

Moteurs à taux de compression variable.

Adrian CLENCI, Pierre PODEVIN

adi.clenci@upit.ro, podevin@cnam.fr

Université de Pitesti, Roumanie

Conservatoire National des Arts et Métiers Paris, France

INTRODUCTION

Une des particularités essentielle du moteur d'automobile est sa grande plage de fonctionnement en terme de régimes et de charges. La pleine charge "*pied au plancher*" est rare, l'utilisation du moteur s'effectue principalement en charges partielles. Le rendement maximum du moteur à allumage commandé qui est d'environ 30%, ne dépasse pas 10 à 15% aux faibles charges partielles. C'est ce dernier cas qui est principalement rencontré, 80 à 90 % du temps, en utilisation urbaine du véhicule.

Pour pallier ce déficit, il faut chercher les solutions constructives qui permettent d'obtenir dans cet intervalle de fonctionnement une augmentation significative du rendement. L'une d'elles consiste en une variation du rapport volumétrique de compression par la variation du volume de la chambre de combustion.

1 - INTERET DU RAPPORT VOLUMETRIQUE DE COMPRESSION VARIABLE

En général, dans le cas du moteur à allumage commandé, le contrôle quantitatif de la charge moteur pour un régime de rotation donné, est effectué par le réglage de la masse d'air admise par le papillon des gaz qui joue le rôle d'une vanne. Le moteur fonctionne à richesse quasiment constante. Du fait de ce vannage, la pression réelle de fin de compression diminue, d'autant plus que la pression d'admission est faible et pénalise le bon déroulement de la combustion. De plus, le rapport réel de compression, rapport entre les pressions mesurées à la fin et au début de la compression est variable. C'est l'inconvénient principal du moteur à allumage commandé : *un rapport réel de compression variable* [1, 2, 3].

Dans le cas d'une compression adiabatique réversible (isentropique) le rapport volumétrique de

compression est $\varepsilon_v = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)_{is}^{\frac{1}{\gamma}} = \frac{V_1}{V_2}$. Pour des raisons pratiques, le rapport réel de compression peut-être

exprimé sous la forme d'un rapport volumétrique de compression, ε_p en utilisant la relation suivante:

$\varepsilon_p = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)_{réel}^{\frac{1}{\gamma}}$. Une étude approfondie, proposée par Porsche [4], montre que ce rapport est fonction, bien

entendu, du rapport volumétrique de compression mais aussi de la charge, du régime moteur et des paramètres de distribution. Figure 1, est représentée l'évolution du rapport ε_p pour deux valeurs du rapport volumétrique de compression ($\varepsilon_v = 8,5$ et $\varepsilon_v = 12,5$)

