

**Projet de fin d'étude.**

**Département Informatique Microélectronique Automatique.**

**Modélisation et commande de l'auto-ignition d'un moteur**

**HCCL.**

Rapport Final.



Elèves Ingénieurs : Moulé Alexandre, Taché Clément

Tuteurs Polytech Lille : Pr. Jean-Yves Dieulot, Pr. Anne-Lise Géhin

Partenaires Université de Gand : Pr. Sebastian Verhelst, Stijn Broekaert

Année : 2014/2015

## **Table des matières.**

Table des matières.	1
Remerciements.	3
Introduction.	4
I/ Présentation du projet.	5
II/ Méthodes de détection.	10
III/ Perspective de contrôle.	16
Conclusion.	22
Références.	23
Annexes.	25

## **Remerciements.**

Nous tenons à remercier nos tuteurs Mr Jean-Yves Dieulot et Mm Anne-Lise Géhin pour leur disponibilité, leur temps et l'aide qu'ils nous ont apporté.

Nous tenons également à remercier Mr Sebastian Verhelst et Mr Stijn Broekaert pour nous avoir accueillis dans leur université, leurs conseils et l'ensemble des informations qu'ils nous ont fournis.

## **Introduction.**

Ce projet se déroule en partenariat avec l'université de Gand (Belgique) et plus particulièrement avec le département « Flow Heat and Combustion Mechanics ». Ce département travaille à l'amélioration des moteurs thermiques existant par l'étude des carburants utilisés et le développement d'outil d'optimisation durable, évolutif et compact.

L'étude du moteur HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) l'amélioration de son fonctionnement, sa commande et son contrôle représente un enjeu dans le cadre des économies de carburant et de la réduction des émissions de polluants atmosphérique.

L'objectif principal de ce projet est de caractériser la combustion au sein du moteur, puis de faire une étude bibliographique des modèles et contrôles applicable au moteur HCCI. La particularité de cette étude repose dans l'utilisation d'un capteur permettant de mesurer la chaleur libérée lors de la combustion.

## I/ Présentation du Projet.

### 1) Principe de fonctionnement du moteur HCCI.

Le moteur HCCI est un moteur à combustion interne au même titre que le moteur à essence ou le moteur diesel. Il peut, d'une certaine manière, être considéré comme un mélange entre ces deux moteurs.

Le principe de fonctionnement de ce moteur est le suivant :

- Injection dans le cylindre du moteur d'un mélange air-carburant homogène. (A)
- Compression de celui-ci jusqu'à parvenir au point d'auto-allumage (ou auto-ignition). (B)
- Détente. (C)
- Evacuation des gaz suite à la combustion. (D)

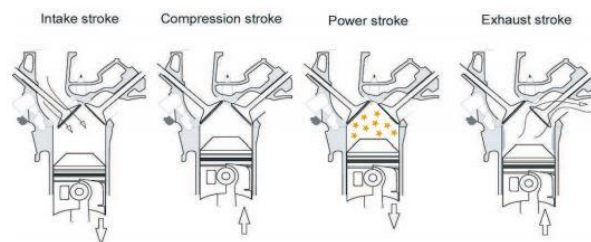
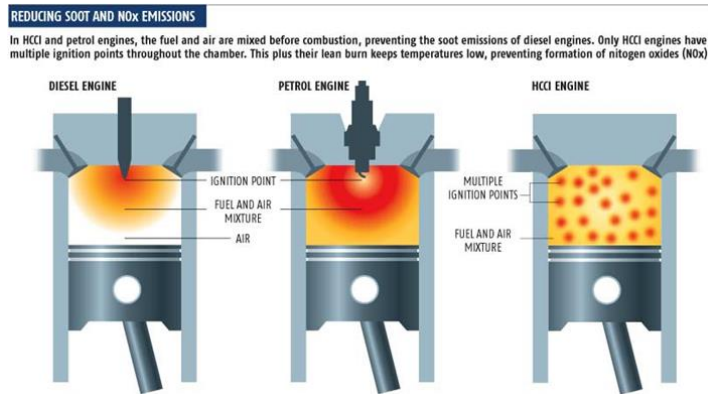


Figure 1.1: Four stroke engine cycle. With permission, from Ford Motor Company.

*Fig. 1 Cycle de fonctionnement du moteur HCCI*

Comme dans le moteur diesel, le mélange est compressé jusqu'à auto-ignition, il n'y a donc pas de commande directe de l'allumage (bougie) comme sur un moteur à essence.

Toutefois, comme les moteurs à essence, le moteur HCCI utilise un mélange homogène contenant du carburant et de l'oxydant (le plus souvent de l'air) alors que dans le cas d'un moteur diesel le carburant est injecté lors de la compression.



*Fig. 2 Comparaison entre les différents types de moteurs.*

Le moteur HCCI présente ainsi des avantages par rapport aux autres types de moteurs à combustion interne :

- Un rendement plus élevé que les moteurs à essence (environ 30%).
- Peu de pertes mécaniques
- Basse température de combustion
- Très peu d'émission d'oxydes de nitrogènes
- Pas d'émission de particules
- Possibilité d'utiliser différents carburants

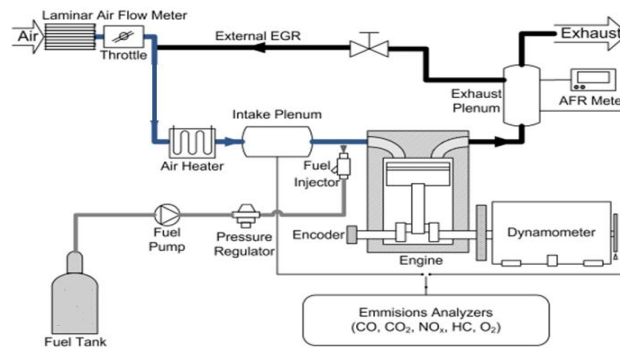
Toutefois, le moteur HCCI présente aussi quelques inconvénients :

- Contrôle difficile de la température d'ignition
- Contrôle difficile du déclenchement de l'ignition
- Faible densité de puissance
- Faibles performances à hautes charges
- Fortes émissions de polluants hydrocarbures
- Pics de pressions élevés
- Energie dissipée dans un temps très court

Le problème principal de ce moteur est donc le contrôle de son ignition, ce qui crée des problèmes principalement lors des phases de démarrage et pour les fonctionnements à couple élevé.

