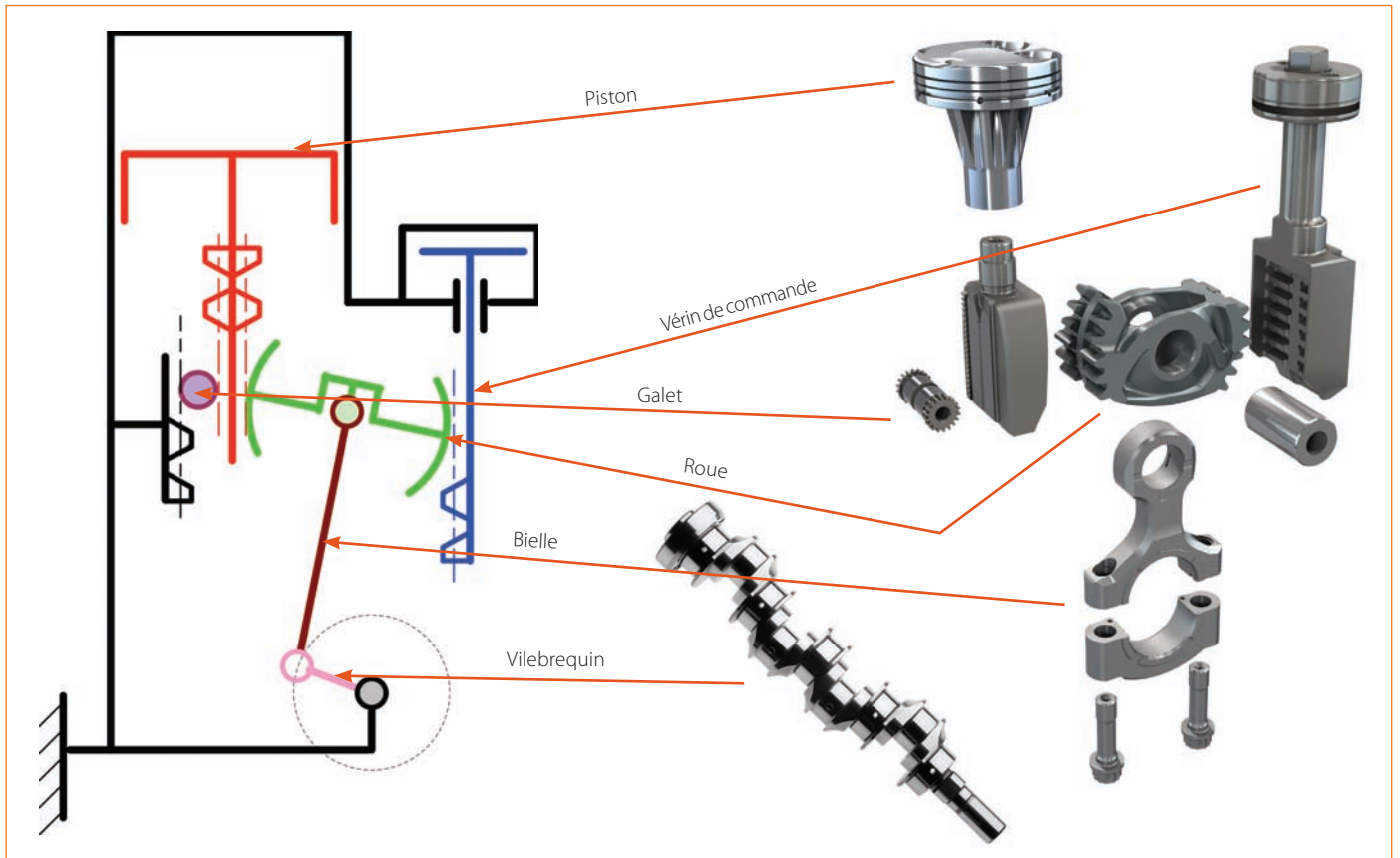
Le moteur VCRi permet d'obtenir des rapports volumétriques variables. C'est rendu possible par un pilotage de l'inclinaison de la roue grâce à un vérin de commande à crémaillère **5**. En sortant, le levier appuie sur la crémaillère et provoque la montée du piston. Le volume de la chambre est ainsi réduit, et le taux de compression augmente, sans pour autant changer la cinématique du piston, assurée par le système bielle-manivelle.