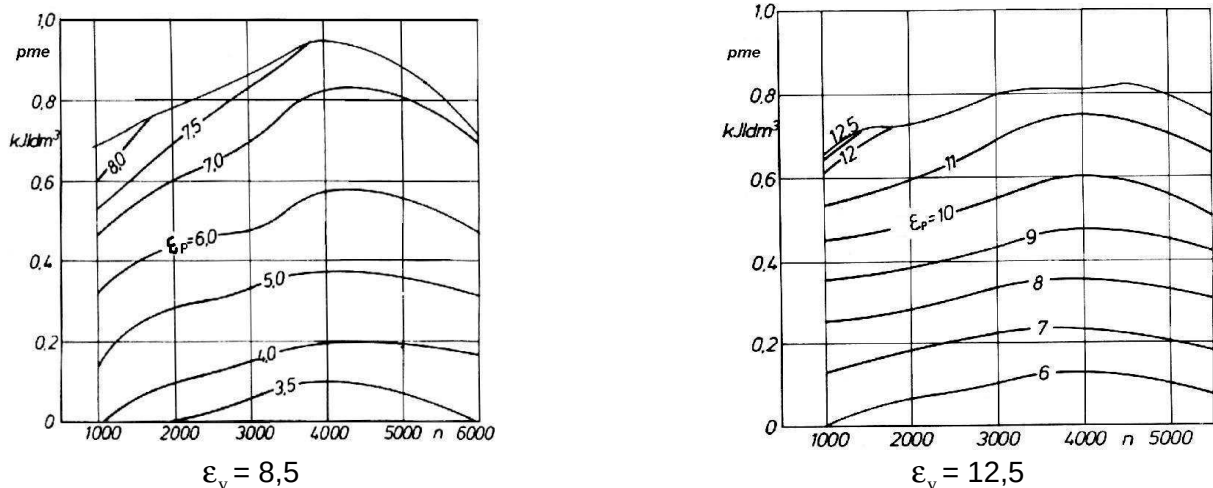


Fig. 1 - Cartographie du rapport réel de compression

Dans le premier cas ($\varepsilon_v = 8,5$), aux faibles charges partielles, le rapport réel de compression se situe entre 3,5 et 5. Par contre, dans le deuxième cas ($\varepsilon_v = 12,5$), les valeurs du rapport réel de compression sont toujours plus élevées, ce qui va déterminer la diminution de la consommation sur cet intervalle de fonctionnement.

Ces résultats montrent l'intérêt de l'augmentation du rapport volumétrique de compression pour obtenir un accroissement du rapport réel de compression quand la charge du moteur diminue. Par ailleurs, il est constaté que lorsque la charge baisse, le risque de cliquetis diminue. En fait, sous 50 à 60% de la pleine charge, ce risque disparaît complètement.

Ainsi, la valeur minimum du rapport volumétrique de compression ε_v peut être établie à la pleine charge, à la limite de cliquetis et la valeur maximum, au ralenti, de façon à avoir une augmentation nette du rapport réel de compression ε_p .

2 - MOTEURS A TAUX DE COMPRESSION VARIABLE

Si l'intérêt pour la compression variable est tout à fait facile à comprendre et à accepter, il en est tout autrement pour la réalisation pratique qui est avant tout un défi d'ordre technologique.

Les solutions mécaniques qui permettent la variation automatique et continue du rapport volumétrique de compression sont nombreuses mais présentent toutes des avantages et des inconvénients.

Toutefois dans le contexte d'un débouché rapide sur le marché certains paramètres constructifs conditionne l'avènement du moteur à taux de compression variable que nous pouvons définir par le cahier des charges suivant :

- Pièces conventionnelles (conservation des acquis en matière de techniques de fabrication, dimensionnement mécaniques, caractéristiques de matériaux, fiabilité...)
- Chambre de combustion, cinématique du mécanisme moteur qui ont fait l'objet d'un siècle de mise au point
- Réponse dynamique du moteur (les systèmes de pilotage trop lent ne sont pas acceptables, surtout pour les systèmes fortement suralimentés)
- Rigidité, encombrement, poids
- Rapport coût/performances : c'est certainement un des paramètres les plus importants qui a été jusqu'à aujourd'hui le principal frein à la réalisation de moteurs à rapport volumétrique de compression variable.

Quelques exemples de solutions constructives sont présentés ci-après.

2 - 1 Moteurs articulés

La première méthode peut être réalisée par un déplacement relatif du haut moteur par rapport au bas moteur. Un déplacement axial étant difficile à réaliser, une solution consiste à basculer le haut moteur par rapport à sa partie inférieure qui reste fixe. Le nom de "moteur articulé" est donné à cette solution, [1, 2].

Saab a réalisé plusieurs prototypes exploitant ce principe, nommés SVC (Saab Variable Compression), figure 2, [5, 6].



Fig. 2 - Le moteur articulé SVC

Le rapport volumétrique de compression peut varier entre 8 et 14 pour une inclinaison de la partie supérieure de 4 degrés. Le basculement de la partie supérieure, commandé par un actionneur hydraulique,

est assuré par un arbre excentré et des biellettes. Ce système est contrôlé par un ordinateur en fonction de la charge, du régime et de l'indice d'octane du carburant.

