

Chapitre 2

Nouvelles techniques et amélioration du rendement des moteurs

Sommaire

2.1.	Sous-dimensionnement (<i>Downsing en Anglais</i>)	21
2.1.1.	L'injection directe	21
2.1.2.	L'injection indirecte	23
2.1.3.	La suralimentation (Plus de détails dans le chapitre VI)	24
2.1.4.	Courbes d'iso-consommation	24
2.2.	Distribution variable	25
2.2.1	Définition	25
2.2.2	Différents types de distribution	26
2.2.3	Avantages de la distribution variable	31
2.2.4	Inconvénients de la distribution variable	32
2.3.	Taux de compression variable	32
2.3.1.	Rappels de base	32
2.3.2.	Relation entre le taux de compression et le rendement du moteur	33
2.3.3.	Choix du taux de compression	37
2.3.4.	Principe du taux de compression	37
2.3.5.	Ajustement du taux de compression	38
2.4.	Cycle Miller-Atkinson	39
2.4.1.	Conception	39
2.4.2.	Cycle thermodynamique parfait	39
2.4.3.	Moteur à quatre temps à cycle Atkinson	40
2.4.4.	Différence entre le cycle Atkinson et le cycle Otto	41
2.5.	Charge stratifiée	41
2.5.1.	Principe	41
2.5.2.	Coefficient d'air et richesse	42
2.5.3.	Avantages de la combustion stratifiée :	43
2.6.	Concept HCCI	43
2.6.1.	Principe	43
2.6.2.	Histoire	44
2.6.3.	Méthode	44
2.6.4.	Avantages	44
2.6.5.	Inconvénients	44
2.6.6.	Contrôle de la combustion	45
2.7.	Concept PCCI	45
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	47

2.1. Sous-dimensionnement (*Downsizing en Anglais*)

Le Sous-dimensionnement désigne un ensemble de procédés visant à réduire la cylindrée d'un moteur, sans en dégrader la puissance spécifique, dans le but de réduire la consommation de carburant. Les solutions techniques apportées aux moteurs essence comme aux moteurs diesel permettent de réduire la cylindrée en conservant une puissance suffisante aux besoins du véhicule.

Pour arriver à ce but on utilise plusieurs méthodes comme : *L'injection directe et la suralimentation*

Les solutions techniques apportées aux moteurs essence comme aux moteurs diesel permettent de réduire la cylindrée en conservant une puissance suffisante aux besoins du véhicule (Figure 1.1).

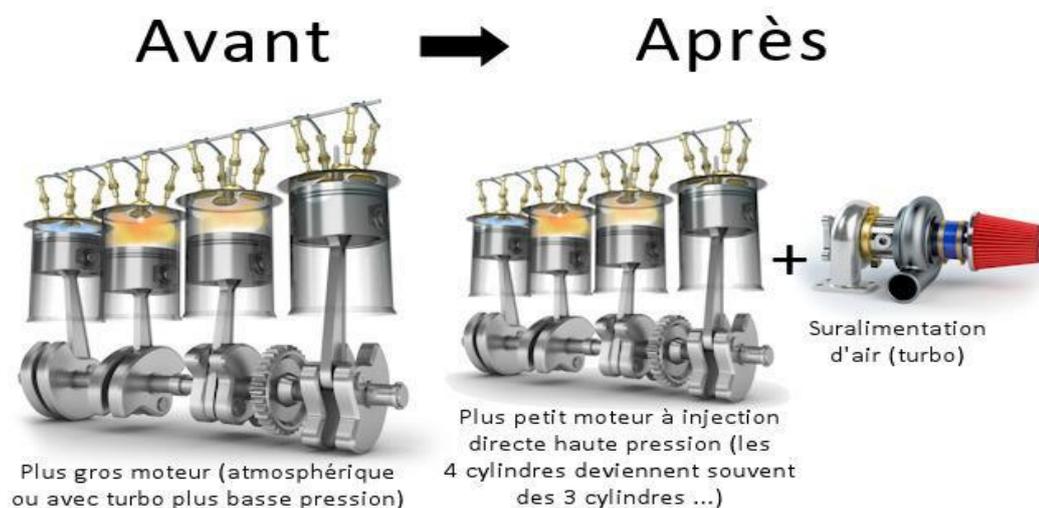


Figure 2.1. Moteur avant et après sous-dimensionnement.

2.1.1. L'injection directe

L'injection directe sur les moteurs essence n'est pas une nouveauté. La magnifique Mercedes 300 SL (1955) a été la première voiture de série à être équipée d'une injection directe essence. L'idée n'a pratiquement plus été mise en œuvre jusque dans les années 1980 où le fabricant Fiat propose une injection directe diesel. Le principe permet une combustion stratifiée à mélange pauvre (rapport carburant/air <1), amène une réduction de l'ordre de 10% de la consommation mais produit dans le même temps plus d'oxyde d'azote (NOx). Depuis, la technologie a évolué vers le turbo-diesel à injection directe.

Le système d'injection directe est assez commun entre un moteur diesel et un moteur essence, ce qui n'est pas le cas pour l'injection indirecte dont la conception change en fonction du moteur essence ou Diesel

L'injection directe est de plus en plus répandue (c'est même systématique maintenant) pour des raisons environnementales.

Ici c'est donc assez simple, le bout de l'injecteur donne directement dans la chambre de combustion (le cylindre), il va donc pulvériser le carburant directement dans cette chambre au moment voulu, plus ou moins tôt, plus ou moins souvent et avec plus ou moins de carburant.

Une injection directe permet de garder plus propre l'admission puisqu'il n'y a que de l'air qui y passe et non pas le mélange air + carburant.

Ce type d'injection implique aussi généralement de plus fortes pressions car ce type de moteurs à un taux de compression plus élevé. Cela induit donc une injection qui doit être plus performante en injectant le carburant avec plus de force (la pression est donc supplémentaire et les injecteurs subissent plus de contraintes).

L'injection d'un moteur à injection indirecte est donc potentiellement plus fiable dans le temps au niveau des injecteurs et de la pompe qui montent moins en pression.

Enfin, il faut noter que l'injection directe permet d'envoyer plusieurs jets au lieu d'un seul pour un même cycle, cela permet alors de mieux mélanger l'air et le carburant (plus c'est homogène mieux c'est, sauf pour la combustion stratifiée).

Le carburant est ici envoyé sous pression directement dans la chambre de combustion. La forme du piston doit être particulièrement étudiée en termes d'aérodynamisme contrairement à ce qu'indique ce schéma conceptuel.

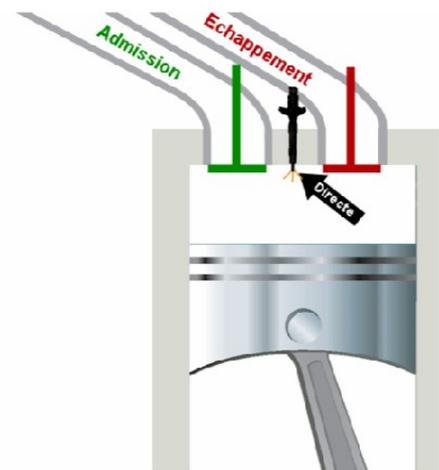


Figure 2.2. Injection directe.

Phase d'injection du carburant

L'injection se fait d'une manière classique c'est-à-dire que le carburant est injecté au moment de l'admission d'air pour que le tout se mélange de manière homogène. Il se vaporise sous l'effet de la chaleur et brûle de manière optimale. Car l'essence s'enflamme sous forme de vapeur et non pas quand elle est liquide.

L'injection directe nécessite une plus grande pression pour injecter le carburant dans les cylindres que pour une version indirecte (taux de compression plus élevé pour améliorer le rendement moteur, et donc la consommation. Sans oublier le turbo qui augmente encore le tout), le coût est alors plus élevé.

Cette méthode permet aussi de contrôler au millimètre la dose de carburant injectée, avec une modulation possible selon le régime moteur. Le calculateur a alors la main de manière parfaite sur la combustion. Pour une injection indirecte, le carburant (essence) arrive au même moment que le comburant (air), sans autre possibilité.

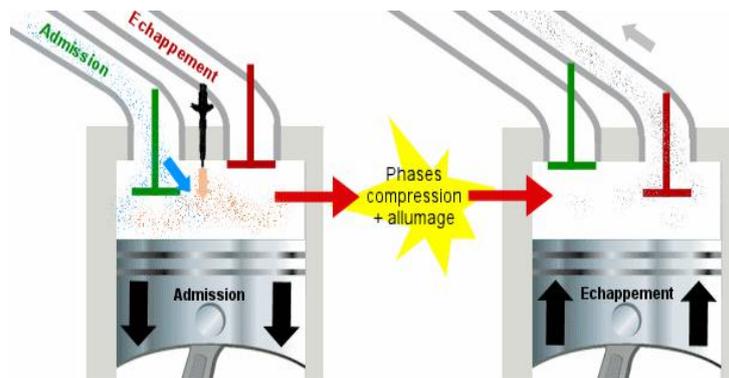


Figure 2.3. Phase d'injection classique dans une injection directe.

2.1.2. L'injection indirecte

Les moteurs essence et diesel ne fonctionnant pas de la même manière, il faut distinguer les deux.

2.1.2.1. Injection indirecte sur moteur essence

Sur une injection indirecte de moteur essence, 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. Sur un moteur essence, c'est dans le conduit d'admission qu'on injecte le carburant.

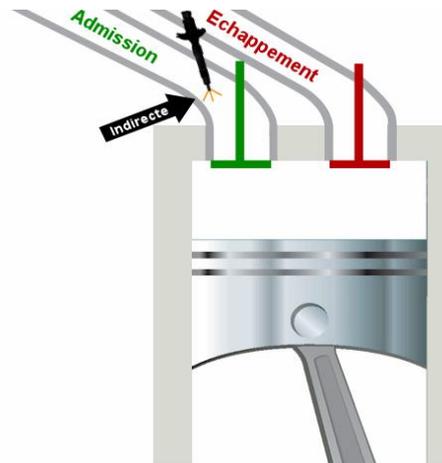


Figure 2.4. Injection indirecte sur moteur essence.

2.1.2.2. Injection indirecte sur moteur diesel

Dans le cas d'une injection indirecte sur un moteur diesel, l'injection se fait dans une petite chambre séparée (préchambre de combustion) qui donne sur le cylindre, et non pas dans le conduit d'admission comme dans le cas d'une injection indirecte essence.

En gros, cette méthode permet d'améliorer la combustion du diesel malgré l'emploi d'une injection basse pression.

Lors de la compression, l'air admis va être envoyé vers cette préchambre sous pression pour se mélanger au carburant vaporisé qui va alors commencer à s'enflammer.

