

**Projet de fin d'étude.**

**Département Informatique Microélectronique Automatique**

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

**HCCL.**

Rapport Intermédiaire



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

|  |            |
|--|------------|
| <b><u>Remerciements</u></b>                    | <b>p3</b>  |
| <b><u>Introduction</u></b>                     | <b>p4</b>  |
| <b><u>I/ Présentation du Projet</u></b>        | <b>p5</b>  |
| <b><u>II/ Détection de l'auto-ignition</u></b> | <b>p9</b>  |
| <b><u>III/ Suite du travail</u></b>            | <b>p16</b> |
| <b><u>Conclusion</u></b>                       | <b>p17</b> |
| <b><u>Bibliographie</u></b>                    | <b>p18</b> |
| <b><u>Annexes</u></b>                          | <b>p20</b> |

## **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 et pour toute l'aide qu'ils nous ont apporté.

## **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.

Ils étudient actuellement le moteur HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) et cherche à améliorer son fonctionnement, en effet la commande et le contrôle de ce moteur représente un enjeu dans le cadre des économies de carburant et de la réduction des émissions de polluant atmosphérique.

Dans le cadre d'un partenariat avec Polytech Lille, l'objectif de ce projet est de modéliser le moteur HCCI et si possible de réaliser une commande de celui-ci. En effet ce moteur n'est que très peu utilisé dans l'industrie car il reste difficile à contrôler, certains constructeurs tels que General Motors ou Mazda ont lancé des prototypes roulant avec un de ces moteurs.

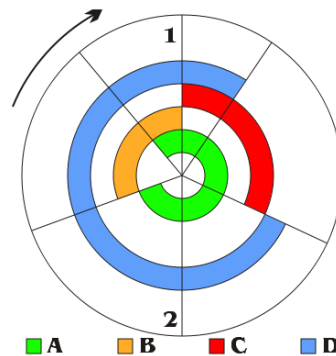
## I/ Présentation du Projet.

### 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 :

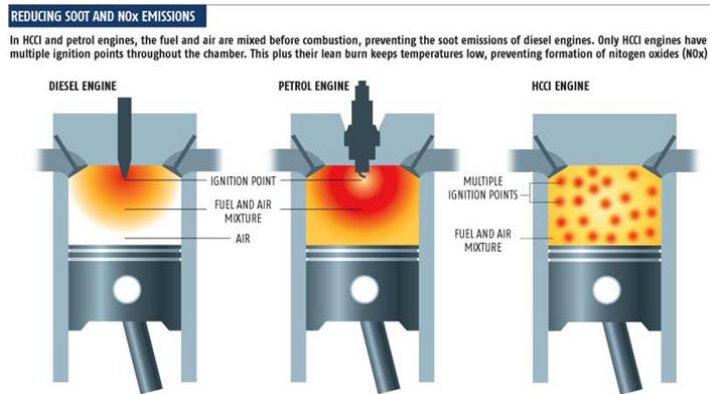
- Injection dans le cylindre du moteur d'un mélange air-carburant homogène. (A)
- Compression de celui-ci jusqu'à parvenir au point d'auto-allumage (ou auto-ignition). (B)
- Détente. (C)
- Evacuation des gaz suite à la combustion. (D)



*Fig. 1 Cycle de fonctionnement du moteur HCCI*

Comme dans le moteur diesel, le mélange est comprimé 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

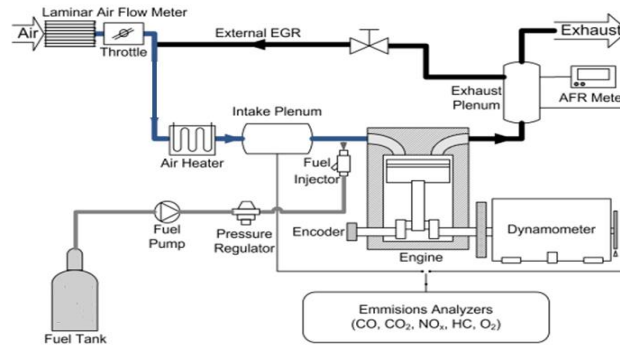
Toutefois, le moteur HCCI présente aussi quelques inconvénients :

- 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 control de son ignition, ce qui crée des problèmes principalement lors des phases de démarrage et pour les fonctionnements à haut couple.