Une autre solution, étudiée et développée par le professeur Hara et ses collègues dès 1980, chez le constructeur Roumain d'automobile DACIA, est représentée sur la figure 3, [1, 7, 8]. Une des particularités remarquables de ce moteur articulé réside dans le fait qu'il possède un système intrinsèque d'autorégulation du rapport volumétrique de compression. C'est à dire que la pression moyenne de gaz à l'intérieur des cylindres donne exactement la force d'exécution nécessaire au système de réglage.

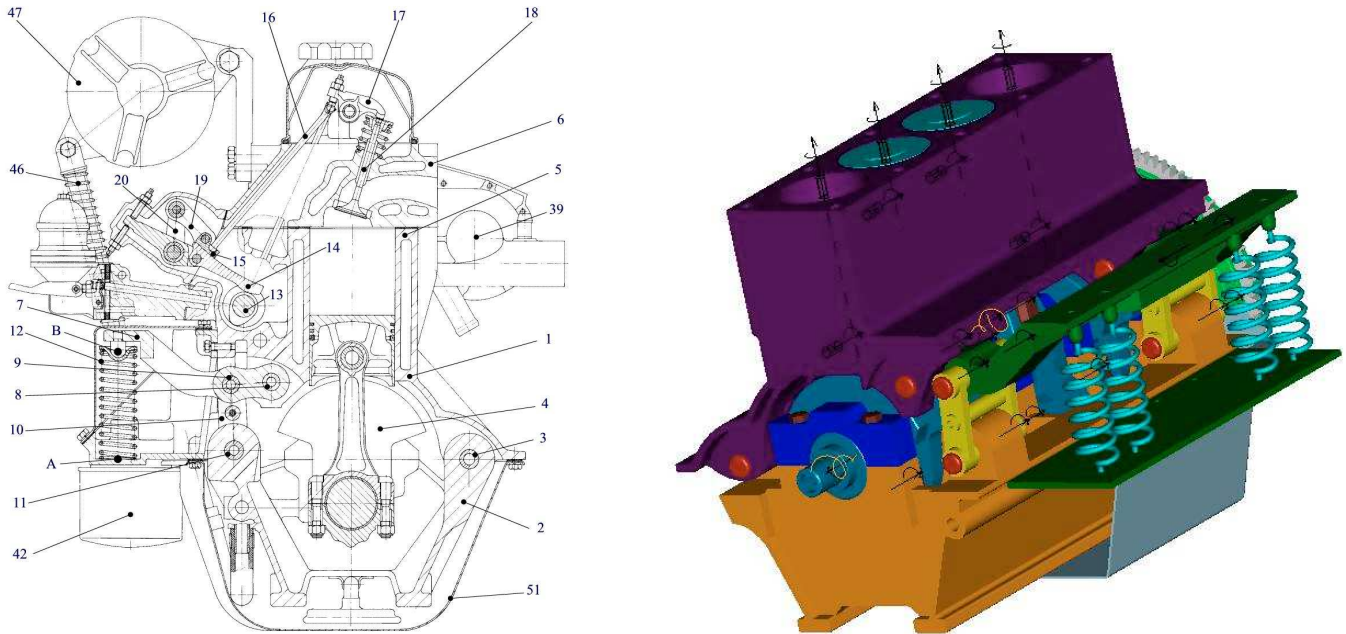


Fig. 3 - Le moteur articulé Hara

Ce moteur, comme le moteur SVC, est constitué de deux parties: un bloc supérieur 1 et un bloc inférieur 2. Ceux-ci sont articulés au niveau d'une axe 3. Le bloc inférieur 2 est fixe et il soutient la totalité du moteur ainsi que le vilebrequin. Quand la charge du moteur croît, la pression moyenne effective augmente et entraîne le basculement du bloc supérieur, provoquant ainsi une diminution du rapport volumétrique de compression. Une variation de 12,5 (ralenti) à 8,5 (pleine charge et couple maximum) est obtenue par une rotation de seulement 2 degrés.