La géométrie est telle qu'avec 10,8 mm de course utile du vérin de commande le taux de compression varie de 6:1 à 15:1. L'étendue de la plage de variation sert à haut ou bas régime (fréquence de rotation) sous une faible ou forte charge (demande d'accélération).

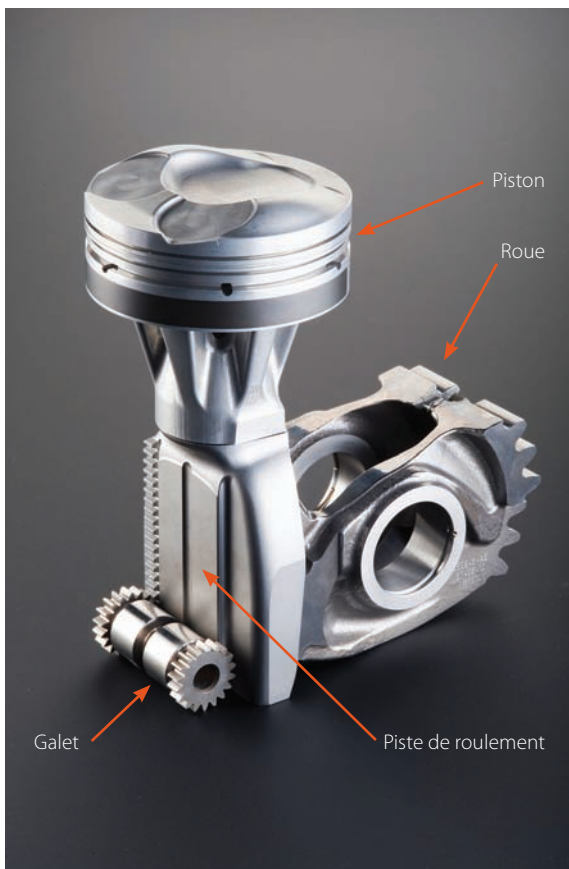
La commande de variation du rapport volumétrique

La recherche d'optimisation du rapport volumétrique pour une fréquence de rotation (régime moteur) et une charge données passe par l'acquisition et la gestion des informations.

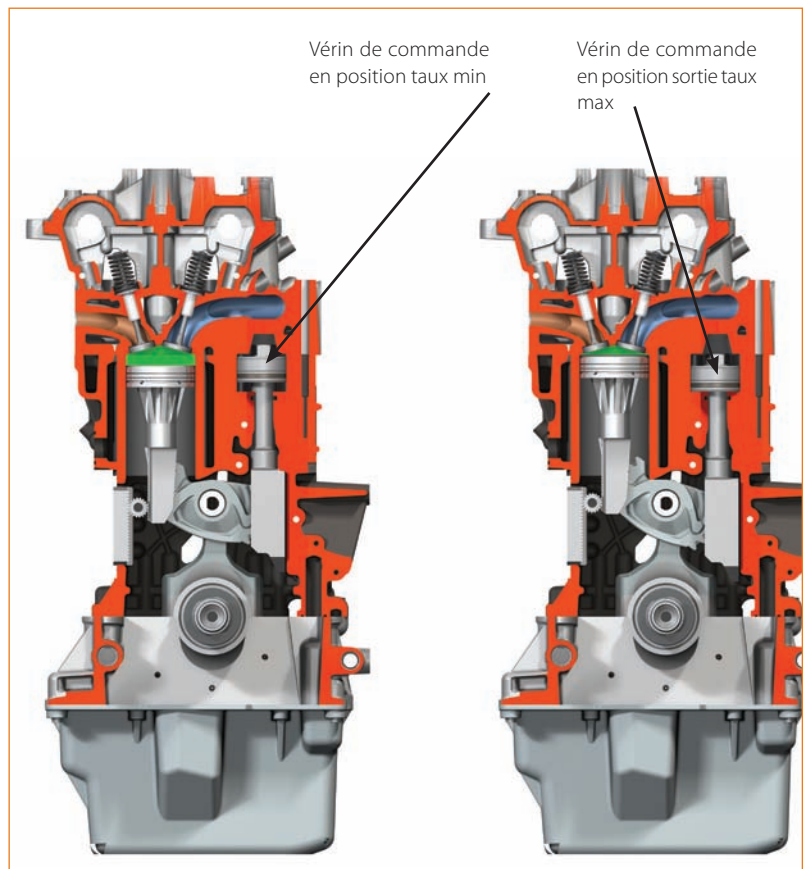
Le cas le plus exigeant correspond à une accélération maximale partant d'un véhicule à l'arrêt (insertion dans une circulation rapide ou course en départ arrêté). Pour obtenir le plein couple avec pression de suralimentation



