

Infos Tech

Les nouveaux modes de combustion (partie 2) (et leur contribution à la dépollution des moteurs)

Préambule

Les appellations

Précisions sur le déroulement d'une combustion de type HCCI

Les différentes solutions de préparation de la charge

Les différentes solutions pour agir sur le début de combustion et sur son déroulement

Le contrôle du phasage de la combustion en boucle fermée

Les performances actuelles

Conclusions, prospective

Préambule

Après avoir posé les principes des combustions homogènes allumées par compression dans la partie 1 (Infos Tech n°18) nous allons examiner l'application de ces principes en vue de réalisations industrielles.

Le cas des moteurs essences utilisant la CAI sera peu abordé dans cette partie 2 et c'est **l'application diesel** qui constituera la majeure partie des développements. Ce choix est logique car les projets et recherches en cours sont en majorité autour du diesel pour qui les futures normes de dépollution seront très coûteuses à satisfaire. La plupart des principes énoncés peuvent néanmoins être transférés aux applications essence.

Les appellations

Voici 5 autres termes que nous pouvons ajouter à la liste des acronymes établie dans la partie 1 :

- **ACCH** : Allumage par **C**ompression de **C**harge **H**omogène (origine recherches canadiennes)
- **HPC** : **H**igly **P**remixed **C**ombustion (origine IFP, c'est l'application au moteur industriel du procédé NADI de l'IFP)
- **CIHC** : **C**ompression-**I**gnited **H**omogeneous **C**harge (Nadj et Foster, University of Wisconsin-Madison)
- **CIBAI** : **C**ompression **I**gnition **B**y **A**ir **I**njection (West Virginia University, essais sur moteur CFR de contrôle de l'auto inflammation par injection d'air chaud)
- **APIR** : **A**uto-inflammation **P**ilotée par **I**njection de **R**adicaux (recherches de l'université d'Orléans en collaboration avec PSA) qui se positionne comme un intermédiaire entre le mode classique et le HCCI

Nous pouvons ajouter également les termes français décidés par la commission de terminologie et qui sont parus au Journal Officiel le 2 juin 2006 :

- Autoallumage par compression traduit le terme HCCI
- Autoallumage par gaz chauds traduit le terme ATAC
- Autoallumage prérégulé traduit le terme CAI

Cette terminologie a un statut obligatoire dans toutes les publications officielles de langue française mais il n'est pas sûr que cela suffise pour l'imposer car le terrain est déjà « bien occupé ».

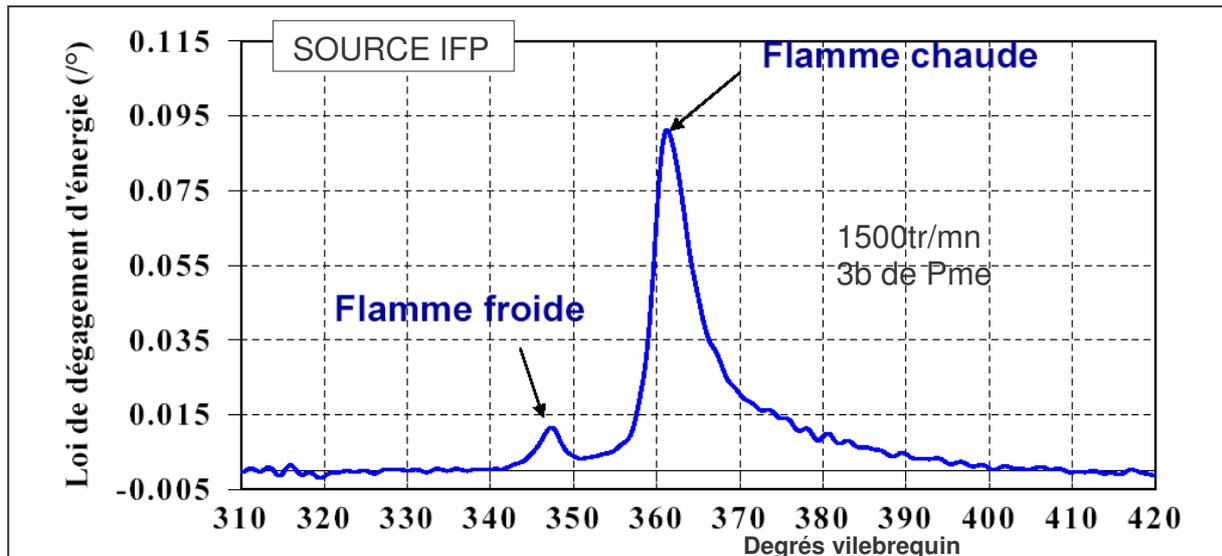
Précisions sur le déroulement d'une combustion de type HCCI

Voici quelques informations qualitatives sur le processus d'auto inflammation.

Les flammes froides

Ce terme, pour le moins paradoxal, décrit un phénomène qui se déroule à des faibles températures (<400°C) et donc nettement avant la fin compression. Il est sensible sur la courbe d'analyse combustion suivante.

Rappel : la loi de dégagement d'énergie est déduite de l'enregistrement de la pression dans la chambre de combustion et son unité (l°) exprime la vitesse de combustion de la charge. Par exemple sur le graphe suivant la valeur maxi atteinte frôle 0,095 ce qui veut dire qu'à cette position de vilebrequin il est brûlé 9,5% de la charge par degré de rotation (c'est une valeur élevée).



Nous constatons que l'énergie mise en jeu par la flamme froide est une toute petite partie de la chaleur totale. Ce régime de réaction « s'éteint » de lui-même car il se trouve que la vitesse de réaction présente un coefficient de température négatif entre 400 et 500 °C ; c'est-à-dire que la réaction ralentit lorsque la température augmente. L'énergie dégagée dans cette phase est faible mais ce régime est le précurseur du dégagement majeur qui va suivre (flamme chaude).

Les flammes chaudes

La flamme chaude apparaît au dessus de 500 °C, elle est beaucoup plus intense et son coefficient de température est positif : le dégagement de chaleur accélère la réaction. Cette auto accélération de la flamme normale peut arriver à générer une onde de choc qui fait passer la combustion en **régime détonant** (source d'incidents) mais toute auto inflammation ne produit pas forcément une détonation : c'est le cas des combustions HCCI pour lesquelles les fortes dilutions modèrent les vitesses de réaction.

Conséquences :

La combustion HCCI malgré sa rapidité n'a pas à être assimilée aux phénomènes de cliquetis qui se produisent dans un moteur bien qu'ils apparaissent également par un processus d'auto inflammation.

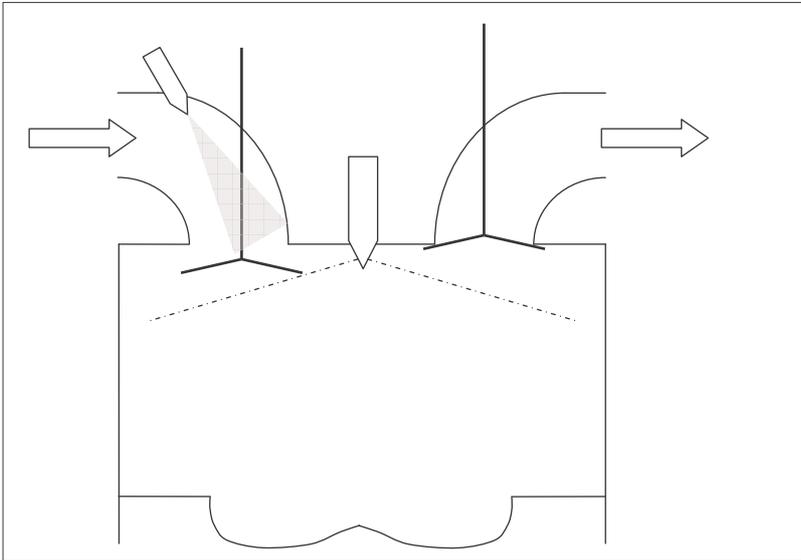
Le délai d'apparition de la flamme froide est important en HCCI car elle est le déclencheur de la flamme chaude. Des essais ont montré la sensibilité de ce délai à la température de l'air admis, au taux d'EGR, et aux réactifs tels que CO, NO des combustions précédentes. Le facteur déterminant reste la composition du carburant et il est évident que celui-ci sera un composant majeur pour le développement du HCCI.

Dans certains cas le délai entre l'apparition des flammes froides et celle des flammes chaudes peut aussi être influencé par les paramètres de fonctionnement ce qui complique la maîtrise du début d'inflammation.

Les différentes solutions de préparation de la charge

Un injecteur supplémentaire dans la tubulure

C'est la stratégie correspondant au système HCDC



L'injecteur tubulaire travaille sous 500b en HCDC mais des valeurs beaucoup plus faibles seraient envisageables car le temps disponible pour la vaporisation est élevé (720° possible par cycle) ce qui autorise des jets à grosses gouttes.

