



## Info Tech

# Les nouveaux modes de combustion (partie 1)

(et leur contribution à la dépollution des moteurs)

## Préambule

Beaucoup d'articles citent actuellement des nouveaux procédés de combustion, le plus fréquemment sous l'appellation « HCCI ou CAI », et leur attribuent des propriétés spectaculaires en terme de réduction des oxydes d'azote et des particules sans perte de rendement. Tous les constructeurs cherchent activement à mettre au point des produits commerciaux utilisant ces procédés. Ils pourraient apparaître sur le marché à l'horizon 2010 environ.

Il est à noter que **Honda** est le seul constructeur à avoir finalisé un moteur 2T utilisant un procédé de type CAI (alors nommé ARcombustion). Des prototypes (EXP2) engagés au PARIS-DAKAR 1995 ont servis à la validation du concept, puis il a été appliqué sur une moto (CRM250AR) en 1998 et sur des scooters (125 et 150) dont la diffusion s'est limitée au Japon.

## Différentes appellations

Tous les procédés actuellement développés s'appuient sur le même principe : ils cherchent à produire l'inflammation spontanée d'un mélange homogène par la compression de celui-ci.

Les difficultés sont la préparation de ce mélange sur un temps très court, pour les moteurs de type diesel, puis le contrôle de l'avance d'auto inflammation et du déroulement de la combustion. Ces difficultés sont traitées de différentes manières et chaque nouvelle recherche créant une avancée signale sa propriété intellectuelle par une appellation qui lui est propre.

En voici quelques-unes :

- **CAI** : **C**ontrolled **A**uto **I**gnition. C'est une appellation (origine Ford) qui concerne plutôt les moteurs à essence (l'appellation à allumage commandé devient alors impropre) et je l'emploierais de manière générique dans tout mon document.
- **HCCI** : **H**omogeneous **C**harge **C**ompression **I**gnition. C'est le nom le plus cité pour les applications diesel et je l'emploierais de manière générique dans tout mon document.
- **HCDC** : **H**omogeneous **C**harge **D**iesel **C**ombustion.
- **UNIBUS** : **U**niform **B**uckly combustion **S**ystem. (origine Toyota).
- **PREDIC** : **P**REmixed lean **D**iesel **C**ombustion.
- **MULDIC** : **M**ULTiple stage **D**iesel **C**ombustion.

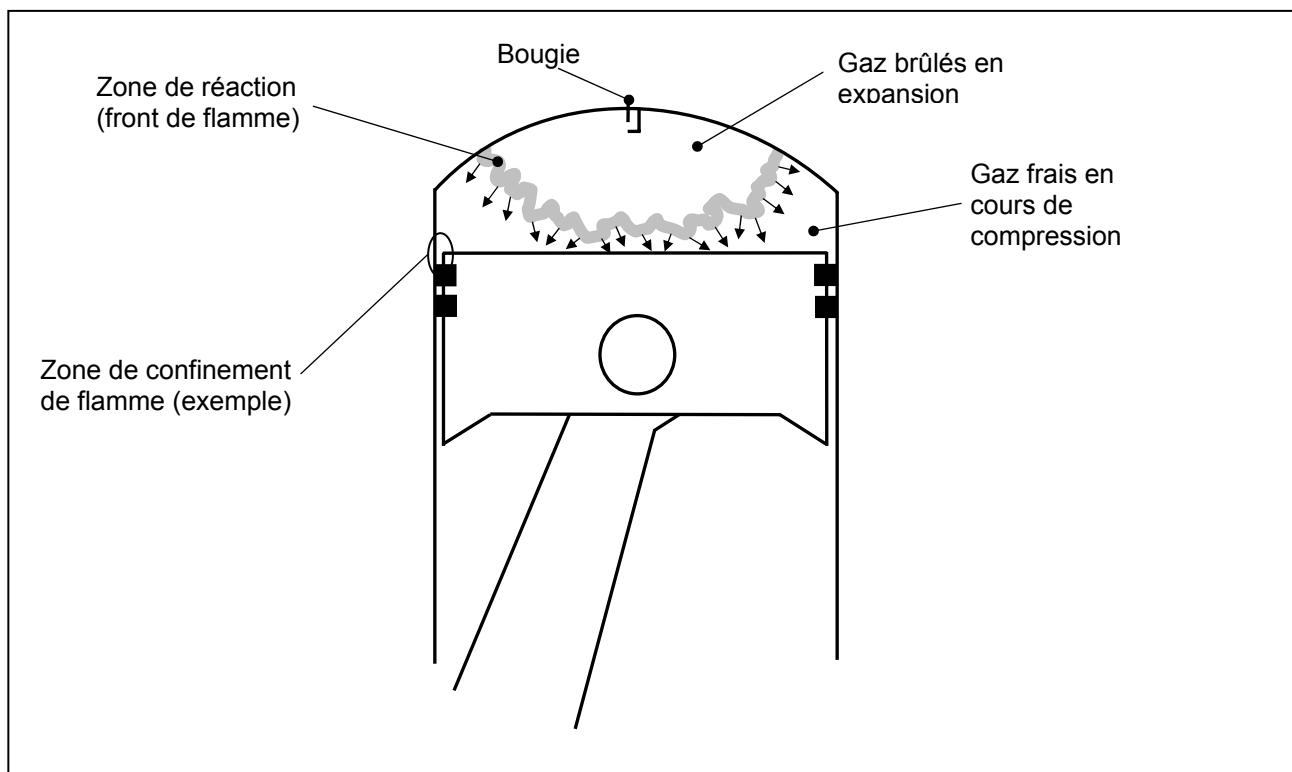
- **PCCI** : Premixed Charge Compression Ignition (origine Mitsubishi).
- **MKconcept** : Modulated Kinetics concept (origine Nissan).
- **HiMiCS** : Homogeneous charge intelligent Multiple injection Combustion System (origine HINO MOTORS entreprise japonaise de VI et marine).
- **ATAC** : Active Thermo Atmosphere Combustion (utilisée pour les moteurs essence moto).
- **ARC** : Activated Radicals Combustion (origine Honda, utilisée pour les moteurs essence moto).
- **TS concept** : initiale des deux entreprises Toyota et Soken l'ayant développé.
- **NADI™** : Narrow Angle Direct Injection (procédé développé par l'IFP ).