## 2) Présentation du banc de test.

L'université de Gand possède un banc d'essai monté autour d'un cylindre de moteur HCCI, cela permet de réaliser des séries de mesures afin d'en étudier le fonctionnement.



*Fig. 3 Schéma du banc de test.*

Ce banc d'essai est équipé d'un grand nombre de capteurs, il est possible de mesurer :

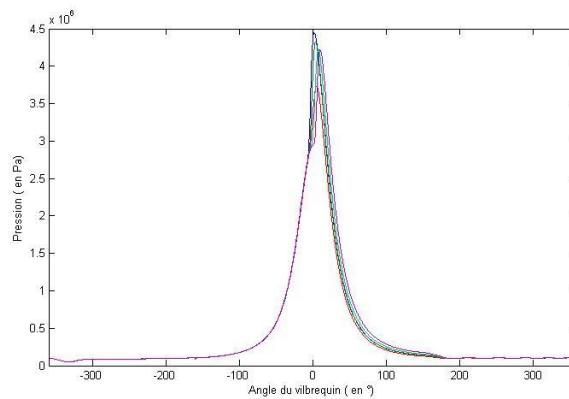
- Angle du vilebrequin
- Température des gaz injectés
- Température en sortie du cylindre
- Température atmosphérique
- Pression atmosphérique
- Pression dans le cylindre
- Pression des gaz en entrée du cylindre
- Chaleur dissipée (précision de 7-10%)
- Couple sur le vilebrequin
- Ratio air/carburant du mélange injecté
- Ratio air/carburant en sortie

Des séries de mesures ont été réalisées sur ce banc de test, cela a permis de récupérer les courbes représentant la pression dans le cylindre, la température des gaz, la chaleur libérée, le flux de chaleur net et le volume de la chambre selon différentes conditions initiales (annexe 1).

### 3) Données disponibles.

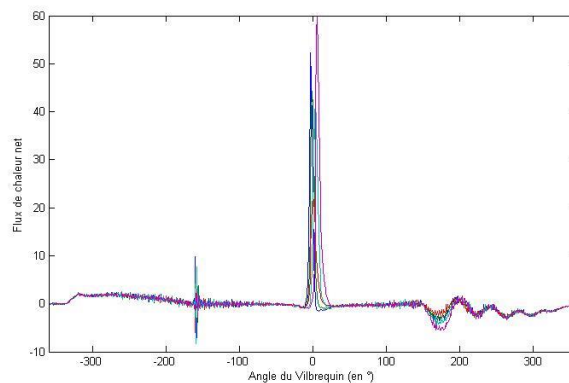
Nous avons à notre disposition 5 jeux de mesures réalisés par Stijn Broekaert. Chaque mesure est réalisée de la même manière en modifiant les variables d'entrées.

L'ensemble de ses mesures nous donne un échantillon suffisant pour tester nos méthodes de détection et vérifier les informations trouvées dans la littérature.



*Fig 4. Pression / CA*

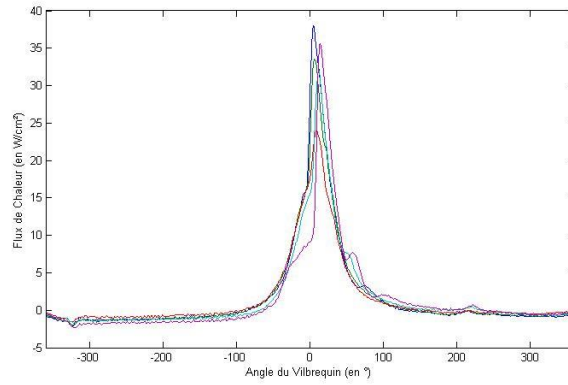
Ces courbes représentent l'évolution de la pression à l'intérieur du cylindre durant un cycle du moteur.



*Fig 5. Flux de chaleur net / CA*

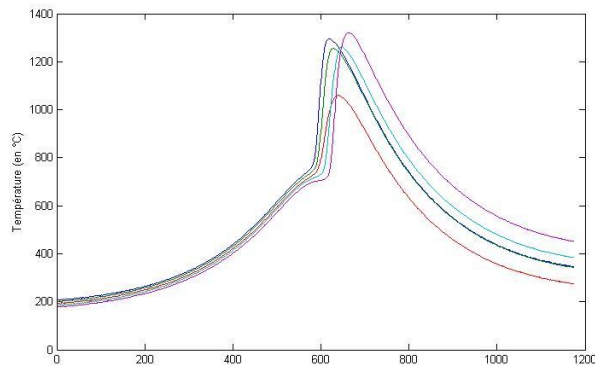
Ces courbes représentent le flux de chaleur net à travers les parois du cylindre durant un cycle, il ne s'agit donc pas du flux réel ce qui aura une importance dans la suite de notre travail.