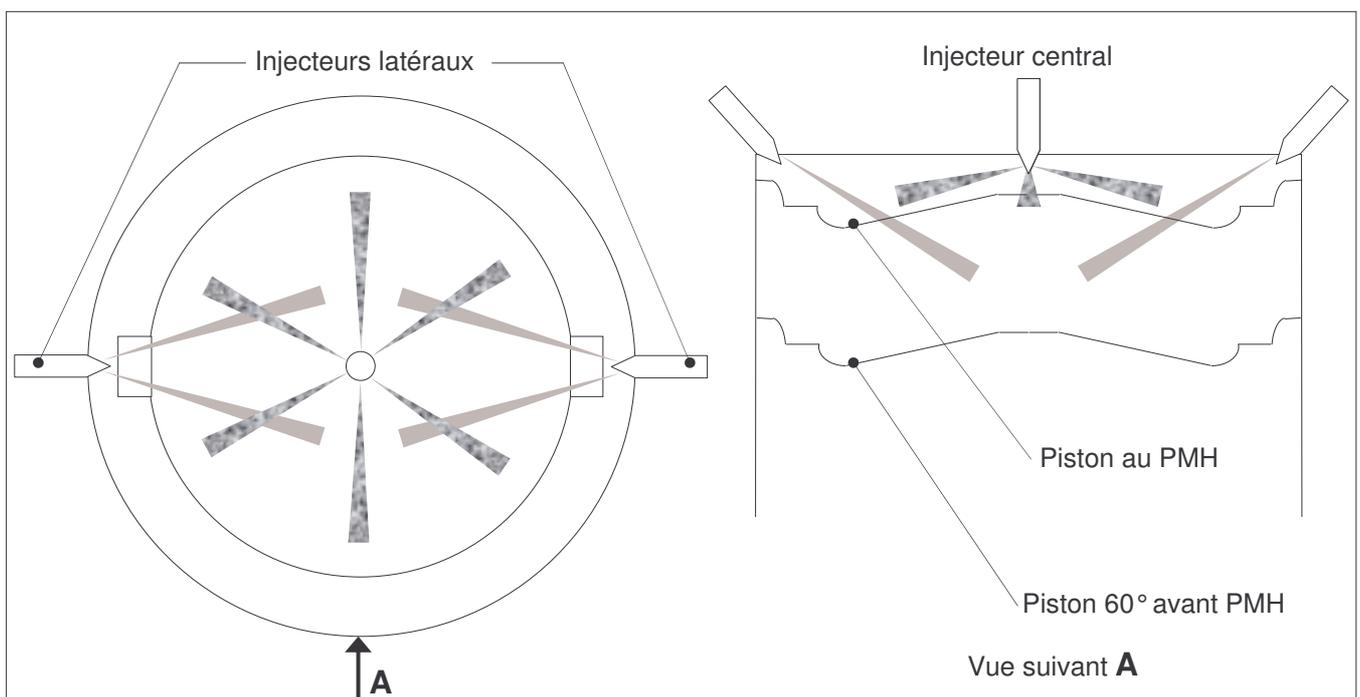
L'injecteur chambre travaille à 1800b, technologie devenue classique avec les systèmes à rampe commune.

L'admission se fait avec un mélange homogène et pauvre, en fin compression l'injecteur central permet d'atteindre ces conditions de combustion correctes. En mode combustion classique l'injecteur central assure seul le fonctionnement.

Un des intérêts de ce choix est la possibilité d'utiliser 2 carburants de réactivités différentes (cf. chapitre suivant)

Un injecteur supplémentaire (ou 2) dans la chambre de combustion

C'est la stratégie PREDIC/MULDIC qui utilise 3 injecteurs dans le cylindre



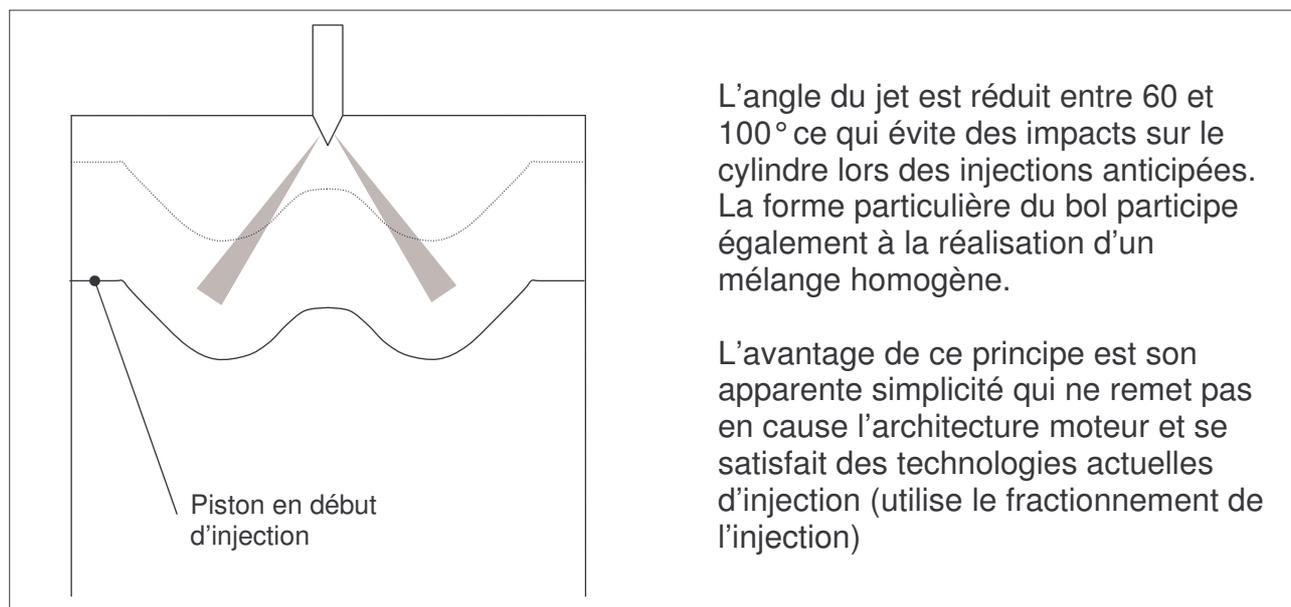
La disposition judicieuse des jets respectifs permet d'atteindre tout le volume de chambre quelle que soit la position piston. Les impacts des jets sur les parois seront réduits grâce à un phasage particulier : l'injection sur les côtés est très précoce (100 à 200° avant PMH) puis l'injection centrale débute environ à 40° avant PMH pour le PREDIC ou passe en injection tardive (2° et 30° après PMH) pour le MULDIC.

Les injecteurs latéraux utilisent un pression d'injection de 1500b (2000b au centre), si besoin leur débit peut être fractionné.

Dans cette application 2 carburants différents peuvent également être associés par 2 circuits séparés.

Un injecteur à jet adapté

C'est le choix fait par l'IFP pour son système NADI



Des organisations similaires se retrouvent sur les technologies UNIBUS et PCI avec également des injections très avancées vers 120° avant PMH.

Certaines réalisations atteignent des sophistications extrêmes qui les éloignent probablement de toute application commerciale : par exemple le système HiMiCS qui utilise un injecteur à 30 trous (!) réalisant 3 angles de jets différents (12 trous sur un cône à 155°, 12 sur un cône à 105° et 6 sur un cône à 55°). De plus la quantité injectée est fractionnée sur 4 injections.

Toutes les solutions de ce type perdent la possibilité d'utiliser conjointement 2 carburants différents.

Préparation par injection tardive

C'est la stratégie MKconcept qui utilise 1 seul injecteur (5 trous) et injecte au-delà du PMH la totalité du carburant (de 3° à 7° après PMH).

La teneur en O₂ est réduite à moins de 15% par un EGR important et un fort swirl est associé à ce mode de fonctionnement.

L'objectif est de profiter du long délai d'inflammation dû aux conditions dans la chambre pour injecter, répartir et vaporiser tout le combustible durant ce délai. La combustion se

déroule bien en mode homogène mais de manière tardive ce qui aura forcément un impact négatif sur le rendement.

L'intérêt de cette stratégie est qu'elle peut être envisagée sur des moteurs de technologie classique pour réduire les émissions de polluants (NOx particulièrement) sur certains points pénalisants. Des essais ont montré la faisabilité de cette solution mais cette réduction de polluants se « paye » par une augmentation de la consommation (et des HC).

Les différentes solutions pour agir sur le début de combustion et sur son déroulement

Par action sur la réactivité du mélange

- *Pré conditionnement du carburant par additif*
Cette solution permet simplement de « recalcr » la carburant par rapport aux situations de mise au point qui ont été choisies. Ceci peut être utile dans une période transitoire tant que la production de carburants ne sera pas calibrée sur les besoins spécifiques du HCCI.
Les distributeurs pourraient assurer eux-mêmes cette adjonction (sur préconisation des raffineurs) ou bien, le contrôle moteur peut prendre cette additivation en charge par injection dans le réservoir. Cette deuxième solution suppose une analyse combustion préalable par le contrôle moteur (voir le chapitre contrôle du phasage) qui devient alors auto adaptatif au carburant.
- *Injection de deux carburants de réactivités différentes*
Il faut doubler le circuit d'alimentation et d'injection ce qui complique notablement l'architecture. Certains systèmes (voir chapitre précédent) imposent déjà la contrainte du double système d'injection et peuvent tout à fait envisager cette stratégie.
L'intérêt de cette méthode est la possibilité d'agir individuellement sur chacun des cycles et d'obtenir une grande autorité de réglage sur le point d'inflammation. La régulation du processus peut s'en trouver améliorée.
- *Introduction de réactifs de combustion dans la charge*
L'introduction de produits intermédiaires de combustions (Radicaux libres, NO, CO) dans la charge agit sur le délai d'inflammation et la vitesse de combustion.
L'apport de ces types de réactifs se fait naturellement par les forts taux d'EGR réalisés pour le HCCI mais il est possible d'envisager une préchambre de combustion ou va être déclenchée une combustion riche qui va « ensemercer » la charge devant s'auto enflammer : c'est le principe de l'APIR.
- *Dépôts catalytiques sur les parois de la chambre*
(recherches CNRS à l'Université des Sciences et Technologies de Lille)
Ces revêtements peuvent modifier les délais d'auto inflammation en abaissant les températures de réaction.
Il est possible d'envisager des taux d'EGR plus faibles ainsi que des températures parois réduites pour arriver au même calage de combustion. L'intérêt serait alors de ramener la gamme de réglage dans des domaines plus compatibles avec les possibilités du moteur et de ses organes.

Par action sur la température de l'air admis

- *Régulation par le RAS (refroidisseur d'air de sural) ou le RAA (réchauffeur d'air d'admission)*

Ces deux échangeurs interviennent au premier ordre sur la température de l'air frais qui va être mélangé avec les gaz recirculés. Secondairement la pression de suralimentation influence aussi la température de l'air, mais ce paramètre ne peut pas être utilisé comme grandeur réglante car il modifie les taux d'EGR par la différence de pression ($P_{ech} - P_{adm}$).