Les turbulences provoquées par l'aérodynamisme de la préchambre permettent d'améliorer la combustion. Dans ce cas, les bougies de préchauffage sont plus utiles que dans le cas d'une injection indirecte. Un moteur à injection directe démarrera plus facilement sans elles.

Une petite chambre connectée au cylindre permet à la fois d'injecter le carburant mais aussi de le mélanger à l'air de l'admission grâce à une forme spécifique en termes d'aérodynamisme (Figure 1.5).

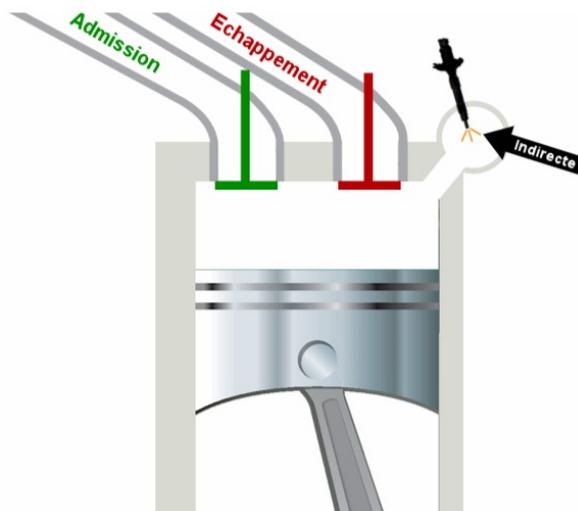


Figure 2.5. Injection indirecte sur moteur Diesel.

2.1.2.3. Injecteurs différents

La forme des injecteurs pour une injection directe et une injection indirecte est assez différente comme le montre la figure 1.6.

Voici les différences entre une version directe et une autre indirecte



Figure 2.6. Injecteurs pour injection directe et injection indirecte.

2.1.3. La suralimentation (Plus de détails dans le chapitre VI)

La suralimentation par turbocompresseur apporte également un gain de puissance ou une diminution de cylindrée à puissance identique ; par exemple, un moteur 1,6 litres turbocompressé (Mini Cooper S) obtient les mêmes performances de couple qu'une cylindrée de 2,5 litres atmosphérique (sans suralimentation).

Le turbocompresseur à faible inertie fonctionne alors à tous les régimes moteur et permet d'observer une caractéristique de couple pratiquement constante de 2000 à 5000 tr/min ; l'économie de carburant est alors de l'ordre de 10%.

2.1.4. Courbes d'iso-consommation

Pour un moteur à combustion interne, la quantité de carburant dépend de sa puissance, du couple demandé et de son régime en tours par minute. Les courbes d'iso-consommation indiquent les zones où le moteur est économe et celles qui engendrent une forte consommation.

Ces courbes permettent de comparer des motorisations différentes en fonction de la consommation spécifique C_{se} en g/kWh. La consommation d'un moteur thermique varie avec la vitesse de rotation (régime tr/min) et la charge (couple produit sur l'arbre moteur Nm)). Pour analyser la consommation de carburant d'un moteur, il est pratique d'utiliser un diagramme du type joint4 qui indique la consommation spécifique (g de carburant par kWh) pour chaque couple (Nm) et vitesse de rotation (tr/min). On observe sur un tel graphique appelé « cartographie moteur » qu'il existe plusieurs combinaisons possibles de couple et vitesse de rotation pour produire une même puissance (par exemple points de fonctionnement 1,2 et 3 du graphique joint). Sur le graphique joint, le point de fonctionnement 3 correspond à une efficacité énergétique de 33 % proche de la ligne de consommation minimale du moteur. À l'inverse, l'efficacité énergétique du point de fonctionnement 1 n'est que de 24 % et dans les zones de faible charge, elle est inférieure à 20 %.

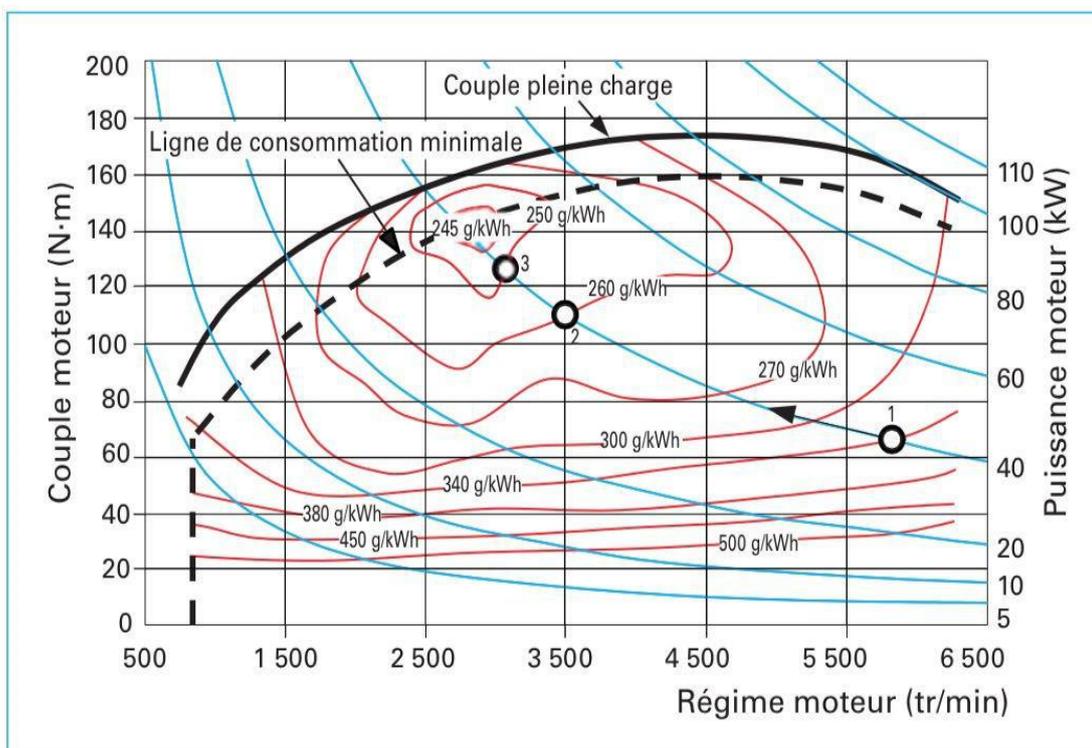


Figure 2.7. Cartographie d'un moteur indiquant la consommation spécifique en fonction du couple (Nm) et de la vitesse de rotation (tr/min)

2.2. Distribution variable

2.2.1. Définition

On appelle "distribution" l'ensemble des organes qui réalisent l'ouverture et la fermeture des conduits d'admission et d'échappement, et des éléments qui effectuent leur commande.

Le rôle de la distribution est de commander l'ouverture et la fermeture des soupapes, imposer leur instant de l'ouverture, l'amplitude et la durée du mouvement.

2.2.2. Différents types de distribution

2.2.2.1. Emplacement de l'arbre à cames

Deux solutions sont utilisées :

- L'arbre à cames est appelé latéral lorsqu'il est situé sur le côté du bloc moteur.
- Il est appelé arbre à cames en tête lorsqu'il est placé sur la culasse à proximité immédiate des soupapes.

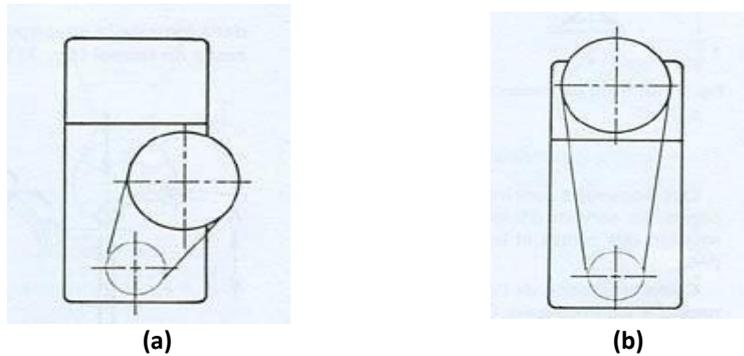


Figure 2.8. Emplacement de l'arbre à cames : a) arbre à cames latéral, b) Arbre à cames en tête

2.2.2.2. Entraînement de l'arbre à came

Dans tous cas c'est le vilebrequin qui assure l'entraînement de l'arbre à cames.

L'arbre à cames doit tourner deux fois moins vite que le vilebrequin car les soupapes ne doivent s'ouvrir qu'une fois par cycle.

Trois solutions sont utilisées:

- Les engrenages, utilisés particulièrement dans les moteurs Diesel
- Les pignons reliés par chaîne. Ce système est couramment utilisé dans les moteurs à arbre à cames latéral et dans certains arbres à cames en tête.
- Les pignons reliés par courroie crantée. Système de plus en plus répandu dans les moteurs à arbre à cames en tête. Son fonctionnement est plus silencieux et ne nécessite pas de système de lubrification.

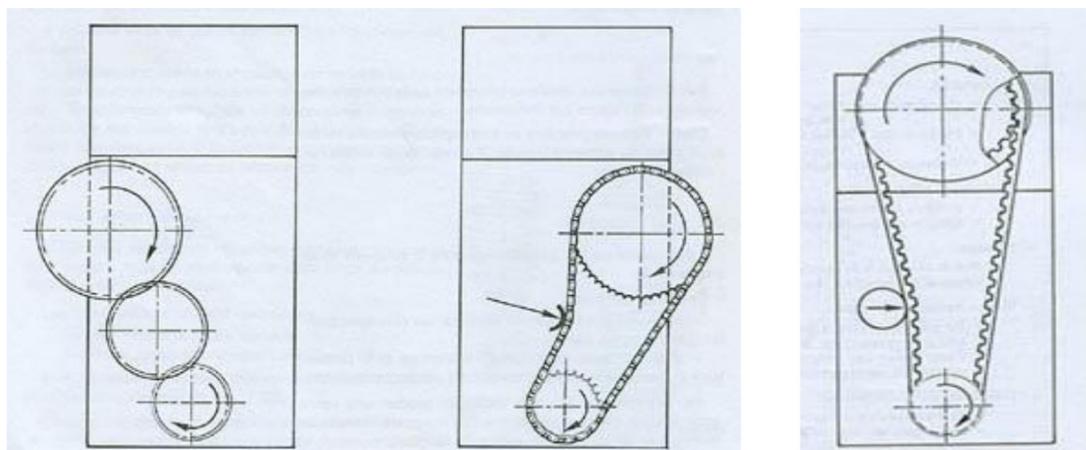


Figure 2.9. Entraînement de l'arbre à cames : a) Entraînement par engrenages, b) Entraînement par chaîne, c) Entraînement par courroie crantée



Figure 2.10. Distribution classique.