En ce qui concerne l'étanchéité, celle-ci est assurée par un joint de type toroïdal sur le moteur Hara et un joint à soufflet sur le moteur Saab.

Les inconvénients de ce type de moteurs, par rapport aux moteurs classiques, sont une rigidité plus faible, du fait de la séparation des blocs et un problème de raccordement des accessoires (notamment la ligne d'échappement) avec le haut moteur qui est mobile. Le grand avantage est de n'entraîner aucune modification de la culasse, de la chambre de combustion, de l'attelage mobile classique.

2 - 2 Variation du volume de la chambre de combustion au sein de la culasse

Cette solution, a priori simple, est obtenue par le déplacement d'un piston au sein de la culasse. Dans les solutions représentées figures 4 et 5, le piston reçoit aussi la bougie d'allumage, ce qui permet de conserver le confinement de la combustion au niveau de la bougie.

Le concept Alvar-Volvo, figure 6, [12,13], fait appel à un piston auxiliaire logé dans la culasse. Il est entraîné par un système bielle vilebrequin tournant à la moitié du régime moteur.

Le réglage du rapport volumétrique de compression est contrôlé par le déphasage angulaire des vilebrequins ce qui permet d'avoir la variation voulue du volume de la chambre de combustion.

Outre la complexité de ce dernier système et les pertes mécaniques supplémentaires que celui-ci engendre, le principal reproche que l'on peut faire à ces systèmes est de perturber l'aérodynamique interne du moteur ainsi que l'aménagement de la culasse qui aujourd'hui est dotée de 3 ou 4 soupapes, parfois de 2 bougies voire d'une injection directe d'essence.

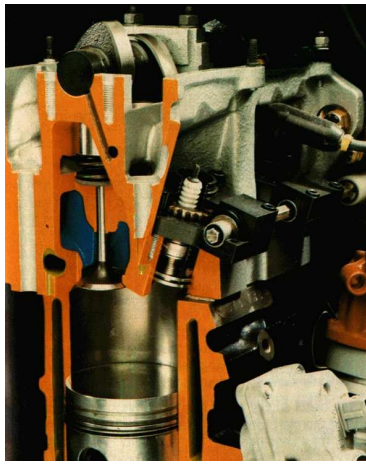


Fig. 4 - VW

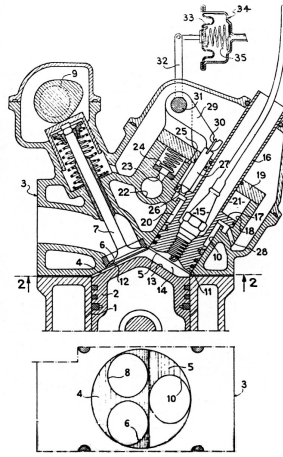


Fig. 5 - PSA (Froumajou)



Fig. 6 - Alvar-Volvo

2 - 3 Variation de la hauteur du piston

La 3ème voie de contrôle du rapport volumétrique de compression est celle de la variation de la hauteur du piston. Cette solution implique une augmentation de la masse de celui-ci et donc des pertes par frottement supplémentaires et surtout une augmentation des efforts d'inertie [1,13].

Sur le moteur BICERA, figure 7, la hauteur du piston est pilotée par un système hydraulique.

Ford, figure 8, propose une autre solution avec un piston équipé d'un ressort de type rondelle Belleville.

Dans les deux cas la hauteur du piston s'autorégule. Ces systèmes permettent surtout de s'opposer à des surpressions pendant la combustion et d'éviter le cliquetis.

Ils ne correspondent pas à une véritable régulation du rapport volumétrique de compression.