*Fig 6. Chaleur / CA*

Cette courbe représente la chaleur libérée par la réaction dans le cylindre durant un cycle.



*Fig 7. Température du mélange / CA*

Cette courbe n'est pas issue d'un capteur mais est calculée à l'aide des courbes de chaleur, de pression et des lois thermodynamique du moteur. Elle représente la température des gaz dans le cylindre durant un cycle.

## II/ Méthodes de détection

### 1) Méthode de détection théorique.

La majorité des méthodes de détections utilisées actuellement sont basées sur le CA50, c'est à dire le moment ou 50% du carburant a été consommé, et non sur la détection directe du déclenchement de la combustion (CA1). En effet, le CA1 est sujet au bruit et est très difficile à détecter avec précision, le CA50 est beaucoup plus stable et robuste au bruit. [1]

Il y a deux types de détections, celles basées sur un modèle thermodynamiques et celles basées sur l'étude du signal observé.

#### 1.1) Méthodes de détection basées sur le modèle thermodynamique.

L'angle du vilebrequin correspondant au moment de l'auto-ignition peut être déterminé en utilisant la condition d'Arrhenius [6]:

$$\int_{\theta_{ivc}(k)}^{\theta_{ign}(k)} f_k(\theta) d(\theta) = 1$$

Complétée avec:

$$f_k(\theta) = A_a P_{in}^n V_k(\theta)^{\gamma m} \exp\left(-\frac{E_a V_k(\theta)^{1-\gamma}}{RT_{1+}(k)}\right)$$

Ou  $P_{in}$  est la pression d'entrée,  $A_a$  un facteur d'échelle,  $E$  l'énergie d'activation,  $R$  la constante des gaz parfait,  $V$  le volume and  $k$  le cycle.

L'équation résultat est ensuite résolue pour:

$$\theta_{ign}(k) = \Delta\theta_A + \frac{1}{f_k(\theta_{TDC})}$$

Afin d'utiliser cette méthode il est nécessaire de connaître l'ensemble des paramètres des équations, ces paramètres doivent être déterminés de manière empirique puisqu'ils dépendent du carburant utilisé, du moteur et des conditions extérieures. Nous n'avons pas les moyens de les déterminer et avons donc décidé de nous orienter vers d'autres méthodes.

## 1.2) Méthodes basées sur l'étude du signal.

Notre première idée était d'utiliser l'algorithme de CUSUM Page-Hinkley, qui peut être trouvé dans le livre de Basseville et Nikiforov et permet la détection d'un changement dans l'un des paramètres d'une séquence dépendante du temps. [9]

Il s'agit d'une méthode d'analyse statistique utilisée pour la détection d'un événement soudain, basée sur un changement de variance des données analysées.

Mais nous ne pouvons pas appliquer cette méthode à nos courbes puisque nous n'avons pas de changement représentatif de la variance (ce qui apparaîtrait, par exemple, pour un phénomène de « knock »). La variance n'est donc pas un élément représentatif des données dans nos courbes, cependant il semble exister des indices dans l'évolution des signaux qui pourraient nous servir, nous en discuteront plus tard.

## 2) Méthodes de détection expérimentales.

### 2.1) Détection du CA50.

#### a) En utilisant la courbe de pression

CA50 peut être déterminé quand la pression dans le cylindre atteint sa valeur maximale. Cette méthode fait l'hypothèse que la combustion se déroule intégralement et dans de bonnes conditions. [1]

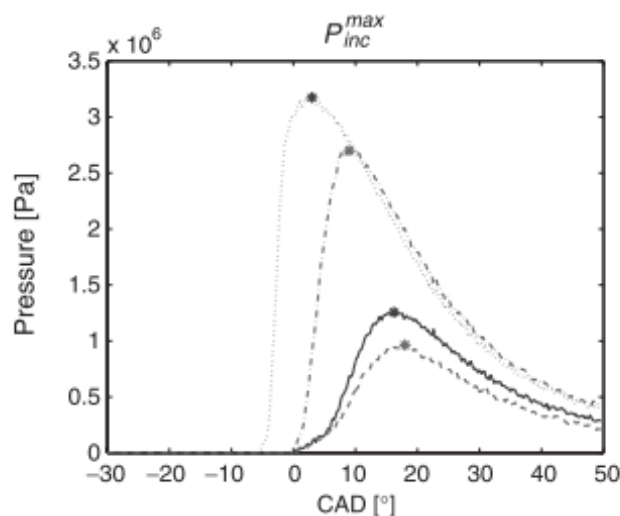


Fig 8. Ca50 sur le courbe de pression / crank angle.

b) En utilisant le flux de chaleur net ( $dQ/d\theta$ )

CA50 peut être déterminé quand l'énergie libérée par degré du vilebrequin ( $dQ$ ) atteint sa valeur maximale. [1] Il est possible d'utiliser cette méthode sur la courbe de chaleur en la dérivant ou sur la courbe de flux de chaleur net.

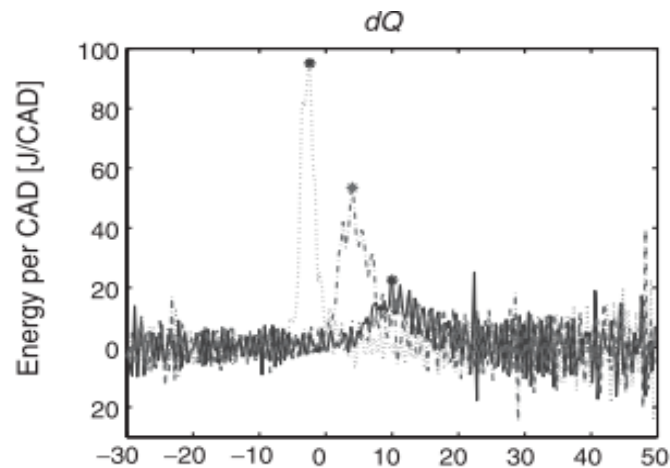


Fig 9. Ca50 sur la courbe dérivée de la chaleur / Crank Angle.

c) En utilisant la chaleur totale libérée par la réaction.