A. Distribution classique

La distribution permet de synchroniser le mouvement du vilebrequin avec celui des soupapes d'admission et d'échappement. Cela se produit donc par une courroie ou une chaîne qui relie le vilebrequin à l'arbre à cames.

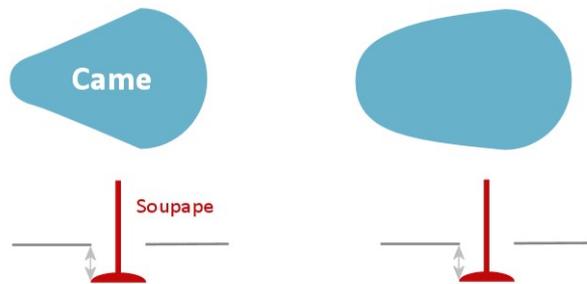
Cet arbre tourne alors au même rythme que le vilebrequin, les cames situées dessus viennent alors ouvrir temporairement les soupapes en les poussant (elles reviennent en position grâce à des ressorts).

Le degré et le temps d'ouverture sont donc relatifs à la forme des cames. Plus elles sont arrondies plus le temps d'ouverture sera long, plus elles sont longues plus l'ouverture sera grande.

Notions de base sur les cames

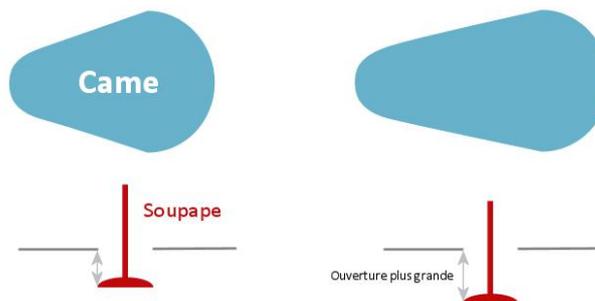
Selon la forme des cames, l'ouverture des soupapes sera différente.

Forme plus ou moins conique



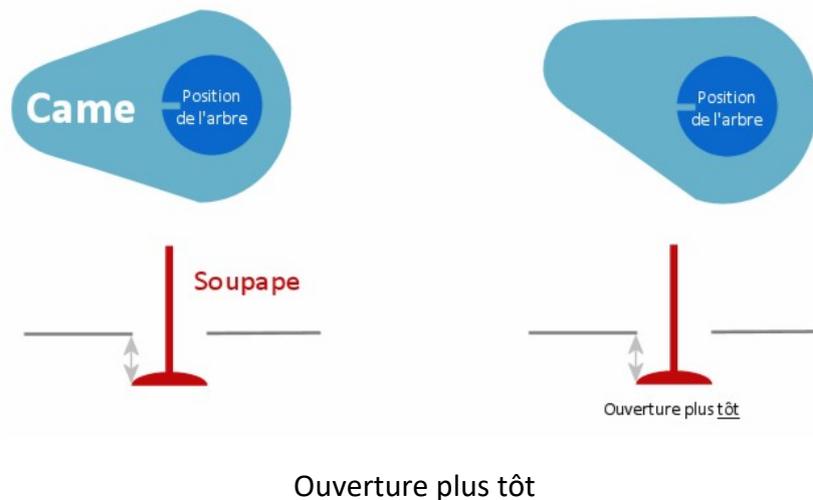
Ouverture plus longue dans le temps

Plus la came sera "pointue", moins la durée d'ouverture sera longue. En effet, la came de droite viendra forcément ouvrir la soupape sur une durée plus longue puisque son extrémité va être en contact plus longtemps (elle appuiera sur la soupape pendant une durée plus longue donc, elle sera donc ouverte plus de temps).



Ouverture plus grande

Si le bout est de la même taille mais que la came est plus grande, et bien la soupape sera poussée plus loin vers le bas (sans toutefois que la durée d'ouverture ne change).



Ici on décale juste la position de la came par rapport à l'arbre (d'où le petit repère placé sur l'axe de l'arbre pour le voir)

B. Distribution variable

Principe

La distribution variable consiste donc à pouvoir moduler les paramètres (pas forcément tous, cela dépend des systèmes) des soupapes d'admission et d'échappement (souvent que d'admission), à savoir :

- Moment d'ouverture des soupapes (plus ou moins en avance)
- Durée d'ouverture (plus ou moins longtemps)
- Degré d'ouverture (plus ou moins ouvert)

L'ouverture variable des soupapes est alors généralement produite par un circuit hydraulique qui vient faire bouger un élément intermédiaire situé entre les soupapes et les cames (culbuteur à plusieurs positions). On peut citer le ValveTronic (BMW) ou encore le système VTEC (Honda). Il existe aussi des systèmes qui rendent la poulie de l'AAC modulable au niveau de son axe afin de changer les moments d'ouverture (pas de culbuteur mobile ici), système VVT de Toyota.

Sur le système Valvetronic de BMW, on fait bouger la position des culbuteurs spécifiques grâce à un système de vis sans fin qui bouge un arbre (cet arbre modifie donc la position des culbuteurs sur toute la ligne). Le culbuteur est une pièce qui se situe entre l'arbres à cames et les soupapes (sorte de levier), en poussant l'un d'entre eux ça pousse aussi la soupape correspondante. Grâce à des culbuteurs ayant une forme spécifique, le fait de modifier leur positionnement permet alors de pousser les soupapes d'une manière différente. Ici on a deux culbuteurs en cascade, la came vient pousser un premier culbuteur, qui lui-même pousse le deuxième et qui lui-même pousse la soupape. Un système permet de faire varier la position initiale du premier culbuteur, ce qui aura comme effet de modifier toute la chaîne, entraînant alors une modification du temps d'ouverture des soupapes. Mais les manières de faire varier l'ouverture des soupapes peuvent être différentes.

De plus, certains systèmes ne vont jouer que sur le degré d'ouverture quand d'autres vont se focaliser sur le temps d'ouverture ou encore le moment.

On peut préciser par exemple que le VTEC va jouer sur la "grandeur" et le temps d'ouverture de la soupape, le VVT va lui décaler le moment d'ouverture / fermeture

Système Vanos.

Le VANOS (VARIABLE NOckenwelle Steuerung) est le système de distribution variable de BMW, complémentaire avec le Valvetronic. C'est le système le plus pointu et efficace sur le marché car il permet plus de possibilités au niveau de la gestion variable des soupapes

Son principe : Il consiste à ajuster la quantité de carburant/air ainsi qu'à gérer la sortie des gaz, cela en contrôlant le positionnement des **temps d'ouverture des soupapes** en fonction du régime moteur et de la position de la pédale d'accélération.

Par exemple : si on a besoin de puissance alors les soupapes resteront ouvertes légèrement plus longtemps afin d'envoyer plus de carburant dans le cylindre.

Ses avantages : Ce système améliore de manière significative le couple du moteur (à bas et moyen régime) et les émissions de gaz.

Son fonctionnement : Afin de modifier le temps d'ouverture des soupapes, le VANOS modifie la position angulaire des arbres à cames. Il va donc travailler sur l'avance ou le retard à l'ouverture ou la fermeture des soupapes. Le calculateur DME (Digital Motor Electronic) va collecter les informations du régime moteur et de la position de la pédale d'accélération.

Il va ensuite calculer l'avance ou le retard de l'arbre à came à avoir et le transmettre à un système hydraulique (un piston) qui va modifier mécaniquement la position de l'arbre à came en actionnant un pignon à denture hélicoïdale.

Système Valvetronic

Ce système est semblable au système Vanos, il a pour but de réduire l'effet de pompage lorsque le moteur est à bas régime (résultat des forces de pression et de dépression au-dessus du piston et qui s'opposent à la rotation du moteur).

Son fonctionnement. Un levier est placé entre l'arbre à cames et le culbuteur à rouleau habituel. À forte charge, ce levier est en permanence en contact avec la came. La descente de la soupape est de 9,7 mm. La soupape est ouverte pendant 250° de vilebrequin. À faible charge, le levier est éloigné de la came par l'action du moteur électrique (jaune). Le levier ne suit qu'une partie du mouvement de la came. Le temps d'ouverture de la soupape est plus court et son déplacement peut être réduit jusqu'à 0,25 mm (images dans le slide-show plus bas).

Ce fameux levier est commandé par un moteur électrique, via une vis sans fin et réagit en 0.3 secondes. Ce système pèse environ 5kg.

Certains modèles à 4 soupapes par cylindre ont une levée asymétrique entre les 2 soupapes pour améliorer l'effet tourbillon dans le cylindre.

Pour sécuriser le système, un papillon de valve est installé, notamment en cas de dysfonctionnement du système. BMW annonce une baisse de la consommation de 18% au ralenti et de 6% à 3 000 tr/mn.

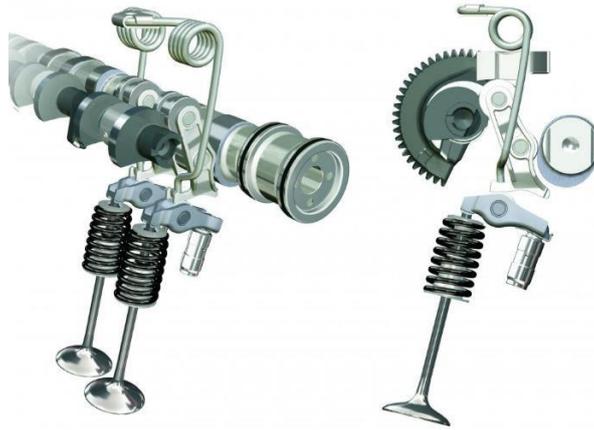
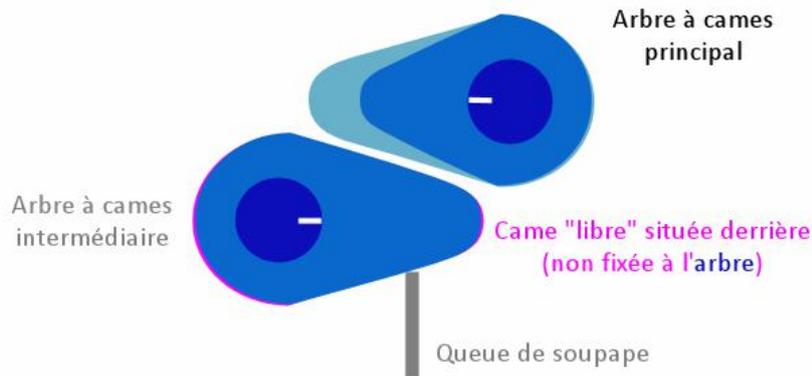


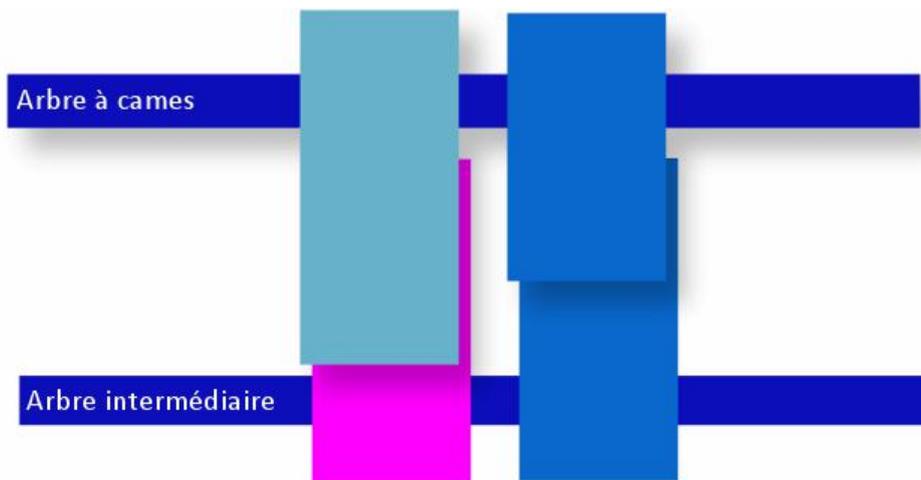
Figure 2.11. Système VALVETRONIC.