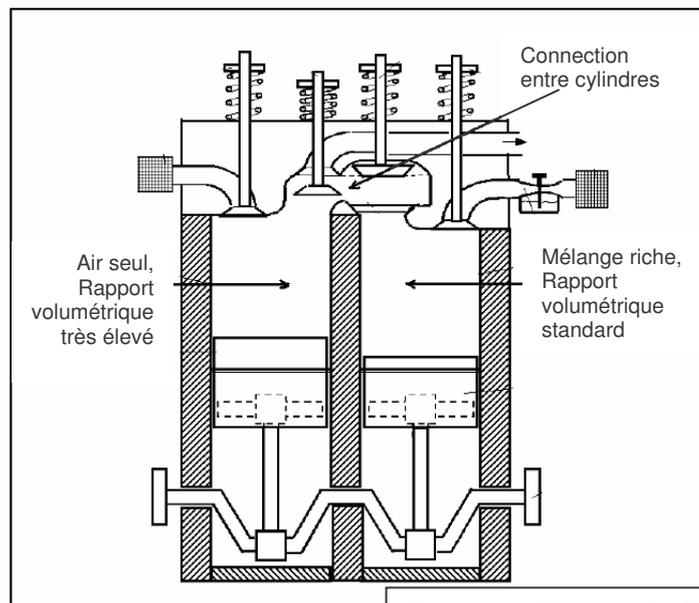
L'amplitude de variation est limitée par le fluide chaud (liquide refroidissement) et le fluide froid (air extérieur). L'action de la température de l'air sera limitée dans ses effets par les taux d'EGR importants, nécessaires au HCCI, qui font que c'est la température des gaz recirculés est prépondérante sur la température de la charge après mélange.

Les temps de réaction lors du processus de régulation sont importants (temps de circulation des flux et inertie thermique) et l'action sur la combustion se réalisera sur une base de temps mettant en jeux de nombreux cycles. La température de l'air constituera une grandeur utile à stabiliser et à optimiser le processus mais pas une grandeur de réglage à elle seule.

- *Injection d'air réchauffé*

Les défauts énoncés ci-dessus peuvent amener à envisager de disposer d'une source d'air beaucoup plus chaude pour augmenter son autorité sur le processus HCCI.

C'est le principe **CIBAI** qui réalise une réserve d'air chauffée par une intense compression dans un cylindre annexe en phase avec le cylindre principal (brevet Loth et Morris) ; une soupape injecte l'air chaud vers la fin compression pour arriver à une situation d'auto inflammation.



Source : Fernando Echavarria

D'autres essais (déclinés du CIBAI) sont réalisés sur un moteur CFR avec une réserve d'air autonome chauffée électriquement (Fernando Echavarria, West Virginia University).

- *par injection d'eau*

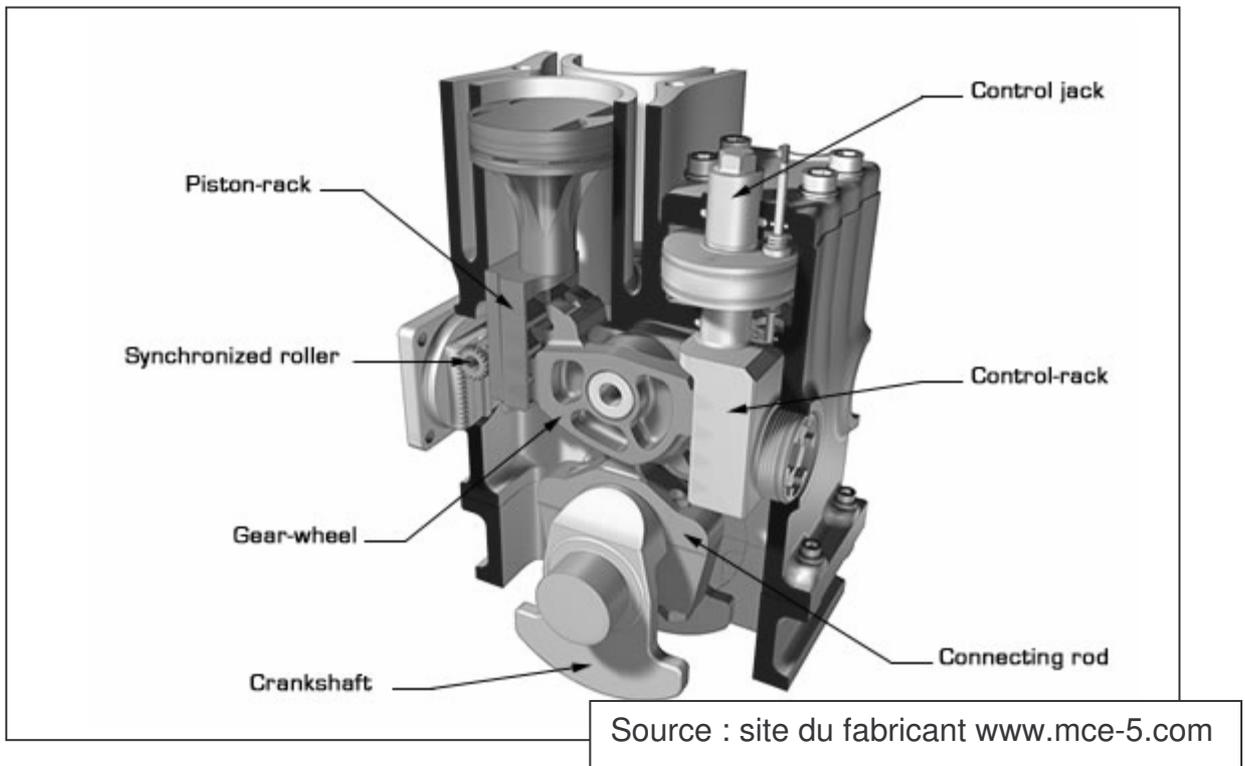
Bien que le HCCI impose souvent de réchauffer l'air il peut se trouver des situations où le besoin est plutôt un refroidissement ; pour des moteurs industriels fortement suralimentés par exemple. Si le RAS s'avère insuffisant, une solution connue est l'injection d'eau à l'admission qui permet une régulation facile de ce refroidissement.

L'eau vaporisée aura en plus un effet positif sur la réduction des NO_x.

Par action sur la température du mélange en fin compression

- *Variation de rapport volumétrique*

Le rapport volumétrique est un paramètre déterminant car c'est de lui⁽¹⁾ dont dépend l'élévation de température de la charge durant la compression. Son réglage en dynamique reste très difficile à résoudre, une réalisation aboutie est présentée ci-dessous (moteur MCE-5), vous vous reporterez au site référencé pour les détails de son fonctionnement.



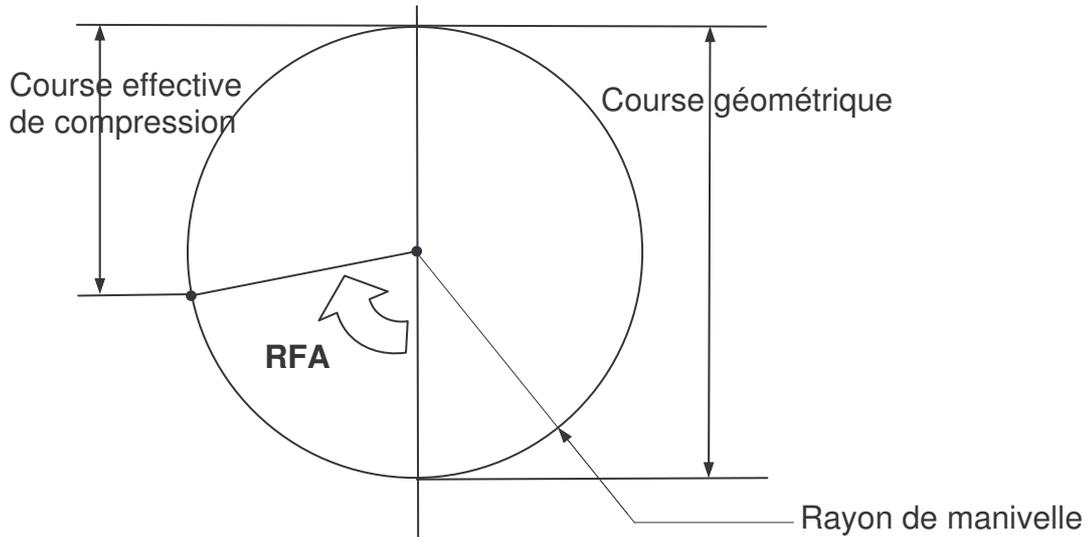
Beaucoup d'autres systèmes ont été imaginés (et même réalisés pour certains) mais celui-ci présente une qualité majeure pour la combustion HCCI c'est son faible temps de réaction, pour modifier son rapport volumétrique : le concepteur annonce 0,1 s pour diminuer le rapport volumétrique de 20 à 7. Il est alors tout à fait envisageable de réguler la combustion avec ce seul paramètre car la modification se fait en quelques cycles moteur.

C'est également le seul à proposer un réglage indépendant pour chaque cylindre ce qui est indispensable pour éviter les dispersions en HCCI.