## 2) Présentation du banc de test et des premières mesures.

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 :

- Mesure de l'angle du vilebrequin
- Mesure de la température des gaz injectés
- Température à l'intérieur du cylindre
- Température en sortie du cylindre
- Température atmosphérique
- Pression atmosphérique
- Pression dans le cylindre
- Pression en entrée du cylindre
- Capteur de flux de chaleur dans le cylindre
- Capteur de couple sur le vilebrequin
- Capteur mesurant le ratio air/carburant du mélange injecté
- Capteur mesurant le 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 dans le cylindre, le flux de chaleur, le volume de la chambre selon différentes conditions initiales (annexe 1).

### 3) Objectifs du Projet.

Lors d'une réunion s'étant déroulé à l'université de Gand, il a été décidé que les objectifs de ce projet seraient les suivants :

- La première étape du projet consistera en la détection du moment de l'ignition dans le cylindre. Pour ce faire une étude bibliographique et l'étude des courbes fournies par l'université de Gand sont nécessaires.
- La deuxième étape est une revue des modèles orientés pour le contrôle issue de la littérature sur le moteur HCCI.
- L'objectif suivant sera de développer un modèle du moteur HCCI, et si possible une première commande de celui-ci.

La communication avec l'université de Gand oblige à la réalisation de rapports intermédiaires en anglais. (Annexe 2)



## II/ Détection de l'auto-ignition.

La première étape de notre travail consiste à déterminer le moment d'ignition à partir de nos recherches bibliographiques et des courbes fournies par l'université de Gand.

### 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:

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

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

L'équation résultat est ensuite résolue pour:

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

Il est difficile d'utiliser cette méthode pour détecter le moment d'ignition car les paramètres des équations dépendent du moteur, du carburant utilisé et ne peuvent pas être déterminés facilement. D'autres modèles thermodynamiques sont encore plus compliqués à utiliser.

## 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 detection expérimentales.

### 2.1) Méthodes de detection de CA50

Il existe différentes méthodes pour déterminer le CA50. Nous pouvons utiliser l'une des méthodes suivantes sur nos données expérimentales:

CA50 en utilisant  $Q_{HR}^{net}$  : CA50 peut être déterminé quand  $Q_{HR}$ , la chaleur totale libérée, atteint la moitié de sa valeur maximale. [1]

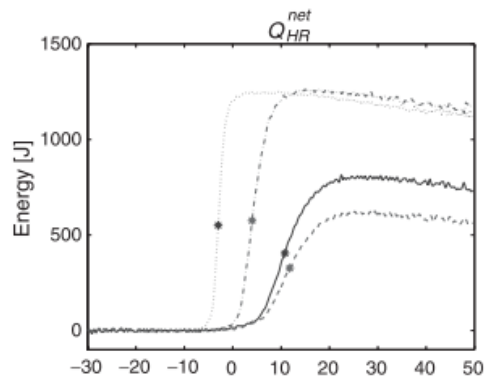


Fig. 4. CA50 point on an Energy vs Crank Angle curve

CA50 en utilisant  $p^{\text{MAX}}$ : 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]

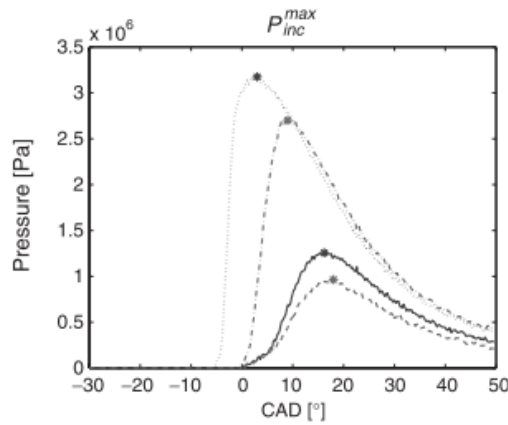


Fig 5. CA50 point on a Pressure vs Crank Angle curve

CA50 en utilisant  $dQ$ : CA50 peut être déterminé quand l'énergie libérée par degré du vilebrequin ( $dQ$ ) atteint sa valeur maximale. [1]