3 Le schéma de principe du moteur



4 L'ensemble piston - levier de transmission - roue



5 La variation du rapport volumétrique (6:1 à gauche, 15:1 à droite)

Les procédés d'obtention de la crémaillère de piston

Le moteur VCRI est constitué de composants standard, tels que la pompe à huile, l'alternateur, de pièces adaptées mais bien maîtrisées par les fabricants d'automobiles, comme la bielle, le vilebrequin, la culasse ou le bloc-moteur, et d'autres pièces spécifiques à la technologie du moteur qui ont dû être entièrement conçues par la société MCE-5. C'est le cas de la crémaillère de piston, pour laquelle les temps d'étude, de développement et de conception du processus de fabrication ont été particulièrement importants. Les premiers prototypes de cette pièce étaient réalisés par électroérosion en 24 heures. Cette durée n'étant évidemment pas compatible avec une réalisation industrielle en grande série, un nouveau processus en 6 étapes de fabrication a dû être mis au point **a** :

● **Forgeage** *near net shape* (au plus près de la forme finie) en 3 phases **b** : ébauche, forgeage et calibration à froid. Ce procédé permet d'accroître la résistance à la fatigue, par fibrage du matériau. Il aura fallu l'usage de logiciels d'optimisation de forme (OptiStruct) et de simulation de forge et pas moins de quatre ans de codéveloppement avec la société Safe Near Net (ex-Safe Automotive) pour obtenir les bonnes caractéristiques mécaniques, les formes

des pièces de frappe et un allègement de la pièce suffisant (passée de 550 g à 400 g), et garantir la faisabilité en grandes séries.

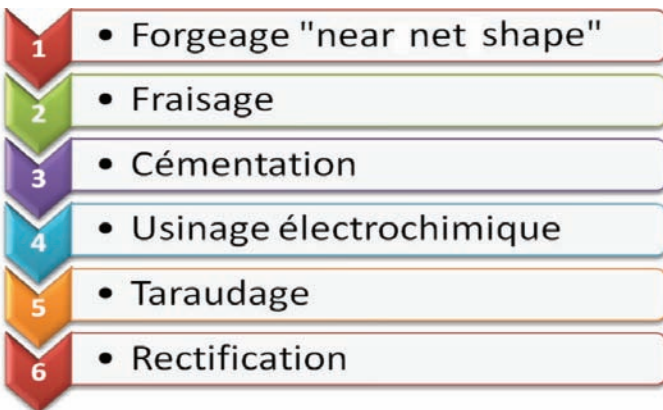
● **Fraisage** en ébauche sur centre d'usinage 5 axes pour l'obtention du dessus de la denture, de la face d'appui du tube de liaison au piston et de la piste de roulement du côté opposé à la denture **c**

● **Cémentation** basse pression avec trempe au gaz, par la société Bodycote. Ce traitement permet d'accroître la dureté du matériau en surface tout en conservant ses propriétés de résilience.