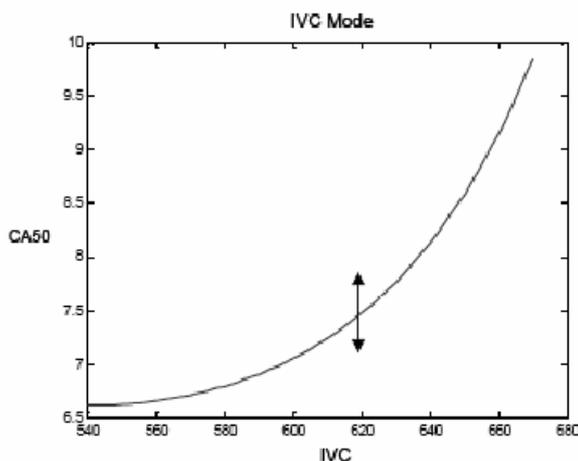
⁽¹⁾ Soit T1 la température avant compression, T2 après compression et ϵ le rapport volumétrique ; nous avons $T2 = T1 \times \epsilon^{\gamma(\gamma-1)}$ avec γ coefficient polytropique de compression. La pression initiale n'influe pas sur la température finale.

- *Variation du Retard Fermeture Admission*

Une solution plus simple pour modifier la compression de la charge est d'agir sur le retard fermeture admission (RFA) : pour de fortes valeurs le rapport de compression « effectif » s'en trouve diminué.



Ce principe est déjà utilisé sur certains moteurs pour réaliser des cycles de type « MILLER » qui améliorent le rendement aux faibles charges en réduisant les pertes par pompage du moteur. Dans une finalité HCCI des essais ont aussi montré sa validité, le graphe ci-dessous montre un exemple de l'impact de la valeur du RFA sur le phasage de la combustion en mode HCCI.



- ✓ Le RFA est porté en abscisses (terme IVC). La référence vilebrequin fait que, par exemple, pour IVC = 640° sur l'axe RFA = 100°
- ✓ Le phasage est caractérisé par le **point CA50** qui représente la position du vilebrequin lorsque 50% de la charge est brûlée. C'est en quelque sorte le « centre de gravité » de la combustion et sa position idéale est un peu après le PMH pour un rendement optimisé.

Ce moyen d'action paraît intéressant malgré sa faible autorité sur le calage de combustion (si RFA passe de 0 à 120° la combustion est décalée de 3° dans cet exemple). Autre avantage, les technologies de calage variable de la distribution sont maintenant maîtrisées et permettent des temps de réaction assez courts.

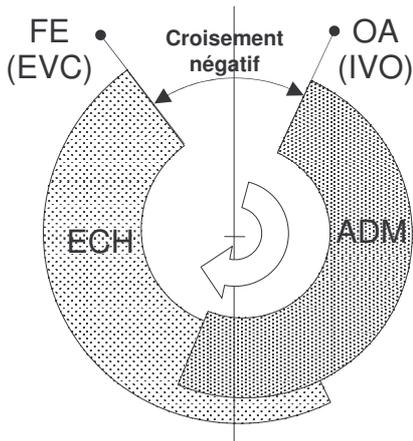
L'action du RFA est prépondérante aux faibles régimes, pour les vitesses de rotation élevées les effets d'inertie et d'acoustiques dans l'air d'admission réduisent son impact.

- *Réchauffage par action sur taux EGR*

Il faut rappeler que les taux d'EGR sont très importants en fonctionnement HCCI (40 à 70 %) : la masse de gaz d'échappement est souvent majoritaire dans la charge et la température de ces gaz brûlés reste élevée, même avec la technologie EGR refroidi.

Le dosage de ces gaz chauds est donc un moyen très efficace de régler la température de la charge, techniquement ce dosage EGR peut se réaliser en interne ou en externe : détaillons ces deux solutions.

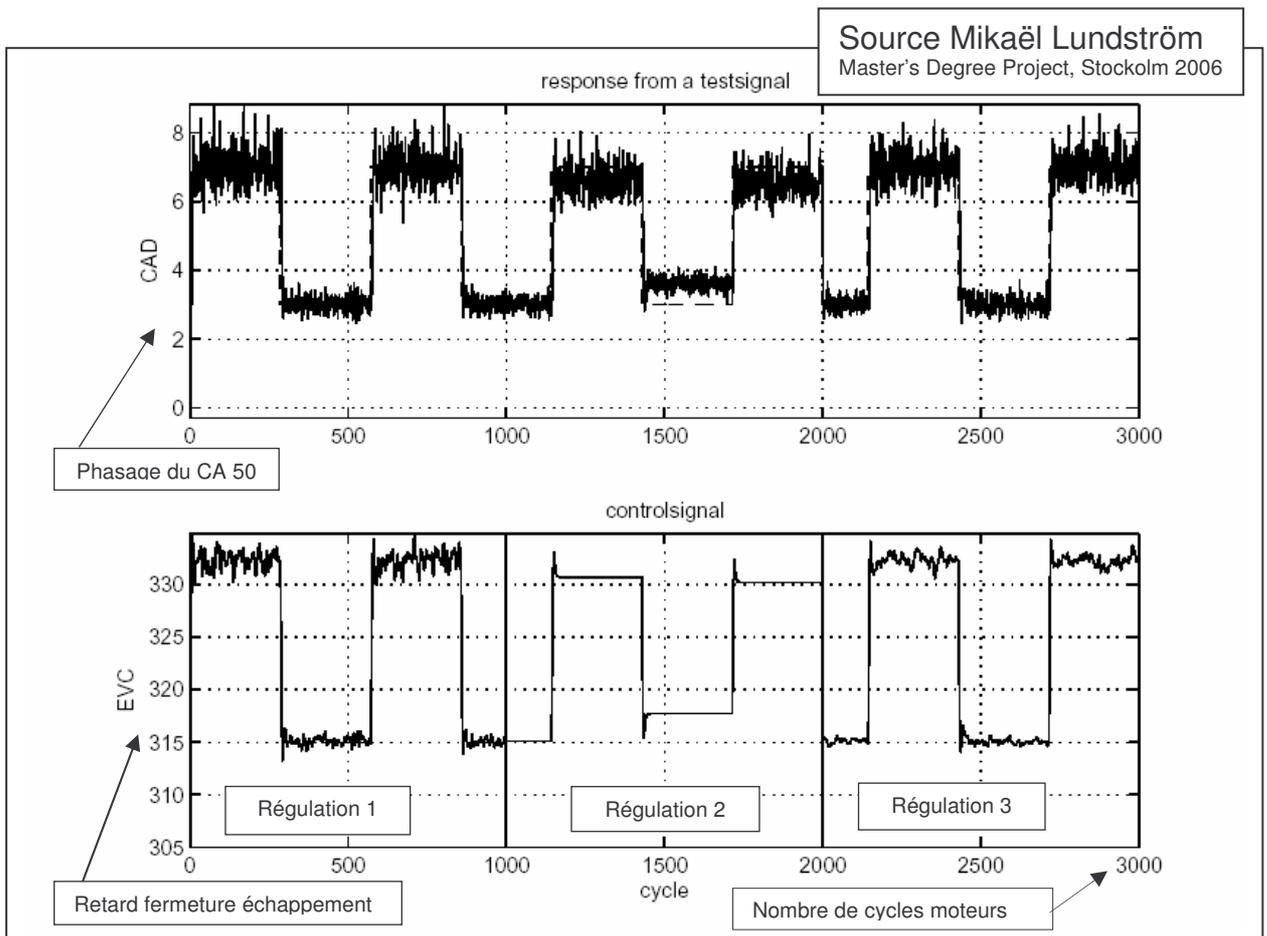
Par épure décroisée



Cette épure est dite « décroisée » ou à croisement négatif (en anglais : negative overlap).

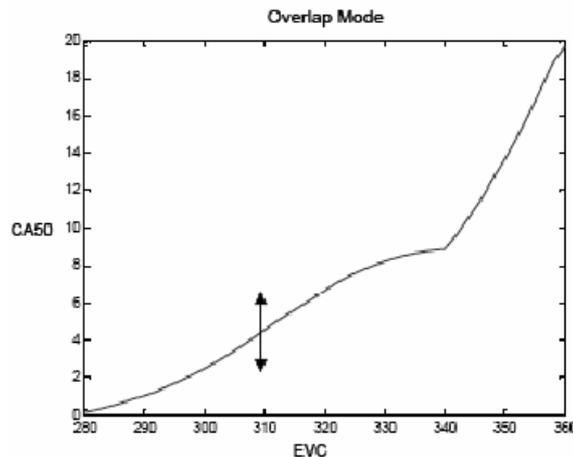
Une épure croisée permet par son recouvrement de créer un balayage du volume mort ; si elle est **décroisée**, elle enferme des gaz d'échappement qui participent au cycle suivant. La fonction EGR est assurée par **recirculation interne**

Le relevé d'essais sur le graphe suivant (monocylindre de recherche) montre que ce mode d'action est tout à fait capable de gérer le phasage de combustion



Sur ce graphe un EVC à 320° correspond à une Avance Fermeture Echappement de 40° part la référence vilebrequin choisie à 0 pour le PMH compression. Nous pouvons constater que les temps de réaction sont tout à fait satisfaisants et que le réglage du décroisement par l'AFE est un meilleur « levier » que le RFA (voir p. 9) pour décaler la combustion puisque 17° de variation d'angle provoque 4° de changement sur le CA50.

Cette grande autorité sur le CA50 est bien traduite par ce graphe qui synthétise ces essais.



Il faut signaler que pour des technologies de VVT classiques le réglage de l'AFE sera la même sur tout les cylindres ce qui ne permet pas une gestion de la dispersion du CA50 entre cylindres.

