

50376  
1984  
117

50396.  
1984.  
117.

N° d'ordre : 1168

# THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE I

pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE TROISIEME CYCLE**

par

Daniel SCACHE



**ETUDE DU CLIQUETIS SUR UN MOTEUR  
A TAUX DE COMPRESSION RÉGLABLE.  
MESURE DES CARACTERISTIQUES DE COMBUSTION  
DES CARBURANTS : INDICES D'OCTANE ET DE CÉTANE.**



10 05 150 3

Soutenue le 29 juin 1984 devant la Commission d'Examen

MM.	M. LUCQUIN	Président
	S. ANTONIK	Rapporteur
	D. THOMAS	Examineur
	M. BAYEN	Membre Invité

DOYENS HONORAIRES DE L'ANCIENNE FACULTE DES SCIENCES

MM. R. DEFRETIN, H. LEFEBVRE, M. PARREAU.

PROFESSEURS HONORAIRES DES ANCIENNES FACULTES DE DROIT  
ET SCIENCES ECONOMIQUES, DES SCIENCES ET DES LETTRES

MM. ARNOULT, Mme BEAUJEU, BONTE, BROCHARD, CHAPPELON, CHAUDRON, CORDONNIER,  
CORSIN, DECUYPER, DEHEUVELS, DEHORS, DION, FAUVEL, FLEURY, P. GERMAIN, GLACET,  
GONTIER, HEIM DE BALSAC, HOCQUETTE, KAMPE DE FERIET, KOURGANOFF, LAMOTTE,  
LASSERRE, LELONG, Mme LELONG, LHOMME, LIEBAERT, MARTINOT-LAGARDE, MAZET,  
MICHEL, PEREZ, ROIG, ROSEAU, ROUELLE, SAVARD, SCHILTZ, WATERLOT, WIEMAN,  
ZAMANSKI.

PROFESSEUR EMERITE

M. A. LEBRUN.

ANCIENS PRESIDENTS DE L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET  
TECHNIQUES DE LILLE

MM. R. DEFRETIN, M. PARREAU, J. LOMBARD, M. MIGEON.

PRESIDENT DE L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES  
DE LILLE

M. J. CORTOIS.

PROFESSEURS - CLASSE EXCEPTIONNELLE

M. CONSTANT Eugène	Electronique
M. FOURET René	Physique du Solide
M. GABILLARD Robert	Electronique
M. MONTREUIL Jean	Biochimie
M. PARREAU Michel	Analyse
M. TRIDOT Gabriel	Chimie appliquée
M. VIVIER Emile	Biologie cellulaire
M. WERTHEIMER Raymond	Physique atomique et moléculaire

PROFESSEURS - 1ère CLASSE

M. BACCHUS Pierre	Astronomie
M. BEAUFILS Jean Pierre	Chimie physique
M. BIAYS Pierre	Géographie
M. BILLARD Jean	Physique du solide
M. BOILLY Bénoni	Biologie

M. BOUGHON Pierre	Algèbre
M. BOURIQUET Robert	Biologie végétale
M. BREZINSKI Claude	Analyse numérique
M. CELET Paul	Géologie générale
M. CHAMLEY Hervé	Géotechnique
M. COEURE Gérard	Analyse
M. CORDONNIER Vincent	Informatique
M. DEBOURSE Jean-Pierre	Gestion des entreprises
M. DYMENT Arthur	Mécanique
M. ESCAIG Bertrand	Physique du solide
M. FAURE Robert	Mécanique
M. FOCT Jacques	Métallurgie
M. GRANELLE Jean-Jacques	Sciences économiques
M. GRUSON Laurent	Algèbre
M. GUILLAUME Jean	Microbiologie
M. HECTOR Joseph	Géométrie
M. LABLACHE COMBIER Alain	Chimie organique
M. LACOSTE Louis	Biologie végétale
M. LAVEINE Jean-Pierre	Paléontologie
M. LEHMANN Daniel	Géométrie
Mme LENOBLE Jacqueline	Physique atomique et moléculaire
M. LHOMME Jean	Chimie organique biologique
M. LOMBARD Jacques	Sociologie
M. LOUCHEUX Claude	Chimie physique
M. LUCQUIN Michel	Chimie physique
M. MAILLET Pierre	Sciences économiques
M. PAQUET Jacques	Géologie générale
M. POUZET Pierre	Analyse numérique
M. PROUVOST Jean	Minéralogie
M. ROUSSEAU Jean-Paul	Physiologie animale
M. SALMER Georges	Electronique
M. SEGUIER Guy	Electrotechnique
M. STANKIEWICZ François	Sciences économiques
M. TILLIEU Jacques	Physique théorique
M. VIDAL Pierre	Automatique
M. ZEYTOUNIAN Radyadour	Mécanique