Cette méthode est notre méthode référence afin de détecter le CA50.

Elle consiste à faire la somme de la chaleur libérée pendant la réaction, la courbe représentant cette somme (fig 10) peut être utilisée afin de déterminer les points recherchés. On mesure l'intervalle entre les valeurs maximale et minimale de la courbe, et on localise le CA50 à la moitié de cet intervalle. [17]

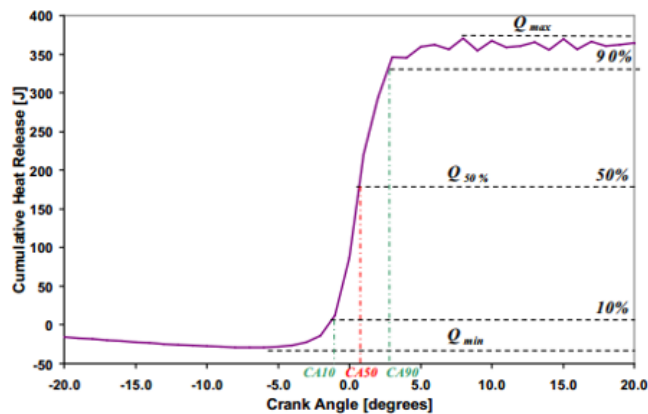


Fig 10. Somme de la chaleur libérée / ca.

## 2.2) Détection du point d'ignition (CA1)

Il est difficile de détecter avec précision le moment d'ignition du carburant à cause des nombreux bruits présent dans le moteur et les capteurs. Cependant nous avons mis en place des méthodes afin d'essayer de nous approcher le plus possible de ce point. Ces méthodes sont issues de nos recherches bibliographiques et de nos propres observations.

### a) En utilisant la courbe de pression.

On utilise la différentielle de la courbe de pression dans le cylindre.

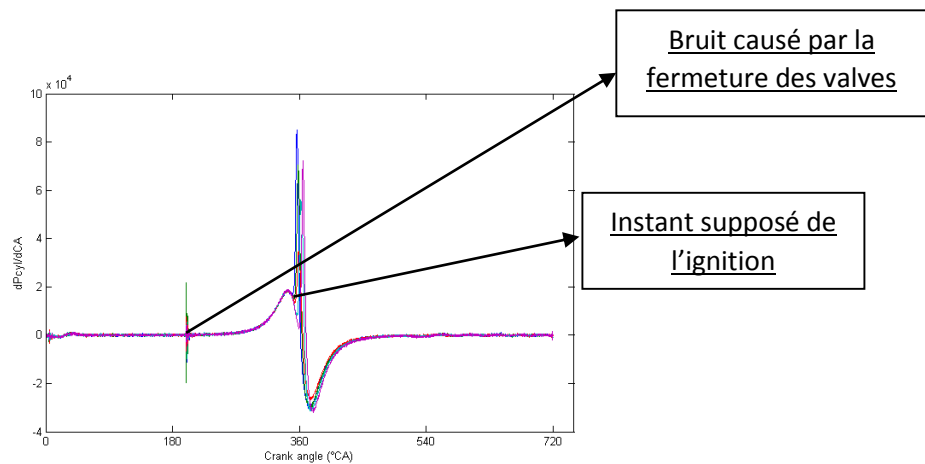


Fig 11. Dérivée de la pression.

### b) En utilisant la courbe de chaleur.

On utilise la différentielle de la courbe de chaleur.

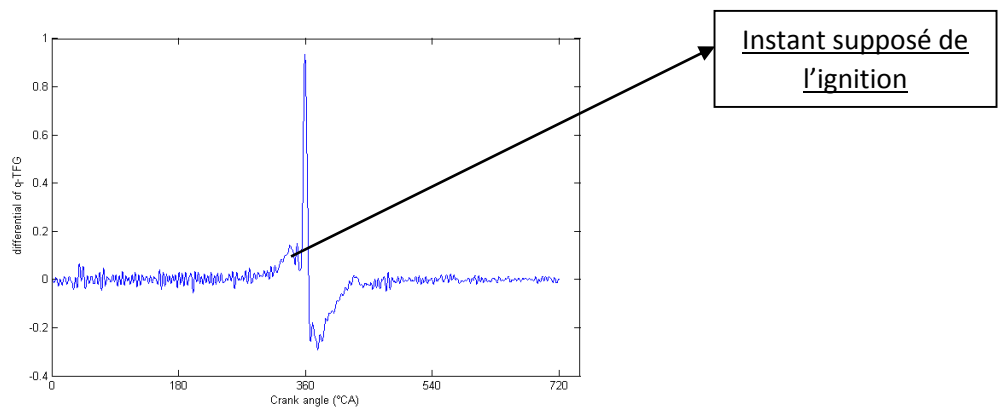
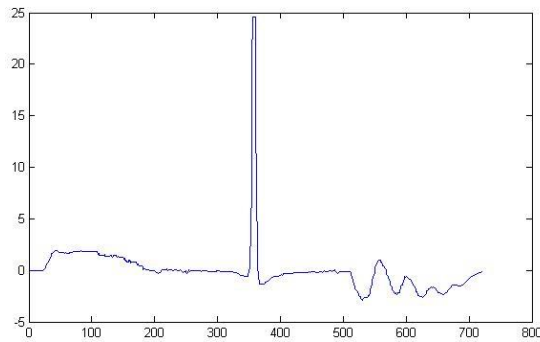


Fig 12. Dérivée de la chaleur libérée.

c) Utilisation d'un seuil et des courbes de chaleur.