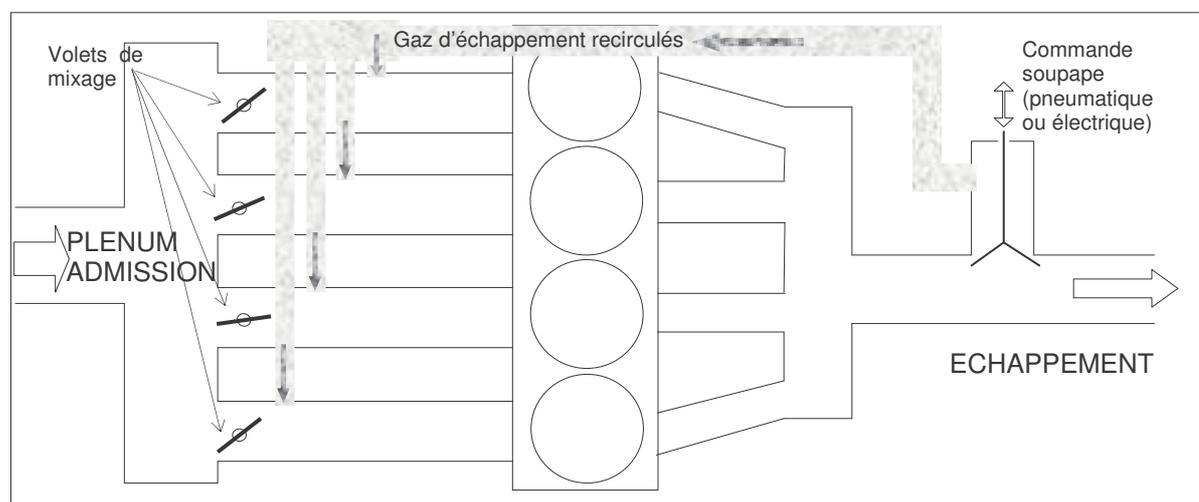
Les technologies « Camless » de distribution électromagnétiques seraient alors d'un grand intérêt pour ce mode de gestion HCCI. Elles apporteraient une gestion individuelle par cylindre et une action possible d'un cycle à l'autre puisqu'il n'y aurait aucune partie opérative intermédiaire.

Par soupape(s) EGR externe(s)

La soupape EGR est présente sur la totalité des diesels du marché, et sa commande obtient des temps de réactions assez faibles : il est donc tentant de l'utiliser directement pour la gestion HCCI en évitant des solutions plus compliquées.

Son action sur le CA50 est indiscutable mais en configuration classique la gestion individuelle de chaque cylindre n'est pas possible. Il faut avoir recours à une soupape EGR par cylindre et autant de voies de régulation, pour rendre ce principe opérationnel. Le coût augmente mais la technologie reste totalement maîtrisée.

Une autre solution est envisagée pour obtenir le même résultat : une soupape EGR unique plus un papillon par cylindre, pour agir sur les proportions du mélange de chaque cylindre.

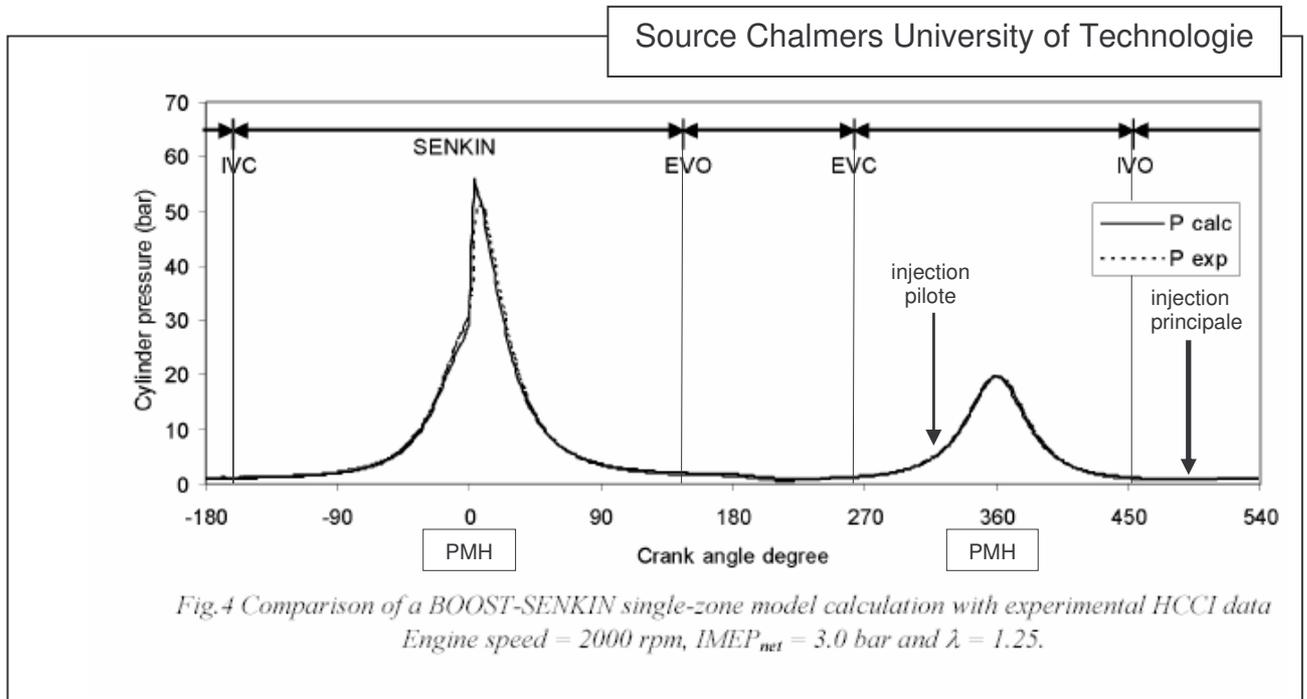


Un volet qui se ferme augmente le débit EGR du cylindre en agissant sur la différence de pression entre l'échappement et la tubulure. En agissant au plus près de l'admission, on améliore également le temps de réaction de la régulation par rapport à la soupape placée à l'échappement.

- *Réchauffage de la charge par pré injection (au PMH précédent la combustion) dans les gaz recirculés enfermés par une épure décroisée.*

Dans les situations les plus défavorables même les plus forts taux d'EGR peuvent s'avérer incapables d'allumer la charge correctement : il faut impérativement un apport de chaleur. Nous avons vu également que les apports de chaleur externes présentaient le défaut d'avoir des temps de régulations trop élevés par rapport à la fréquence des cycles.

La meilleure solution est alors de réchauffer directement la masse de gaz recirculés en interne par une injection pilote très anticipée puisqu'elle interviendra aux environs du PMH échappement. Le graphe ci-dessous montre une application de ce principe.



Principe

Sur cet exemple l'angle de « décroisement » est de l'ordre de 180° pour capturer une masse importante de gaz d'échappement.

L'injection pilote se fait après la fermeture échappement, la compression de la FE (EVC) jusqu'au PMH chauffe le mélange gaz échappement-carburant.

La condition pour rendre cette pré injection efficace est d'avoir encore un léger excès d'oxygène à l'échappement ce qui va autoriser des réactions d'oxydation dans les gaz recirculés. Le taux d'EGR doit être limité pour préserver cet oxygène résiduel

Effets positifs

C'est cette chaleur apportée par l'injection pilote qui règle la température du cycle suivant. L'injection principale peut avoir lieu durant l'admission ou la compression

(durant l'admission pour cet exemple). L'action sur la combustion se fait bien au cycle près, par la masse injectée en pilote, ce que peu de systèmes proposent.

Ce principe de fonctionnement réduit également les risques de ratés de combustions (Misfires) inhérents aux HCCI réglés par EGR. Ce risque vient des interactions entre les combustions successives ; ces interactions découlent de l'incidence de la température d'échappement sur la température de la charge. Lorsque les conditions de températures sont à la limite de l'auto inflammation malgré de forts taux d'EGR, certaines combustions peuvent ne pas être initiées : les bouffées d'échappement qui suivent sont alors plus froides que les précédentes et, après mélange à l'admission, vont faire chuter la température de la charge pour les cycles suivants. La situation limite est rendue critique et peut aboutir à un calage si le contrôle moteur n'a pas d'autres moyens d'action.

En supposant que la détection des combustions soit efficace (voir paragraphe suivant), la pilote dans les gaz recirculés est capable d'enrayer ce processus dès le premier raté de combustion.

L'avantage majeur de cette solution est de s'appuyer sur des technologies de contrôle moteur devenues courantes ; elle s'associe naturellement avec les distributions à calage variable de technologie classique (pas besoin de Camless). Son application n'entraîne pas un « saut technologique » important ce qui réduit le risque d'un projet qui s'appuierait sur ce principe. Hors zone HCCI le moteur retrouve une configuration classique et son potentiel ne doit pas être diminué.

Le contrôle du phasage de la combustion en boucle fermée

Le préalable à un contrôle de la combustion est de pouvoir générer une information sur sa position dans le cycle (CA50). L'information doit être exploitable par le calculateur et s'appuyer sur des principes de capteurs compatibles avec les coûts de la production série.

Evaluation du phasage (capteurs)

- *Par analyse dN/dt*

Il n'est pas nécessaire d'implanter un capteur supplémentaire pour contrôler la combustion. Le signal du capteur volant moteur porte des informations exploitables après analyse par le contrôle moteur. Ce sont les acyclismes près du PMH combustion qui vont être la signature de la combustion en cours, un manque d'accélération au-delà du PMH sera interprété (par rapports à des valeurs de référence) comme une combustion décalée en retard ou ratée. Cette stratégie impose des séquences « d'apprentissage » au calculateur pour qu'il prenne en compte les erreurs d'usinage de la cible.

Cette méthode est utilisée avec succès sur la plupart des moteurs à allumages commandés pour détecter les misfires (obligatoire pour satisfaire l'OBD2). Elle peut apporter une indication intéressante en combustion diesel mais celle-ci reste assez binaire : elle ne suffit pas lorsqu'il s'agit d'obtenir une information angulaire pertinente sur le déroulement de la combustion.

- *Par accéléromètre piézo-électrique*

Ce type de capteur est devenu courant sur moteur essence pour détecter le cliquetis moteur ; il est constitué d'un quartz piézoélectrique fixé sur le bloc moteur

et une masse sismique qui lui est associée. Il est implanté au plus près de la chambre de combustion mais rarement dans la culasse afin d'éviter les bruits mécaniques dus à la distribution.

Delphi l'utilise avec succès sur son système d'injection diesel pour contrôler le début de combustion et recalibrer les temps de réactions des injecteurs en dynamique.