L'énumération s'arrête ici mais il est certain que la liste va encore s'allonger dans les années à venir.

## Rappels sur les modes de combustions « traditionnels »

### Combustion essence

La flamme est dite de prémélange car la richesse est supposée homogène en tout point : le front de flamme (zone de réaction séparant les gaz frais des gaz brûlés) se déplace en consommant les gaz frais et en étant propulsé par l'expansion des gaz déjà brûlés. La combustion dans ces conditions produit une température de flamme élevée qui dépasse 2000 K.



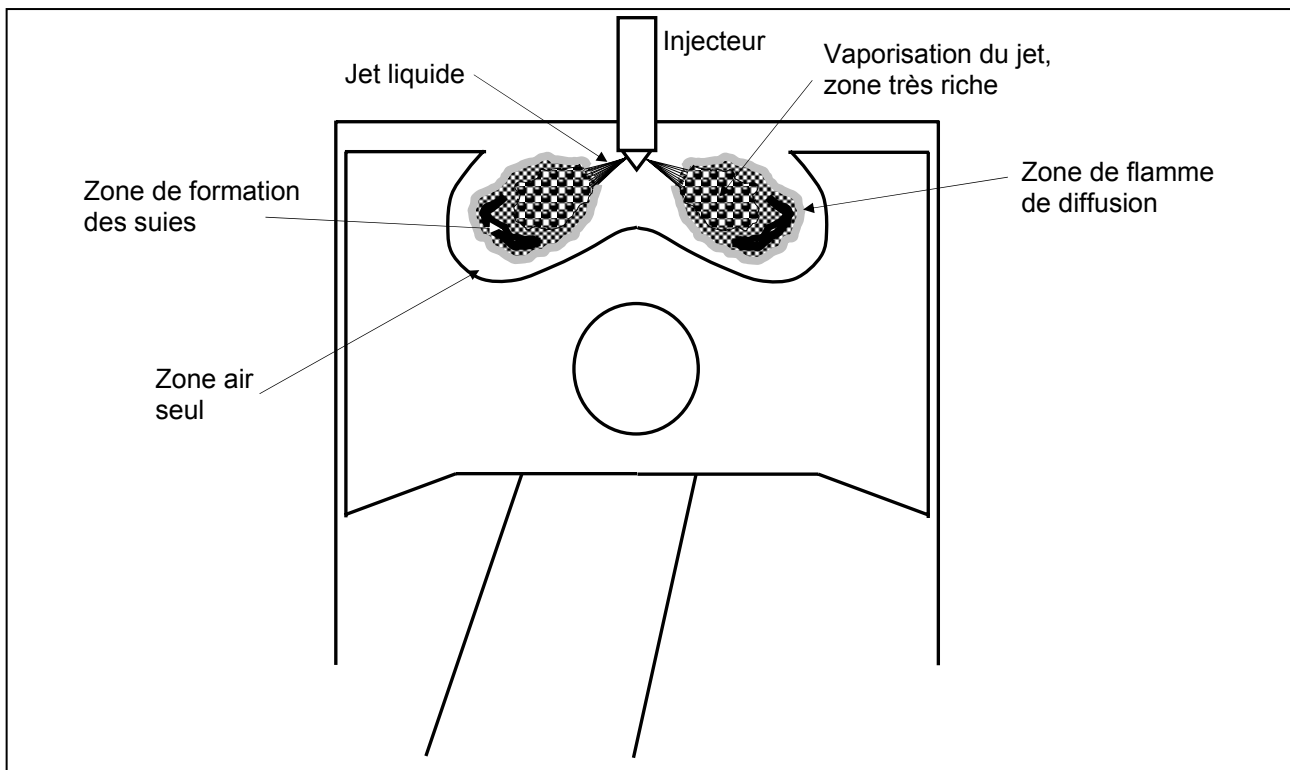
Les conséquences de ce mode de combustion sont principalement :

- Une **production d'oxydes d'azote** dans la zone de réaction à cause des températures élevées.

- **Une production d'imbrûlés** par extinction de la flamme au contact de la paroi (qui capte la chaleur et les réactifs) ou dans des zones trop confinées de la chambre (filetage bougie, jeu piston-cylindre au dessus du segment de feu, ...).
- **Des pertes de rendement dues à l'étalement de la combustion** ; malgré la vivacité de la flamme de prémélange, la combustion complète est assez longue (typiquement 30 à 60 °vilebrequin) car le front de flamme présente une surface quasi-nulle au démarrage de la flamme et de même lorsqu'il s'éteint en rencontrant les parois sa surface se réduit pour tendre vers zéro. La vitesse de combustion est donc faible au début et à la fin de la réaction. Cet étalement nous écarte de l'hypothèse du cycle Beau de Rochas selon laquelle la combustion se déroule à volume constant et il en résulte une perte de travail mécanique sur le piston.
- **Des pertes de rendement dues à la température élevée** de la charge gazeuse qui produit un flux de chaleur important sur les parois de la chambre (d'autant plus que la combustion sera étalée).

## Combustion diesel

L'injection à très haute pression pulvérise finement le carburant qui progresse dans la chambre sous la forme d'un jet de liquide immédiatement vaporisé par la température de fin compression. La partie liquide du jet continue sa pénétration pendant que la partie vapeur est entraînée par le swirl<sup>(1)</sup> et se mélange à l'air. Toute la partie vaporisée et mélangée à l'air se trouve en situation de prémélange et brûle très brutalement dès que le délai d'inflammation est écoulé ; la montée en pression rapide qui en résulte provoque le bruit typique du diesel.



Par la suite la combustion se poursuit en étant limitée dans ses réactions par la surface de mise en contact du carburant et de l'air résiduel : la réaction se produit uniquement à

<sup>(1)</sup> SWIRL : mouvement de rotation de la masse d'air autour de l'axe du cylindre dans le bol du piston.

l'interface carburant-air elle débute en situation de richesse stoechiométrique et s'étend jusqu'à des richesses de 0,3. Cette **flamme est dite de diffusion**.