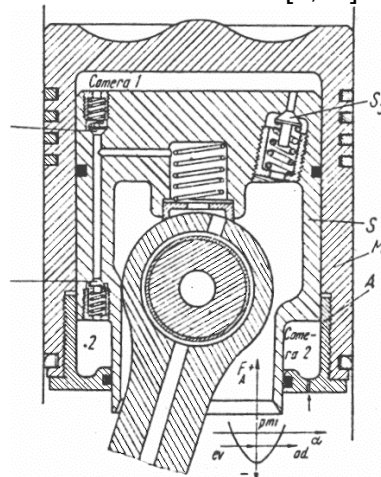


Fig. 7 - BICERA

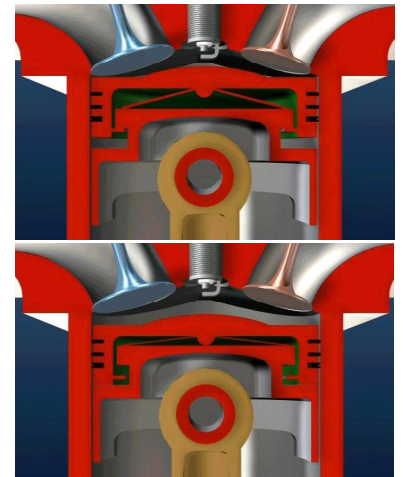


Fig. 8 - Ford

2 - 4 Modification de la cinématique bielle-manivelle

Une première approche consiste à déplacer l'axe du vilebrequin. Cette solution, CCP (Crankshaft Controlled Positioning), proposée par FEV et Audi est obtenue à l'aide d'un excentrique placé au niveau de la ligne des paliers du vilebrequin, [9]. La forme de la chambre de combustion et la cinématique du piston sont conservées. Le principe de fonctionnement est compréhensible à partir de l'examen des figures 9.



Fig. 9 - FEV-Audi

La première difficulté à résoudre sur ce type de système est d'assurer l'alignement des paliers du vilebrequin tout en conservant une rigidité suffisante. La seconde difficulté est d'assurer la transmission de puissance car l'arbre du vilebrequin est mobile par rapport à l'arbre primaire de la boîte de vitesses, ce qui a été résolu à l'aide d'accouplements spécifiques.

Une autre approche consiste non plus à déplacer l'axe du vilebrequin mais l'axe du maneton. Cette solution Gomecsys, figure 10, fait appel à des excentriques autour des manetons liés à un pignon engrené sur une couronne dentée, [10]. Le déplacement de cette couronne permet de faire varier le rapport volumétrique de compression.

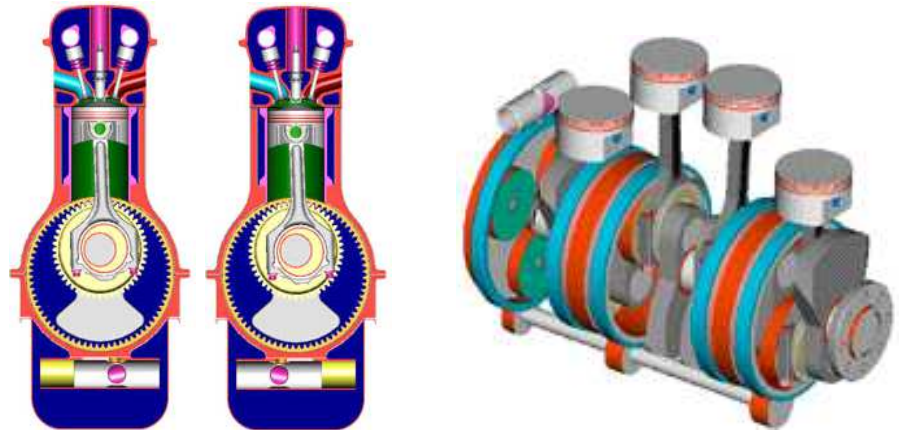


Fig. 10 - Gomecsys

Maintenant, nous abordons les systèmes qui rajoutent une pièce en mouvement dans l'assemblage bielle-manivelle.

