Une solution pour des moteurs à essence à faible consommation et émissions polluantes quasi-nulles?

#### **Pierre Duret**

Directeur Centre "Moteurs et Utilisation des Hydrocarbures"

IFP School

# La Combustion par Auto-Inflammation contrôlée (CAI)

#### Introduction

- 1- Les conditions d'obtention de l'auto-inflammation de carburant essence
- 2- La réalisation et le contrôle de la combustion par autoinflammation dans un moteur 4 temps
- 3- L'application de la combustion CAI: une alternative à l'injection directe essence stratifiée ?

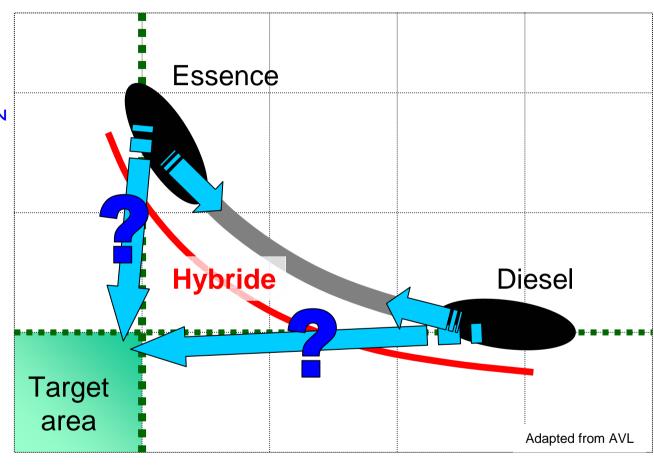


### Les enjeux "CO2 – rendement" et "émissions polluantes" des moteurs d'automobiles

Pour sortir du dilemme "CO2-rendement" / "NOx-particules" des moteurs d'automobiles, comment faire:

d'automobiles, comment / logressia des moteurs à essence ayant les consommations du dieselo

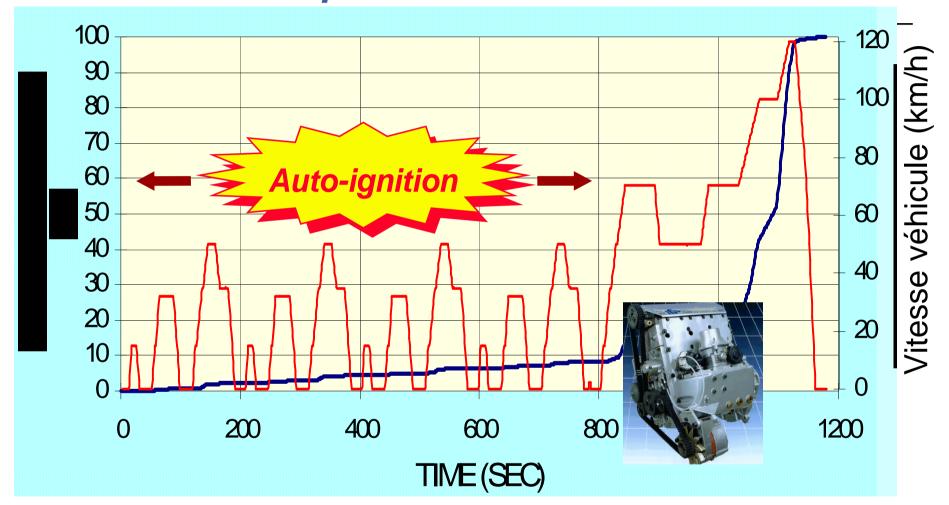
→ des moteurs diesel ayant les émissions de l'essence



Emissions (HC, NOx, PM)



### IFP pionnier dans l'utilisation de la combustion CAI 1995: moteur 2 temps automobile à ID essence

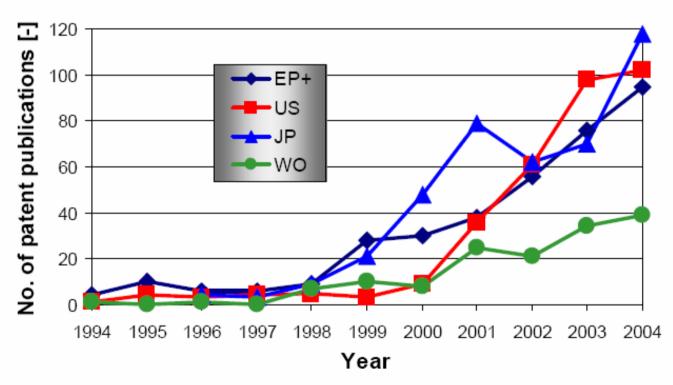


10 % de NOx émis pendant le fonctionnement en CAI (env. 0.07 g/km) = partie urbaine du cycle MVEG à niveau **Euro 4 sans catalyse DeNOx** 

SCHOO

### Une "explosion" du nombre de brevets publiés sur la combustion CAI depuis 1999

### Results of Data Analysis Publications classified in F02B1/12



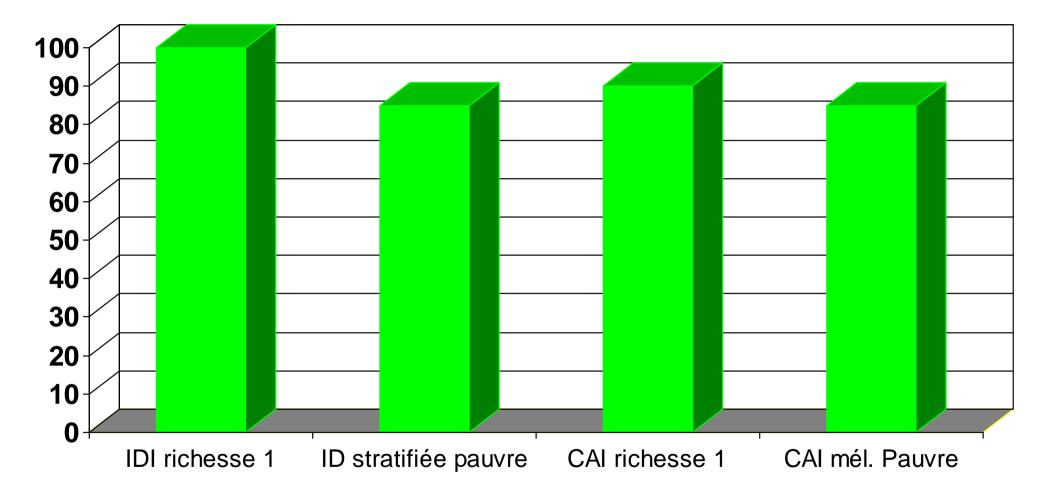


Source: Frank van der Staay - European Patent Office





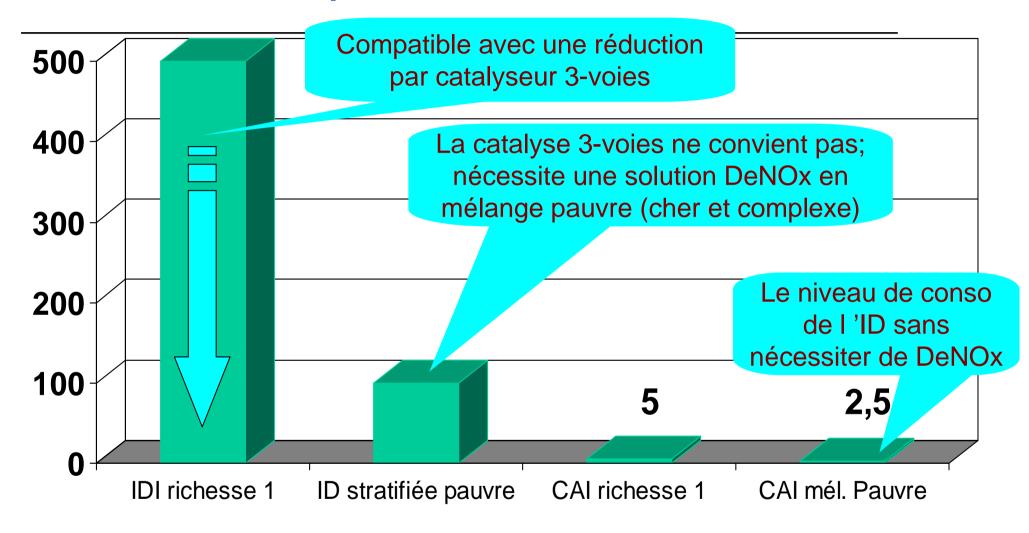
### Potentiel de différents procédés de combustion essence