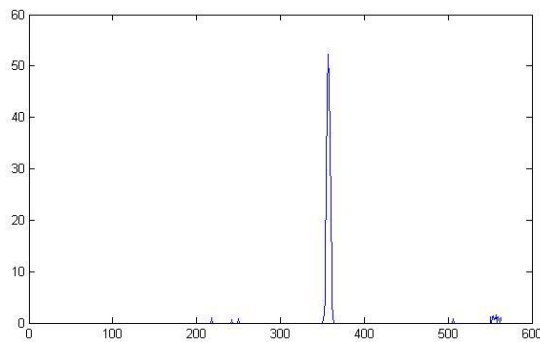
La dernière méthode mise en place consiste à réaliser un seuil afin de détecter le début de la combustion. Cette méthode peut être appliquée aux courbes représentant la chaleur libérée et le flux de chaleur net.

Premièrement nous utilisons un filtre médian afin de nettoyer la courbe de son bruit.

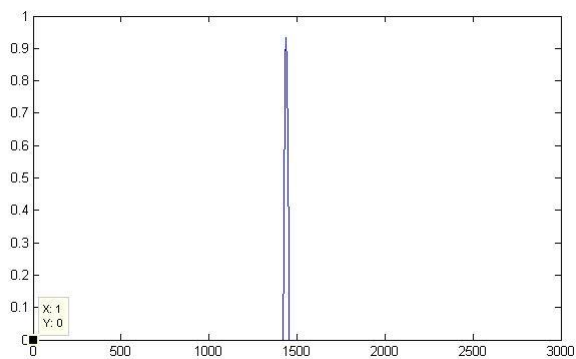


*Fig 13. Filtre médian appliqué au flux net.*

Nous calculons ensuite l'écart type du bruit de la mesure et le multiplions par 3 pour obtenir le seuil désiré. [10] Cela nous permet d'être le plus proche possible du véritable CA1.



*Fig 14. Résultats avec le flux de chaleur net.*



*Fig 15. Résultat avec la dérivée de la chaleur.*

Nous pensons qu'il s'agit de la meilleure méthode possible afin de détecter le CA1.

### 3) Résultats

#### 1) CA50 measures.

Les méthodes de détection expliquées précédemment ont été appliquées aux données que nous possédons et nous obtenons les résultats suivants:

	Curve 1	Curve 2	Curve 3	Curve 4	Curve 5
Pressure method	1.75	3.5	5	7.5	9.75
dQ/dθ method	-3	-1	0	3	6
Cumulative sum method	9,75°	10°	9,25°	14,75°	20,5°

*Table 1. Mesure de CA50.*

Les résultats obtenus à l'aide des courbes de pression et de flux de chaleur sont similaires. Ceux obtenus avec la somme de la chaleur libérée, notre méthode de référence, sont plus élevés d'environ 10°. Cet écart s'explique par les imprécisions de calcul, et le côté approximatif des deux premières méthodes.

#### 2) CA1 results.

Les résultats présentés ci-dessous sont des approximations de CA1.

	Curve 1	Curve 2	Curve 3	Curve 4	Curve 5
Pressure	-10	-8	-6.25	-3	0
dQ/dθ	-9	-11.25	-5	-0.75	-0.75
Threshold	-19	-17	-16	-13	-11

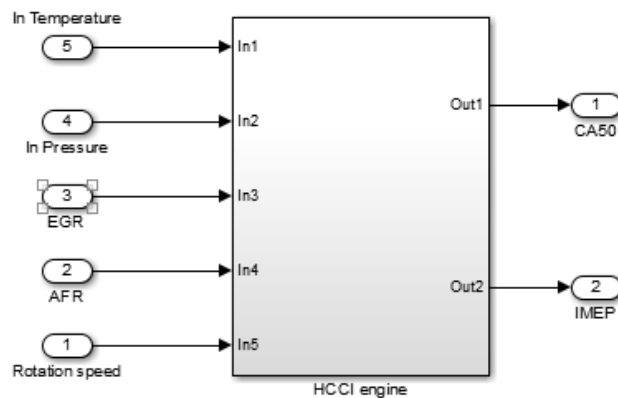
*Table 2. Mesures de CA1.*

Les résultats les plus fiables sont donnés par la méthode utilisant le seuil, les autres méthodes n'étant pas très documentées. Ces résultats sont en accord avec ceux du CA50 : lorsque l'ignition est retardée, le CA50 l'est aussi.

### III/ Perspective de contrôle.

#### 1) Analyse du système.

Le moteur HCCI est un système complexe, afin de le contrôler il est nécessaire d'en comprendre le fonctionnement mais aussi de bien maîtriser les différentes variables mis en jeu et leur impact sur le cycle de combustion. [21]



*Fig 16. Entrées et sorties du système.*

#### a) Entrée du système.

Les variables d'entrée sur lesquelles il est possible d'influer sont :

- la température des gaz admis
- la pression des gaz admis
- l'EGR (exhaust gas return)
- l'AFR (air fuel ratio)
- la vitesse de rotation du moteur.

Une autre méthode consiste à modifier l'instant de fermeture de la valve d'admission afin de retarder ou avancer le départ de l'ignition. [11, 12] Cependant il est plus simple de fixer l'instant de fermeture des valves et de jouer sur les autres paramètres.