Ainsi la société Mayflower, figure 11, introduit une bielle supplémentaire coulissante dont la position est ajustable par un pivot, [11]. L'avantage est la réalisation d'un moteur dont la cylindrée et le rapport volumétrique de compression sont variables ($\epsilon_v = 9$ à 15 , $V = 260$ à 300 cm^3). Cependant la réalisation technique est délicate et risque d'annihiler les gains potentiellement escomptés.

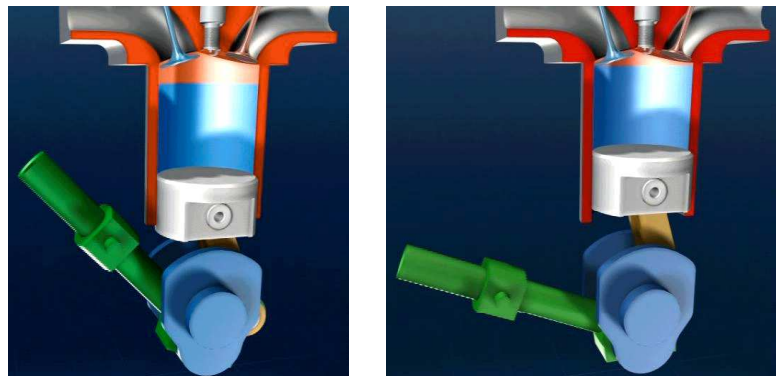


Fig. 11 - Mayflower

Une solution plus « classique », consiste à introduire dans le système bielle-manivelle un levier supplémentaire dont le point d'ancrage est mobile de façon à faire varier le rapport volumétrique de compression.

Ce sont par exemple les réalisations de PSA et de Nissan figure 12, [13]. Malgré leurs 3 liaisons oscillantes supplémentaires, les pertes mécaniques sont équivalentes à celle d'un moteur classique grâce à la réduction du rayon de manivelle (environ 40 %). Il est dès lors possible de réduire les diamètres des tourillons et manetons et ainsi de réduire les pertes par frottement.

La différence fondamentale entre ces deux moteurs réside dans le point d'ancrage.

La conséquence du point d'ancrage vers le haut fait que pour PSA, la variation du rapport volumétrique de compression engendre aussi une variation de la cylindrée: quand le rapport volumétrique de compression est élevé sa cylindrée est faible et inversement.

Le point d'ancrage du moteur Nissan fait que la cylindrée reste pratiquement constante.