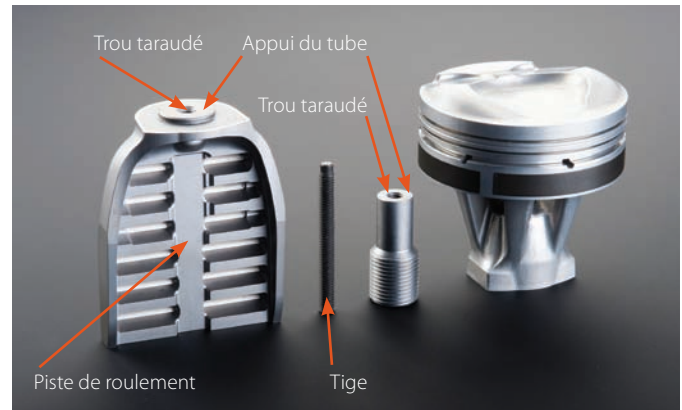
● **Usinage électrochimique** (ECM) pour la finition de la denture par la société PEMTec **d**. Ce procédé d'usinage utilise le principe de la dissolution anodique de la pièce à usiner, le tout dans un milieu électroconducteur. La technologie ECM permet de réaliser une érosion importante de matière sans usure de l'électrode-outil avec une excellente répétabilité. Avec ce procédé, la forme de la denture, forgée à 1/10 de la forme finale, est finie en environ 1 minute avec une précision de l'ordre de quelques microns !

● **Taraudage** du trou permettant le logement de la tige filetée **c**

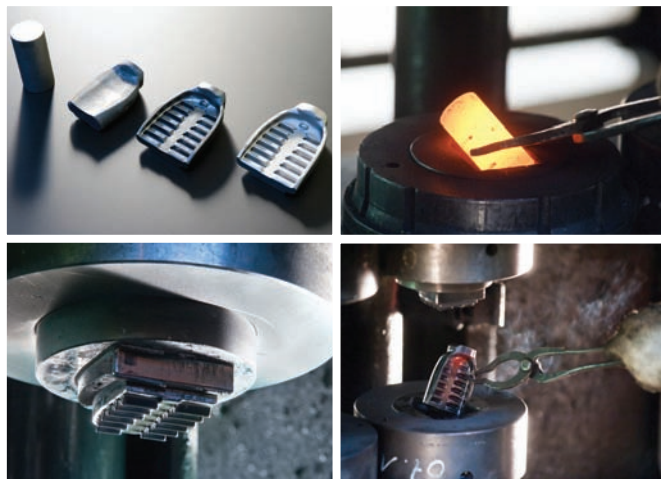
● **Rectification** des pistes de roulement du rouleau de synchronisation



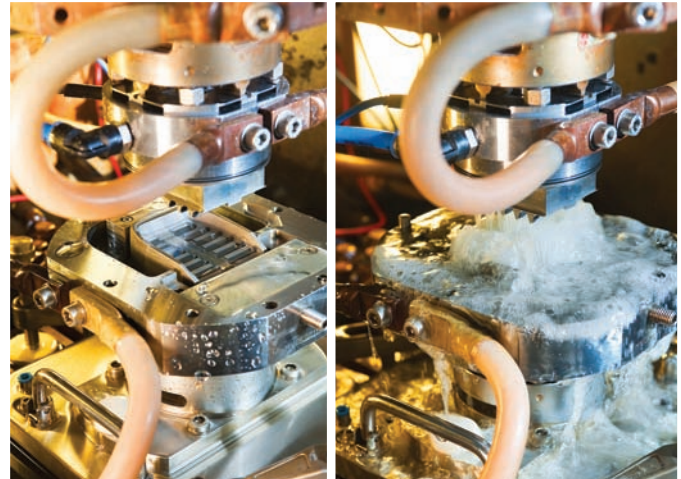
a Le processus de fabrication de la crémaillère de piston



c Les surfaces usinées



b Le forgeage *near net shape*



d L'usinage électrochimique

maximale depuis le régime de ralenti, le taux de compression doit rapidement passer de 15:1 à 6:1. Ce délai est d'environ 100 ms.