## b) Sortie du système.

L'objectif du contrôle et de fixer l'instant d'ignition du carburant, n'ayant pas d'accès direct au CA1 on se concentre sur le positionnement du CA50.

Le fait de fixer le CA50 dans un intervalle compris entre 0° et 10 °(ou 3° et 7°) permet d'éviter les phénomènes de knock, de mistfire ou de combustion partielle. Cela permet au moteur de fonctionner avec le meilleur rendement et de réduire les émissions de particules polluantes.

Au contraire, si le CA50 se situe trop tôt on observe :

- Des pics de pressions très élevés qui peuvent endommager le cylindre produisent un fort bruit.
- Une augmentation de la production de NOx.

Si le CA50 se situe trop tard on observe :

- Une combustion incomplète.
- Une augmentation des émissions de monoxyde de carbone et d'hydrocarbures.

Il peut aussi être intéressant de travailler avec l'IMEP (indicative mean effective pressure) qui permet d'avoir un deuxième regard sur le meilleur point de fonctionnement possible.

## 2) Méthodes de contrôles.

Il existe deux méthodes principales afin de contrôler un moteur thermique : le contrôle intra-cycle et le contrôle cycle par cycle.

### a) Contrôle intra-cycle.

Comme son nom l'indique l'objectif de ce contrôle est de suivre en direct le déroulement d'un cycle et de modifier en temps réel les variables, ou d'agir sur un élément mécanique afin de changer la dynamique du système et d'obtenir le comportement désiré. Cette méthode est appliquée lors du contrôle des moteurs diesel et essence : l'allumage des bougies ou l'injection du carburant a lieu à l'instant même ou l'on souhaite que la combustion ait lieu.

Pour cela on regarde la pression dans le cylindre et on injecte le carburant (ou on l'allume) dès que la valeur désirée est atteinte. Un modèle de prédiction est nécessaire pour utiliser cette méthode. [18, 19, 20]

Si cette méthode s'applique parfaitement pour les moteurs à combustion classique, il n'est pas possible de l'appliquer au moteur HCCI. En effet une fois la valve d'admission fermée le cycle se déroule sans aucune possibilité d'intervenir sur les paramètres.

Des solutions hybrides avec le rajout d'un injecteur permettant de modifier légèrement la quantité de carburant dans le cylindre pendant la combustion ont été envisagées mais il ne s'agirait alors plus d'un vrai moteur HCCI. Cette problématique nous pousse à nous orienter vers d'autre type de contrôle.

#### b) Contrôle cycle par cycle.

Cette méthode semble être la plus à même d'être appliquée pour un moteur HCCI. Pour un point de fonctionnement du moteur (couple-vitesse) donné, on observe à l'aide de capteur l'évolution des variables lors d'un ou de quelques cycles. A l'aide des méthodes présentées précédemment on peut alors caractériser la combustion et connaître l'instant (ou la moyenne des instants) où se situe le CA50. [14, 15]

Il est alors possible de modifier les entrées du système afin de relocaliser le CA50 dans l'intervalle de valeur souhaité.

Afin d'appliquer cette méthode il faut soit posséder un modèle thermodynamique et mécanique complet du système, soit connaître l'impact relatif des différentes variables sur la position du CA50.

#### 3) Première idée du contrôle.

Cette partie a pour objectif l'étude de l'impact des variables d'entrée dans le cas d'un contrôle cycle par cycle.

##### a) Cinétique des variables.

Il est en théorie possible de jouer sur toutes les variables d'entrée entre deux cycles du moteur, cependant toutes les variables ne possèdent pas la même cinétique et cela doit être pris en compte pour le contrôle.

En effet il n'est pas possible de faire varier la température d'admission du mélange air carburant de façon instantanée, il faut attendre plusieurs cycles avant que la modification soit effective et le rendement du moteur peut être affecté pendant la phase d'ajustement de la température.

Dans le cas particulier de notre banc de test, nous ne possédons pas de compresseur, il n'est donc pas possible de modifier la pression d'entrée. Cependant sur un moteur équipé de ce matériel il serait possible de modifier de manière quasi instantanée la pression et cela pourrait être une bonne manière de régler le CA50.

Lors d'une des réunions s'étant déroulée à Gand, il a été décidé que la meilleure solution dans notre cas serait de réaliser le contrôle en modifiant l'AFR et l'EGR. Ces deux variables peuvent être rapidement modifiées, sont facilement mesurables et ont un effet important sur le déroulement du cycle. À l'aide de ces variables et d'un algorithme de détection et de contrôle rapide il apparaît envisageable de réaliser un véritable contrôle cycle par cycle.

b) Influence de l'AFR et l'EGR.

L'AFR et l'EGR permettent de modifier la nature des gaz admis dans le cylindre, leur effet sur la combustion peut être caractérisé de différentes façons.

Si de manière générale l'augmentation de l'EGR avance le début de la combustion, il n'est pas possible de donner une loi linéaire expliquant la réaction du système selon l'EGR ou l'AFR, il faut en outre posséder un modèle thermodynamique et chimique complet.