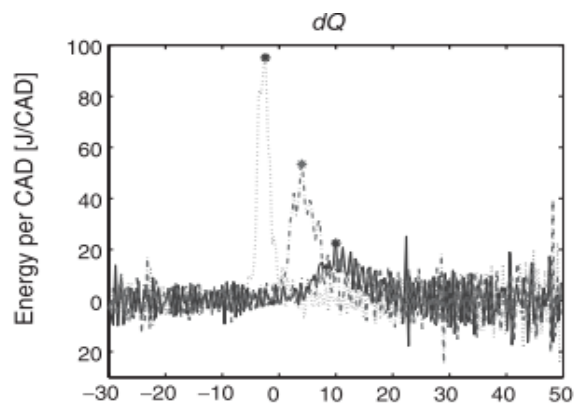
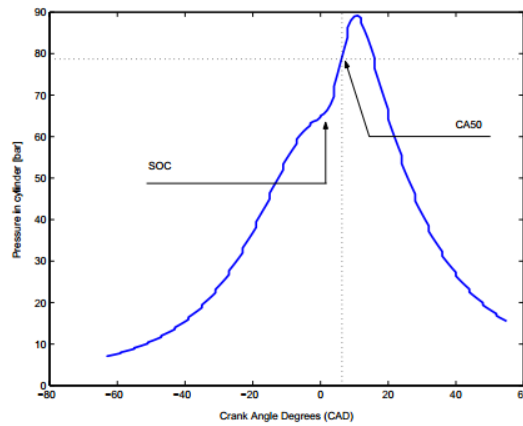


Fig6. CA50 point on a Energy per CAD vs Crank Angle curve

D'autres études nous permettent de détecter le CA50 et le CA1 en utilisant la courbe de pression dans le cylindre, cependant la détection du CA1 est très imprécise. [8]



*Fig. 7 Pressure curve with CA1 and CA50*

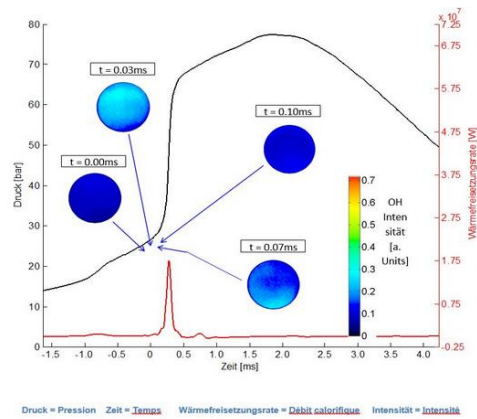
De plus, la méthode utilisée pour détecter CA est différente dans cette étude, la courbe de pression dans le cylindre est comparée à la courbe de pression lorsqu'il n'y a pas de combustion dans celui-ci et le CA50 est trouvé lorsque la différence entre les deux courbes est de 5 bars.

## 2.2) Méthode pour la détection du point d'ignition.

Il est difficile de détecter précisément l'instant d'ignition, cependant nous pouvons émettre des hypothèses basées sur nos recherches bibliographiques et nos propres observations pour l'identifier.

Premièrement, nous avons vu précédemment [8] que l'instant d'ignition (CA1) peut être localisé approximativement sur la courbe de pression.

De plus, certaine expérience optiques menées par l'université de Stuttgart et l'école polytechnique de Zurich viennent confirmer cette observation.



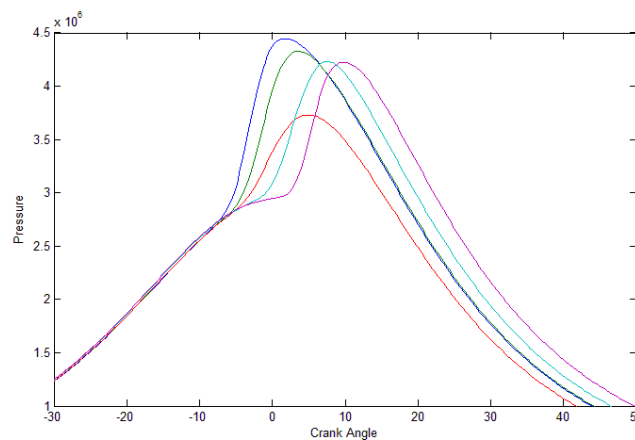
*Fig. 8 CAI using optical methods*

Sachant cela, nous avons essayé de déterminer l’instant d’ignition en utilisant nos propres courbes. Notre théorie est que CAI peut être observé juste avant le pic principal sur les différentes courbes de pressions et de chaleur. Ces points coïncident avec les mesures approchées trouvées dans la littérature et correspondent à une modification abrupte de l’équilibre physique dans le cylindre.

