

Chapitre 1 : Nouvelles techniques et amélioration du rendement des moteurs

I. 1 Sous-dimensionnement

Dans l'industrie automobile, le sous dimensionnement est la technique utilisée pour rendre les moteurs à combustion interne plus compacts avec de petites dimensions aux lieux de ceux avec de grandes dimensions, en gardant la même capacité de puissance. C'est l'objectif fixé par les fabricants de véhicules pour designer des moteurs thermiques plus efficaces émettant moins d'émissions souvent, prescrit par des législations standards. L'idée, est de réduire la cylindrée du moteur ainsi que le nombre de cylindres par moteur. Ce dernier principe est accompli par l'addition des systèmes d'aspiration forcée tels que la suralimentation par turbocompresseur ou simplement par compresseur et la technologie d'injection directe qu'est la solution prometteuse pour diverses difficultés rencontrées dans les moteurs à essence ou Diesel.

Le but est de designer des moteurs puissants avec des performances similaires à ceux de grandes dimensions mais avec un rendement amélioré et des émissions réduites de carbone. Un petit moteur est souvent léger, donc moins d'énergie globalement dépensée pendant le fonctionnement. La réduction du nombre des cylindres est aussi conduit à la réduction du taux de frottement dans le cylindre, donc, augmenter le rendement.

I.1.1 Injection (indirecte et direct)

La principale différence entre l'injection directe et l'injection indirecte réside dans la disposition du système d'injection (injecteur).

a) Injection indirecte

Sur une injection indirecte le moteur à **Essence** (Fig1), l'injecteur est placé en amont de la soupape, soit dans la tubulure d'admission. Le mélange est effectué par vaporisation avant de rentrer dans le cylindre.

Dans le cas d'un **Diesel** (Fig 2), l'injection se fait dans une petite chambre séparée (pré-chambre de combustion), et non pas dans le conduit d'admission.

Les avantages sont:

- ✓ Fonctionnement plus silencieux que l'injection directe ;
- ✓ Une meilleure turbulence de l'air permet un fonctionnement plus homogène ;
- ✓ Plus **tolérant** aux variations de qualité du carburant (ne dépend pas fortement du changement du combustible);
- ✓ Des émissions plus propres.

Les inconvénients sont:

- ✓ Grand rapport (surface/volume), ce qui signifie une plus grande perte de chaleur vers les chemises de refroidissement et une efficacité thermique inférieure ;
- ✓ Difficile de démarrer.

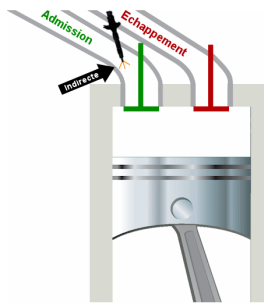


Fig. 1: Injection indirecte sur moteur SI

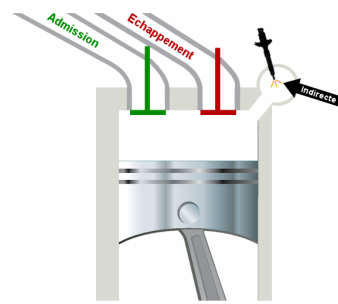


Fig. 2: Injection indirecte sur moteur CI

b) Injection directe

Le carburant atomisé est injecté directement dans la chambre de combustion qui dans ce cas, est formée dans la couronne du piston.

Les avantages sont:

- ✓ Réduction de la consommation de carburant
- ✓ Une combustion plus propre
- ✓ Démarrage plus facile
- ✓ Haute efficacité thermique

Les inconvénients sont:

- ✓ Bruyant (coup de diesel, en raison de la période de retard plus longue) ;
- ✓ Niveaux plus élevés de fumée d'échappement.