L'acquisition des données de commande

Chez un garagiste, la mesure du taux de compression se fait en démontant les bougies et en utilisant un

compressiomètre. Ce diagnostic de l'état de santé du moteur se fait à l'arrêt et demande environ cinq révolutions. Pour effectuer cette mesure en temps réel, on utilise un ensemble de capteurs à effet Hall **e** permettant de déterminer le régime moteur et la position exacte du piston. Cette dernière résulte de la position de la crémaillère de commande, mesurée à $\pm 0,02$ mm par



6 Le capteur à effet Hall détectant la position du vérin de commande

un capteur de position qui détecte son bord inférieur, et de la détermination de l'altitude finale du piston de combustion au PMH, qui est fonction de l'angle de vilebrequin et des dimensions des pièces.

Le rapport volumétrique en cours peut être obtenu, selon les lois de la thermodynamique, par la mesure de la pression régnant dans la chambre de combustion (lire « Taux de compression et rapport volumétrique » en encadré). Cette mesure peut être effectuée au moyen d'un capteur piézométrique ou à quartz.

Le pilotage du vérin de commande

L'organe de commande se compose d'un étage électromécanique de commande et d'un étage hydraulique de puissance **7**. Le pilotage est sous le contrôle du calculateur central de gestion du moteur VCRI, l'EMS (*Engine Management System*). Un bus rapide assure la liaison avec des cartes contrôleurs spécifiques à chaque cylindre.

L'étage hydraulique, dont le piston de commande fait partie, fonctionne avec l'huile utilisée pour lubrifier le moteur. Cette huile est prépressurisée entre 40 et 60 bars par une micropompe électrique et stockée dans un petit accumulateur de pression situé dans le carter du moteur. On évite ainsi les phénomènes de cavitation dans les chambres de vérin, et on dispose en permanence d'une assistance très utile lors de l'augmentation du taux de compression.

Le dispositif électromécanique comporte deux billes **8** qui peuvent être levées de leur siège par des tiges-poussoirs à vis mues par des engrenages entraînés par un moteur électrique *brushless*. En appui sur leur siège, les billes jouent le rôle de clapets antiretour et verrouillent en position le vérin de commande ; soulevées,

elles se comportent comme une vanne et autorisent son déplacement.

Aucun apport de puissance externe n'est nécessaire pour déplacer le vérin de commande. Au cours d'un cycle, la crémaillère de commande est soumise à l'action du levier denté avec un effort variable en sens et en intensité. Lorsqu'on souhaite modifier le taux de compression, il suffit d'attendre que l'effort du levier sur la crémaillère soit orienté dans le sens du déplacement voulu **9**. On commande alors la levée d'une des billes de l'électrovanne, ce qui libère le vérin de commande et lui permet de se déplacer dans le sens souhaité jusqu'à ce que la consigne de taux de compression soit atteinte.

Le vérin se comporte donc comme un cliquet hydraulique grâce à la fonction antiretour des billes. Ce dispositif est de type « proportionnel », les billes pouvant être levées de leur siège de n'importe quelle valeur comprise entre 0 et 1 mm, et ce, grâce à trois cibles à effet Hall qui délivrent trois tops par tour du moteur *brushless*.