Son application au HCCI est tentante car c'est une technologie peut onéreuse et d'implantation facile. On peut douter cependant de sa sensibilité car en HCCI il n'y a plus de départ de combustion détonante (due à la quantité injectée durant le délai d'auto inflammation) provoquant un front raide de pression. Il paraît difficile d'exploiter le signal de manière qualitative sur toute la durée de combustion.

- *Par sonde d'ionisation (ou capteur ionique)*

Le principe de ce capteur est basé sur le changement de conductivité des gaz lorsqu'ils sont en réaction et produisent des ions : une pointe métallique, sur laquelle est appliquée une tension continue, constatera cette baisse de conductivité, par rapport à la masse, au passage de la flamme. L'électrode centrale de bougie peut assurer cette fonction ainsi qu'une bougie de préchauffage si elle est isolée de la masse.

Ce principe est utilisé depuis peu par BMW (système Bosch)⁽²⁾ en combustion essence, sa fiabilité lui permet d'assurer seul la détection des ratés et de supprimer le capteur de cliquetis.

Des essais spécifiques ont été menés pour voir la qualité de cette information en combustion HCCI ; les deux graphes ci-dessous s'y rapportent.

A gauche sont présentés la tension d'ionisation récupérée par le capteur et l'évolution de la pression de chambre mesurée par un capteur d'instrumentation ajouté au moteur. L'évolution de la pression permet de calculer la loi de dégagement de l'énergie au cours de la combustion et de situer le CA50 qui est la caractéristique qui nous intéresse.

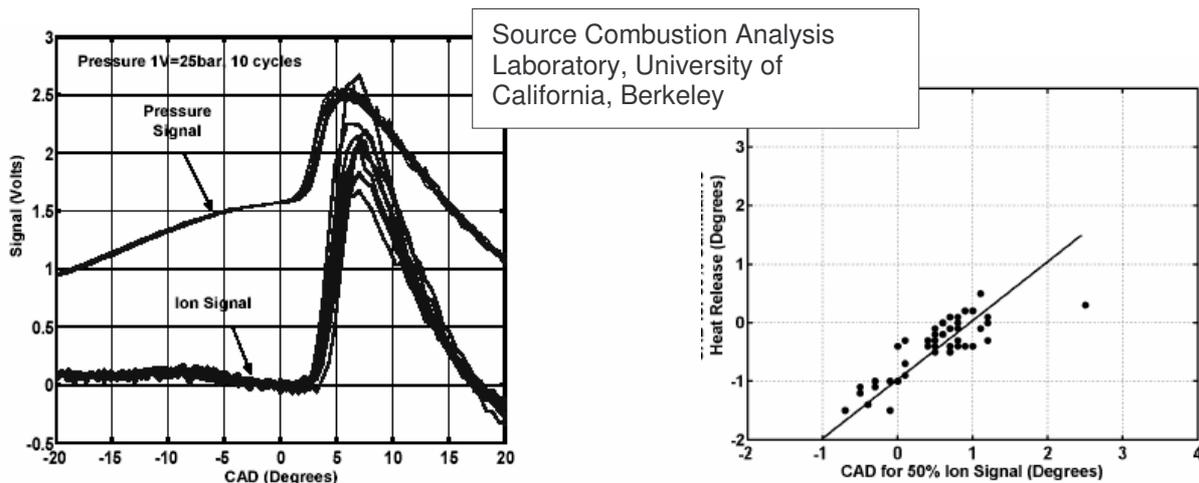


FIG. 2. Ion signal (volts*100) and pressure transducer signal (1V = 25bar). 3. 3. Linear relationship between CA50 and CAD for 50% ion signal.

A droite sont mis en relation le CA50 (en ordonnées) et le point où le signal d'ionisation est à 50% de sa valeur maxi (abscisses). Le dépouillement sur un grand nombre de cycle fait apparaître une tendance qui pourrait être considérée

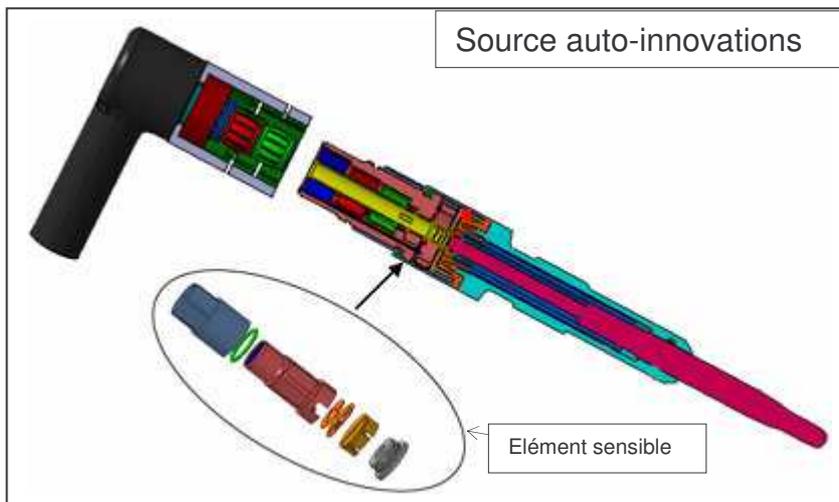
⁽²⁾ la première mondiale en revient à Mercedes en 1987

linéaire. Malgré la dispersion du nuage autour de la droite (de l'ordre du degré) le signal d'ionisation est capable de rendre compte du calage de la combustion avec une précision satisfaisante.

- *Par capteur de pression de chambre*

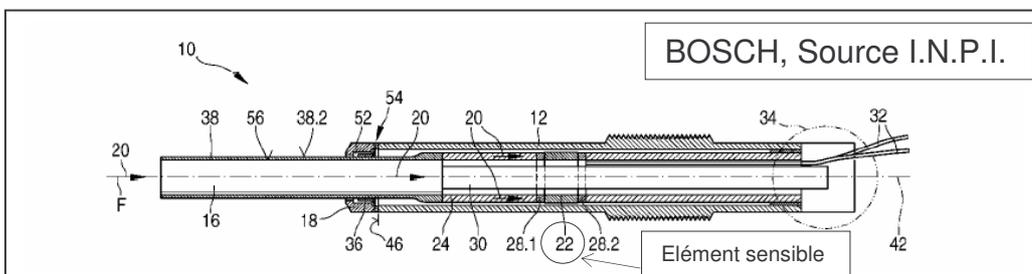
Comme il n'est pas question d'implanter un nouvel organe dans la chambre de combustion, il est logique que la bougie de préchauffage prenne cette fonction à son compte. La mesure directe de pression en temps réel permet une analyse qualitative tout au long de la combustion et les informations acquises ne dépendent que de la puissance de calcul disponible dans le contrôle moteur. Ce type de capteur constitue donc une avancée certaine vers la maîtrise de la combustion HCCI.

Le dessin ci-dessous présente une réalisation de la marque BERU, la première au stade commercial, disponible pour les constructeurs (en 2007).



Le crayon de la bougie est guidé par le corps (avec une étanchéité au guidage) ce qui lui permet de transmettre l'effort sur un corps d'épreuve situé loin de la zone chaude. Ce corps est instrumenté par des jauges de contraintes piézo-résistives ; toute l'électronique nécessaire au conditionnement du signal est incluse dans le capteur à l'extrémité la plus froide, aucune interface spécifique n'est nécessaire.

D'autres constructeurs travaillent sur le même produit, Bosch par exemple a déposé des brevets à ce sujet dès 1994 (ci-dessous).



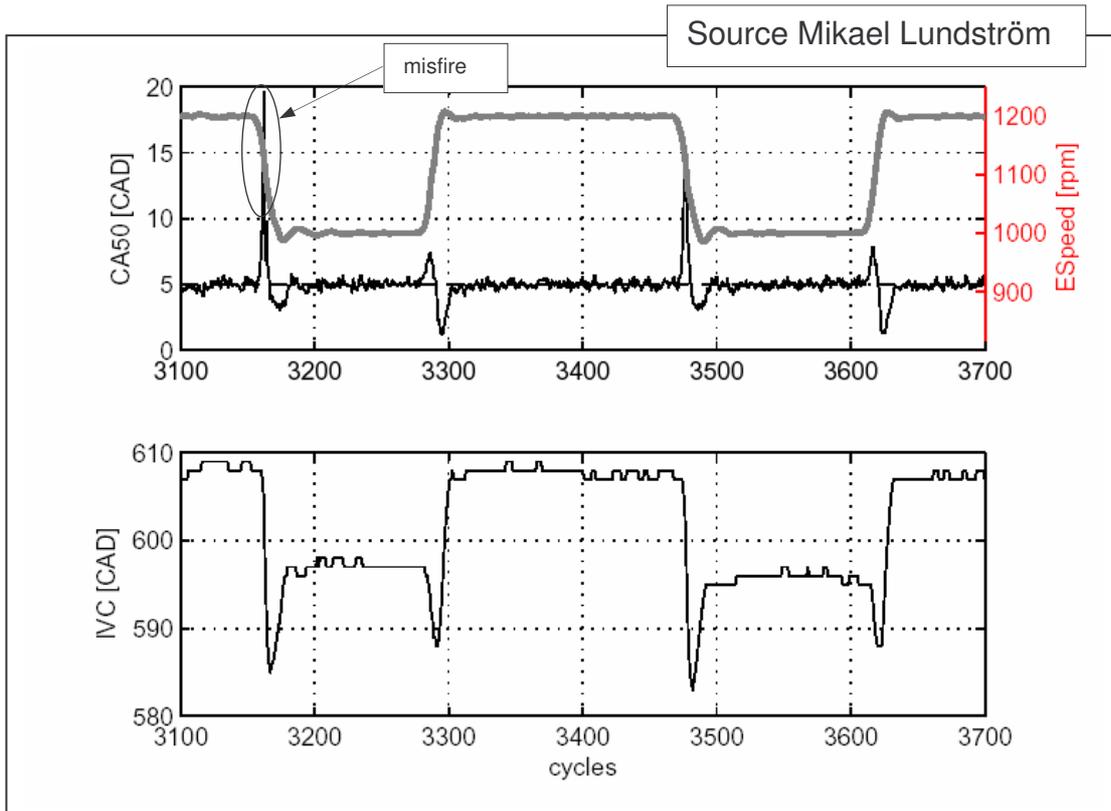
Le capteur est constitué dans ce cas par un quartz piézoélectrique.