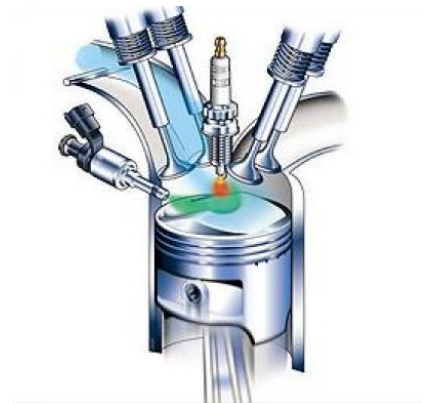


Fig. 3: Injection directe

I.1.2 La suralimentation (plus de détails dans le chapitre 5):

La suralimentation peut être définie comme l'introduction d'air (ou d'un mélange air/carburant) dans un cylindre moteur à une densité supérieure à la densité ambiante. Cela permet une augmentation proportionnelle du carburant qui peut être brûlé et augmente donc la puissance de sortie potentiellement. L'objectif principal est d'augmenter la puissance de sortie, ne pas d'améliorer le rendement, bien que le rendement puisse en bénéficier. L'effet de la suralimentation sur la puissance de sortie peut être vu à partir d'un diagramme (P-V) (fig. 4).

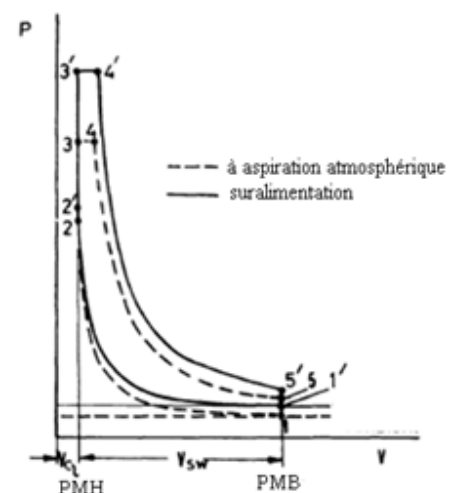


Fig. 4: Comparaison des moteurs à air suralimenté et à aspiration naturelle

1-2 Distribution variable

Après la technologie multisoupapes qu'est devenue la norme dans la conception du moteur, le calage variable des soupapes devient l'étape succédant pour améliorer la puissance du moteur, peu importe la puissance ou le couple.

Comme nous savons, les soupapes activent la respiration du moteur. La synchronisation de la respiration, c'est-à-dire la synchronisation de l'admission de l'air et de l'échappement des gaz brûlés, est contrôlée par la forme et l'angle de phase des cames. Pour optimiser la respiration, le moteur nécessite un calage des soupapes différent à des vitesses différentes. Lorsque le régime augmente, la durée de la course d'admission et d'échappement diminue de sorte que l'air frais ne devient pas assez rapide pour entrer dans la chambre de combustion, tandis que l'échappement ne devient pas assez rapide pour quitter la chambre de combustion.

Par conséquent, la meilleure solution est d'ouvrir les soupapes d'admission plus tôt et de fermer les soupapes d'échappement plus tard. En d'autres termes, le chevauchement entre la période d'admission et la période d'échappement doit être augmenté à mesure que le régime augmente.

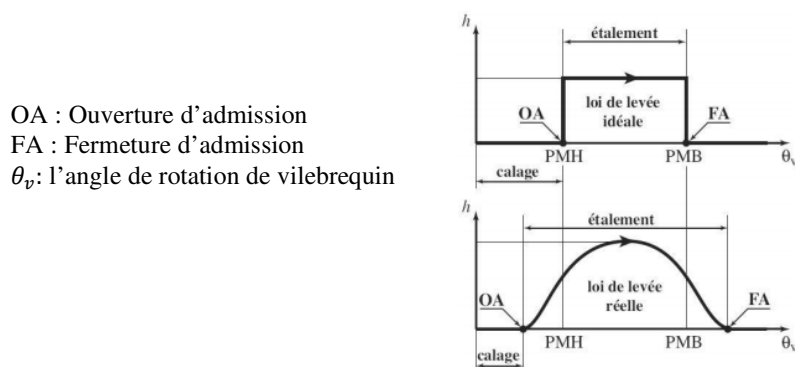


Fig. 5: loi de levée de la soupape d'admission

On donne un diagramme « pression des gaz dans la chambre - volume de la chambre » qui représente le cycle réel du moteur à quatre temps. On y place les points caractéristiques des positions du piston et des soupapes.