L'avantage du système VALVETRONIC est surtout mesurable en utilisation « faible charge ».

Système VTEC, Fonctionnement VTEC

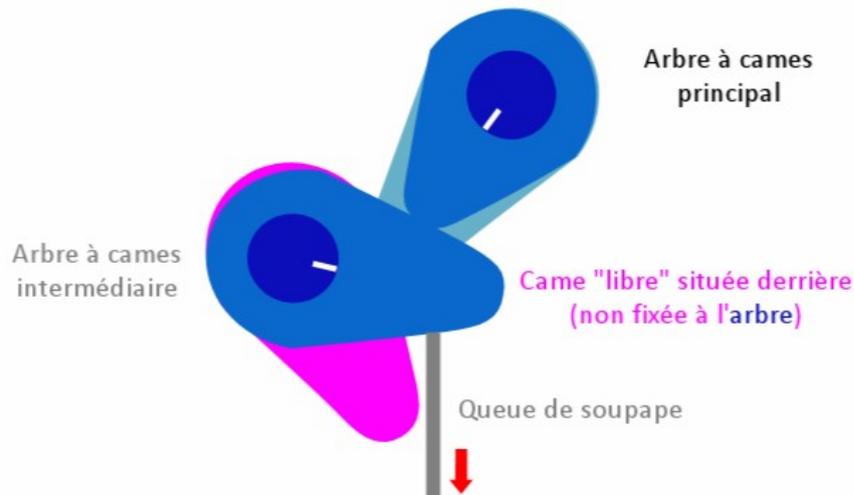


Vue de profil : les cames du "premier plan sont sur le même plan" et les deux du fond aussi (bleu clair et rose). Notez que l'arbre du haut tourne sur lui-même au même rythme que le vilebrequin (c'est un arbre à cames classique). Le deuxième du dessous ne tourne pas sur lui-même, il ne peut qu'être incliné vers le bas et revenir à sa position initiale.



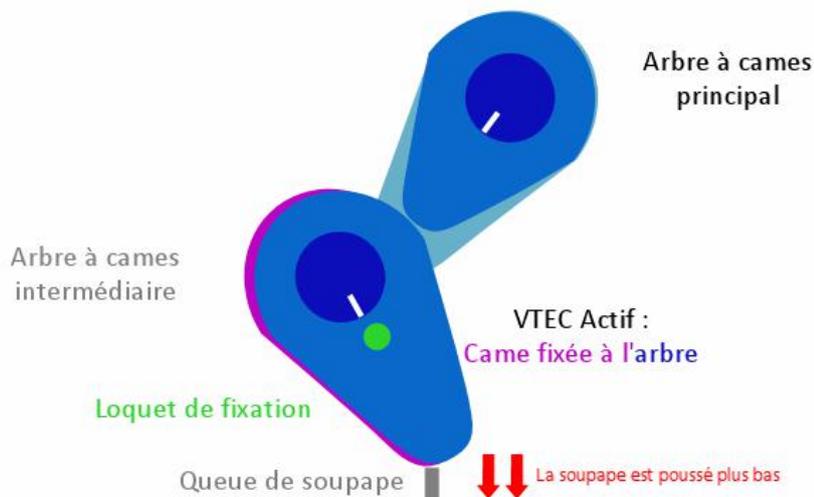
Vue de dessus pour mieux comprendre le premier schéma

Fonctionnement "normal"



Ici tout se produit comme avec un arbre à cames normal, on peut donc oublier les deux cames du fond (bleu clair et rose). La came du haut (AAC moteur) vient pousser la came de l'arbre intermédiaire du bas qui elle-même pousse la queue de soupape. La longue came du haut vient pousser assez bas la came rose du deuxième arbre. Mais comme elle n'est pas fixée à son arbre cela n'influe sur rien.

Avec distribution variable active



Ici les choses changent un peu, les deux cames de l'arbre du dessous (l'arbre intermédiaire) sont désormais fixées entre elles par un loquet. De ce fait, la came rose est en prise avec son arbre, résultat la longue came de l'arbre du haut (bleu clair) pousse la came rose qui entraîne donc en même temps la bleue située à ses côtés. Cela fait donc varier plus l'inclinaison du deuxième arbre de manière plus importante car la deuxième came du haut est plus longue.

2.2.3. Avantages de la distribution variable

Le fait de contrôler le degré et le temps d'ouverture selon le régime moteur permet beaucoup d'avantages ... En effet, le contrôle de la modularité du temps et du degré d'ouverture a des bienfaits sur la consommation, l'agrément et les performances.

Pour la consommation, on réduit l'effet de pompage des moteurs essence en permettant alors de fonctionner avec le papillon des gaz ouvert le plus possible. Car un moteur essence ne

fonctionne pas en excès d'air comme sur un diesel, il faut limiter l'arrivée d'air pour que le mélange ne soit trop pauvre. En permettant de réduire l'ouverture des soupapes d'admission on peut alors ouvrir plus grand le papillon (on limite donc la prise d'air par la soupape et non par le papillon). De plus, les ingénieurs se sont aperçus que le rendement moteur était un peu meilleur à haut régime quand les soupapes d'admission et d'échappement étaient ouvertes ensemble pendant un tout petit laps de temps. Cependant cette manière de fonctionner n'est pas possible sur les petits régimes, notamment le ralenti car l'aspiration n'est plus assez "brutale" pour exploiter ce phénomène.

La distribution variable par les cames permet donc d'avoir des soupapes qui s'ouvrent et se ferment à la suite dans les bas régimes mais qui en même temps peuvent avoir une ouverture commune (une toute petite partie du temps) à haut régime.

2.2.4. Inconvénients de la distribution variable

Le système apporte de la complexité au moteur et donc potentiellement plus de pannes ... De plus, tout le dispositif alourdit un peu le travail du vilebrequin qui est alors pénalisé par une petite résistance supplémentaire (très légère baisse du rendement), sauf sur le VVT de Toyota qui reste un module électrique qui fait varier la position de l'axe de l'arbre à cames.

2.3. Taux de compression variable

2.3.1. Rappels de base

Le fonctionnement d'un moteur met en jeu un ensemble mobile constitué d'un vilebrequin, de bielles et de pistons. Le piston monte et descend, alternativement : lorsqu'il est à sa position la plus haute, on dit qu'il est au point mort haut (PMH). Lorsqu'il est à sa position la plus basse, il est au point mort bas (PMB). La course C d'un moteur est la distance entre le PMB et le PMH.

L'alésage d'un moteur est le diamètre du cylindre. La cylindrée unitaire d'un moteur (notée V_{cyl} et représenté en jaune sur le schéma en dessous) est le volume du cylindre dont le diamètre est l'alésage et la hauteur la course. On a donc

$$V_{cyl} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot S \quad (1.1)$$

La cylindrée V_t est la somme de toutes les cylindrées unitaires.

On a donc Cylindrée $= V_t = V_{cyl} \cdot n$ (n : nombre de cylindres)

Lorsque le piston est au PMH, le volume de la chambre de combustion est appelé le volume mort (noté v et représenté en rouge sur le schéma en dessous).

Le taux de compression (qu'on appelle également rapport volumétrique de compression, RVC) se calcule de la façon suivante :

$$\varepsilon = \frac{V_{PMB}}{V_{PMH}} = \frac{V_{cyl} + V_c}{V_c} \quad (1.2)$$

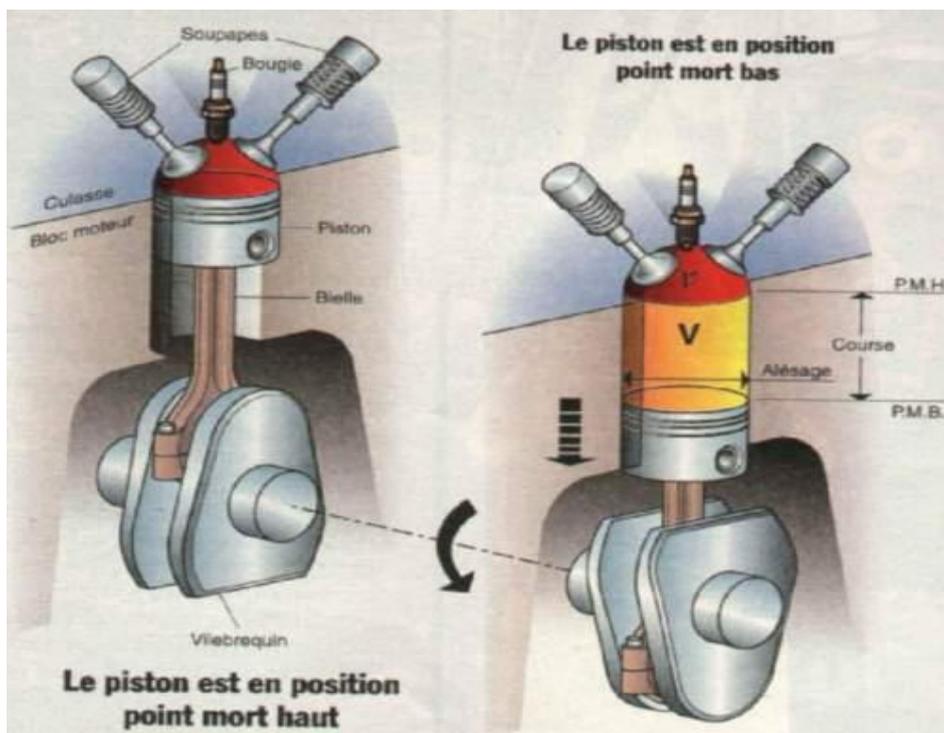


Figure 2.12. Cylindrée Moteur.