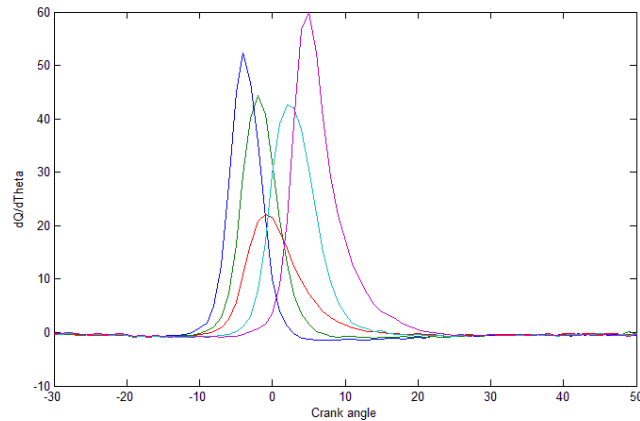
### 3) Résultats obtenus.

#### 3.1) Résultats pour CA50.

Nous avons utilisé la courbe de pression et de chaleur pour déterminer le CA50 sur nos propres données.



*Fig. 9 Pressure (Pa) vs Crank angle (°)*



*Fig. 10 Dq/Dtheta (J) vs Crank Angle (°)*

| N° test | CA50 from pressure | CA50 from dQ/dTheta |
|---------|--------------------|---------------------|
| 1       | 1.75°              | -3°                 |
| 2       | 3.5°               | -1°                 |
| 3       | 5°                 | 0°                  |
| 4       | 7.5°               | 3°                  |
| 5       | 9.75°              | 6°                  |

*Table 1. CA50 measures*

Nos mesures sont cohérentes avec celles trouvées dans la littérature.

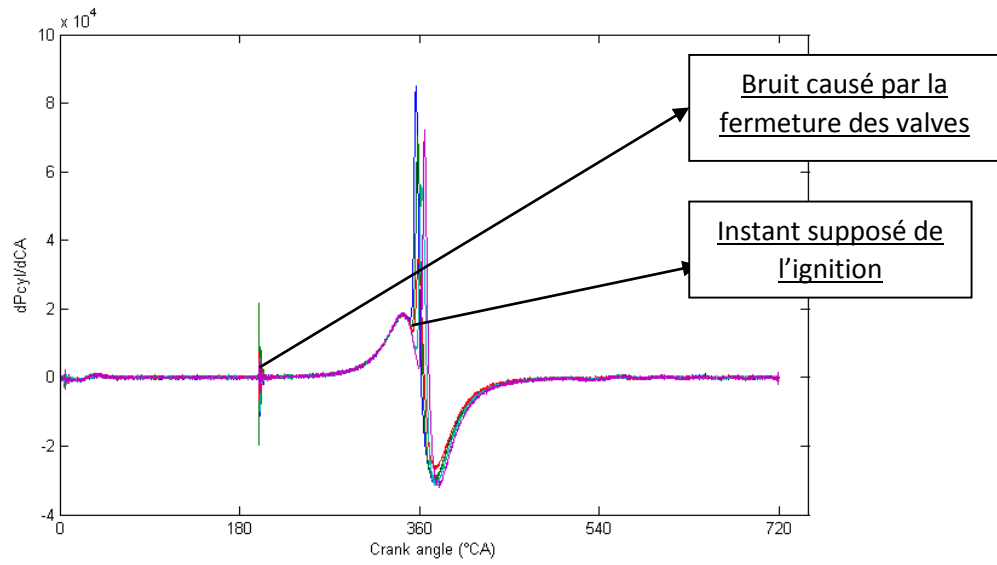
On observe une différence entre les deux méthodes, à savoir CA50 en utilisant la pression ou la chaleur.

Cependant utiliser la pression pour déterminer CA50 n'est pas une bonne solution, en cas de combustion avancée ou retardée,  $P^{\max}$  donne une valeur erronée de CA50. La pression n'est pas suffisante pour estimer CA50, nous utiliseront donc la chaleur.