Consommation de carburant comparée (%) entre divers procédés de combustion essence et diesel (référence 100 = essence stoechio)



#### Potentiel de différents procédés de combustion essence



Emissions de NOx comparées (%) entre divers procédés de combustion essence (référence 100 = ID stratifiée)

### L'appellation CAI de plus en plus ettilisée! mais beaucoup d'autres appellations existent ...

2-stroke engines ATAC Active Thermo-Atmosphere Combustion Toyota-Soken auto-ign caused by radicals, not **Active Radical Combustion Radical Activated Combustion** intake temp Homogeneous Charge Comp Ignition Compression-Ignited Homogeneous Charge comb auto-ign **CAI**<sup>TM</sup> Controlled Auto Ignition (IFP trade mark!) caused by **Combined Combustion System** radicals and/or intake Premixed Charge Compression Ignition temp



# La Combustion par Auto-Inflammation contrôlée (CAI)

#### Introduction

1- Les conditions d'obtention de l'auto-inflammation de carburant essence

- 2- La réalisation et le contrôle de la combustion par autoinflammation dans un moteur 4 temps
- 3- L'application de la combustion CAI: une alternative à l'injection directe essence stratifiée ?



## Une leçon d'histoire: le développement de la combustion CAI

Tout a commencé par le moteur 2 temps...





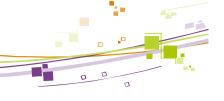
□ En 1979, la première publication sur une combustion de type CAI recherchée dans un moteur 2-temps:

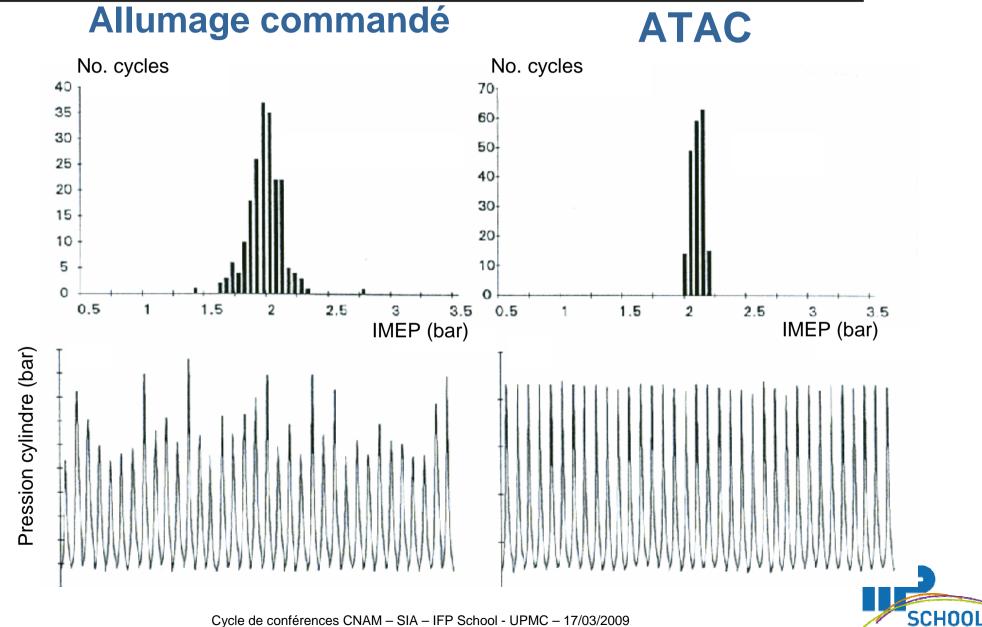
**Onishi** et. al. (Nippon Clean Engine Research Institute), "Active Thermo-Atmosphere Combustion (ATAC) - A New Combustion Process for Internal Combustion Engines", SAE 790501, 1979

- □ La description d'un nouveau procédé de combustion (ATAC) essence fonctionnant à charge partielle en mélange pauvre sans besoin d'allumage
- Des améliorations remarquables de la stabilité de combustion, du rendement et des émissions polluantes sont obtenues



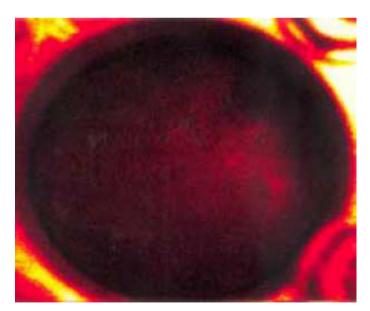
### Amélioration de la qualité de combustion et réduction des fluctuations cycliques



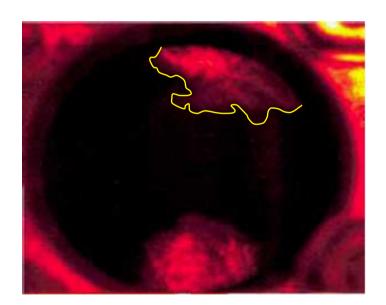


#### Ce qu'ils ont vu ?

- □ Absence de front de flamme!
- □ Absence de noyau de flamme initial
- □ Réaction progressive et simultanée dans l'ensemble de la chambre de combustion







Allumage commandé



# ierre DURET - IFP Schooll

### Quelle explication au phénomène observé?

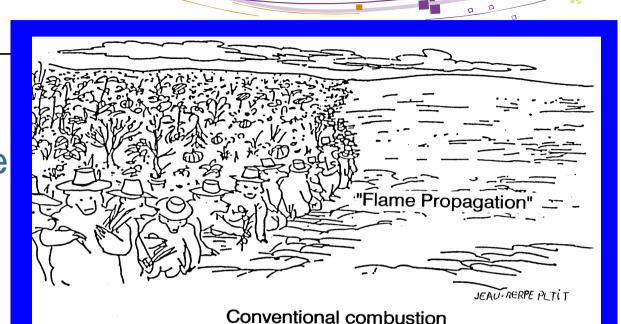
#### AC

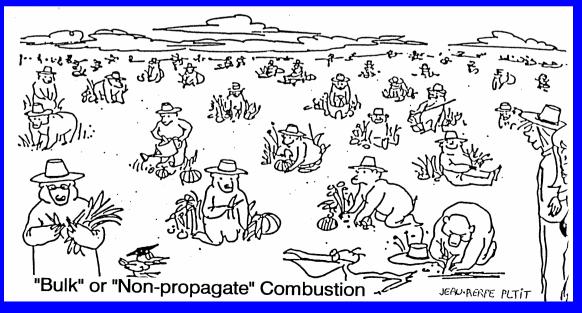
Propagation d'un front de flamme des gaz brûlés vers les gaz frais

### ATAC (CAI)

Absence de front de flamme!