Pour une cylindrée donnée, le taux de compression est donc uniquement lié au volume mort. Plus ce dernier est petit, plus le taux de compression est élevé. Il est important de noter que tel qu'on l'a défini, le taux de compression est géométrique. Le taux de compression réel, qu'on appelle taux de compression effectif varie très souvent du taux de compression géométrique. En effet, la fermeture des soupapes d'admission n'a que très rarement lieu exactement au PMB. La cylindrée n'est donc pas totalement exploitée, le taux de compression effectif est donc inférieur au taux de compression géométrique.

Pour notre problématique, on s'intéresse uniquement au taux de compression géométrique.

2.3.2. Relation entre le taux de compression et le rendement du moteur

Petit rappel du cycle thermodynamique d'un moteur à allumage commandé, appelé cycle Beau-de-Rochas

1-2 : les soupapes d'admission sont ouvertes. Le piston descend du PMH vers le PMB, en aspirant les gaz frais. C'est l'**admission**. Arrivé au point 2, les soupapes d'admission se ferment.

2-3 : toutes les soupapes sont fermées. Le piston monte du PMB vers le PMH, en comprimant les gaz frais. C'est la **compression**.

3-4 : l'allumage se déclenche. C'est la **combustion**.

4-5 : toutes les soupapes sont encore fermées. La pression pousse le piston du PMB vers le PMH. C'est la **détente**.

5-6 : les soupapes d'échappement s'ouvrent.

6-1 : les soupapes d'échappement sont ouvertes. Les gaz sont refoulés par la montée du piston. C'est l'**échappement**.

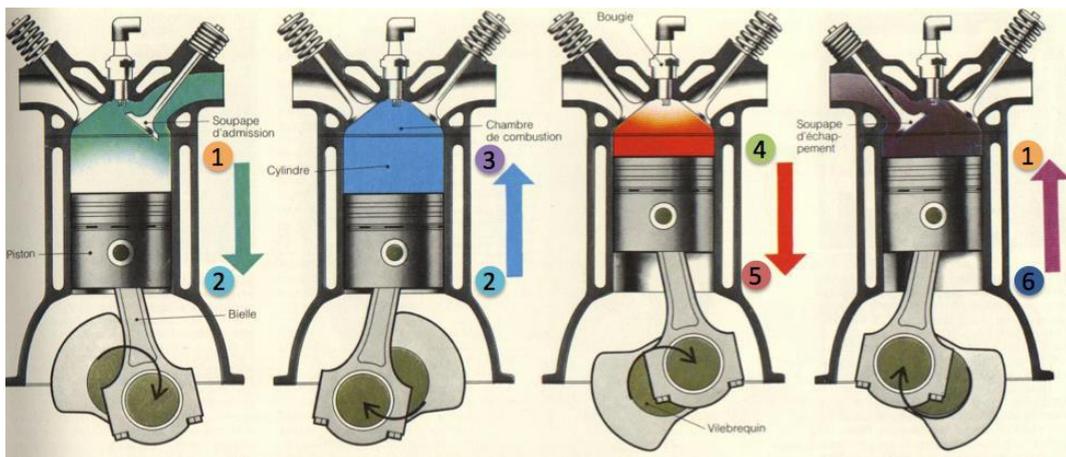


Figure 2.13. Différentes étapes de fonctionnement d'un M.C.I à 4 temps.

On retrouve ces différentes étapes sur le diagramme pression/volume ci-dessous. Le taux de compression a un impact sur les phases de compression (2-3) et de détente (4-5).

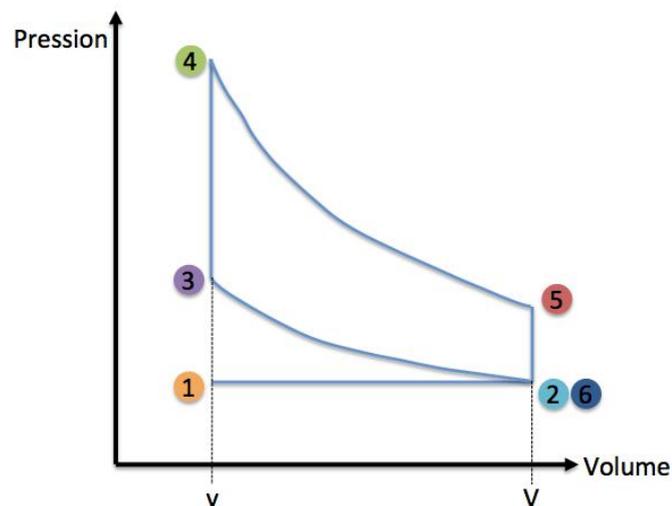


Figure 2.14. Cycle de Beau de Rochas dans le Diagramme PV.

2.3.2.1. Rendement du cycle Beau de Rochas

$$\text{Rendement thermodynamique théorique} = 1 - RVC^{1-\gamma}$$

Il fait apparaître uniquement 2 paramètres :

- Le taux de compression RVC
- Le coefficient adiabatique du gaz concerné

En fixant ce dernier coefficient, on peut donc facilement obtenir l'évolution du rendement thermodynamique théorique en fonction du taux de compression :

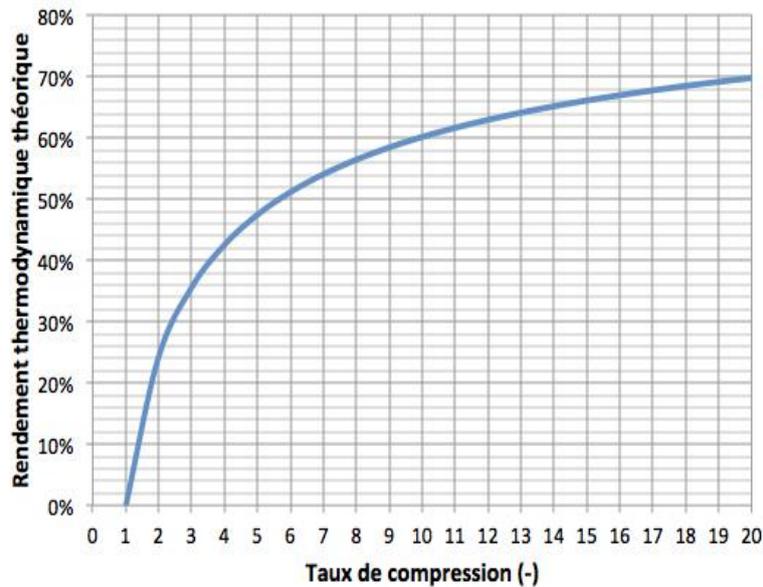


Figure 2.15. Variation du rendement de Beau de Rochas en fonction du taux de compression

On remarque que :

- Plus le RVC est élevé, plus le rendement est élevé
- À Le gain en rendement s'estompe lorsqu'on arrive vers des RVC élevés. Par exemple, en passant d'un RVC de 8 à 9, on passe d'un rendement de 56,5 à 58,5%, soit 2,0 points de rendement en plus. En passant d'un RVC de 14 à 15, le rendement passe de 65,2 à 66,1%, soit seulement 0,9 point de rendement en plus.

Quand on voit ce graphique, le choix est vite fait : on choisit un taux de compression élevé pour maximiser le rendement. Malheureusement, ce n'est pas si simple et un phénomène impose un compromis : c'est le **cliquetis**.

2.3.2.2. Le cliquetis

Le cliquetis est un phénomène d'auto-inflammation auquel le mélange air-carburant est soumis lorsqu'il se trouve dans des conditions de pression et de température élevées.

Avec la même température et la pression lors de la fermeture des soupapes d'admission, la pression et la température augmentent d'autant plus pendant la phase de compression que le RVC est élevé.

Sur les graphiques ci-dessous, est représentée l'évolution de la pression et de la température dans la chambre de combustion pendant la phase de compression pour différents RVC.

Par exemple en passant d'un RVC de 9 à 10, la pression au PMH augmente de quasiment 7 bar et la température de 31°C. On avance donc fortement le moment où le mélange va s'auto-enflammer.

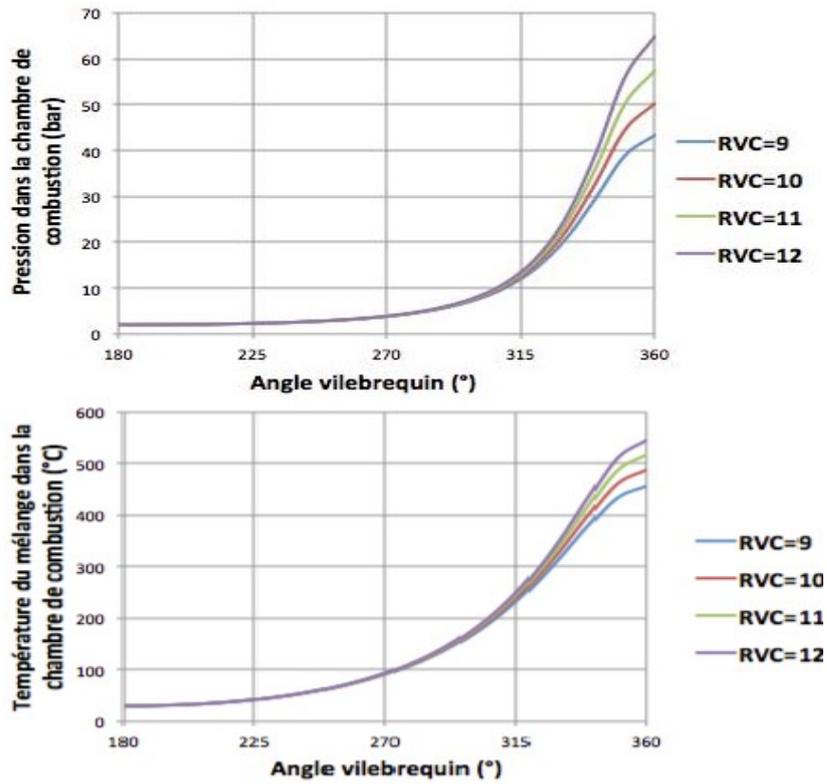


Figure 2.16. Évolution de la pression et de la température de différents RVC.

En fait le cliquetis est un combat entre la vitesse de combustion et l’auto-inflammation du mélange. Si la combustion est rapide : le mélange n’a pas le temps de s’auto-enflammer. Si la pression et la température sont trop élevées, une partie du mélange peut s’auto-enflammer avant que la flamme l’atteigne.