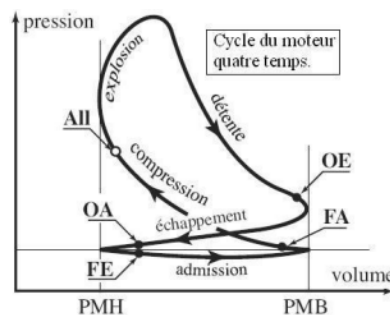


Fig. 6: Cycle réel du moteur à quatre temps

Le principal avantage d'avoir une technologie à calage variable des soupapes est :

- ✓ l'augmentation du nombre de tours par minute du moteur (vitesse de rotation, régime);
- ✓ Meilleure économie de carburant ;
- ✓ Émissions du carbone plus faible ;
- ✓ Augmentation de la durée de vie du moteur.

Inconvénients:

- ✓ couple à mi-régime insuffisant ;
- ✓ perte par pompage de piston;
- ✓ réduction du rapport de compression.

1-3 Taux de compression variable

L'une des systèmes les plus efficaces pour développer les moteurs est le système du taux de compression variable (TCV), car il permet non seulement une réduction de la consommation de carburant, mais il ouvre la voie à de nombreuses autres améliorations. Les moteurs à compression variable permettent de modifier le volume au-dessus du piston au point mort haut (PMH).

D'un point de vue thermodynamique, le rendement du cycle d'Otto est uniquement influencé par le taux de compression géométrique (TCG), comme indiqué ci-dessous:

$$\eta_{otto} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}} \quad (1); \quad \left\{ \begin{array}{l} \gamma = \frac{C_p}{C_v} = 1.4 \\ \varepsilon = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_h + V_{cc}}{V_{cc}} \end{array} \right. \quad (2)$$

Où η_{otto} est le rendement thermodynamique, ε est le TCG (le rapport entre les volumes maximum et minimum du cylindre du moteur, V_{max} , V_{min})

D'après l'équation (2), il y a deux possibilités pour modifier le taux de compression géométrique (TCG), soit en modifiant le volume de la chambre de combustion (V_{cc}), soit en modifiant le volume du cylindre déplacé pendant la course du piston (V_h).

Un résumé des différents concepts de TCV est présenté dans la figure 7.

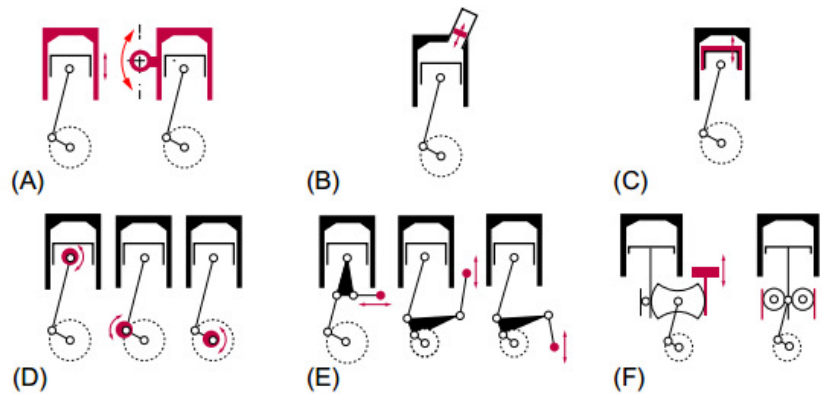


Fig. 6 : Différentes techniques pour obtenir un moteur TCV. (A) Bloc-cylindres coulissant ou articulé, (B) piston supplémentaire dans la culasse, (C) hauteur de piston réglable, (D) excentriques sur roulements, (E) mécanisme à liaisons multiples, (F) mécanisme à engrenages.

1-4 Cycle Miller-Atkinson (cycle à détente prolongée) :

1-4.1 Cycle Atkinson

En pratique, le cycle d'Atkinson peut être obtenu en modifiant les temps d'ouverture de la soupape d'échappement et de la fermeture de la soupape d'admission, par rapport au PMB. Ce changement de synchronisation permet aux gaz de se détendre complètement jusqu'à la pression ambiante. Bien que le cycle d'Atkinson fournisse des améliorations de rendement car il y a une production de **travail supplémentaire**.

Les inconvénients comprennent :

- Des réductions de la puissance, du couple maximal et de la pression effective moyenne indiquée car il y a une réduction du volume à remplir avec une charge fraîche.