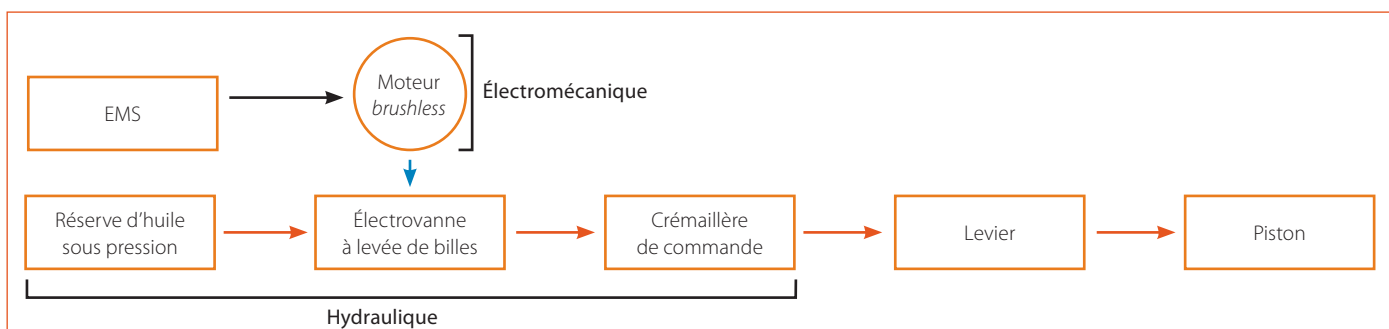
D'autres versions du dispositif sont à l'étude avec des ventouses électromagnétiques ; la solution retenue sera celle qui apportera le meilleur compromis entre coût et efficacité, à robustesse équivalente.

Les avantages techniques du moteur

Les différents concepts VCRI permettent d'obtenir une variation. L'appréciation va donc porter sur d'autres critères tels que la plage de variation possible, la précision de la mesure et du contrôle, la capacité à piloter chaque cylindre indépendamment et la dispersion associée, la rapidité de réaction aux changements imposés par la conduite, la possibilité de réduction des frottements, mais aussi leur capacité à être assemblés selon un processus industriel.

Actuellement, les véhicules multicarburants, dits flex-fuel, ont un rendement moins élevé que ceux des véhicules à carburant unique, car le taux de compression choisi est un compromis entre les taux de compression optimaux des carburants utilisés. Le taux de compression variable continuellement permet de s'adapter aux différents types de carburant quel qu'en soit l'indice d'octane, et ce, sans baisse de rendement.

Dans une architecture conventionnelle, l'équipage mobile composé du piston, des segments et de la bielle génère entre 40 et 60 % des pertes par frottement. Dans



7 L'organe de commande

la solution retenue, le piston ne reçoit que la poussée des gaz, et c'est la piste de roulement du galet **10** qui encaisse l'effort latéral. Cet effort provient du contact avec le levier et à pour origine l'orientation changeante de la bielle. En supprimant les efforts radiaux sur le piston, il a été possible de réduire les effets dus aux frottements et de raccourcir la hauteur du piston (la jupe).

Les prototypes actuels de VCRI associent un rapport alésage/course faible (course longue) qui favorise le remplissage du cylindre à bas régimes, avec un rapport bielle/manivelle élevé (bielle longue) qui favorise le remplissage à régimes élevés. La vitesse de piston suffisante au voisinage du point mort haut permet d'obtenir une turbulence du mélange. Allié à l'élévation de température en phase de compression, cela accélère la combustion et la rend plus complète, réduit, avec l'avance à l'allumage, la sensibilité aux cliquetis du moteur, les pertes thermiques aux parois, et augmente la détente des gaz brûlés. Bilan, un rendement nettement meilleur.

Les limites à la compression

La valeur maximale du taux de compression est limitée pour deux raisons principales.

L'apparition des phénomènes d'autoallumage spontané du mélange air-essence (détonation et cliquetis) aux environs de 400 °C en est la première. Dans un moteur conventionnel, à plein régime ou à pleine charge, on limite le rapport volumétrique à 12 afin de ne pas dépasser le seuil. Pour augmenter encore le taux, il est alors nécessaire de mieux gérer la qualité du mélange à bas régime, et la propagation de la combustion à haut régime.