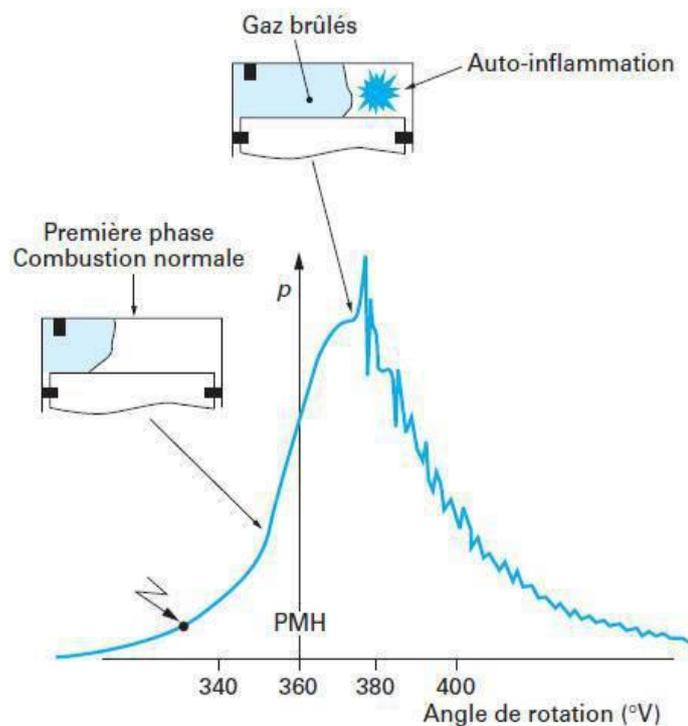


Figure 2.17. Phénomène du cliquetis.

Pour lutter contre le cliquetis, il y a de nombreuses possibilités. Certaines concernent la géométrie même du moteur (forme de la chambre de combustion, refroidissement, qualité du mélange, ...) d'autres concernent le réglage. Dans la dernière catégorie, **la plus simple est de retarder l'avance à l'allumage** : plus simplement, ça veut dire qu'on allume plus tard qu'on le ferait pour avoir un rendement optimal. Ça a pour effet de faire baisser la température et la température du mélange qui n'a pas encore brûlé lors de la combustion. Par contre, l'effet négatif est que le rendement est dégradé.

2.3.3. Choix du taux de compression

Un taux élevé est très bon pour le rendement pour les faibles charges par contre pour les charges motrices les plus élevées, on va avoir beaucoup de cliquetis et donc un rendement mauvais car on va être obligé de dégrader l'allumage. Si par contre on opte pour un taux de compression faible, on va avoir un rendement plutôt mauvais sur les faibles charges mais un rendement relativement bon sur les charges élevées.

L'idéal est donc de d'adapter le taux de compression pour chaque point de fonctionnement.

L'entreprise française MCE-5 propose un moteur MCE-5 (de l'anglais « Multi Cycle Engine - 5 parameters »), c'est un moteur à explosion, plus particulièrement un type de moteur à compression variable VCR (Variable Compression Ratio).

Il s'agit d'un moteur fonctionnant sur le principe d'un moteur à allumage commandé dont le volume de la chambre de combustion varie continûment en fonction de la charge du moteur. Pour cela, le moteur utilise un mécanisme classique bielle-manivelle associé à des engrenages à longue durée de vie, réalisant un piston à la cinématique parfaitement verticale, débarrassée des contraintes radiales, principale source de frottements.

2.3.4. Principe du taux de compression

Le moteur MCE-5 est un moteur à allumage commandé, fonctionnant grâce à la combustion du mélange air-essence selon le principe thermodynamique développée par Beau de Rochas. Il s'agit de surcroît d'un moteur VCR (Variable Compression Ratio) dont le taux de compression varie en fonction du régime moteur et de la charge en faisant varier le volume de la chambre de combustion 4.

Ces moteurs présentent un meilleur rendement thermodynamique en raison de l'augmentation de pression lors de la combustion. En effet, les lois thermodynamiques démontrent que plus la pression dans la chambre est élevée, meilleur est le rendement. Cependant, les moteurs à allumage commandé sont sensibles au phénomène de cliquetis, si bien qu'il est impossible d'augmenter indéfiniment la compression. Les moteurs classiques calculent le taux de compression en fonction de l'apparition du cliquetis à pleine charge et à haut régime. Les moteurs VCR permettent de compenser le faible taux de compression en bas régime et/ou à faible charge en faisant varier ce taux. La puissance et le couple à bas régime s'en trouvent par conséquent améliorés et les émissions de polluants réduits.

L'avantage du moteur MCE-5 par rapport aux autres systèmes de compression variable est qu'il n'y a plus aucune poussée latérale sur le piston, d'où un important gain de frottements et une usure moindre pour une meilleure fiabilité. La roue dentée faisant levier, la course du piston est le double de la course de la tête de la bielle, permettant un vilebrequin plus compact.

Le surcoût de ce type de moteur est généralement faible à négatif selon la configuration. Néanmoins, le système de crémaillère augmente les masses mobiles et l'inertie tandis que les efforts sur l'embellage sont doublés d'où d'importantes contraintes mécaniques et un doublement des pertes par frottement sur les paliers.

2.3.5. Ajustement du taux de compression

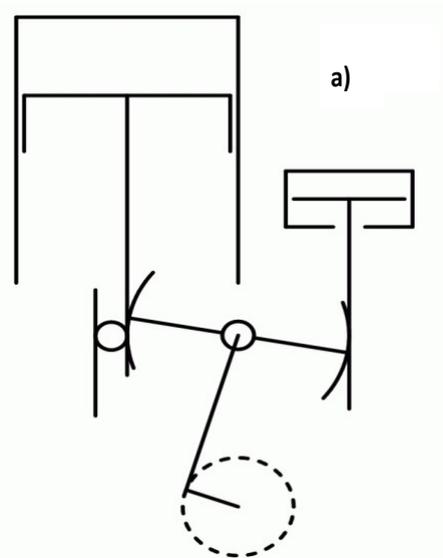
Le taux de compression, ajusté de manière conjointe à l'avance à l'allumage et à la limite du phénomène de cliquetis, varie de 1:7 à 1:18. Il varie de façon continue lors du fonctionnement du moteur et varie selon les cylindres avec une précision de l'ordre de 5/100 de millimètre avec une vitesse de changement d'une dizaine de millisecondes. Les moteurs MCE-5 sont à l'heure actuelle les seuls à proposer un taux de compression adapté à chaque cylindre et à chaque instant. Le choix continu du meilleur couple taux de compression/avance permet d'optimiser le rendement à tous les régimes et à toutes les charges moteur.

Deux méthodes sont prises en compte afin de régler initialement le taux de compression. La première consiste à mesurer la hauteur du Point Mort Haut du piston (PMH) via les puits de bougies dans la culasse tandis que la deuxième s'effectue par la mesure du volume de la chambre de combustion après assemblage. Cette dernière méthode présente l'avantage de pouvoir s'appuyer sur les dimensions réelles de la chambre.

Le vérin de commande, entouré d'huile moteur, est mû par une technique toute particulière. La pression des gaz ainsi que les inerties mises en jeu permettent le déplacement du vérin de commande. Des culbuteurs contrôlés électroniquement engendrent le déplacement des tiges de commandes et maintiennent ouverts ou fermés des soupapes, permettant ainsi le passage de l'huile de part et d'autre du vérin. Les forces exercées (pressions et inerties) sur l'huile déplacent de ce fait le vérin jusqu'à ce qu'elles se compensent de part et d'autre de ce dernier.

(Fig. 2.18. a) et b)

- À Gauche, piston classique du moteur à combustion interne.
- À Droite, l'ensemble cylindre-piston est un vérin hydraulique à double effet dont le mouvement règle le taux de compression dans le cylindre de gauche. En bas, système bielle-manivelle. Les mouvements de translation sont transformés en rotation, et vice-versa, par des crémaillères.



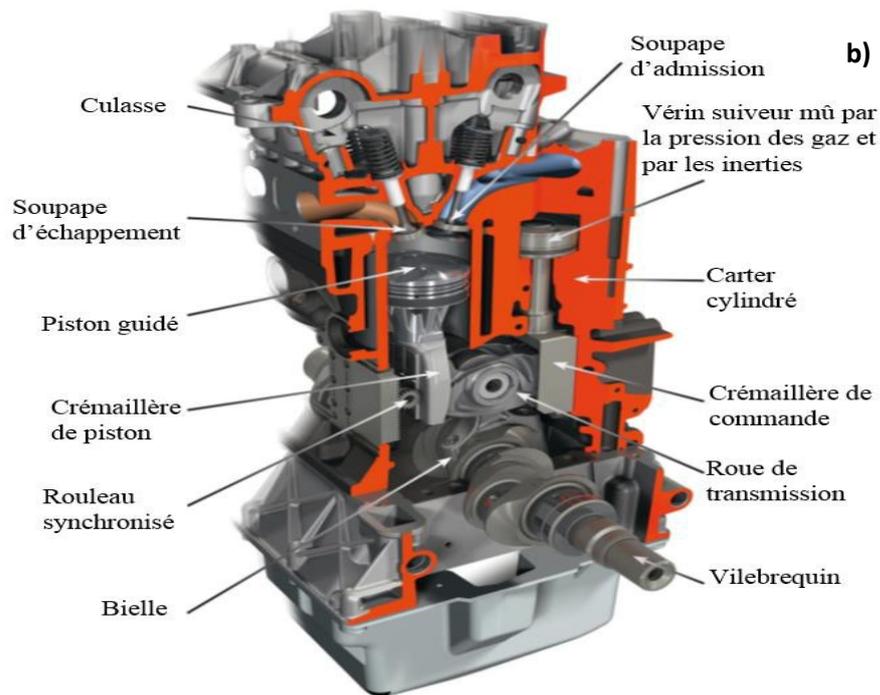


Figure 2.18. Principe du moteur MCE-5

2.4. Cycle Miller-Atkinson

Le Cycle d'Atkinson est un cycle thermodynamique utilisé dans un moteur à explosion. Il a été découvert par James Atkinson en 1882. Ce cycle qui utilise une détente plus grande que la compression perfectionne le rendement au prix d'une puissance plus faible. Il est utilisé dans les voitures hybrides modernes.

2.4.1. Conception

Le moteur à cycle d'Atkinson original permettait l'admission, la compression, l'explosion et l'échappement en un seul tour de vilebrequin. Il était conçu pour contourner les brevets d'Otto. Du fait de la conception spécifique du vilebrequin, le taux de détente est supérieur au taux de compression, ce qui perfectionne le rendement du moteur comparé à un cycle de Beau de Rochas conventionnel. Quoique la conception du moteur Atkinson ne soit désormais plus qu'une curiosité, le cycle thermodynamique avec détente prolongée retrouve aujourd'hui une certaine popularité du fait de son meilleur rendement.