Contrôle en boucle fermée

Le fait de disposer d'opérateurs ayant une action sur le phasage de la combustion et de capteurs permettant d'évaluer celle-ci ne règle pas pour autant le problème de **la stabilité du CA50** lorsque les conditions de marche sont variables. C'est un problème de régulation en boucle fermée et voici quelques résultats sur moteurs de recherche.

Contrôle par RFA variable

L'essai ci-dessous se déroule avec une vitesse variable entre 1000 et 1200 tr/mn (tracé en gris) à charge constante. Le point de CA50 est régulé par VVT en agissant sur le RFA (IVC sur le graphe).

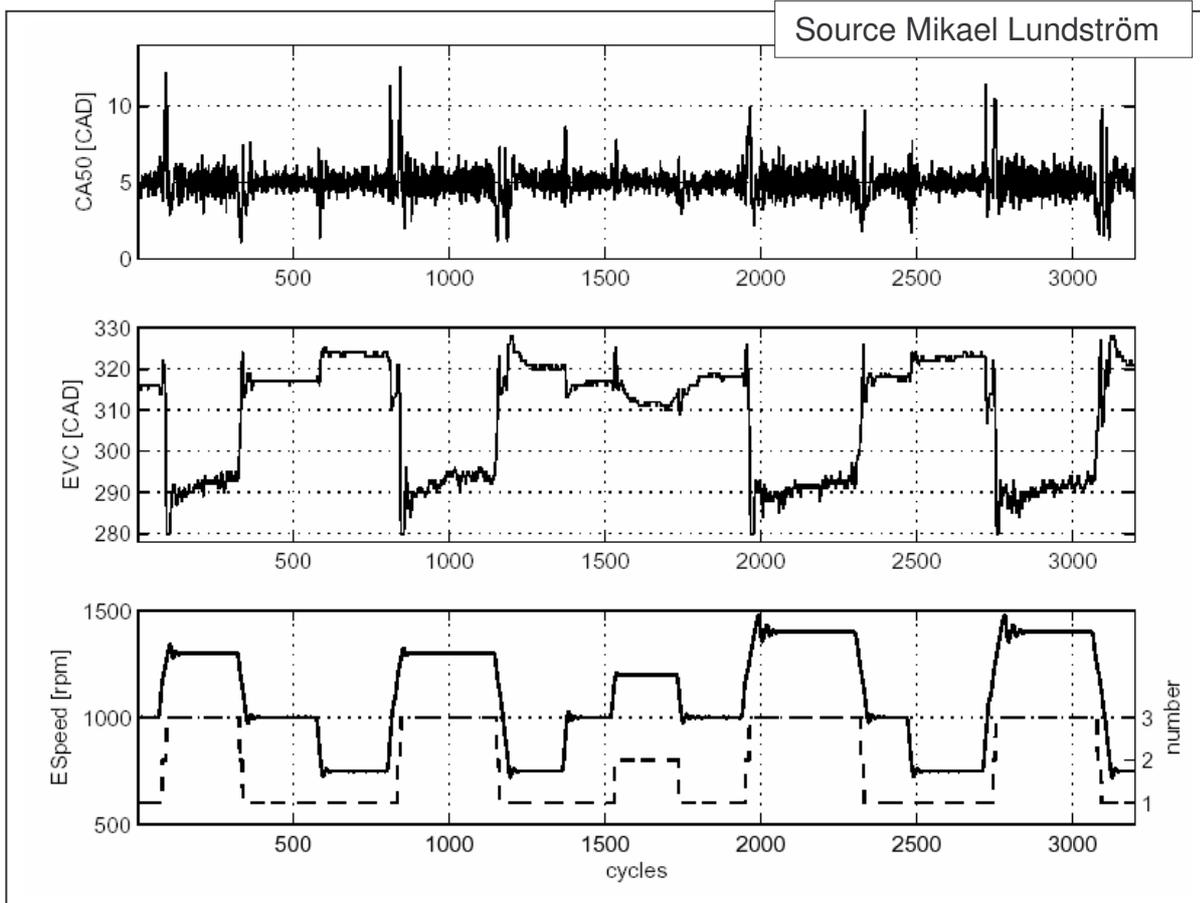


Nous remarquons que pour une faible variation de régime le RFA varie beaucoup (de 45° à 68°) et que le contrôle n'arrive pas à éviter des misfires : nous concluons que le RFA ne peut pas être un paramètre de contrôle à lui seul ce que nous énoncions déjà en page 9.

Contrôle par AFE et recirculation interne

Nous avons vu que l'angle de « décroisement avait plus d'autorité sur le CA50, c'est ce qui semble ressortir de l'essai page suivante où l'AFE (EVC sur le graphe) varie entre 35° et 80°.

Malgré des combustions tardives lors des transitions de régime, les misfires semblent être évitées ; le contrôle est de meilleure qualité et les technologies VVT sont probablement incontournables en HCCL.



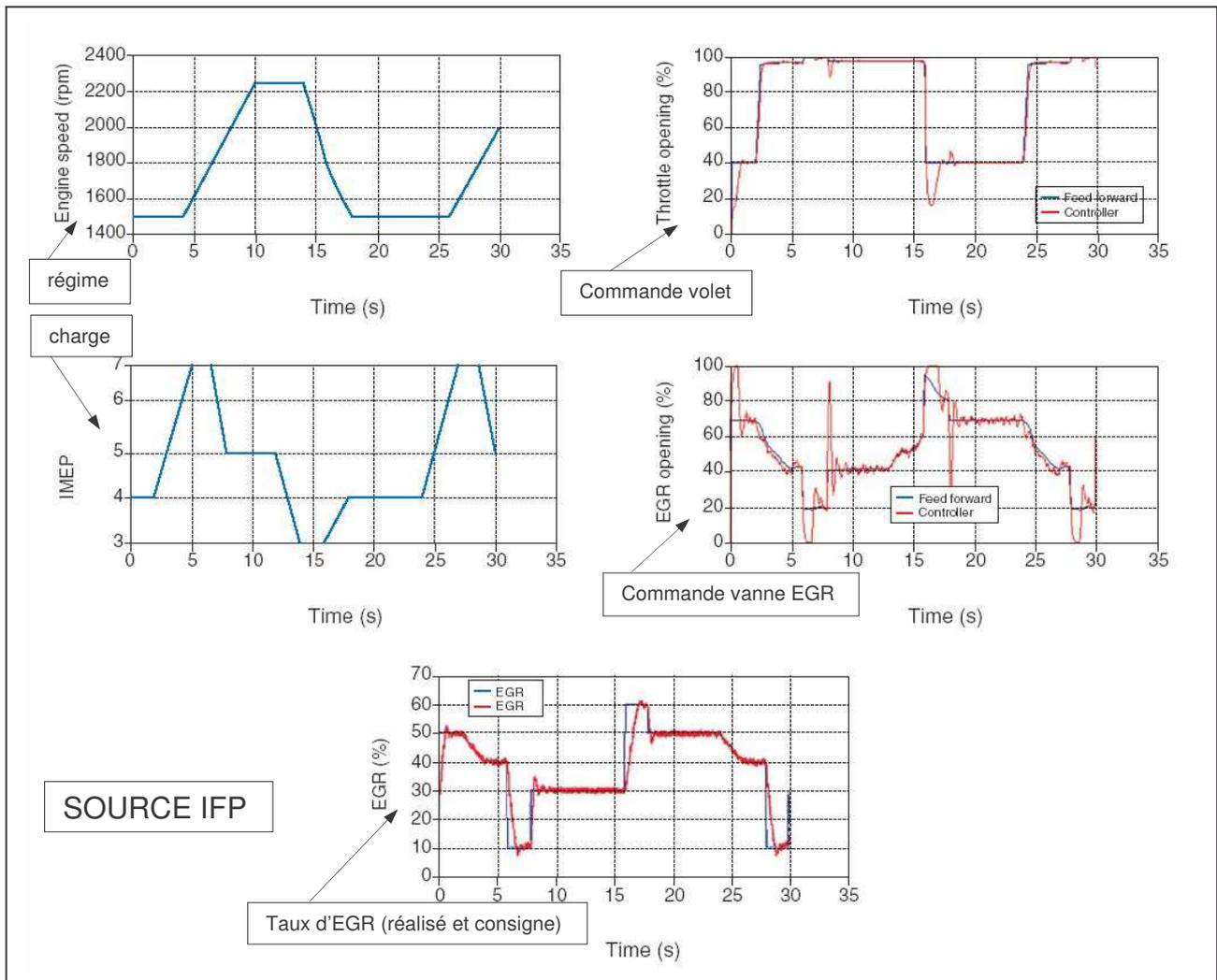
Contrôle par EGR externe

C'est l'application qui reste la plus proche d'une configuration classique ; pour améliorer le mode de contrôle nous avons vu que des volets de mixage peuvent être utiles. Le graphe de la page suivante montre la logique de commande de la vanne et du volet sur un cylindre. Cette stratégie permet une gestion individuelle par cylindre du CA50 (le CA50 n'est pas représenté dans la série de graphe).

Dans cet essai le régime varie conjointement avec la Pme (IMEP en bar) du moteur ce qui se rapproche d'une situation de roulage réelle : voir 2 graphes de gauche.

La gestion du volet et de la soupape est simultanée : voir 2 graphes de droite.

Le taux d'EGR réalisé est porté en rouge sur le graphe du bas et nous constatons qu'il est conforme à l'objectif (en bleu) nécessaire à la réalisation du CA50 visé.