Il est cependant possible de connaître certaines caractéristiques de la combustion grâce aux données présentes dans la littérature. [23]

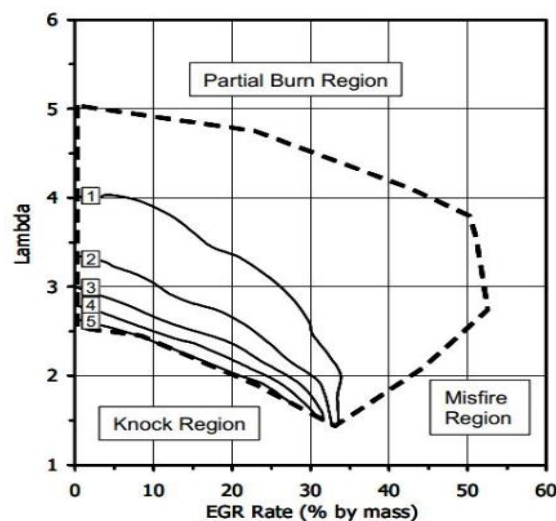
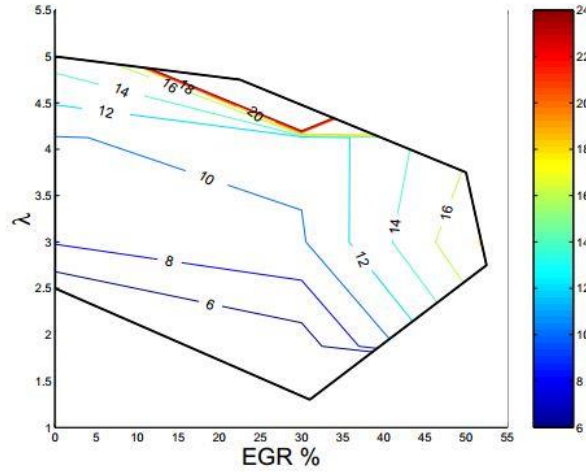


Fig 17. Zone de fonctionnement optimale du moteur en fonction de L'AFR / EGR.

Cette première figure définit la zone optimale de fonctionnement du moteur en fonction de l'EGR et de l'AFR. On voit que le ratio air/carburant ne doit pas être inférieur à une certaine valeur et qu'il ne peut pas dépasser une valeur maximale sous peine de gêner le bon déroulement de la combustion. De même si l'EGR n'est pas indispensable à la combustion, il ne doit pas dépasser une valeur maximale.



(a) Combustion duration prediction

Fig 18. Vitesse de réaction en fonction de l'AFR / EGR

Une étude plus approfondie de la zone où la réaction se déroule dans de bonne condition permet de contrôler la vitesse de la réaction en fonction de ces deux paramètres. [22] De manière globale plus l'EGR et l'AFR sont élevés plus la réaction est lente. Cette observation permet de modifier la position du CA50 selon le moment de fermeture des valves et de régler la vitesse du moteur.

Il n'est cependant pas simple de contrôler la position du CA50 à l'aide de ces variables. Les courbes suivantes montrent en effet que le CA50 n'est pas totalement stable, et que selon les valeurs d'AFR et d'EGR choisis la valeur du CA50 peut varier d'un cycle à l'autre. [21]

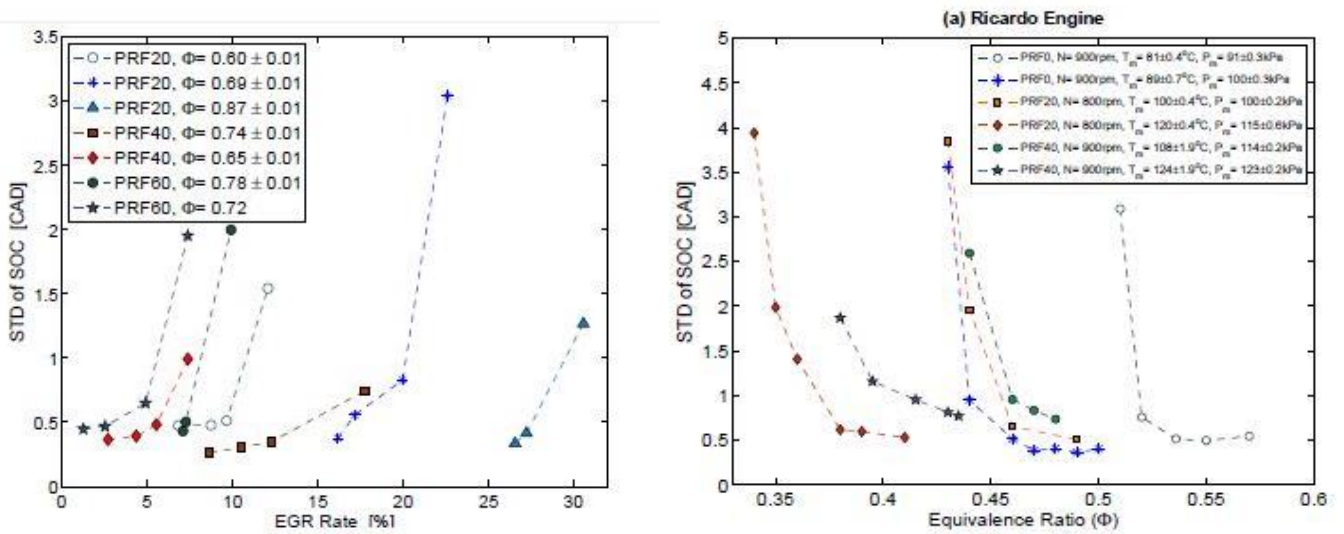


Fig 19. Ecart type entre les valeurs du CA50 d'un cycle à l'autre selon les valeurs d'AFR et d'EGR.

L'ensemble des courbes précédentes sont issues de test réalisé sur un moteur HCCI dans des conditions particulières pour un carburant précis, il s'agit de tendances que l'on retrouve dans la littérature et non de valeurs vraies dans chaque cas.