2.4.2. Cycle thermodynamique parfait

Le cycle Atkinson idéal se compose de :

- Compression adiabatique
- Apport de chaleur à volume constant.
- Détente adiabatique.
- Restitution de la chaleur à pression constante.

2.4.3. Moteur à quatre temps à cycle Atkinson

Le cycle Atkinson peut aussi faire référence à un moteur à quatre temps dans lequel la soupape d'admission est tenue ouverte au-delà du point mort bas pour permettre l'éjection d'une partie du mélange auparavant admis. Le taux de compression est réduit (du fait qu'une partie de l'air est éjectée au lieu d'être comprimée) mais le taux de détente est inchangé. Ce qui veut dire que le taux de détente est plus élevé que le taux de compression. L'objectif du cycle Atkinson est d'abaisser tout autant qu'envisageable la pression de fin de détente, pour récupérer un maximum d'énergie mécanique.

L'inconvénient principal d'un moteur à quatre temps à cycle Atkinson est sa puissance réduite comparé à un cycle de Beau de Rochas classique car il admet moins d'air et par conséquent moins de combustible.

Ce type de fonctionnement auquel on ajoute un compresseur à l'admission forme le cycle de Miller dont le cycle thermodynamique est décrit comme suit (Fig. 1.21)

1-2 : Compression isentropique.

2-3 : Absorption de chaleur isochore, la pression augmente rapidement mais le piston ne bouge pas encore.

3-4 : Absorption de chaleur isobare, la combustion continue et le piston se déplace.

4-5 : Détente isentropique.

5-6 : Dégagement de chaleur isochore.

6-1 : dégageant de chaleur isobare.

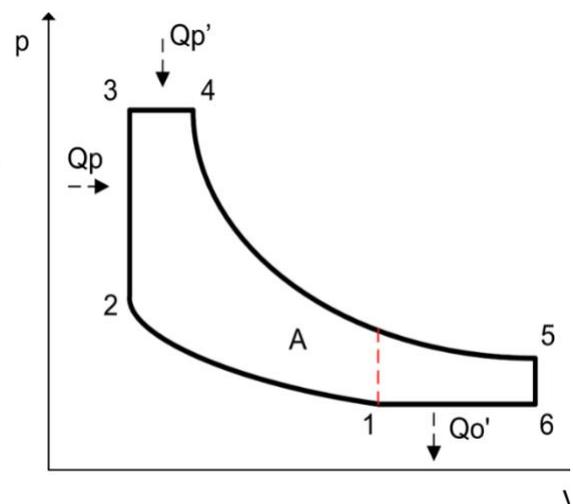


Figure 2.19. Cycle d'Atkinson idéal

Différentes étapes du cycle Atkinson

A) : Admission : tout se passe comme sur un moteur classique.

B) : Refoulement : la soupape d'admission se ferme avec un fort retard : une partie du mélange est donc refoulée dans la pipe d'admission (et y restera jusqu'au cycle moteur suivant).

C) : Compression : comme une partie du mélange a été refoulée, seule une fraction de la cylindrée est comprimée.

D) : Détente : les gaz de combustion sont par contre détendus sur la totalité de la course du piston.

E) : Echappement : tout se passe comme sur un moteur classique.

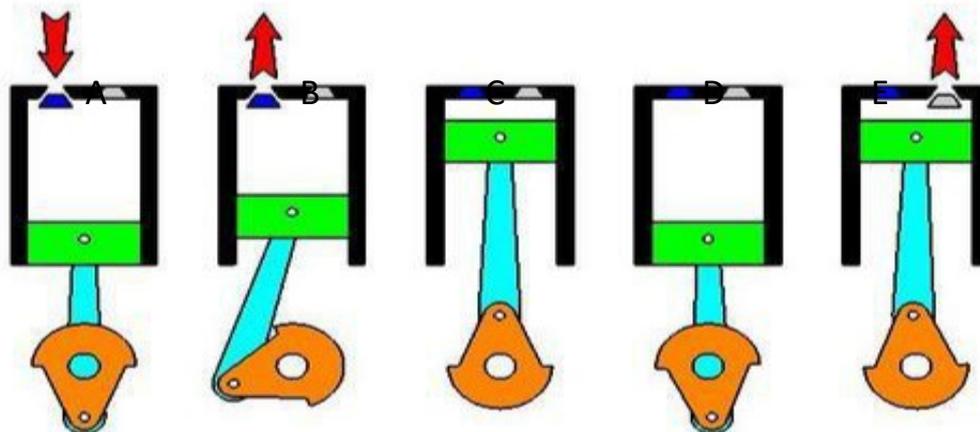


Figure 2.20. Différentes étapes du cycle Atkinson

2.4.4. Différence entre le cycle Atkinson et le cycle Otto

Dans le cycle Otto la soupape d'admission s'ouvre quand le piston est au PMH et se referme quand il est au PMB. Tandis que dans le cycle Atkinson, la soupape d'admission se ferme après le PMB, et refoule ainsi un peu de mélange dans le collecteur d'admission. Il faut donc moins de mélange, donc moins de carburant, pour obtenir un cycle complet.

La compression du moteur est aussi plus basse du fait que le volume d'air comprimé est moindre.

L'inconvénient principal d'un moteur à quatre temps à cycle Atkinson est sa puissance réduite comparé à un cycle de Beau de Rochas classique car il admet moins d'air et par conséquent moins de combustible.

2.5. Charge stratifiée.

2.5.1. Principe.

Le principe de la charge stratifiée s'applique aux moteurs à essence à injection directe. Il consiste à concentrer la vaporisation du carburant à proximité de la bougie et non dans l'ensemble de la chambre de combustion.

Ce mode d'injection permet de disposer, proximité immédiate de la bougie, d'un mélange suffisamment riche pour qu'il soit inflammable, et, dans le reste du cylindre, d'un mélange moins riche, si pauvre en carburant qu'il ne pourrait pas être utilisé dans un moteur traditionnel (Figure 1.23). Sur un moteur à charge stratifiée, la puissance délivrée n'est plus contrôlée par la quantité d'air admis, mais par la quantité d'essence injectée, comme sur un moteur Diesel.

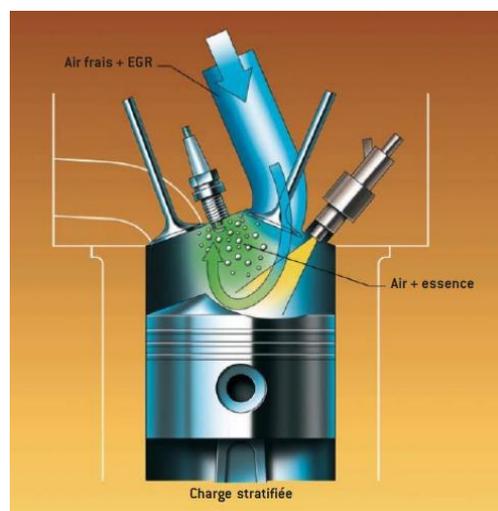


Figure 2.21. Principe de la charge stratifiée

La charge stratifiée signifie que le mélange air/essence dans le cylindre est réparti en plusieurs couches de richesses différentes.

Un mélange stratifié est un mélange hétérogène et structuré (organisé) globalement pauvre à très pauvre : $0.1 \ll R < 0.7$ (R est la richesse).

Ce mode de fonctionnement permet une réduction de la consommation du moteur qui peut atteindre 40% lorsqu'il tourne à faible charge.

2.5.2. Coefficient d'air et richesse

Pour l'essence, le rapport qui assure une combustion totale (rapport stœchiométrique) est d'environ 14,7 c'est-à-dire qu'il faut sensiblement 14,7 kg d'air pour brûler totalement 1 kg de carburant.

On définit les deux coefficients suivants :

$$1) \text{ Coefficient d'air: } \lambda = \frac{m_{\text{air}}}{m_{\text{carburant}}} / 14.7 \quad (1.3)$$

$$2) \text{ Richesse : } r = \frac{1}{\lambda} = \frac{m_{\text{carburant}}}{m_{\text{air}}} / 0.068 \quad (1.4)$$

- À la stœchiométrie

C'est-à-dire quand la combustion du mélange est totale, dans la mesure où les deux constituants, combustible et comburant, sont présents dans un rapport bien déterminé. Un tel mélange se nomme mélange stœchiométrique, dans ce cas on a : $r = 1$

- Pour un mélange pauvre, c'est-à-dire quand on a :

$\lambda > 1$ donc $r < 1$ dans ce cas le mélange contient d'avantage d'air que de carburant

Un mélange riche contient moins d'air

- La richesse =1 autour de la bougie.
- La combustion se propage ensuite sur les couches plus pauvres et génère une faible consommation (Zone2).
- La dernière couche peut être, le cas échéant, du recyclage de gaz d'échappement (Zone 3).



Figure 2.22. Propagation de la combustion dans le cas d'une charge stratifiée

Le mode stratifié ne fonctionne qu'à faible charge et faible régime. Dès qu'une puissance supérieure est demandée, la gestion du moteur passe en mode "mélange homogène".

L'injection est avancée et réalisée pendant l'aspiration de l'air d'admission.

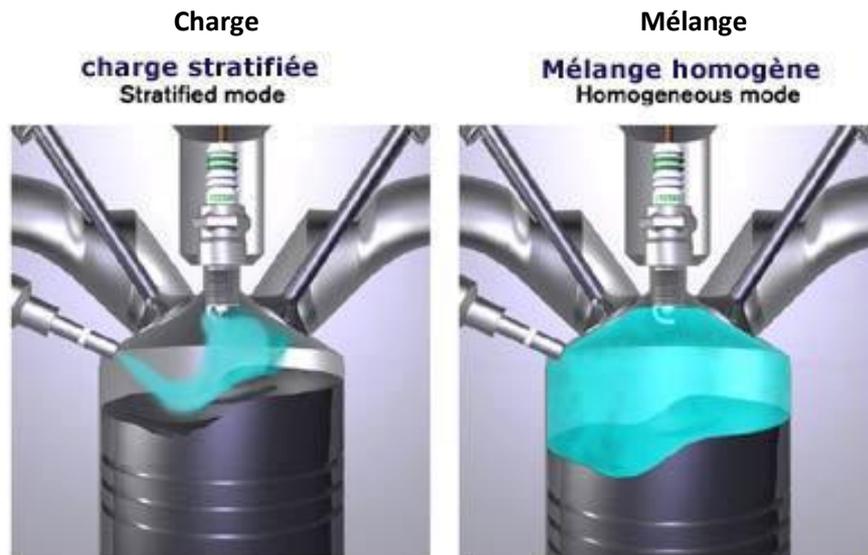


Figure 2.23. Les deux modes de fonctionnement : stratifiée et homogène

2.5.3. Avantages de la combustion stratifiée :

- Diminuer la consommation à faible charge
- Diminuer les rejets de polluants

2.6. Concept HCCI

2.6.1. Principe.

Le moteur avec le concept **HCCI** (*Homogeneous Charge Compression Ignition*), est un type de moteur à combustion interne dans lequel le mélange air-carburant est mélangé de la manière la plus homogène envisageable et est comprimé assez fortement pour atteindre le point d'auto-allumage.