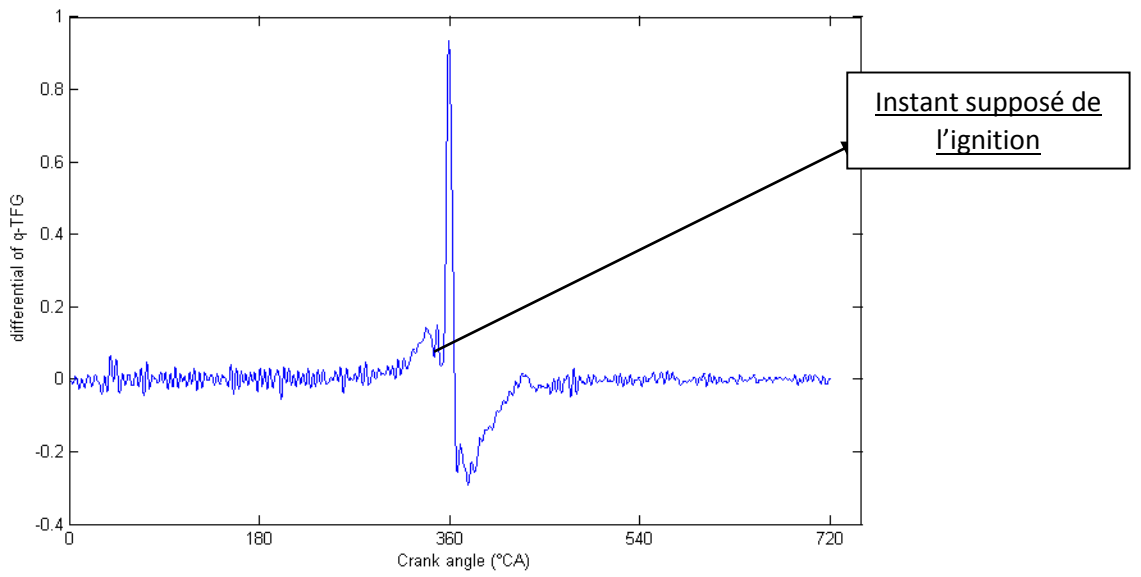
### 3.2) Résultats pour CA1

En utilisant nos recherches et notre propre théorie, nous avons déterminé l'instant de l'ignition.

Les courbes suivantes représentent la différentielle de la pression dans le cylindre, nous supposons que l'ignition est observable sur ces courbes, juste avant le pic principal.



*Fig. 11 Diff(summary P\_cyl)*



*Fig.12 Diff (summary q\_TFG FOUR 2T mean)*

| N° test | CA1 from diff pressure | CA1 from diff q_TFG |
|---------|------------------------|---------------------|
| 1       | -10°                   | -9°                 |
| 2       | -8°                    | -11.25°             |
| 3       | -6.25°                 | -5°                 |
| 4       | -3°                    | -0.75°              |
| 5       | 0°                     | -0.75°              |

*Table 2. CA1 measures*

Les deux méthodes nous donnent des résultats similaires, nous pensons qu'il s'agit d'une bonne méthode pour déterminer l'instant d'ignition.

### **III/ Suite du travail.**

La suite de ce projet sera consacrée à la modélisation du moteur HCCI, et principalement du déroulement de la combustion à l'intérieur de celui-ci. L'objectif est de détecter avec précision le CA50 en mettant en place un algorithme de détection.

Pour cela nous allons devoir continuer nos recherches bibliographiques et affiner notre connaissance du fonctionnement du moteur (cinétique chimique, ...).

Il est aussi prévu que nous retournions à Gand afin d'effectuer une nouvelle série de mesure, de voir le moteur en action et de faire un point précis sur l'avancée de nos travaux.

Une fois cette phase terminée, s'il nous reste du temps, nous proposerons une ébauche de commande afin de contrôler avec précision l'instant d'ignition.



## Conclusion

Cette première partie de projet nous a permis de nous familiariser avec le fonctionnement du moteur HCCI et de proposer une première méthode de détection du moment d'ignition que nous pourrions appeler "méthode manuelle".

Après un premier retour par mail de l'équipe de Gand, nous avons corrigé certaines de nos premières hypothèses et avons décidé de nous focaliser sur la courbe de chaleur afin de détecter le CA50 et le CA10 et non le CA1.

Nous continuons nos recherches afin de répondre au mieux à la problématique de ce projet.