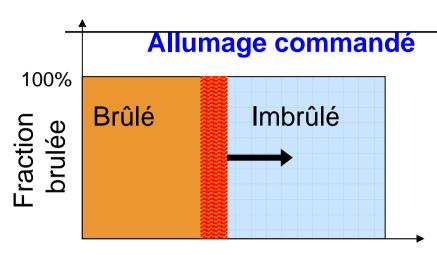
Combustion simultanée multi-sites dans l'ensemble de la chambre de combustion



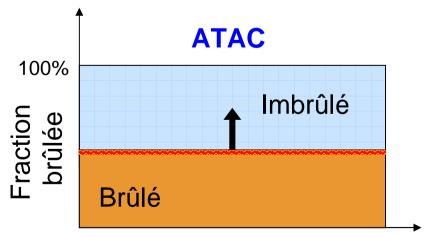




### Quelle explication au phénomène observé?

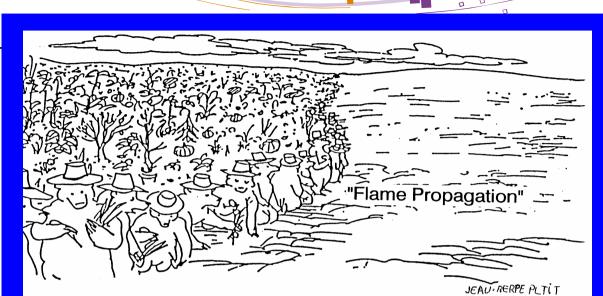


Gaz dans la chambre de combustion

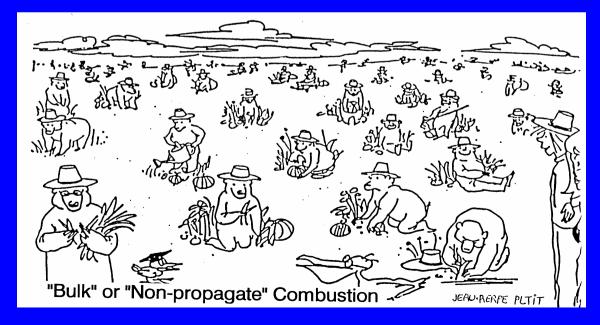


Gaz dans la chambre de combustion

Source: D. Wang (IFP School)

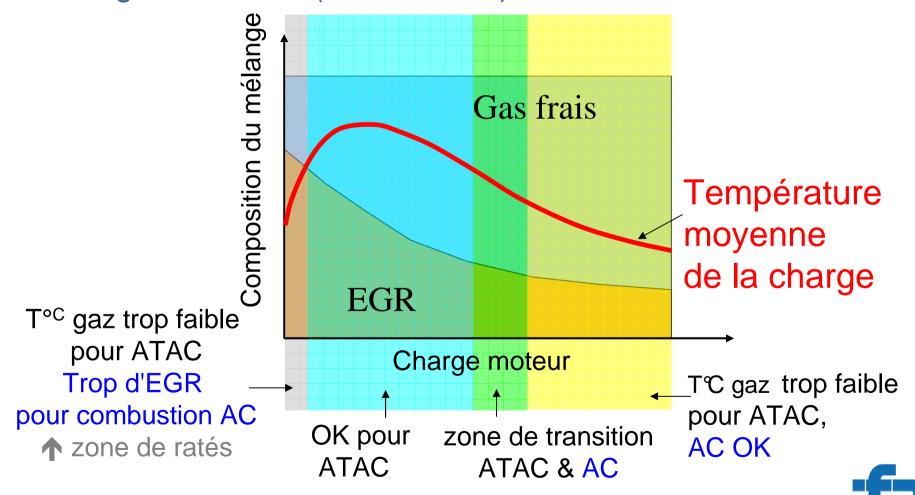


Conventional combustion



### Les conditions pour la combustion ATAC (CAI)

- □ Température élevée pour auto-inflammation
- □ Taux de gaz résiduels (EGR interne) élevé

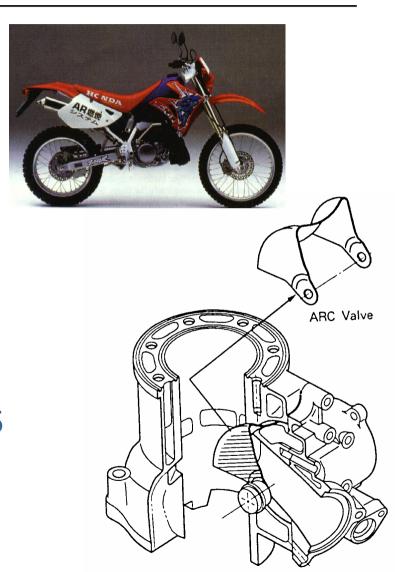


SCHOOL

### Le premier moteur 2-temps CAI en production Honda ARC (Activated Radical Combustion)

# Le système ARC (Activated Radicals Combustion) développé par Honda :

- reprise des travaux des années 1970 sur le sujet avec l'idée additionnelle de contrôler l'instant d'auto-allumage par une valve échappement particulière
- démonstration de l'intérêt du système lors du Rallye Dakar 1995 avec les 2 prototypes EXP-2
- industrialisation au Japon depuis début 97 et en Europe mi 98



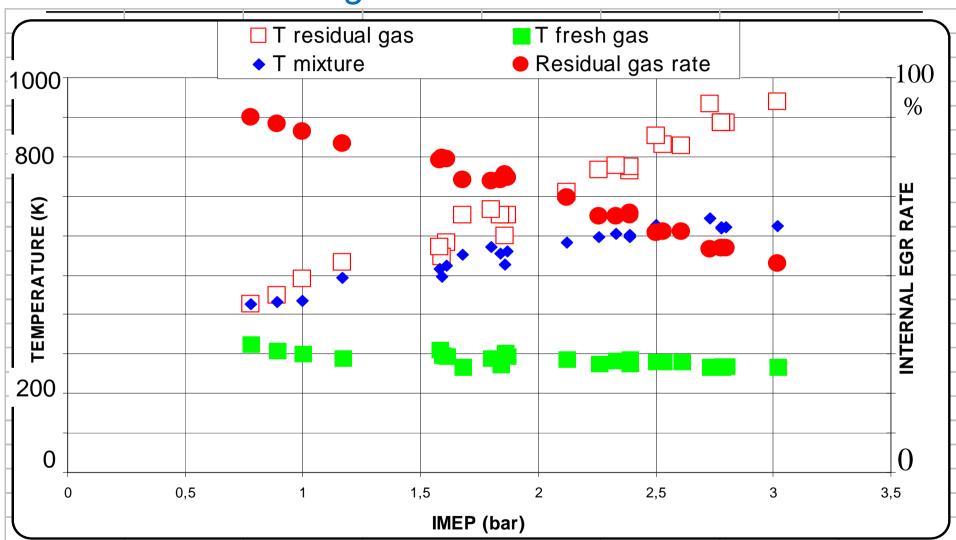




### L'analyse des conditions d'obtention de la combustion CAI sur moteur 2 temps

Pour préparer son transfert au moteur 4-temps...