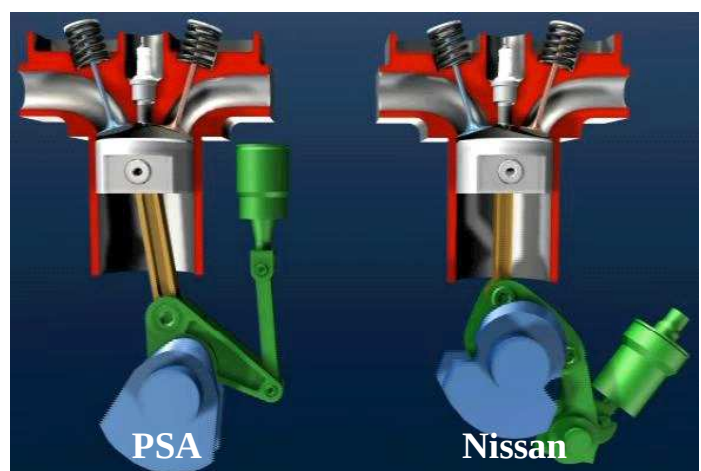


Fig. 12 – PSA -Nissan

Une solution qui rompt avec le schéma classique bielle-manivelle, figure 13, est présentée par la société MCE-5, [12]. Le haut moteur est conservé mais la liaison piston bielle est réalisée par un engrenage. Cette conception oblige un déplacement du piston rigoureusement axial, ce qui est obtenu à l'aide d'un rouleau denté. Cette contrainte se transformant en avantage en supprimant les efforts radiaux sur le piston ce qui permet de raccourcir considérablement la jupe du piston et réduire les forces de frottement. Comme pour les moteurs PSA et Nissan la manivelle est raccourcie de 50% par rapport à un moteur classique permettant de même une réduction substantielle des pertes par frottements.



Fig. 13 – MCE-5

3 - CONCLUSIONS

Dans le cadre de cet article, il est impossible de présenter toutes les conceptions de moteurs à rapport volumétrique de compression variable. En consultant les documents cités en référence en fin de cet article vous pourrez trouver des compléments d'informations.

Il nous a été de même impossible, de décrire complètement les avantages et les inconvénients de ces systèmes. Un examen approfondi de ceux-ci montre que certains présentent des possibilités de courses de détente supérieure à la course de compression et aussi parfois la possibilité de contrôler le rapport volumétrique de compression de chaque cylindre.

Le rapport volumétrique de compression variable laisse espérer des gains de consommation >35% en charges partielles pour des moteurs suralimentés de faibles cylindrées et de fortes puissances spécifiques (downsizing). Des gains même supérieurs sont annoncés dans le cas de la réalisation du cycle de Miller-Atkinson.

Les technologies exposées présentent toutes des avantages et des inconvénients. A vous de juger quelle est la meilleure. Nous aurons donc, comme toujours dans le domaine de l'automobile à faire appel à un compromis. Néanmoins face à "l'explosion" des solutions proposées, il est probable qu'un moteur à essence à rapport volumétrique de compression variable fortement suralimenté soit, sauf bouleversement politique ou technologique, produit en série dans les prochaines années.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier pour son aide précieuse et avoir accepté de présider cette conférence, Vianney Rabhi, Directeur Stratégie & Développement de la société MCE-5.

Bibliographie

- [1] *Recherches sur l'amélioration du fonctionnement aux charges partielles d'un moteur à allumage commandé, par compression variable*. Thèse de doctorat, Brasov, Roumanie, Octobre 2003 – A. Clenci
- [2] *Amélioration du rendement, aux charges partielles, des moteurs à allumage commandé par l'augmentation du taux de compression*. COFRET04, Nancy, France, Avril 2004–P. Podevin, G. Descombes, A. Clenci, V. Hara
- [3] *Considerations on the downsizing technique at the s.i.engine*. CONAT, Brasov, Roumanie, Octobre 2004 – A. Clenci, G. Descombes, P. Podevin, V. Hara
- [4] Performance, exhaust emissions and fuel consumption of an i.c.engine operating with lean mixtures. IMech C111/1979 ; D. Gruden, R. Hahn
- [5] *Future near term SI engine concepts for fuel consumption reduction with worldwide compliant emissions*. FISITA2002, Helsinki ; R. Reinmann, H. Drangel, E. Olofsson
- [6] *Combustion engine with variable compression ratio*, Brevet international n°PCT/SE91/00817 ; H. Drangel, P.I. Nilson, L. Bergsten
- [7] *The adaptive thermal engine with variable compression ratio and variable intake valve lift*. ISBN 973-8212-92-8 ; V. Hara, A. Clenci

- [8] *Le moteur adaptif à rapport volumétrique de compression variable et à levée variable de la soupape d'admission*, Brevet Roumain n°111863B ; V. Hara
- [9] www.fev.com
- [10] www.gomecsys.com
- [11] BIRCH, S. – *MayFlow's variable engine technology*, Automotive Engineering International, january 2002
- [12] www.mce-5.com
- [13] www.auto-innovations.com