Cette phase de combustion diffusante brûle la majeure partie du carburant, sa vitesse de combustion dépend surtout du taux d'introduction du carburant.

Les conséquences de ce mode de combustion sont principalement :

- Une **production élevée d'oxydes d'azote** qui se forment d'abord durant la combustion de prémélange qui est très violente, alors que près du PMH la température est déjà élevée ; puis la combustion diffusante produit elle-même des températures assez élevées et en présence d'oxygène en excès (2 facteurs générateurs de NO<sub>x</sub>, la température étant prépondérante<sup>(2)</sup>).
- Une **production importante de particules** qui se forment principalement pendant la combustion diffusante. Durant cette phase le front de flamme est presque stoechiométrique mais en excès d'oxygène sur un côté et en excès de carburant sur l'autre. C'est dans la zone chaude en excès de carburant que vont se former les suies qui sont un aggloméré de petites sphères de carbone (environ 0,1 µm de diamètre). Heureusement la majeure partie de ces suies sera oxydée (en CO<sub>2</sub>) grâce à l'excès d'O<sub>2</sub> dans la chambre, si la température y reste suffisamment élevée. Le reste, moins de 10 %, sera évacué à l'échappement et responsables des émissions de particules (environ 1 µm de diamètre moyen) du moteur.
- **Des pertes de rendement** dues à la **température élevée** (id° moteur essence) car le cycle diesel est réalisé avec des conditions plus sévères qu'en allumage commandé
- **Des pertes de rendement** dues à **l'étalement de la combustion** (id° moteur essence) ; bien que la durée de combustion puisse être réduite en augmentant le taux d'introduction du gazole, la limitation des pressions maxi dans la chambre impose de prolonger la combustion.

## Synthèse polluants et rendements

Les paramètres de combustion à améliorer pour réduire les défauts énumérés précédemment sont :

- **Réduire les températures** et les vitesses de réaction pour éviter la formation des NO<sub>x</sub>. Abaisser la vitesse de réaction peut se faire par **mélange pauvre** en combustion essence homogène mais pas en flamme de diffusion (diesel). La solution est alors une **dilution par des gaz d'échappement**, contenant très peu d'oxygène. Dans les deux cas l'objectif est de réduire la vitesse de réaction<sup>(3)</sup> pour abaisser la température de flamme.
- **Réduire les températures moyennes** de la charge au voisinage du PMH pour minimiser les pertes de chaleur aux parois qui vont se traduire par une perte de travail mécanique sur le piston.

Il faut rappeler qu'il n'y a pas égalité entre perte de chaleur et perte de travail sur le cycle car la perte de travail est d'autant plus importante que la chaleur est cédée près du PMH (à la limite, de la chaleur perdue à la paroi au PMB n'entraîne aucune perte de travail).

<sup>(2)</sup> Voir infotech n°2 pour la formation des oxydes d'azote

<sup>(3)</sup> Cette vitesse de réaction est caractérisée par la **vitesse fondamentale laminaire** qui est de l'ordre de 0,5 m/s pour les hydrocarbures usuels à la stoechiométrie et chute rapidement avec l'excès d'air ou/et la dilution par RGE. Cette valeur paraît très faible mais la turbulence dans la chambre permet d'accélérer la combustion en plissant et étendant le front de flamme.

- **Réduire la durée de combustion** pour se rapprocher de l'hypothèse de combustion à volume constant ce qui va à l'encontre des remarques précédentes car il faudrait pour cela accélérer les réactions, et les pressions et températures au PMH se verraient augmentées

L'idéal recherché est donc une **combustion rapide et « froide »** ce qui est contradictoire dans les configurations actuelles.

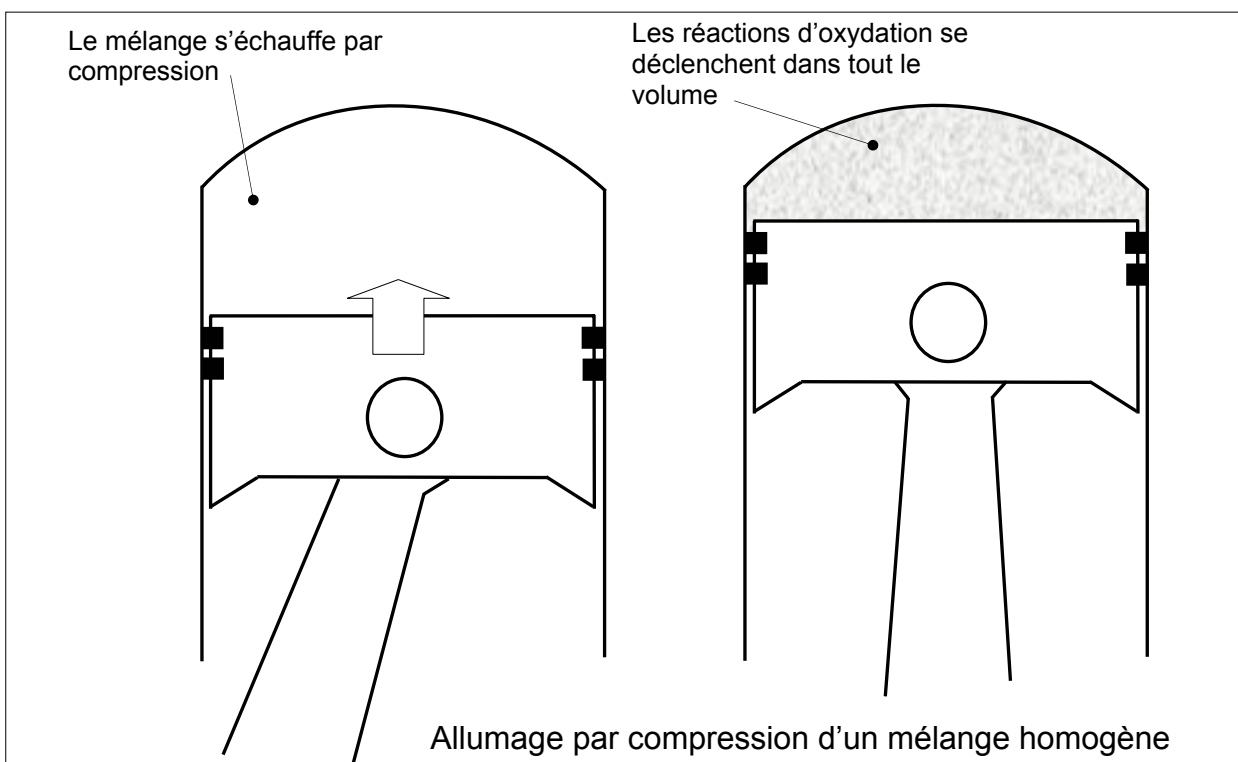
## La combustion par auto inflammation contrôlée