Les performances actuelles

Les performances de ces technologies progressent chaque jour car beaucoup de développements sont en cours dans tous les secteurs industriels. La combustion HCCI est à la convergence de beaucoup de technologies avancées sur les moteurs et capitalise tout le savoir faire des bureaux d'études.

Il est certains que ce travail aura des retombées à court et moyen termes sur des produits commerciaux, même ceux de technologie classique.

Pour l'instant les résultats expérimentaux semblent dire que le HCCI « tient ses promesses » :

- La charge maxi en mode HCCI arrive à 6 - 7 bar de P_{me} en mode NADI (IFP) par exemple. Cette valeur rend possible la réalisation d'un cycle d'homologation NMVEG quasi intégralement en HCCI et de tirer profit de ses faibles émissions de NOx et Particules.

Le mode HPC (IFP) appliqué aux moteurs industriels permet même d'atteindre des valeurs de l'ordre de 13 bar en mode HCCI à mi-régime ce qui couvre une grande partie des points du cycle ESC d'homologation.

Pour ne pas pénaliser la puissance spécifique des moteurs il faut tout de même basculer en combustion classique lors des pleines charges car la forte dilution par l'EGR n'est plus compatible avec les performances.

- Sur les polluants les gains sont dans un rapport de 20 à 100 sur les NOx et les particules, c'est le principal intérêt des combustions HCCI car elles autorisent le passage des futures normes EURO 5 sans post traitement sur ces deux polluants. Filtres à particules et pièges à NOx étant les plus coûteux des systèmes de post traitement, ce sera l'apport majeur de ces recherches. Par contre les émissions de CO et HC sont en légère augmentation en mode HCCI. Cette caractéristique n'est pas très pénalisante car ces deux polluants se traitent par une catalyse d'oxydation qui est maintenant une technologie parfaitement maîtrisée et d'un coût acceptable.
- L'impact sur les rendements dépend du type d'application : sur des moteurs industriels fortement suralimentés le rendement est légèrement dégradé, sur des diesels rapides automobiles il arrive à être conservé, alors que sur des moteurs essence en combustion CAI il est nettement amélioré. Ces pertes éventuelles de rendement sont à comparer avec celles qui découleraient de toute façon des post traitement à mettre en place sans HCCI, en effet un FAP ou un piège à NOx ont chacun un impact négatif sur la consommation.

Il reste encore des défauts qui nous éloignent d'une application commerciale :

- La régulation du calage de la combustion n'est pas encore assez réactive pour une utilisation de traction routière.
- La transition HCCI ↔ mode normal est délicate à gérer car ce sont 2 configurations et des réglages totalement différents.
- La gestion de la boucle de suralimentation devient compliquée car le mode HCCI « refroidit » les gaz d'échappement et réduit l'énergie à la turbine.
- Les gaz d'échappement plus froids perturbent également les réactions catalytiques qui perdent de leur efficacité.
- Le bruit émis par une combustion HCCI reste plus élevé que les combustions classiques et implique un surcoût (et un surpoids) en insonorisation
- Les résultats sont dépendants de la formulation du carburant et le carburant commercial n'est pas conçu sur ce cahier des charges.

Conclusions, prospective

Nous pouvons imaginer les solutions les plus probables à court terme

Les voies réalisables avec technologie actuelle

- En cumulant les technologies EGR externe plus volet de mixage et calages de distribution variables nous possédons 4 paramètres de réglage du CA50 : commande vanne EGR + commande volet de Mixage + valeur du RFA + valeur de l'AFE. Ces technologies font partie des solutions actuelles et évitent de faire appel à un rapport volumétrique variable, par exemple, qui représente un coût et un saut technologique important.
- La technologie de pré injection dans les gaz recirculés paraît également incontournable car elle élargit les possibilités de réaction de la régulation en proposant une action cycle par cycle ce que ne font pas les 4 paramètres cités plus haut.
- La régulation en boucle fermée de la combustion ne pourra pas faire l'économie d'un capteur de pression de chambre et Béru paraît bien placé pour imposer son produit.

- Les pétroliers devront accompagner cette évolution technologique en proposant des carburants adaptés aux HCCL.

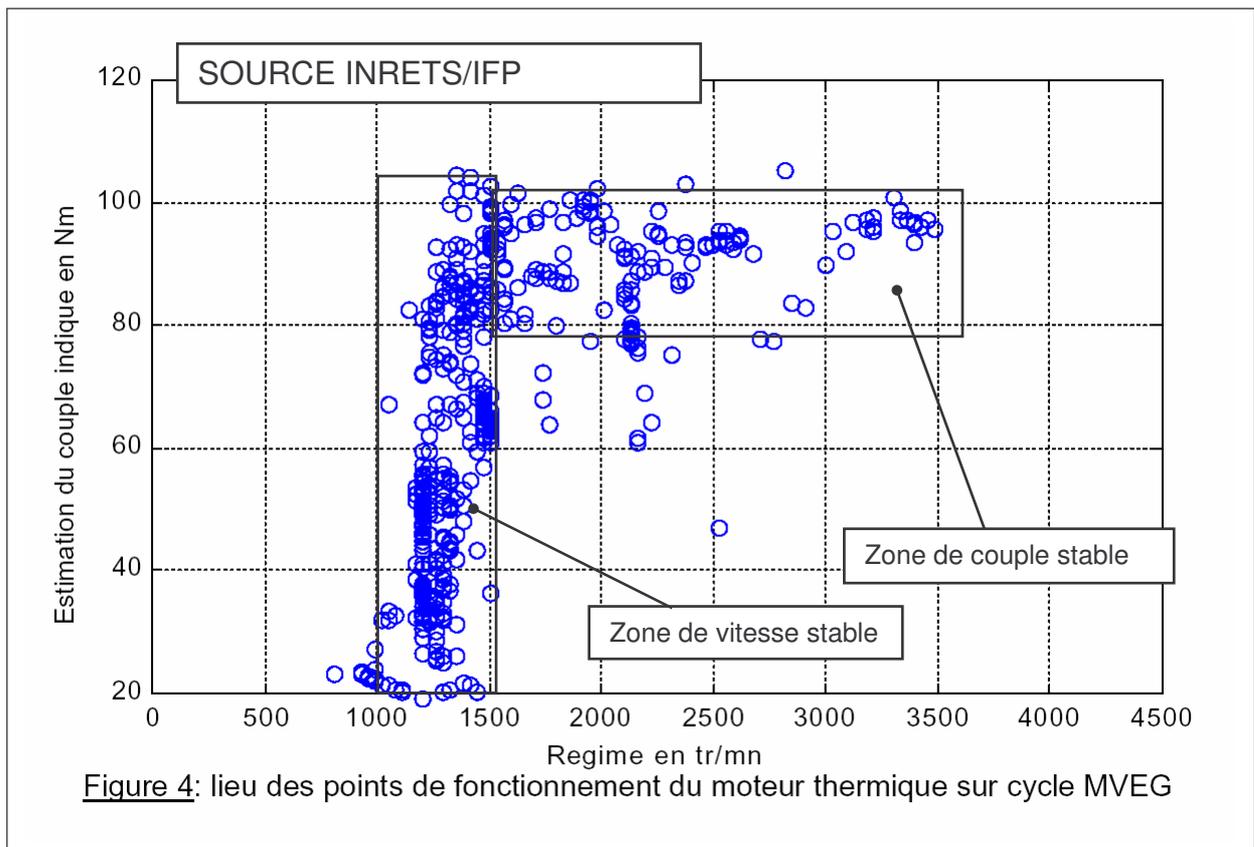
Intérêt HCCL plus hybridation

Le problème majeur pour le contrôle de la combustion est sa réponse aux variations de charge et de régime. En roulage c'est le conducteur qui impose ces variations : il serait intéressant de découpler la charge produite au vilebrequin et le couple demandé aux roues.

L'hybridation réalise cette idée :

- Par sa transmission à variation continue elle dissocie variation de régime et vitesse véhicule.
- Par sa double motorisation (en mode hybride parallèle) thermique et électrique elle gère la distribution du couple demandé sur ces 2 sources et peut réguler le couple du moteur thermique.
- Le graphe suivant correspond à une Toyota PRIUS réalisant le cycle NMVEG sur banc à rouleaux.

Bien que la stratégie de commande ne soit pas optimisée dans ce but, nous constatons que l'hybridation parallèle réduit les zones d'utilisations du moteur autour d'une iso-régime et d'une iso-charge



Une mise au point plus poussée pourrait réduire encore la dispersion des points de fonctionnement (en bleu) et avoir un impact tout à fait positif sur la régulation HCCL qui verrait les transitoires brutales disparaître sur le régime et la charge.

L'hybridation peut être ajoutée à la liste des technologies actuelles concourant à la réalisation des combustions HCCL.

Une solution en attendant ?

L'évolution technique se fait par petits changements tels que ceux que nous vivons en ce moment : Hybridation des moteurs à essence puis arrivée des hybrides diesels (la tendance se poursuivra probablement par de l'hybride GNV), ces solutions réduisant les consommations et les polluants à technologie moteur constante.

Le HCCI, dans cette logique, trouve sa place comme une solution intermédiaire (horizon 2010 à 2015) en attendant des changements plus radicaux tels que les moteurs à hydrogènes et les piles à combustibles (au-delà de 2020).

Cette période intermédiaire verra également le développement de nouveaux carburants conçus pour ces nouveaux modes de combustions et prenant en compte l'évolution des technologies de post traitement.

Le HCCI et le CAI réaliseront certainement une convergence des deux moteurs essence et diesel vers un même carburant, un même contrôle moteur et les mêmes post traitement des polluants.

Actuellement les rapports volumétriques sont à 14 à 18 en diesel HCCI et 10 à 12 en essence, les pressions d'injection en essence IDE augmentent constamment, ce sont des indices sur ce rapprochement en cours.