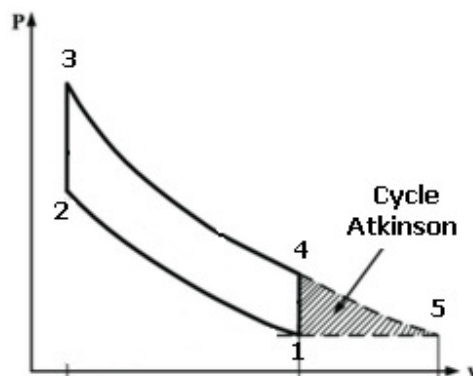


Fig. 7: diagramme p-V du cycle d'Atkinson

Le fonctionnement du cycle d'Atkinson est représenté sur un diagramme p-V sur la figure 7. Le cycle comprend les processus suivants: compression adiabatique 1→2, addition de chaleur à volume constant 2→3, détente adiabatique 3→4, dégagement de chaleur isochore 4→5 et évacuation de chaleur à pression constante 5→1.

Pour ce cycle, on a : $V_2 = V_3$, $P_5 = P_1$, $\varepsilon_c = (V_1/V_2) = (V_1/V_3)$

$\varepsilon_d = (V_5/V_3)$, $\alpha = P_3/P_2$, et $T_R = T_3/T_1$.

ε_c : Taux de compression

ε_d : Taux de détente

α : Rapport de pression .

$$\eta_{th} = \left| \frac{W_{net}}{Q_{23}} \right|$$

$$Q_{23} = mC_v(T_3 - T_2)$$

$$Q_{51} = mC_p(T_5 - T_1)$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{C_p(T_5 - T_1)}{C_v(T_3 - T_2)} = 1 - \gamma \frac{(T_5 - T_1)}{(T_3 - T_2)}$$

Transformations :

- Pour la transformation adiabatique 1→2, nous avons :

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{1-\gamma} \Rightarrow T_2 = T_1 \varepsilon_c^{\gamma-1}$$

- Transformation volume constant (isochore) 2 → 3 :

$$T_3 = T_2 \left(\frac{P_3}{P_2} \right) = T_2 \alpha = \alpha \varepsilon_c^{\gamma-1} T_1$$

- Pour la transformation adiabatique 3→5, nous avons :

$$T_3 V_3^{\gamma-1} = T_5 V_5^{\gamma-1} \Rightarrow \frac{T_5}{T_3} = \left(\frac{V_3}{V_5} \right)^{\gamma-1} = \left(\frac{V_3}{V_1} \frac{V_1}{V_5} \right)^{\gamma-1}$$

$$T_5 = \frac{T_3}{\varepsilon_c^{\gamma-1}} \left(\frac{V_1}{V_5} \right)^{\gamma-1} = \alpha T_1 \left(\frac{V_1 V_2}{V_2 V_5} \right)^{\gamma-1} = \alpha T_1 \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_d} \right)^{\gamma-1}$$

- Transformation isobare de 5 → 1 :

$$\frac{V_1}{V_5} = \frac{T_1}{T_5}$$

$$T_5 = \frac{\alpha \varepsilon_c^{\gamma-1} T_1}{\varepsilon_c^{\gamma-1}} \left(\frac{T_1}{T_5} \right)^{\gamma-1} = \alpha T_1 \left(\frac{T_1}{T_5} \right)^{\gamma-1}$$

$$T_5 = T_1 \alpha^{\frac{1}{\gamma}}$$

Le rendement thermique du cycle peut maintenant être obtenue en substituant :

$$\eta_{th} = 1 - \gamma \frac{\left(T_1 \alpha^{\frac{1}{\gamma}} - T_1 \right)}{(\alpha \varepsilon_c^{\gamma-1} T_1 - T_1 \varepsilon_c^{\gamma-1})}$$

Après substitution, on obtient :

$$\eta_{th} = 1 - \left(\frac{\gamma}{\varepsilon_c^{\gamma-1}} \right) \left(\frac{\alpha^{\frac{1}{\gamma}} - 1}{\alpha - 1} \right)$$

1-4.2 Cycle Miller

Le cycle de Miller est le cycle de Atkinson avec suralimentation (compresseur).