Un contrôle basé sur les taux d'EGR et d'AFR permet donc de contrôler la réaction et de s'assurer de son bon déroulement, il ne permet cependant pas de maîtriser totalement l'instant du CA50. Il paraît donc indispensable de posséder un modèle thermodynamique complet pour réaliser le contrôle cycle par cycle du moteur HCCI de manière précise.

## Conclusion

Ce projet nous a permis de découvrir et d'étudier le fonctionnement d'un moteur HCCI, technologie singulière posant des problèmes de contrôles que nous n'avions pas rencontré jusqu'à présent.

Des recherches bibliographiques approfondies nous ont permis d'en comprendre le fonctionnement, de caractériser la combustion en détectant les points nécessaires et enfin de proposer une première approche des méthodes de contrôle applicable à ce type de moteur.

A la fin de ce projet, il nous semble indispensable de posséder un modèle thermodynamique ou cinétique-chimique du moteur afin d'en assurer le contrôle. Avec un modèle de ce genre et les recherches effectuées lors de ce projet il apparait réaliste de pouvoir contrôler le moment d'ignition d'un moteur HCCI.

Ce projet nous a aussi permis de travailler en partenariat avec une université étrangère, de découvrir une autre culture du travail et d'échanger avec des spécialistes d'une discipline différente de la nôtre.

Il a été extrêmement enrichissant pour nous, nous obligeant à sortir de notre domaine de travail habituel pour nous adapter à un autre dans lequel nos connaissances de départ étaient limitées.

## Références

1. J. Bentsson, P. Strandh, R. Johansson, P. Tunestal, B. Johansson, “ Closed-loop combustion control of homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine dynamics”, International Journal Of Adaptive Control And Signal Processing, 18, 168-179, 2004
2. N. Killingsworth, S. Aceves, D. Flowers, M. Krstic, “A Simple HCCI Engine Model for Control, IEEE International Conference on Control Applications Munich”, Germany ,October, 2006
3. R. Worret, S. Bernhardt, F. Schwarz , U. Spicher, “Application of Different Cylinder Pressure Based Knock Detection Methods in Spark Ignition Engines”, International Spring Fuels & Lubricants Meeting & Exhibition Reno, Nevada, May, 2002
4. G. Haraldsson, P. Tunestål , B. Johansson, “HCCI Closed-Loop Combustion Control Using Fast Thermal Management”, SAE international, 2004-01-0943, 2004
5. J. Bengtsson , P. Strandh , R. Johansson , P. Tunestål, B. Johansson, ” Hybrid modelling of homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine dynamics—a survey”, International Journal of Control, 80, 1814-1847, 2007.
6. A. Widd, P. Tunestål, R. Johansson.,”Modeling for HCCI Control”, Springer-Verlag London, LNCIS 418, p283-302, 2012
7. G. Xiaofeng, R. Stone, C. Hudson, ”The Detection and Quantification of Knock in Spark Ignition Engines”, SAE Technical Paper Series, Fuels and Lubricants Meeting and Exposition Philadelphia, Pennsylvania October 1, 1993
8. M. Lundström, “Model Based HCCI engine combustion control”, Master's Degree Project, University of Stockholm, Sweden, 2006
9. M. Basseville, I. V. Nikiforov, “Detection of Abrupt Changes: Theory and Application”, Prentice-Hall, 1993
10. B. Oud Bouamama, “Structural Analysis for Supervision System Design part 1”, 2014
11. F. Agrell, “Control of HCCI by aid of variable Valve Timing with Specialization in Usage of a Non-linear Quasic-Static Compensation”, KTH Industrial Engineering and Management, Stockholm, Sweden, 2006, thesis
12. G. M. Shaver, M. J. Roelle, J. C. Gerdes, “Modeling cycle-to-cycle dynamics and mode transition in HCCI engines with variable valve actuation”, Control Engineering Practice 14, 213 – 22, 2006
13. Adam F. Jungkunz, “Actuation strategies for cycle-to-cycle control of homogeneous charge compression ignition combustion engines”, Stanford University, March 2013, dissertation
14. J. B. Bettis, “ Thermodynamic based modeling for nonlinear control of combustion phasing in HCCI engines”, Missouri University of Science and Technology, 2010, thesis
15. C. Hernandez, “HCCI Timing Control Using Iterative Feedback Tuning”, KTH Electrical Engineering, Stockholm, Sweden, 2006

16. Steffen, T., Stobart, R., and Yang, Z., "Challenges and Potential of Intra-Cycle Combustion Control for [Direct](#) Injection Diesel Engines," SAE Technical Paper 2012-01-1158, 2012, doi: 10.4271/2012-01-1158.
17. N. J. Killingsworth HCCI Engine Control and Optimization A dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree Doctor of Philosophy in Engineering Sciences (Mechanical Engineering) University of California, San Diego
18. T. Steffen, R. Stobart, Z. Yang, Challenges of combustion of Intra-cycle combustion control for direct injection diesel engine.  
16/04/2012 SAE international
19. T. Steffen, R. Stobart, Z. Yang, Disturbance sources in the diesel engine combustion process  
08/04/2013 SAE international
20. T. Steffen, R. Stobart, Z. Yang, E. Winward, A predictive model of Pmax and Imep for intra-cycle control  
01/04/2014 SAE international
21. M. Shahbakhti, Modeling and experimental study of an HCCI engine for combustion timing control.  
2009, Alberta University Thesis
22. A. Bhave, M. Kraft, A. Oakley, H. Zhao, F. Mauss, Analyzing the limits of a stable homogeneous charge compression ignition operation  
2004, Cambridge University
23. P. E. Yelvington, Design of a variable homogeneous charge compression ignition engine: a computational study with detailed chemical kinetics.  
2004, Massachusetts Institute of Technology.