### Principe et avantages potentiels

Le principe est de préparer un mélange homogène par injection directe ou indirecte puis d'amener celui-ci dans des conditions d'auto inflammation par la compression qui échauffe le mélange. L'instant d'inflammation doit être contrôlé pour que le phasage de la combustion reste favorable au rendement moteur.

Nous pouvons nous attendre, si les conditions de richesse et de température sont homogènes dans la chambre, à ce que toutes les parties du mélange soient simultanément à leur instant d'inflammation (lorsque le délai d'inflammation sera écoulé).

La combustion sera alors radicalement différente d'une flamme de prémélange car il n'y aura pas de front de flamme : chaque molécule de carburant sera oxydée localement puisque l'O<sub>2</sub> et l'énergie d'activation sont disponibles en tout point de la chambre. Les températures maximales atteintes resteront beaucoup plus basses que les températures de front de flamme et la réaction exothermique se fera en masse de l'état initial jusqu'à l'état final sans pic de température. Les températures resteront en tout point inférieures à 1000K.



Le phénomène de flamme de diffusion est également supprimé ce qui fait disparaître la formation des suies et les émissions de particules qui en résultent. A condition que le mélange n'atteigne pas des richesses excessives.

Il n'y a plus de trajet de front de flamme à travers la chambre puisque la flamme est présente partout simultanément ce qui permet une combustion beaucoup plus rapide et peut avoir un impact positif sur le rendement.

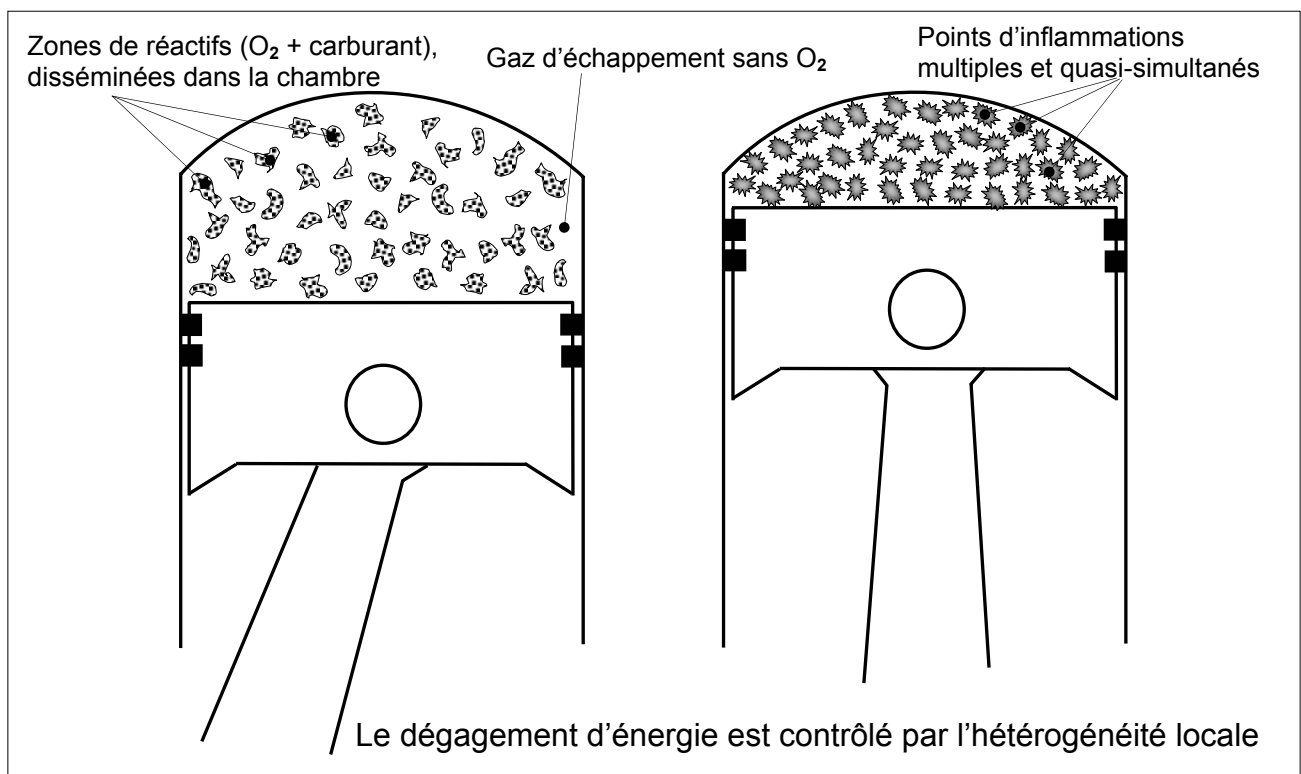
### Les problèmes techniques à régler

Si la combustion se passait telle que décrite plus haut et le mélange était près de la stoechiométrie, le résultat serait inacceptable à cause du dégagement d'énergie beaucoup trop brutal et nous aurions peu de moyens d'action pour le contrôler.

Pour devenir applicable ce concept doit être adapté et il faut ralentir nettement les vitesses de réaction ce qui se réalise par un excès d'air et/ou une très forte dilution par les gaz d'échappement (jusqu'à 70% de taux<sup>(4)</sup> d'EGR).