Le moteur HCCI a des caractéristiques issues des deux types de combustion les plus connues : l'allumage commandé (par une ou plusieurs bougies) d'une charge homogène étant utilisée dans les moteurs à essence alors que l'auto-allumage d'une charge stratifiée est utilisé dans les moteurs Diesel. Comme dans les moteurs à allumage commandé d'une charge homogène, le carburant et l'oxydant (en général l'air) sont mélangés de manière homogène. Néanmoins, plutôt que d'utiliser une étincelle d'origine électrique pour enflammer un point du mélange, le mélange est comprimé pour atteindre une température et une densité assez haute pour que le mélange s'enflamme entièrement et spontanément.

Les moteurs à charge stratifiée fonctionnent selon le même principe de compression mais la différence est que la combustion démarre aux frontières entre l'air et le carburant injecté mais non vaporisé.

La combustion dans le moteur HCCI commence à plusieurs lieux à la fois, ce qui résulte en une combustion de tout le mélange air-carburant presque simultanée, il n'y a pas d'initiateur direct de la combustion. Le moteur présente dans ce cas plus de difficulté de contrôle de la combustion. Pourtant, les progrès des microprocesseurs et la meilleure compréhension physique des phénomènes de combustion permettent ce contrôle au point d'arriver à des

émissions polluantes semblables à un moteur à essence, tout en ayant l'efficacité plus élevée d'un moteur Diesel.

Les moteurs HCCI permettent d'arriver à des émissions de NO_x extrêmement faibles sans traitement post-combustion (par exemple grâce à un pot catalytique). Les hydrocarbures non-brûlés et le monoxyde de carbone émis restent à des niveaux élevés à cause du pic de température de combustion plus bas ; ces émissions doivent toujours être post-traitées pour garantir des émissions en-deçà des normes en vigueur fixées par les autorités.

2.6.2. Histoire

L'origine du moteur HCCI n'est pas récente, même s'il n'a pas été tout autant utilisé que le moteur à allumage commandé ou l'injection directe dans le moteur Diesel. Le moteur HCCI était déjà connu avant que n'apparaisse l'allumage électronique.

2.6.3. Méthode

Un mélange de carburant et d'air s'enflamme spontanément lorsque la densité et la température des réactifs est assez élevée. Ces deux conditions peuvent être remplies par plusieurs moyens :

- Un taux de compression élevé,
- Un préchauffage des gaz admis,
- L'admission forcée par suralimentation,
- La recirculation des gaz d'échappement.

Une fois le mélange enflammé, la combustion se déroule particulièrement rapidement. Quand l'auto-allumage a lieu trop tôt ou dégage trop d'énergie, la combustion est trop rapide ; alors, les pics de pressions dans le cylindre peuvent mener à la destruction du moteur. Pour cette raison, les moteurs HCCI fonctionnent généralement en mélange pauvre.

2.6.4. Avantages

- Le moteur HCCI est plus proche du cycle de Beau de Rochas parfait que le moteur à allumage commandé,
- Le mélange pauvre implique un rendement plus élevé que dans le moteur à allumage commandé,
- La charge homogène mène à des émissions de polluants moins élevées, les émissions de NO_x sont négligeables,
- L'absence de papillon évite les pertes de vannage (ou pertes par pompage).

2.6.5. Inconvénients

- Les pics de pression sont élevés,
- Il est complexe de contrôler la combustion,
- L'énergie est dissipée dans un temps particulièrement court,
- La puissance disponible est limitée,
- Les émissions d'hydrocarbures et de monoxyde de carbone sont élevées.

2.6.6. Contrôle de la combustion

Dans l'objectif d'une commercialisation, le contrôle précis de la combustion dans un moteur HCCI est d'une importance majeure mais ce contrôle est plus malaisé que celui d'une combustion classique.

Dans un moteur à essence, on utilise une étincelle pour enflammer le mélange air-carburant. Dans un moteur diesel, la combustion commence quand le carburant est injecté dans l'air comprimé.

Dans les deux cas, la combustion est contrôlée exactement dans le temps. Au contraire, dans un moteur HCCI, la combustion commence quand les conditions de densité et de température du mélange sont atteintes et il n'y a pas d'évènement initiateur contrôlable exactement.

La conception du moteur peut être faite avec pour objectif un début de combustion à un temps précis, mais ceci n'est envisageable que pour un point de fonctionnement spécifique du moteur, ce qui n'est pas compatible avec la volonté d'un conducteur qui souhaiterait pouvoir choisir le couple développé par le moteur, au travers de son action sur la pédale d'accélérateur.

Afin d'arriver à contrôler le moteur HCCI de manière dynamique, c'est-à-dire de pouvoir choisir le couple développé par le moteur, le dispositif de contrôle du moteur doit pouvoir changer les conditions qui initient la combustion ; cela se fait grâce au contrôle du taux de compression, de la température et de la pression des gaz admis et de la quantité de gaz recirculés.

2.7. Concept PCCI

Dans la combustion HCCI, l'air et le carburant entrent dans la chambre de combustion et sont comprimés jusqu'au point d'auto-inflammation. Tandis que dans la combustion PCCI le carburant est injecté en course de compression et donc nous avons l'hybride de HCCI et la combustion diesel. Dans la combustion PCCI, nous pouvons utiliser plus EGR que dans HCCI.

PCCI est l'hybride de la combustion HCCI et diesel, a plus de contrôle sur la combustion / allumage et le taux de dégagement de chaleur avec moins de NO_x et émission de suie car la charge prémélangée peut être contrôlée avec différents mélanges de carburant pour obtenir des résultats optimaux.

Pour obtenir une efficacité élevée, il faut avoir une combustion CI. Les moteurs à allumage par compression actuels utilisent du carburant diesel qui s'enflamme très rapidement après son injection dans le cylindre avant qu'il ne se mélange à l'oxygène dans le cylindre, ce qui provoque des suies et des NO_x élevés à l'échappement. La combustion PCCI est un moyen pratique d'obtenir de faibles émissions de NO_x et de faibles suies dans les moteurs à allumage par compression. Les émissions de NO_x peuvent être réduites en réduisant la température de combustion. La formation de suie peut être évitée si le rapport d'équivalence (rapport combustible sur oxygène rapporté au même rapport dans les conditions stœchiométriques) est inférieur à 2 environ. La suie moteur reflète l'équilibre entre la suie formée et la suie oxydée dans le cylindre. Dans les moteurs HCCI, les mélanges très pauvres garantissent une faible teneur en NO_x et une faible teneur en suie. En effet, dans les moteurs HCCI, le rapport d'équivalence (charge à une vitesse donnée) augmente, les NO_x (et le dégagement de chaleur) augmentent et deviennent trop élevés. De plus, les moteurs HCCI n'ont aucun contrôle en cours sur le phasage de la combustion.

Dans les moteurs diesel (CI pratiques). Les NO_x peuvent être réduits en utilisant la vanne EGR. Cependant, si on utilise la vanne EGR, l'oxydation de la suie est inhibée et la suie du moteur va augmenter. En combustion CI (PCI) prémélangée, si l'injection finale, qui contrôle le phasage de la combustion, est terminée suffisamment avant le début de la combustion (délai d'allumage élevé), la formation de suie peut être évitée et la vanne EGR peut être utilisé pour contrôler les NO_x. La combustion PCI conventionnelle du carburant diesel n'est possible qu'à des charges très faibles. Augmenter la pression d'injection ou réduire le l'indice de cétane du carburant facilite la combustion PCI. *(L'indice de cétane évalue la capacité d'un carburant à s'enflammer sur une échelle de 0 à 100. Il est particulièrement important pour les moteurs Diesel où le carburant doit s'auto-enflammer sous l'effet de la compression. Un carburant à haut indice de cétane est caractérisé par sa facilité à s'auto-allumer. L'indice de cétane est au moteur Diesel ce que l'indice d'octane est au moteur à essence. Toutefois, ils décrivent des qualités de carburant radicalement opposées, adaptées au type de moteur. Si le premier décrit une capacité d'auto-inflammation recherchée par le moteur Diesel, le second décrit une capacité de résistance à la détonation recherchée par le moteur à essence. La définition a été posée par Wilfrid de Nercy, ingénieur chez Shell, en 1958. On dit qu'un carburant a un indice de cétane de x , lorsque celui-ci a le même pouvoir d'auto-inflammation qu'un mélange constitué de $x\%$ en volume de n -cétane et $(100-x)\%$ d'alpha-méthyl naphthalène. Un additif pour carburant, le Tétranitrométhane peut améliorer l'indice de cétane du fuel-diesel.)*

En résumé, dans la combustion PCCI (ou PCI), on essaye d'obtenir les avantages de la combustion HCCI (faible NO_x, faible teneur en suie et rendement élevé) tout en conservant le contrôle sur la phase de combustion. Le carburant et l'oxygène doivent être suffisamment prémélangés pour obtenir ces avantages, mais ils ne doivent pas être entièrement prémélangés. L'inhomogénéité du cylindre obtenue avec une injection tardive permet au moteur de fonctionner dans des conditions où la combustion HCCI ne serait pas possible.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Technique de l'ingénieur Caractéristiques et similitude des turbomachines hydrauliques par André L. JAUMOTTE et al.
2. Modélisation du moteur à allumage par compression.MA03. Polycopié Ecole Militaire Polytechnique
3. STI2D-EE2-1- Mobilité automobile – Enjeux énergétiques.
4. Modélisation 0D/1D de la Combustion Diesel du Mode Conventionnel au Mode Homogène. THÈSE « Nicolas BORDET » UNIVERSITÉ D'ORLÉANS
5. www.fiches-auto.fr/articles-auto/fonctionnement-difference-entre-injection-directe-et-indirecte.php.
6. https://fr.wikipedia.org/wiki/Consommation_de_carburant_par_les_voitures.
7. www.fiches-auto.fr/articles-auto/fonctionnement-soupapes-et-distribution-variable-valvetronic-vtec-vvt-etc.php.
8. <https://theautomobilist.fr/technique/moteur-taux-de-compression-variable-95802>.
9. https://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_MCE-5.
10. http://www.super-soupape.com/moteur_hcci.php.