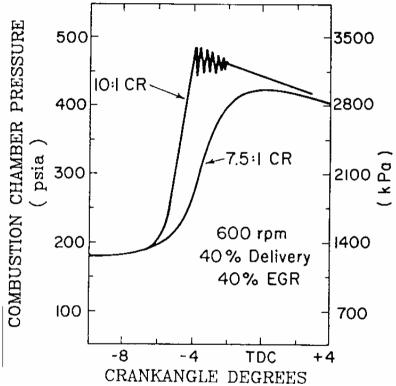


Températures et taux d'EGR interne en fonction de la P

### Comment obtenir la combustion CAI dans un moteur 2 temps ?

- □ avec le même taux d'EGR interne (et la même quantité de gaz frais), la combustion CAI peut avoir lieu dans un cas et pas dans l'autre,
- □ la combustion CAI est obtenue avec une introduction plus douce et plus étalée dans le temps des gaz frais (par exemple avec valve échappement Honda); il en résulte moins de mélange entre gaz frais et gaz brûlés et sans doute un gradient de température dans la chambre de combustion
- → des conditions globales de fort taux de gaz résiduels à température élevée sont donc nécessaires mais pas suffisantes
- → des conditions locales de faible mélange entre gaz frais et gaz brûlés (EGR interne partiellement stratifié) sont aussi nécessaires

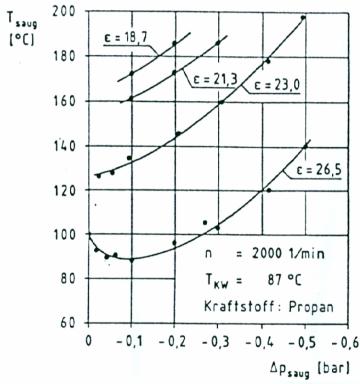
# Les 1ères voies de recherche pour obtenir l'auto-inflammation sur moteur 4 temps ? Augmenter le taux de compression... ou réchauffer l'air admis



... avance l'auto-inflammation et augmente la vitesse de dégagement d'énergie (CIHC 4temps)

(besoin de fonctionner avec un air admis à 370 ℃ avec un moteur HCCl avec taux de comp. de 7.5 )

Source: Nait and al.



réchauffage d'air admission (application 4T)

Source: Schäpertöns and al. (VW)



- sans augmenter le taux de compression
- sans augmenter la température de l'air admission

non utilisable
dans la pratique
pour une
application
automobile (en
particulier en
transitoire)





### Comment obtenir l'auto-inflammation sur moteur 47... sans réchauffage de l'admission ni taux de compression variable

à partir de la connaissance des phénomènes qui se déroulent sur moteur 2 temps

- → en reproduisant les conditions de forts taux d'EGR interne stratifié du moteur 2 temps en CAI
  - □ en d'abord maximisant la quantité d 'EGR interne à la fin de la phase d'échappement,
  - □ et ensuite en essayant de retarder l'introduction de la charge fraîche pour minimiser le mélange avec l'EGR interne



### Quel effet de la stratification de l'EGR interne?



Intake Condition

ĔGR T<sub>Air</sub> ≈ 20° C

T<sub>RG</sub> ≈ 500° C

EGR 409

Homogeneous

T<sub>Air</sub> ≈ 150° C

Intake Air

Heating

T<sub>RG</sub> ≈ 500° C

EGR 40%

Stratified EGR

T<sub>Air</sub> ≈ 20° C

T<sub>RG</sub> ≈ 500° C

EGR 409

Combustion Chamber before Compression

 $T_{Cyl} \approx 210^{\circ} C$ homogeneous  $T_{\text{Cyl}} \approx 290^{\circ} \text{ C}$ 

homogeneous

 $T_{Air} \approx 50^{\circ} C$ **EGR 40%** 

isentropic Compression w/o Heat Losses, ε 11,5



Combustion Chamber after Compression

T<sub>Cyl</sub> ≈ 847° C

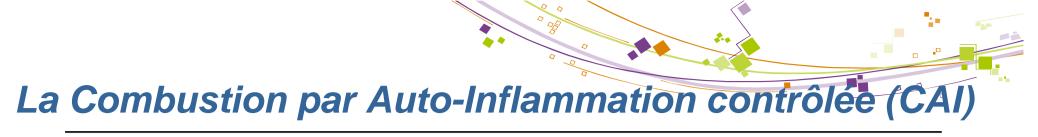
T<sub>cyl</sub> € 1190°

T<sub>RG</sub> ≈ 1250° C T<sub>Air</sub> ≈ 570° C

Al par réchauffage de l'air admis

CAI avec air admis à température ambiante!!!

Source: SAE 2003-01-0032



#### Introduction

1- Les conditions d'obtention de l'auto-inflammation de carburant essence

2- La réalisation et le contrôle de la combustion par auto-inflammation dans un moteur 4 temps

3- L'application de la combustion CAI: une alternative à l'injection directe essence stratifiée ?



# Le transfert de la combustion CAI (et de ses avantages !!!) au moteur 4 temps

A partir de l'analyse de ce qui se passe sur moteur 2 temps...

- 1ère condition : comment retrouver sur moteur 4 temps les conditions globales (taux d'EGR interne et températures) du 2 temps ?
- ⊇ème condition: comment retrouver sur moteur
   4 temps les conditions locales (stratification de l'EGR interne et gradient de T℃) du 2 temps ?



# Les principales solutions techniques étudiées pour respecter ces conditions

L'utilisation de la distribution variable (lois d'ouverture des soupapes échappement et admission) pour obtenir

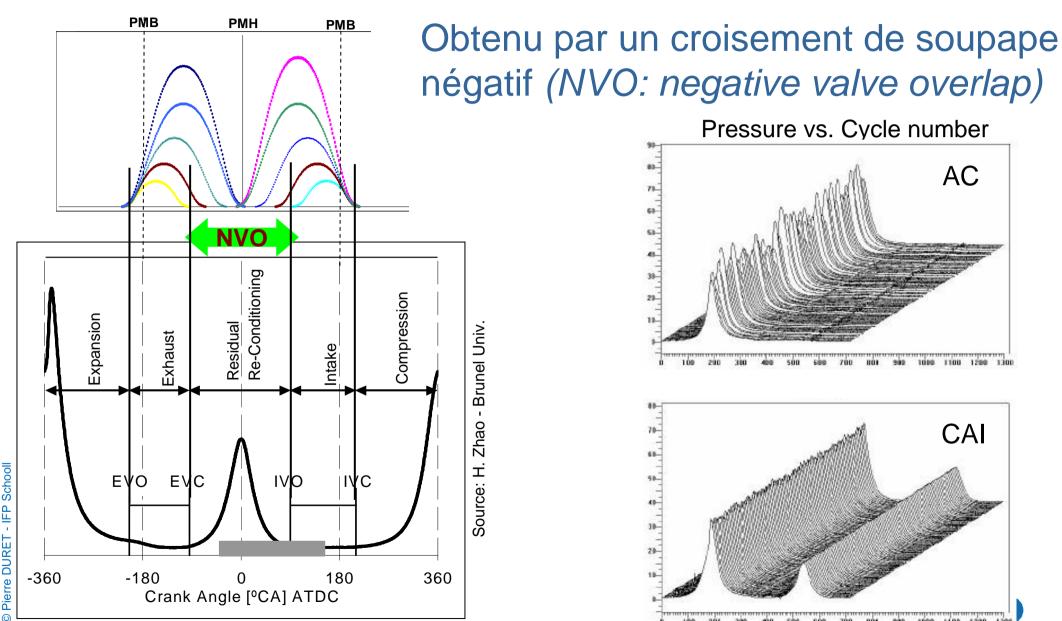
□ le piégeage d'une partie des gaz brulés dans la chambre de combustion et leur recompression avant l'admission des gaz frais (ou recompression de l'EGR interne)

ou

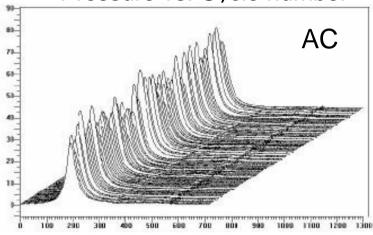
□ la réaspiration dans la chambre de combustion, avec l'admission des gaz frais, des gaz brulés du cycle précédent encore dans les conduits d'échappement