L'idéal serait exactement :

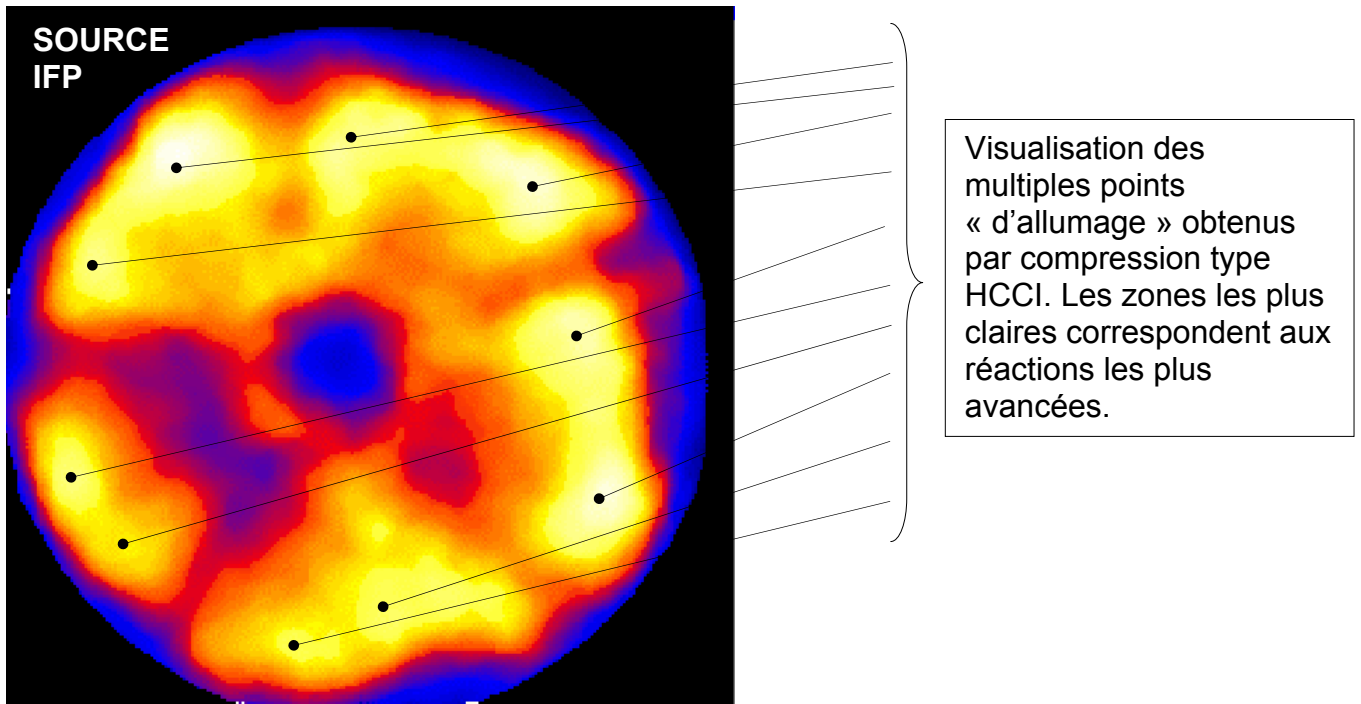
- Très grande homogénéité au niveau global, c'est-à-dire le carburant et l'oxygène sont présents dans tout le volume de chambre.
- Mais hétérogénéité à petite échelle, c'est-à-dire des noyaux actifs [O<sub>2</sub>-carburant] disséminé au milieu des gaz d'échappement inertes



Le résultat est une multitude de points d'inflammations quasi simultanés qui vont se rejoindre rapidement et réaliser une combustion rapide mais contrôlée.

<sup>(4)</sup> le taux d'EGR = 100\*masse de gaz d'échappement présente dans la charge / masse totale enfermée

Un exemple de ce genre de situation vous est fourni ci-dessous (à partir d'un document issu de l'IFP) ; vous pouvez constater que la zone d'inflammation s'étend quasiment à toute la chambre ce qui indique la grande rapidité du phénomène, et que plusieurs zones de réaction ont initié cette combustion.



Conclusion : Les 2 difficultés majeures pour maîtriser ce mode de combustion sont :

- La technique de préparation du mélange devant assurer le dosage de l'air frais, du carburant et des gaz d'échappement ainsi que leur répartition spatiale. Il est évident que l'aérodynamique interne de la chambre et la gestion de l'injection seront les facteurs prépondérants.
- Le réglage du point d'auto inflammation et la stabilisation de celui-ci pour que le rendement soit optimum. Les conditions de températures et de pression au voisinage du PMH seront prépondérantes mais il ne faut pas oublier le carburant qui intervient au premier ordre par ses caractéristiques physico-chimiques. Le mode de réglage choisi doit permettre une action « cycle à cycle » sur l'avance pour être satisfaisant.

## Application moteur ESSENCE

Préambule : La maîtrise du point d'inflammation est plus difficile en essence qu'en diesel car le contrôle du dégagement d'énergie dépend uniquement du délai d'inflammation. Le délai d'inflammation des essences est nettement plus élevé que les gazoles<sup>(5)</sup> et il est très sensible aux paramètres de combustion.

<sup>(5)</sup> Le délai d'inflammation d'un carburant est caractérisé par l'indice d'**octane** en essence et l'indice de **cétane** en diesel. Ces deux échelles sont opposées c'est-à-dire que si le délai d'inflammation augmente l'indice d'octane augmente et l'indice de cétane diminue.

## Moteur essence 4temps

Les moteurs essence utilisant la technologie la plus courante (mélange homogène et injection dans la tubulure d'admission) donnent peu de résultats probants en auto inflammation car la combustion reste trop brutale (donc trop bruyante) et le contrôle du point initial d'inflammation imprécis.