Principe du cycle Miller

- La fermeture des soupapes d'admission est retardée et une partie de l'air retourne dans le collecteur d'admission ;
- Le taux d'expansion est augmenté sans augmenter le taux de compression en changeant la forme du piston ;
- Excellente puissance de sortie et puissance spécifique ;
- L'efficacité thermique s'améliore sans risque de cognement et de pertes de pompage.

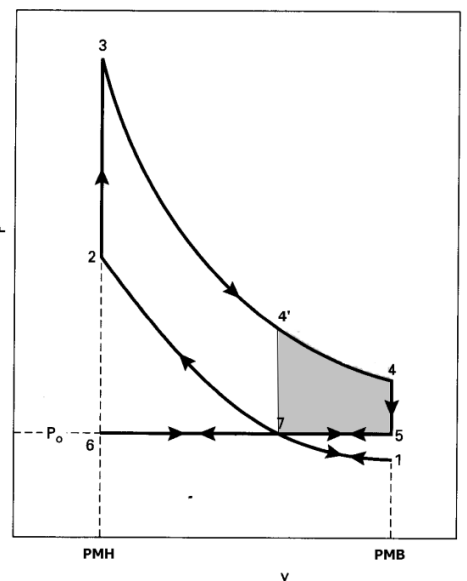


Fig. 8: diagramme p-V du cycle de Miller

- La course de compression réelle se produit dans les derniers 70 à 80% de la course de compression.
- Réduction des NOx

Le fonctionnement du cycle de Miller est illustré sur un diagramme p-V sur la figure 8. La quantité d'air ingérée dans chaque cylindre est contrôlée en fermant la soupape d'admission au bon moment (point 7 sur la figure 8).

Il comprend cinq processus: compression adiabatique 7→2, addition de chaleur à volume constant 2→3, détente adiabatique 3→4, évacuation de chaleur à volume constant 4→5 et l'évacuation de la chaleur à pression constante 5→7.

Pour le cycle Miller, nous avons : $V_2=V_3$, $V_4=V_5$, $P_5=P_7$,

$\varepsilon_c=V_7/V_2$, $\varepsilon_d=V_4/V_3$, $\alpha=P_3/P_5$, et $T_R=T_3/T_1$.

$$\eta_{th} = \left| \frac{W_{net}}{Q_{23}} \right| = 1 - \frac{Q_{45} + Q_{57}}{Q_{23}}$$

$$Q_{23} = mC_v(T_3 - T_2)$$

$$Q_{45} = mC_v(T_4 - T_5)$$

$$Q_{57} = mC_p(T_5 - T_7)$$

$$W_{34} = mC_v(T_4 - T_3)$$

$$W_{72} = mC_v(T_2 - T_7)$$

Transformations :

- Pour la transformation adiabatique 7→ 2, nous avons :

$$\frac{T_2}{T_7} = \left(\frac{V_2}{V_7} \right)^{1-\gamma} \Rightarrow T_2 = T_7 \varepsilon_c^{\gamma-1}$$

- Transformation à volume constant (isochore) 2 → 3 :

$$T_3 = T_2 \left(\frac{P_3}{P_2} \right) = T_2 \alpha = \alpha \varepsilon_c^{\gamma-1} T_1$$

- Pour la transformation adiabatique 3→ 4, nous avons :

$$T_3 V_3^{\gamma-1} = T_4 V_4^{\gamma-1} \Rightarrow \frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{V_3}{V_4} \right)^{\gamma-1} = \left(\frac{V_3}{V_1} \frac{V_1}{V_4} \right)^{\gamma-1}$$

$$T_4 = \frac{T_3}{\varepsilon_c^{\gamma-1}} \left(\frac{V_1}{V_4} \right)^{\gamma-1}$$

- Pour la transformation isochore 4→5 :

$$T_5 = T_4 \left(\frac{P_5}{P_4} \right) = T_4 \left(\frac{P_5}{P_3} \frac{P_3}{P_4} \right) = T_4 \left(\frac{1}{\alpha} \right) \left(\frac{V_4}{V_3} \right)^{\gamma} = T_4 \left(\frac{1}{\alpha} \right) (\varepsilon_d)^{\gamma}$$