## **Bibliographie**

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 ADAPTATIVE CONTROL AND SIGNAL PROCESSING, p168-179
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 - 4, 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 and B. Johansson  
HCCI Closed-Loop Combustion Control Using Fast Thermal Management  
2004-01-0943, SAE international, 2004
5. J. Bengtsson, P. Strandh, R. Johansson, P. Tunestål, B. Johansson  
Hybrid modeling of homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine dynamics—a survey, International Journal of Control, 80, 1814-1847, 2007.
6. A. Widd, P. Tunestål, and R. Johansson.  
Modeling for HCCI Control  
Lund University, Sweden
7. G. Xiaofeng, R. Stone, and C. Hudson  
The Detection and Quantification of Knock in Spark Ignition Engines  
SAE TECHNICAL PAPER SERIES

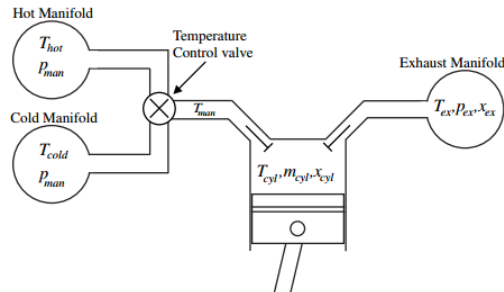
Fuels and Lubricants Meeting and Exposition Philadelphia, Pennsylvania October, 1993

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, Inc.
10. <http://www.erdoel-vereinigung.ch/fr/erdoelvereinigung/ev-forschungsfonds/treibstoffe/laufendeprojektetreibstoffe/hcci.aspx>

## Annexes

|                  |            |          |         |           |           |            |           |               |                 |                 |            |             |         |         |        |
|------------------|------------|----------|---------|-----------|-----------|------------|-----------|---------------|-----------------|-----------------|------------|-------------|---------|---------|--------|
| date             | 21/08/2014 |          |         |           |           |            |           |               |                 |                 |            |             |         |         |        |
| operation        | fired      |          |         |           |           |            |           |               |                 |                 |            |             |         |         |        |
| gas              | C8H18      |          |         |           |           |            |           |               |                 |                 |            |             |         |         |        |
| resolution       | 4          |          |         |           |           |            |           |               |                 |                 |            |             |         |         |        |
| T_atm            | 21,0 °C    |          |         |           |           |            |           |               |                 |                 |            |             |         |         |        |
| p_atm            | 1014,8 hPa |          |         |           |           |            |           |               |                 |                 |            |             |         |         |        |
| RV               | 43,1 %     |          |         |           |           |            |           |               |                 |                 |            |             |         |         |        |
| voltage p_inlet  | 1,008 V    |          |         |           |           |            |           |               |                 |                 |            |             |         |         |        |
| voltage p_outlet | 0,063 V    |          |         |           |           |            |           |               |                 |                 |            |             |         |         |        |
| numberfiles      | 5          |          |         |           |           |            |           |               |                 |                 |            |             |         |         |        |
| File             | CR         | Position | Remarks | Tint [°C] | Texh [°C] | Texh2 [°C] | Toil [°C] | Tcoolant [°C] | air flow [kg/h] | gas flow [kg/h] | T_atm [°C] | p_atm [hPa] | RV [%]  | afr     | lambda |
| meting5.prn      | 13         | P1       | WOT     | 160,222   | 202,452   | 77,693     | 29,069    | 78,303        | 8,382           | 0,147           | 21,1       | 1015,1      | 47,0000 | 56,9410 | 3,874  |
| meting6.prn      | 13         | P1       | WOT     | 150,377   | 207,76    | 83,373     | 29,344    | 82,051        | 8,521           | 0,147           | 21,2       | 1015,1      | 46,8000 | 57,8810 | 3,937  |
| meting7.prn      | 13         | P1       | WOT     | 148,76    | 180,297   | 92,006     | 31,492    | 93,076        | 8,623           | 0,126           | 21,1       | 1015,1      | 47,0000 | 68,6650 | 4,671  |
| meting8.prn      | 13         | P1       | WOT     | 130,912   | 223,768   | 99,296     | 32,502    | 99,727        | 8,849           | 0,16            | 21,3       | 1015        | 46,4000 | 55,3030 | 3,762  |
| meting9.prn      | 13         | P1       | WOT     | 115,329   | 253,196   | 118,257    | 34,418    | 101,736       | 9,053           | 0,228           | 21,3       | 1014,8      | 45,9000 | 39,6450 | 2,697  |

Annexe 1. Tableau des conditions des mesures



Annexe 2. Premier modèle du moteur HCCI