Pour pouvoir atteindre des qualités de combustion intéressantes il faut avoir recours à des stratégies d'injection directe, et des taux d'EGR importants, permettant une hétérogénéité de la charge. L'aérodynamique de chambre et le mode d'injection deviennent alors aussi complexes qu'en diesel. Pour ces raisons, le développement de la CAI ne semble pas prioritaire sur les moteurs essence car les coûts de développement sont trop élevés et ne peuvent être cumulés avec ceux des projets diesel.

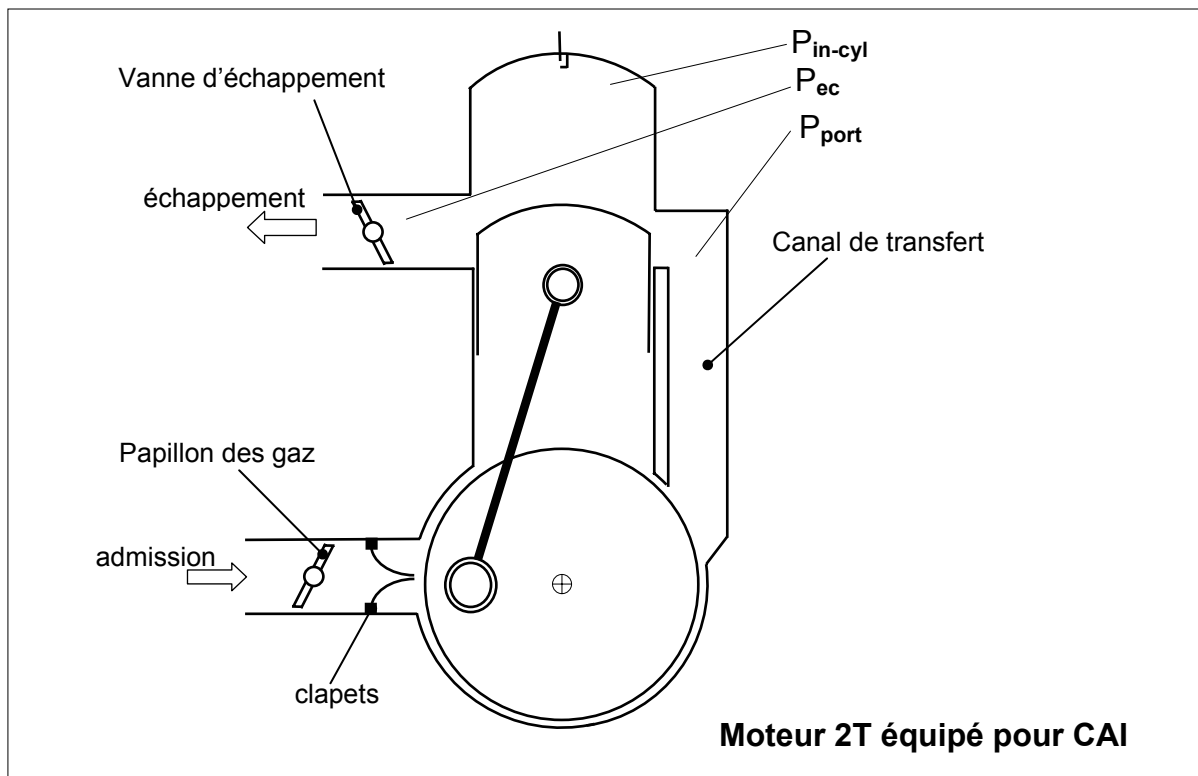
Pour l'instant la catalyse 3 voies, voire les pièges à NO<sub>x</sub> ajoutés, permettent de répondre aux cahier des charges pollution.

Les émissions des moteurs diesels, en revanche, restent difficiles à traiter (surtout sur le marché VI) et beaucoup de recherches explorent cette voie. Le chapitre diesel sera logiquement plus développé dans ce dossier et fera l'objet d'une partie 2 à lui seul.

## Moteur essence 2 temps

Le moteur 2T présente des particularités qui le rendent apte à un fonctionnement CAI de qualité satisfaisante (même avec un carburateur). La pollution excessive de ces types de moteurs en fait un candidat logique à la CAI.

### Le procédé AR.Combustion





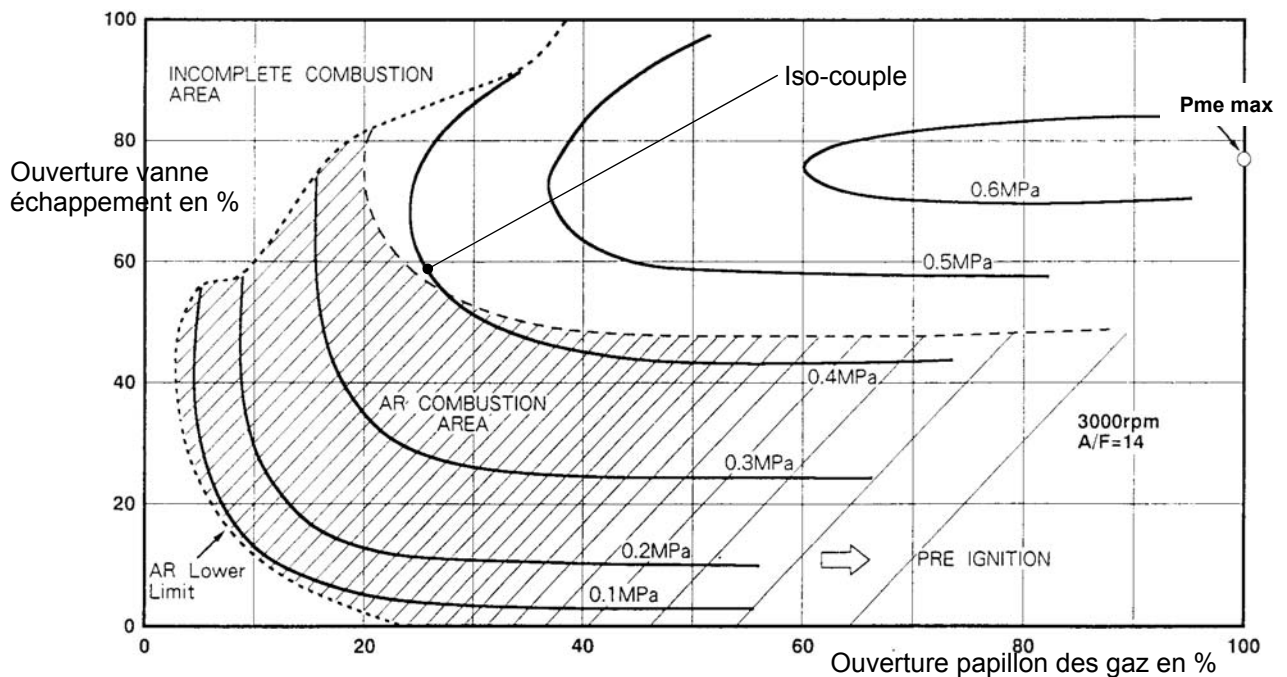
Le moteur est assez proche de l'architecture classique d'un 2T, il est ajouté un papillon (ou boisseau) qui va permettre un vannage variable sur le conduit d'échappement. L'objectif est d'augmenter la contre pression d'échappement ( $P_{ec}$ ) pour réduire le remplissage en air frais et réaliser un fort pourcentage de recirculation sans ajout d'une vanne EGR.