- Pour la transformation isobare 5→7 :

$$T_5 = T_7 \left(\frac{V_5}{V_7} \right) = T_7 \left(\frac{V_5}{V_3} \frac{V_3}{V_7} \right) = T_7 \left(\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_c} \right)$$

1-4.3 Avantages du cycle Atkinson/Miller

L'utilisation du cycle Atkinson / Miller conduit aux avantages suivants par rapport à l'utilisation du cycle Otto conventionnel:

- ✓ une détente plus complète ;
- ✓ meilleure utilisation de l'énergie de combustion ;
- ✓ moins de bruit dans l'orifice d'échappement ;
- ✓ température plus basse dans l'orifice d'échappement ;
- ✓ Un meilleur rendement de combustion.

1-5 Charge stratifiée (figure 9)

Le moteur à charge stratifiée est similaire au moteur à combustion interne standard sauf que le mélange carburant-air dans la chambre de combustion est beaucoup plus riche en carburant près de la bougie d'allumage qu'ailleurs. Ceci, contrairement au moteur à charge uniforme, permet des températures de pointe (maximale) plus basses, des taux de compression plus élevés et une combustion plus complète.

- Le principe de la charge stratifiée s'applique aux moteurs à essences à injection directe.
- Il s'agit de concentrer la pulvérisation du carburant à proximité de la bougie plutôt que sur l'ensemble de la chambre de combustion.
- Ce mode de fonctionnement permet une réduction de la consommation de carburant pouvant atteindre 40% lorsque le moteur tourne à très faible charge.

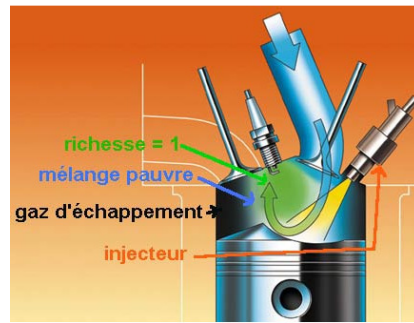


Fig. 9: mode stratifié

Les avantages :

- ✓ Le rapport air-carburant global peut être très pauvre, ce qui donne un rendement énergétique élevé ;
- ✓ Le mélange étant riche près de la bougie d'allumage, de bonnes caractéristiques d'allumage;
- ✓ Les gaz terminaux étant très pauvres en carburant, les réactions de précombustion seraient très lentes, ce qui réduirait la tendance au cognement. Par conséquent, un taux de compression plus élevé peut être utilisé pour améliorer encore le rendement énergétique. ;
- ✓ La présence d'un mélange riche près de la bougie d'allumage maintient la formation de NOx à de faibles niveaux. Le mélange qui brûle tôt est déficient en oxygène bien qu'il atteigne des températures de combustion élevées.

Les inconvénients :

- ✓ Les injecteurs ajoutent un coût important au système, mais les avantages en termes de rendement énergétique surmontent ce problème ;
- ✓ Avec une charge croissante, le rendement correspond à celui des moteurs conventionnels grâce au mélange stœchiométrique;
- ✓ Une forte variabilité cyclique peut perturber la formation (et l'emplacement) des zones stratifiées, réduisant ainsi l'effet de l'étincelle - si la zone riche n'est pas près de l'étincelle, la combustion peut non plus se produire correctement.

1-6 Concept HCCI

La combustion à allumage par compression à charge homogène (HCCI) est considérée comme les futurs concepts de moteurs IC les plus prometteurs. HCCI est un concept de combustion hybride, entre le moteur Otto et le moteur Diesel..

Les rendements élevés du moteur et les émissions de NO ultra faibles et les faibles particules sont les avantages des moteurs HCCI. La combustion volumétrique auto-allumée du mélange air comprimé pauvre en carburant est attribuée à ces avantages.

La figure 10 montre les différentes stratégies pour réaliser la combustion HCCI.