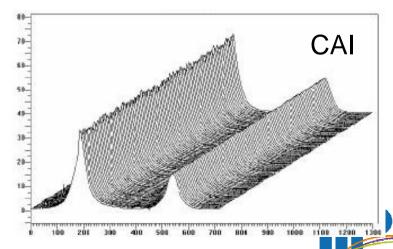






#### Pressure vs. Cycle number





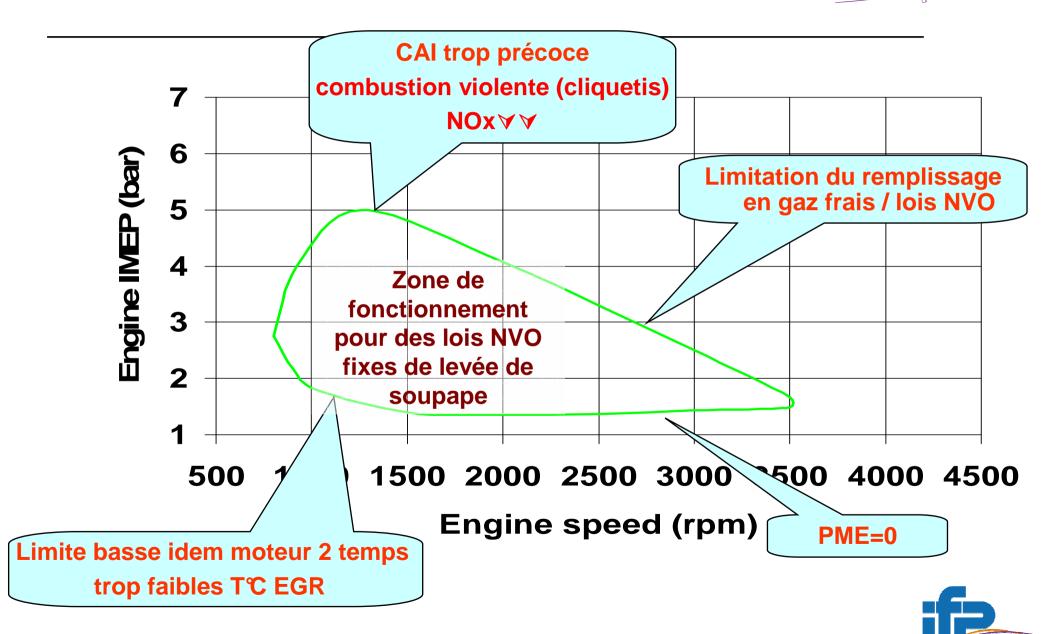
SCHOOL

# CAI par recompression de l'EGR interne

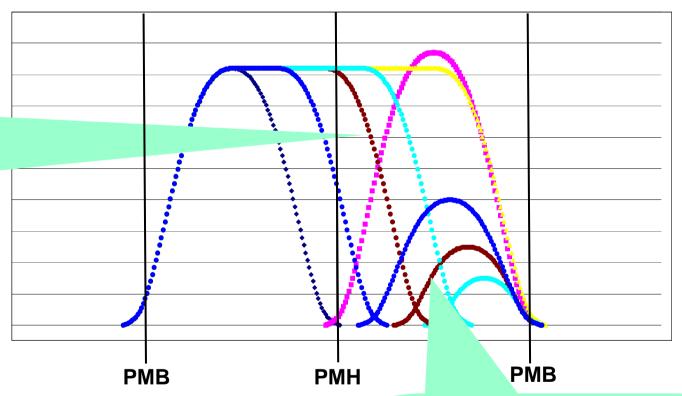
- □ EGR recompressé durant la phase échappement
  - > pertes thermiques aux parois
  - poursuite possible de l'oxidation des EGR
  - réduction des pertes par pompage comparées au fonctionnement homogène AC (une partie des pertes de pompage subsiste / recompression)
- Mélange EGR/gaz frais plus stratifié
  - > favorise les poches de gaz chauds et avance le calage de la CAI
- □ Plus fortes T°C et pression cylindre
  - favorable pour les faibles charges
  - réduction des émissions de HC

La solution (initialement brevetée par IFP) qui fait aujourd'hui l'objet des principaux développements





L'ouverture de la soupape d'échappement est prolongée pendant la phase d'admission Obtenu par un retard à la fermeture échappement (croisement positif)



L'ouverture de la soupape d'admission est retardée et de levée réduite

# CAI par réaspiration des gaz brulés

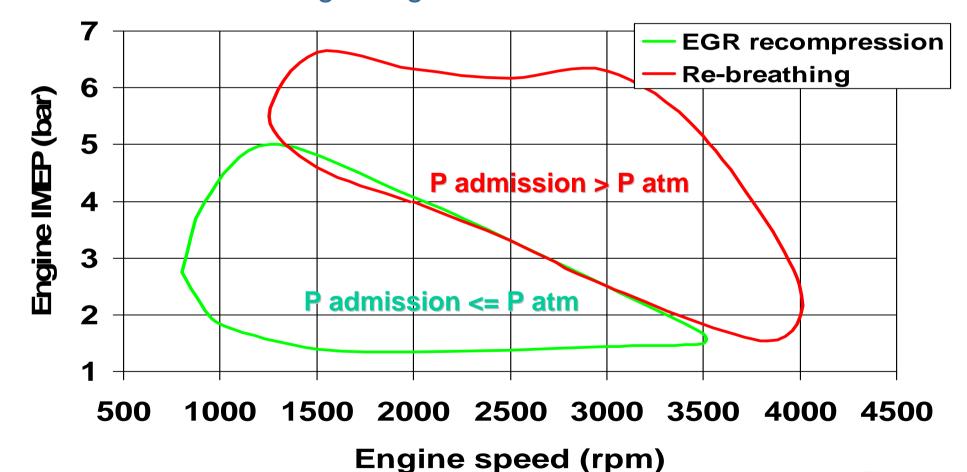
- □ EGR non recompressé
  - les plus faibles pertes par pompage (meilleures conso à richesse 1)
  - combustion moins stable qu 'avec I 'EGR interne mais peut fonctionner à de plus fortes charges
    - charge max ~1.5 bar PMI en plus qu 'avec I 'EGR recompressé
- Mélange plus homogène (plus de mélange gaz frais/EGR)
  - plus limité pour fonctionner à très faible charge et en mélange pauvre
  - plus faibles NOx (en particulier aux charges CAI élevées)



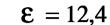
### CAI par réaspiration de l'EGR Une zone de fonctionnement étendue vers les fortes charges

... en particulier si combinaison avec la suralimentation de la charge en gaz frais  $\varepsilon = 12,4$ 