La charge du moteur est alors réglée par les deux papillons : la mise en CAI du moteur se fera en recherchant une forte  $P_{in-cyl}$  pour une faible  $P_{me}$ . C'est, schématiquement, la valeur de  $P_{ec}$  à la fermeture de la lumière d'échappement qui décidera de la pression début admission (et en conséquence fin compression) et de l'instant d'inflammation. Les forts pourcentages de recirculation limitent la vitesse de combustion et la marche du moteur reste assez douce.

Les deux papillons doivent respecter une loi de commande particulière pour répondre à la demande de couple de l'utilisateur (graphe page suivante) : le long des courbes en trait plein, le couple est constant.

Nous observons que au-delà de 4 bars de  $P_{me}$ , le moteur passe en allumage classique pour satisfaire la demande de puissance (pour commenter ces graphes il faut se rappeler que la  $P_{me}$  maxi d'un 2T est inférieure à celle d'un 4T).

Source : Y. Ishibashi et Y. Tsushima, R&D HONDA



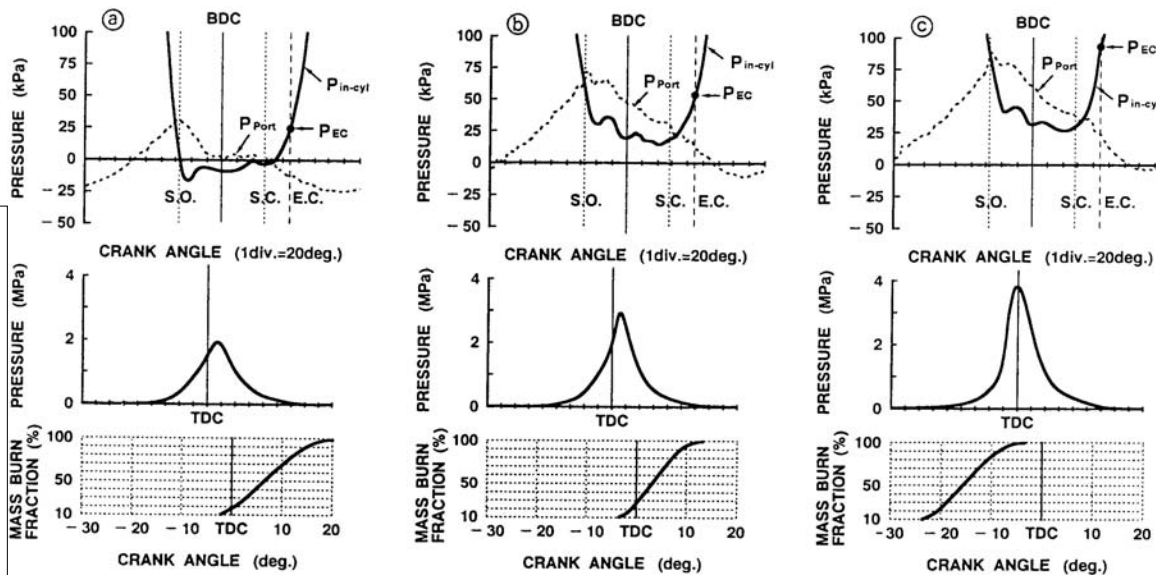
La zone de fonctionnement en AR Combustion est suffisamment étendue (zone hachurée) pour représenter une part majoritaire du temps d'utilisation du véhicule. L'impact sur les émissions et la consommation sera important sur un cycle d'homologation.

## Stabilité du processus en 2T

Il est paradoxal qu'un mécanisme aussi simple permette un fonctionnement stable du moteur et une avance à l'inflammation facile à régler. Il nous faut rappeler les spécificités du 2T pour comprendre les mécanismes mis en jeu.