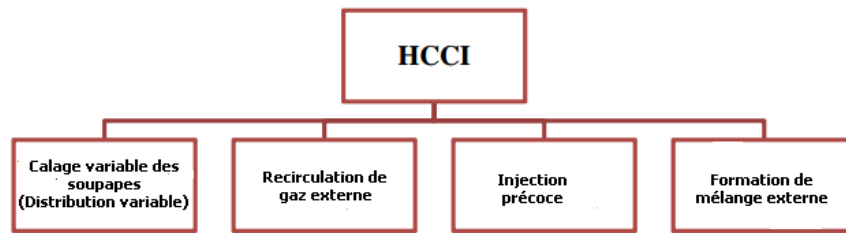


Fig.10 : Stratégies pour réaliser la combustion HCCI

Limitations de HCCI :

- ✓ Manque de contrôle sur l'auto-allumage ;
- ✓ Pressions de crête élevées ;
- ✓ Plage de fonctionnement à faible charge ;
- ✓ Capacité de démarrage à froid ;
- ✓ Émissions élevées de CO et HC.

Tableau 1 Comparaison entre le moteur SI conventionnel et le moteur HCCI

Base de comparaison	Moteur SI	Moteur HCCI
Rendement	Moins	Plus
Pertes d'accélérateur	Plus	Non
Taux de compression	Faible	élevé
Durée de la combustion	Plus	Moins
Émissions de NOx	Comparativement plus	Moins

Tableau 2 Comparaison entre le moteur CI conventionnel et le moteur HCCI

Base de comparaison	Moteur Diesel	Moteur HCCI
Rendement	élevé	Également élevé
Températures de combustion	1900–2100 K	800–1100 K
Coût	Comparativement élevé	Moins
Durée de la combustion	Plus	Moins
Émissions de NOx	Plus	Moins

1-7 Concept PCCI

La combustion PCCI (premixed charge compression ignition) a été décrite comme une voie intermédiaire entre les modes de combustion conventionnel et HCCI. Dans la combustion HCCI, il y a le défi du

contrôle des phases de combustion et de la préparation du mélange homogène. Pour résoudre ces problèmes la combustion PCCI a été utilisée.

- La combustion PCCI est basée sur la technique d'injection précoce de carburant (entre la combustion HCCI et CI), qui laisse suffisamment de temps pour le mélange carburant-air avant le début de la combustion.
- L'homogénéité du mélange air-carburant en cas de combustion PCCI est relativement inférieure par rapport à la combustion HCCI; cependant, il est supérieur à la combustion CI. Semblable à la combustion HCCI, la combustion PCCI est également un processus de combustion en une seule étape, dans lequel la plupart des combustibles brûlent en phase de combustion pré-mélangée. Il en résulte l'absence de phase de combustion par diffusion, conduisant à des températures de combustion localement plus élevées mais globalement plus basses à l'intérieur de la chambre de combustion. C'est la principale raison pour laquelle les émissions de NOx sont nettement plus faibles en mode de combustion PCCI. Cependant, à l'instar de d'autres dérivés de combustion à basse température, la combustion PCCI souffre également du problème des émissions plus élevées de HC et de CO; cependant, la quantité d'émissions de HC et de CO est relativement inférieure à celle de la combustion HCCI.

Dans l'ensemble, la combustion PCCI peut être considérée comme une stratégie de combustion intermédiaire entre la combustion HCCI et la combustion CI conventionnelle, qui offre des émissions de NOx et de particules plus faibles et offre un meilleur contrôle de la phase de combustion.

	SI	CI	HCCI	PCCI
Type d'allumage	allumage par étincelle	allumage par compression	allumage par compression	allumage par compression
Type de carburant	Octane élevé	Cétane élevé	Mélange de chaque carburant liquide ou gazeux	Mélange de chaque carburant liquide ou gazeux
État du mélange air-carburant	Rapport air-carburant presque stœchiométrique	Rapport air-carburant pauvre	Rapport air-carburant pauvre	Rapport air-carburant pauvre
Émissions de particules et de NOx	Nettoyant avec catalyseur à trois voies	Particules et NOx plus élevées	Moins de NOx et de particules	Moins de NOx et de particules
Autres caractéristiques d'émission	CO ₂ plus élevé	Moins de CO ₂	HC et CO plus élevés et moins de CO ₂	HC et CO plus élevés et moins de CO ₂

Tableau : Comparaison de SI, CI, HCCI, PCCI,