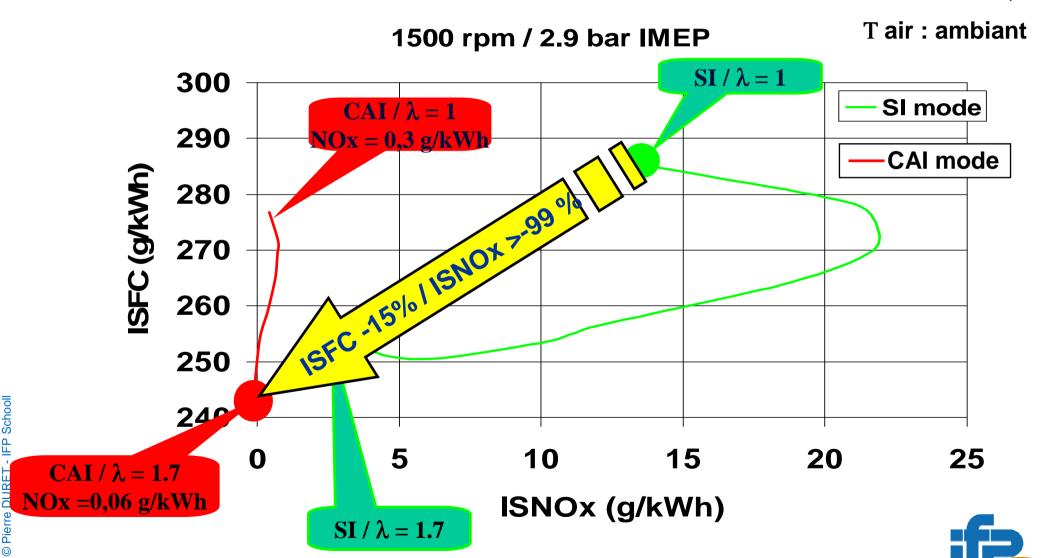
T intake : 40℃



### Compromis NOx / CO2 en combustion CAI



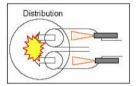
SCHOOL



### Visualisation de la combustion CAI sur moteur 4 temps





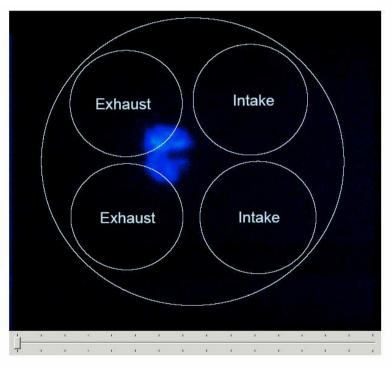


Running conditions: 1200 rpm Vol. Efficiency: 0.3 Equivalence ratio: 0.9

Fuel Euro95

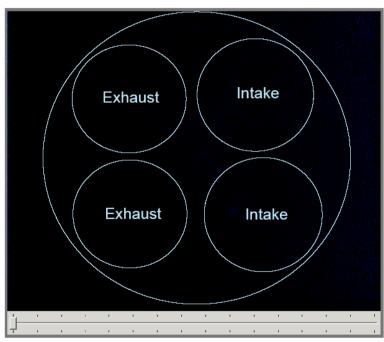
2005-01-0141

Pierre DURET



AC (334 - 349℃A)

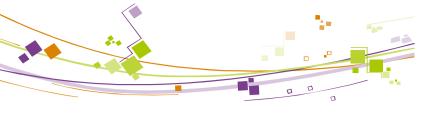
First image 357° Duration: 7.5° Distribution Running conditions: 1200 rpm Vol. Efficiency: 0.3 Equivalence ratio: 0.9 Fuel Euro95

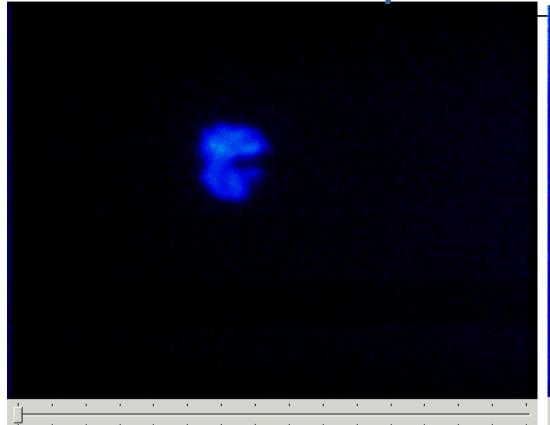


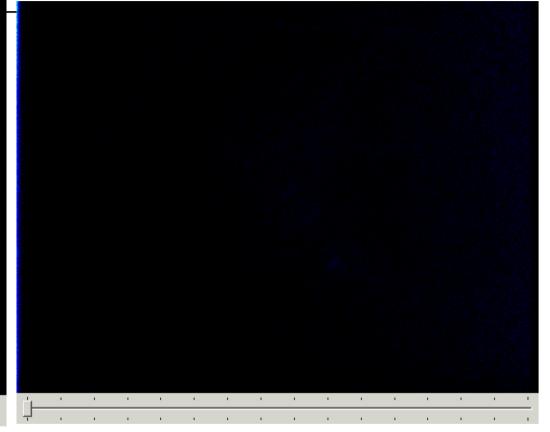
CAI (357 - 363.5℃A) par recompression EGR

Source: B. Thirouard - IFP









AC (334 - 349℃A)

CAI (357 - 363.5℃A)

© Pierre DURET - IFP Schooll

Source: B. Thirouard (IFP)

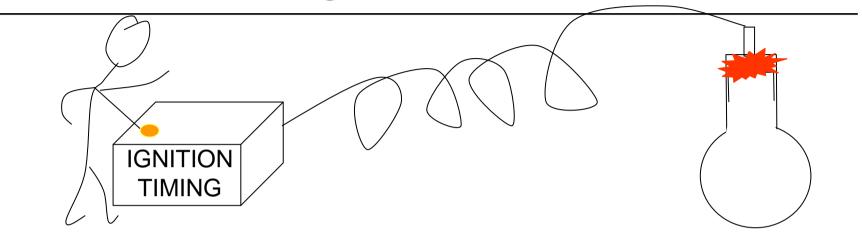




### Le contrôle de la combustion CAI Phasage et loi de dégagement d'énergie

Les paramètres influents...

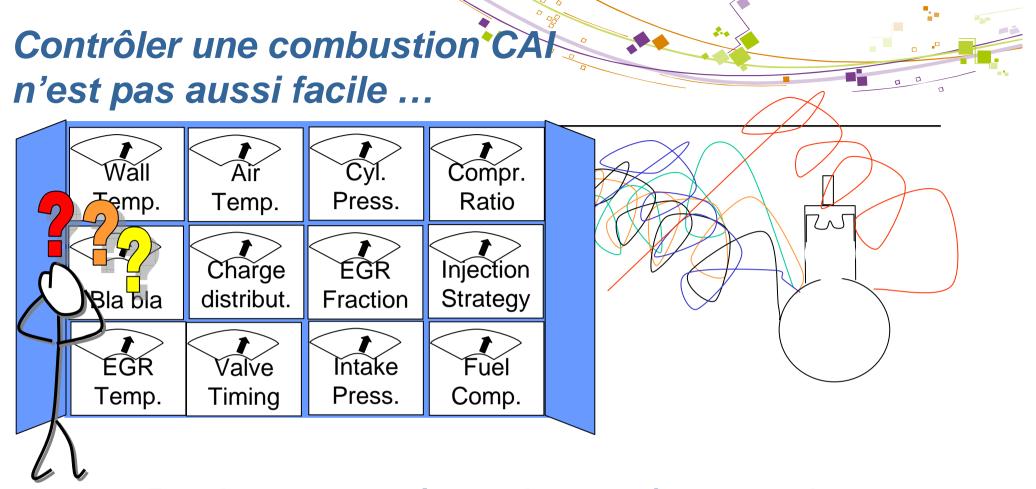




- en préparant le mélange air/carburant correct (moins facile en ID !)
- en générant une étincelle au moment où le piston est à la bonne position
- 3. ...et en attendant!