Source : Y. Ishibashi et Y. Tsushima, R&D HONDA

Ne = 3000  
L = 42%  
A/F = 15



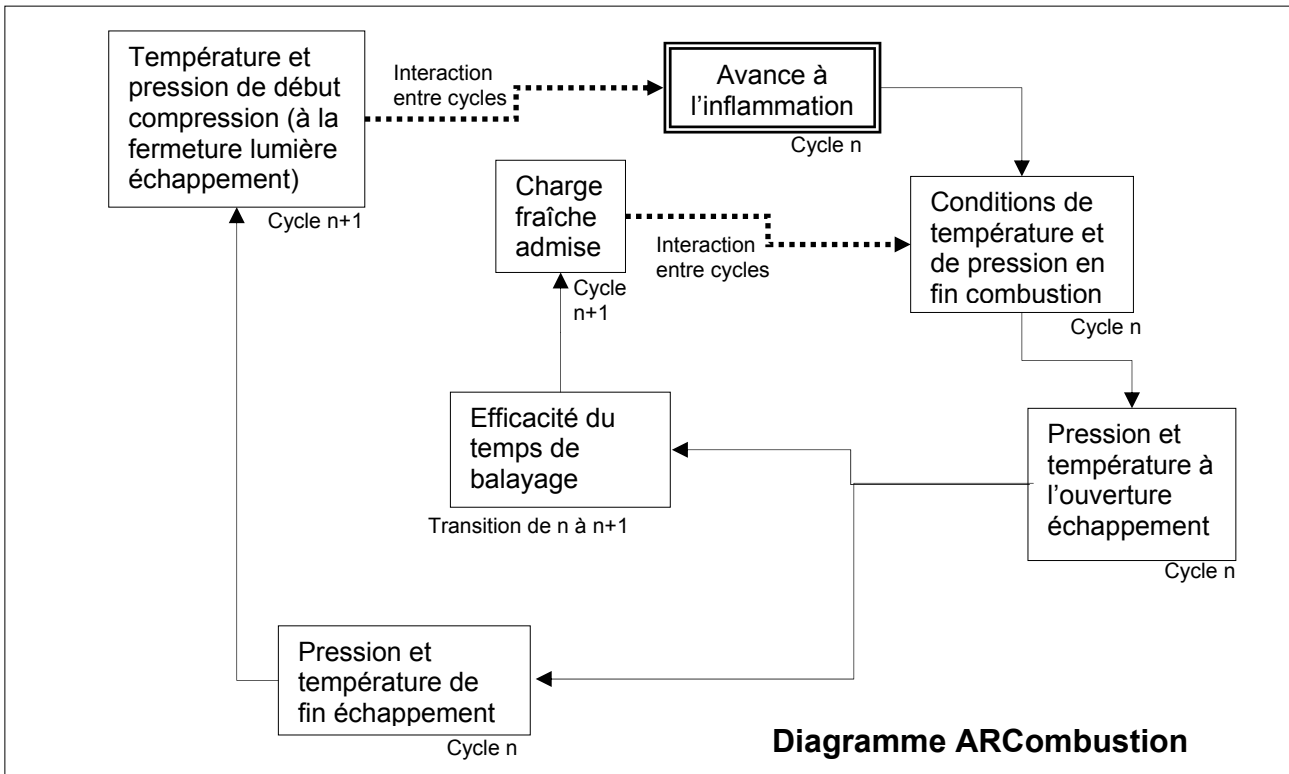
### Glossaire

- SO : ouverture Transfert
- SC : fermeture transfert
- EC : fermeture échappement
- BDC : point mort bas
- TDC : point mort haut
- L : charge moteur
- $P_{in-cyl}$  : pression cylindre
- $P_{ec}$  : pression échappement
- $P_{port}$  : pression canal transfert

Le graphe précédent montre 3 situations de fermeture du vannage échappement (courbes **a**, 75% ; courbe **b**, 50% ; courbe **c**, 25%).

- Les courbes **a** correspondent à une combustion allumée classique.
- La fermeture de la vanne (**b** puis **c**) entraîne une augmentation de la  $P_{ec}$  (jusqu'à 900 mb) à la fermeture lumière échappement ; la température croit également dans le cylindre par les gaz recirculés. L'ARCombustion devient possible et l'avance à l'inflammation croit avec  $P_{ec}$  de fermeture (décalage du début de la combustion en avance de 22° entre **a** et **b**).
- Il est remarquable de constater que de **a** à **b** la durée de combustion a été divisée par 2 ! (sur la durée entre 10% et 95% brûlés).

C'est par les conditions de pression et température à l'échappement que le 2T peut avoir une corrélation entre 2 combustions successives. Cette propriété, qui s'avère en général un défaut favorisant la dispersion cyclique, est très utile à la stabilité du point d'inflammation. Visualisons ceci par un schéma :



Pour comprendre ce schéma, imaginons que le point d'inflammation soit beaucoup **plus avancé** que prévu dans le cycle, ceci va faire chuter la pression et la température fin combustion et entraîner 2 effets :

- La pression d'échappement étant plus faible, l'onde de pression à l'échappement perd de l'énergie ce qui réduit indirectement la charge fraîche admise au cycle suivant en dégradant le temps de transfert/balayage. La pression et la température fin combustion seront plus faibles au cycle suivant.
- La  $P_{ec}$  diminue à la fermeture lumière (voir essais de la page 10) ce qui **retarde l'inflammation** du cycle suivant.

En synthèse : trop d'avance entraîne, **dès le cycle suivant**, une avance diminuée et une baisse de la température de combustion qui accentue la tendance au retrait d'avance. Le raisonnement fonctionne dans les deux sens et justifie que ce moteur présente une stabilité naturelle de son point d'inflammation. Cette caractéristique permet de mettre en œuvre l'ARCombustion même avec une alimentation par carburateur.

Les avantages avérés de ce mode de fonctionnement sont :

- Une baisse de l'écart type des pressions moyennes indiquées cycle à cycle de 75% qui améliore le rendement et les émissions de HC.
- Une capacité à brûler un mélange pauvre qui permet de réduire la consommation (gain de 25% à 4000 tr/mn, 2 bars de Pme).
- Une réduction des émissions de HC supérieure à 50%.
- (un gain sur  $NO_x$  est sans objet car le 2T classique utilise un mélange riche et émet peu de  $NO_x$ ).

## Conclusion moteur essence

Les modes CAI ne représente pas une « urgence » en terme de développement et leur mise au point sera difficile à cause des caractéristiques des carburants. Les moteurs 2T sont eux plus facile à gérer dans cette situation mais leur gamme d'application (petites cylindrées bon marché) se prête mal à la sophistication technologique.

Il faut pourtant remarquer que des contrôles moteurs à injection sont apparus sur les 50cm<sup>3</sup> et que certaines applications 2T, de plus fortes cylindrées, se trouvent sur des marchés où le respect de l'environnement devient un critère sensible (navigation, engins de plein air).

La CAI pourrait « sauver » le deux temps en l'amenant à des valeurs d'émission et de consommation nettement plus faibles, à moins que les progrès du 4t en puissance au litre, puissance au kg, coûts de production le rendent universel.

Dans ce cas le 2T essence disparaîtra du marché

---

## Partie 2 à suivre