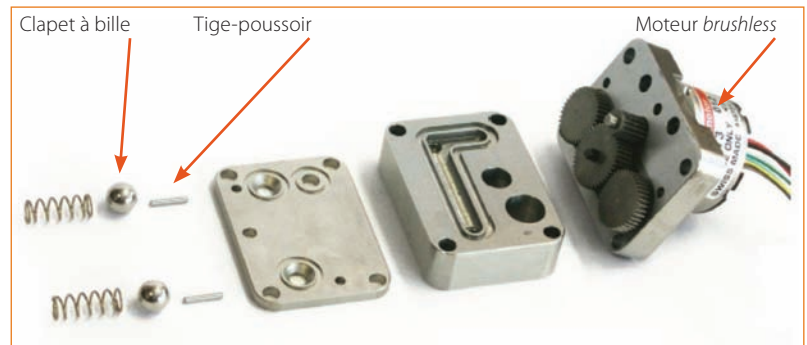
L'autre raison est la perte d'efficacité globale du fonctionnement du moteur. En effet, utiliser un taux de compression supérieur à 17:1 améliore le cycle thermodynamique mais diminue plus vite l'efficacité mécanique.

Une voie d'avenir

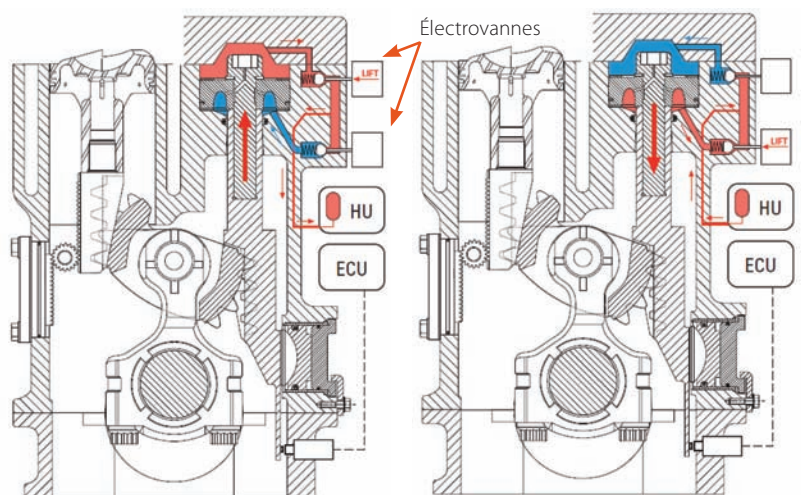
Réduire la cylindrée (*downsizing*) et le régime moyen des moteurs (*downspeeding*) pour réduire la consommation de carburant des véhicules, voilà les maîtres mots de l'industrie automobile. En ce sens, le moteur VCRI représente une avancée technologique considérable, qui permet d'atteindre un couple et une puissance spécifiques très élevés avec des consommations spécifiques réduites de 20 à 30 % selon les cylindrées.

La société MCE-5 a pour but de développer une technologie compatible avec les impératifs de la production en grande série. Ses programmes de R&D ont été soutenus par l'État français à hauteur de 10 millions d'euros sur les 30 investis (Ademe, Predit, Régions, etc.) et pour le reste par des investisseurs privés (400 actionnaires).

Une production en grande série conforme aux nouvelles réglementations environnementales pourra être lancée dès 2016-2017, pour des véhicules coûtant en production selon les cylindrées de 500 à 1 500 euros moins cher. ■



8 Les électrovannes à levée de billes



9 Le pilotage de la crémaillère de commande (basse pression en bleu, haute pression en rouge)



10 Les pistes de roulements de l'équipage mobile

Remerciements

Nous tenons à remercier Philippe Dury et Sylvain Bigot de la société MCE-5 pour leur collaboration.