mais pratiquement aucun moyen d'affecter la combustion après l'instant d'allumage

© Pierre DURET - IFP Schooll



- 1. Plusieurs paramètres de contrôle avec de complexes interactions (pas encore bien connues)
- 2. Pas de système vraiment au point pour basculer de la combustion CAI à AC et vice-versa



# Le contrôle de la combustion CAI et les voies de progrès futurs

- □ Le contrôle précis de la combustion CAI (calage et loi de dégagement d'énergie) et la maîtrise de sa transition avec la combustion par AC quand la charge augmente
- □ L'extension de la zone de fonctionnement en CAI
- → vers les faibles charges (jusqu'à charge nulle ?) pour limiter les besoins en transitions CAI/AC
- → vers les fortes charges (jusqu'à couvrir le cycle NEDC) pour tirer profit des gains en émissions, consommation et CO2 offert par CAI



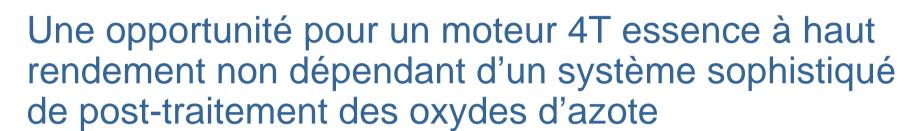
# La Combustion par Auto-Inflammation contrôle (CAI)

#### Introduction

- 1- Les conditions d'obtention de l'auto-inflammation de carburant essence
- 2- La réalisation et le contrôle de la combustion par autoinflammation dans un moteur 4 temps
- 3- L'application de la combustion CAI: une alternative à l'injection directe essence stratifiée ?



### L'objectif d'application de la CAI à l'automobile Un moteur bi-mode CAI / AC



Charges partielles en CAI

(conditions urbaines)

Quasi-zero NOx contrôlés par l'autoinflammation et la très forte dilution

Mélange pauvre pour meilleures consommations

Catalyse d'oxydation à amorçage rapide pour HC et CO

Fortes charges en AC (accélérations)

Fonctionnement conventionnel en AC à richesse 1 et catalyse 3-voies

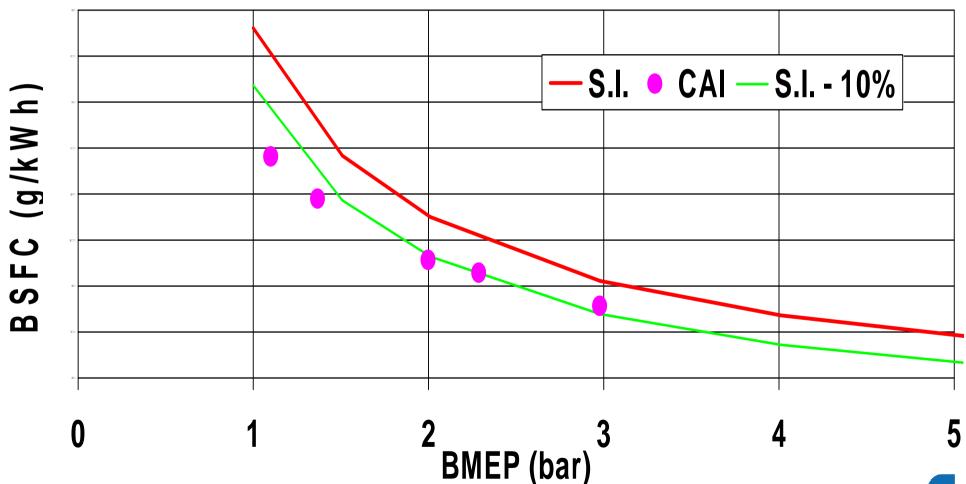


# © Pierre DURET - IFP Schooll

### L'application CAI sur moteur multicylindre Comparaison AC / CAI à richesse 1



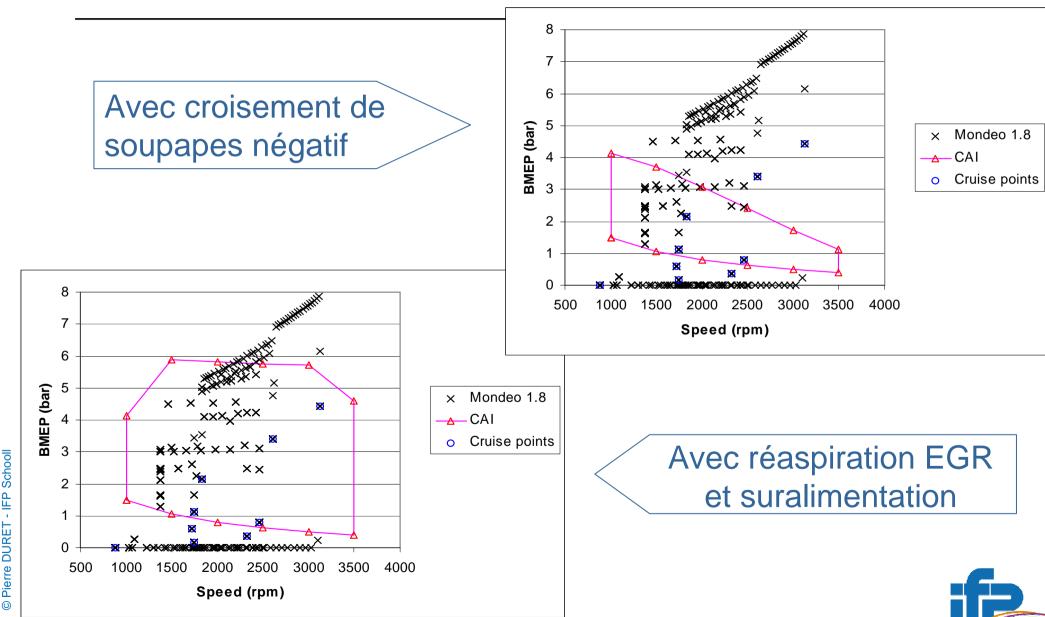
2000 rpm /  $\lambda$  = 1 / 2 lois de levées fixes (croisement négatif)



2L injection indirecte - Rapport volumétrique : 11.5



### L'application CAI sur moteur multicylindre Des zones de fonctionnement CAI encore très limitées



## La combustion CAI combinée avec l'injection directe d'essence



- □ Le "cooling effect" de l'ID lui permet de généralement fonctionner avec des rapports volumétriques un peu plus élevés
- → favorable pour étendre la zone CAI vers les faibles charges
- □ L'ID: un possible paramètre supplémentaire de contrôle du phasage de la combustion CAI
- → favorable pour étendre la zone CAI
- pour une même ouverture papillon, le même point de fonctionnement peut-être réalisé en ID stratifié & distribution classique ou en CAI & distribution croisement négatif
- → facilite la transition AC / CAI



# L'application CAI sur moteur multicylindre Quels apports de l'injection directe?

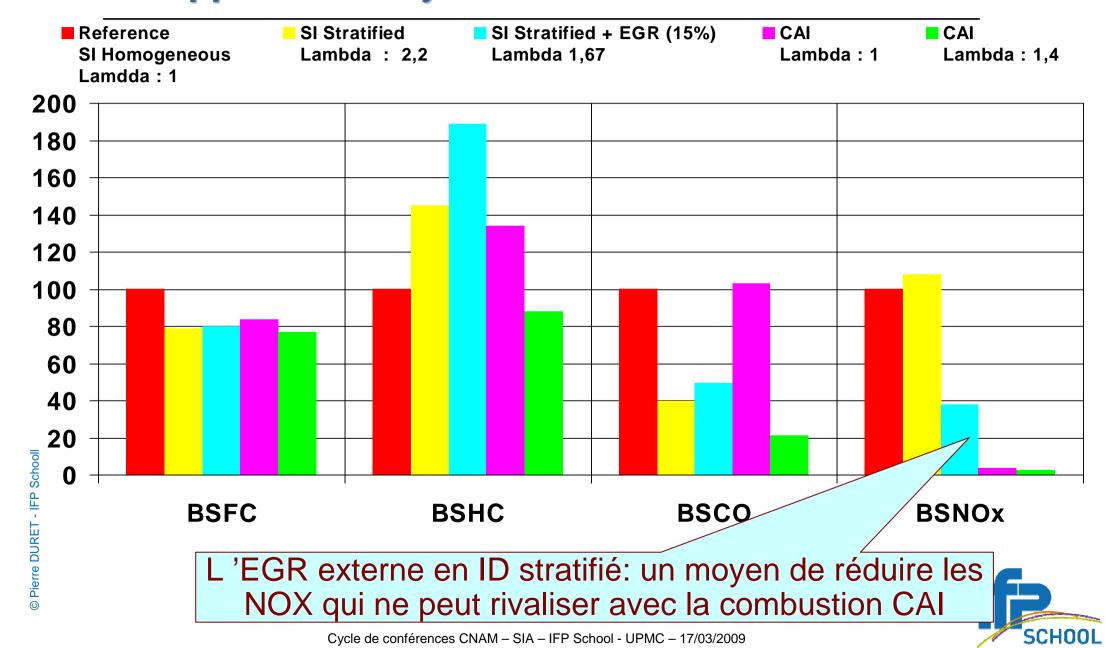
### Performances comparées entre

- ⇒ ID AC stoechio (homogène) / pauvre (stratifié)
- ⇒ ID CAI stoechio / pauvre

sur moteur prototype IFP 1.2 L / GDI Rapport volumétrique 10.8:1 3 bars de PME @ 2000 tr/min



### L'application CAI sur moteur multicylindre Quels apports de l'injection directe?



Un nouveau procédé de combustion pour moteur 4 temps a été découvert et est en cours de développement avancé. Il présente:

- □ une plage de fonctionnement limitée,
- → l'extension de cette plage fait aujourd'hui l'objet des principaux développements (avec la maîtrise de la transition AC/CAI)
- un potentiel d'émissions d'oxyde d'azote quasi-nulles
- → émissions de NOx divisées par 50 à 200 comparées à la référence AC: potentiel pour niveau Euro 4+ sans DeNOx en CAI pauvre (~ 4-5 ppm NOx dans certaines conditions)
- □ un potentiel de haut rendement et de réduction des émissions de CO2 du moteur à essence
- → améliorations à richesse 1 de 5 à 10 % de la consommation par rapport à la référence AC, et de 10 15 % jusqu'à plus de 20 % en mélange pauvre (niveau de consommation similaire à l'injection directe stratifiée avec 50 fois moins de NOx)





- ☐ un niveau d'émissions d'HC et de CO acceptables
- un fonctionnement avec un air admis à température ambiante
- → facilite le fonctionnement (en particulier en transitoire) sur véhicule
- ☐ un taux de compression conventionnel (ou légèrement accru)
- capacité à fonctionner en mode conventionnel AC aux fortes charges
- □ le phasage de la combustion CAI et son dégagement d'énergie peuvent être controlés
- par les lois de distribution, par la charge en EGR (quantité, stratégie de piégeage, degré de mélange), et dans un moteur ID par la stratégie d'injection du carburant
- □ avec l'avènement programmé des technologies de contrôle moteur de plus en plus sophistiquées (multi injection directe de carburant, actionnement variable des soupapes, taux de compression variable,...) les perspectives d'application industrielle des procédés CAI sont sérieuses.





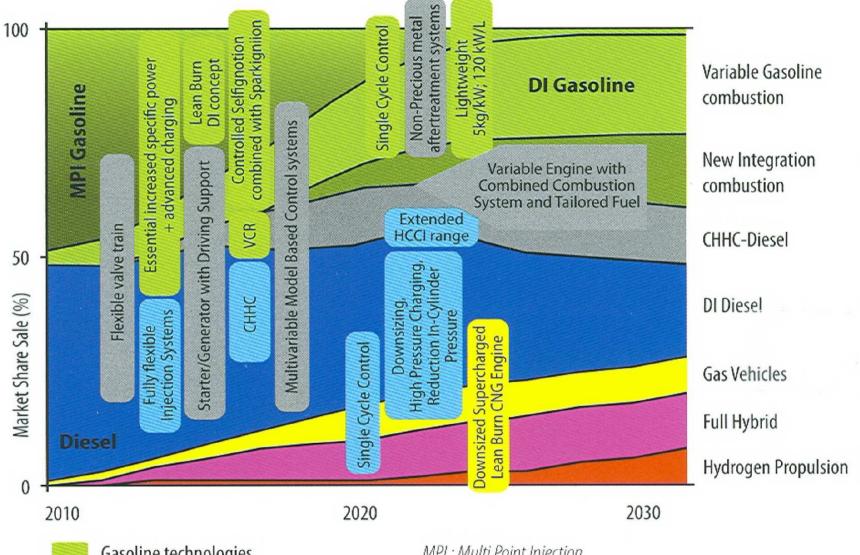
### Potentiel et perspectives pour de futures applications automobiles

La vision EUCAR (EUropean Council of Automotive Research) concernant l'évolution du groupe moto-propulseur automobile en Europe



#### **New Passenger Cars &** Light Commercial Vehicle (<5t)





Source EUCAR Conference 2006



Gasoline technologies

Gasoline + diesel technologies

Diesel technologies

MPI: Multi Point Injection

DI: Direct Injection

CHHC: Combined Homogeneous/Heteregeneous Combustion

HCCI: Homogeneous Charged Compression Ignition

#### **DOWNSIZING**

ID essence, bi-turbo, 1800 cc 175 kW (238 cv), 400 mN

**5,3 l/100 km** de consommation (127 g/km de CO2) revendiqués pour un véhicule essence **Class S!** 



© Pierre DURET - IFP Schooll

**COMBUSTION** 

CAL

VVA, VCR

### toujours en Septembre 2007!

GG V0192



**General Motors** présente 2 véhicules Saturn Aura et Opel Vectra pour démonstration HCCI (CAI)!



### Et dans le futur... un procédé de combustion et un carburant unique ?

Les procédés de combustion essence CAI et diesel HCCI se rapprochent de plus en plus sur le plan de la technologie moteur:

- caractéristiques similaires des émissions de polluants
- réduction de la différence de rendement entre essence et diesel
- augmentation du taux de compression du moteur à essence (10 → 12) quand celui du moteur diesel diminue (18 → 14)

"What is happening in advanced combustion systems is particularly interesting. There is a convergence of diesel and gasoline engines. .. In the future, there may be no significant difference between [them]"

Dr J Gary Smyth, Director, GM Systems Research Laboratories - Emissions Control Technology, Issue 2005-1