PROFESSEURS - 2ème classe

M. AL FAKIR Sabah	Algèbre
M. ALLAMANDO Etienne	Electronique et électrotechnique
M. ANCIAN Bernard	Spectrochimie
M. ANTOINE Philippe	Analyse
M. BART André	Biologie animale
Mme BATTIAU Yvonne	Géographie
M. BEGUIN Paul	Mécanique
M. BELLET Jean	Physique atomique et moléculaire
M. BERZIN Robert	Analyse
M. BKOUCHE Rudolphe	Algèbre
M. BODARD Marcel	Biologie végétale
M. BOIVIN Jean-Claude	Chimie minérale
M. BONNELLE Jean-Pierre	Catalyse
M. BOSCO Denis	Probabilités
M. BOUQUELET Stéphane	Biochimie structurale
M. BRASSELET Jean-Paul	Géométrie et topologie

M. BRIDOUX Michel	Chimie physique
M. BRUYELLE Pierre	Géographie
M. CAPURON Alfred	Biologie animale
M. CARREZ Christian	Informatique
M. CHAPOTON Alain	Electronique
M. COQUERY Jean-Marie	Psychophysiologie
Mme CORSIN Paule	Paléontologie
M. CORTOIS Jean	Physique nucléaire et corpusculaire
M. COUTURIER Daniel	Chimie organique
M. CRAMPON Norbert	Hydrogéologie et environnement
M. CROSNIER Yves	Electronique
Mlle DACHARRY Monique	Géographie
M. DAUCHET Max	Informatique
M. DEBRABANT Pierre	Géologie appliquée
M. DEGAUQUE Pierre	Electronique
M. DELORME Pierre	Physiologie animale
M. DE MASSON D'AUTUME Antoine	Sciences économiques
M. DEMUNTER Paul	Sociologie
M. DENEL JACQUES	Informatique
M. DE PARIS Jean-Claude	Analyse
M. DEPREZ Gilbert	Physique du solide et cristallographie
M. DERIEUX Jean-Claude	Microbiologie
Mlle DESSAUX Odile	Spectroscopie de la réactivité chimique
M. DEVRAINNE Pierre	Chimie minérale
M. DHAINAUT André	Biologie animale
Mme DHAINAUT Nicole	Biologie animale
M. DORMARD Serge	Sciences économiques
M. DOUKHAN Jean-Claude	Physique du solide
M. DUBOIS Henri	Spectroscopie hertzienne
M. DUBRULLE Alain	Spectroscopie hertzienne
M. DUBUS Jean-Paul	Spectrométrie des solides
M. DUPONT Christophe	Vie de la firme (I.P.A.)
Mme EVRARD Micheline	Chimie appliquée
M. FONTAINE Hubert	Dynamique des cristaux
M. FOUQUART Yves	Optique atmosphérique
M. FOURNET Bernard	Biochimie structurale
M. FRONTIER Serge	Ecologie numérique
M. GAMBLIN André	Géographie urbaine, industrielle et démographie
M. GLORIEUX Pierre	Physique moléculaire et rayonnements atmosphériques
M. GOBLOT Rémi	Algèbre
M. GOSSELIN Gabriel	Sociologie
M. GOUDMAND Pierre	Chimie Physique
M. GREMY Jean-Paul	Sociologie
M. GREVET Patrick	Sciences économiques
M. GUILBAULT Pierre	Physiologie animale
M. HENRY Jean-Pierre	Génie mécanique
M. HERMAN Maurice	Physique spatiale
M. HOUDART René	Physique atomique et moléculaire
M. JACOB Gérard	Informatique
M. JACOB Pierre	Probabilités et statistiques
M. JACQUILLAT Bertrand	Gestion
M. JEAN Raymond	Biologie des populations végétales
M. JOFFRE Patrick	Vie de la firme (I.P.A.)
M. JOURNAL Gérard	Spectroscopie hertzienne
M. KREMBEL Jean	Biochimie
M. LANGRAND Claude	Probabilités et statistiques

Mme LECLERCQ Ginette	Catalyse
M. LEFEVRE Christian	Pétrologie
Mlle LEGRAND Denise	Algèbre
Mlle LEGRAND Solange	Algèbre
Mme LEHMANN Josiane	Analyse
M. LEMAIRE Jean	Spectroscopie hertzienne
M. LE MAROIS Henri	Vie de la firme (I.P.A.)
M. LEROY Jean Marie	Chimie appliquée
M. LEROY Yves	Electronique, électrotechnique, automatique
M. LESENNE Jacques	Electrotechnique
M. LHENAFF René	Géographie
M. LOCQUENEUX Robert	Physique théorique
M. LOSFELD Joseph	Informatique
M. LOUAGE Francis	Electronique
M. MACKE Bruno	Physique moléculaire et rayonnements atmosphériques
M. MAHIEU Jean-Marie	Physique atomique et moléculaire
M. MAIZIERES Christian	Automatique
M. MESMACQUE Gérard	Génie mécanique
M. MESSELYN Jean	Physique atomique et moléculaire
M. MESSERLIN Patrick	Sciences économiques
M. MIGNOT Fulbert	Analyse numérique
M. MONTEL Marc	Physique du solide
M. MONTUELLE Bernard	Biologie et biochimie appliquées
Mme MOUNIER Yvonne	Physiologie des structures contractiles
Mme N'GUYEN VAN CHI Régine	Géographie
M. NICOLE Jacques	Chimie analytique
M. NOTELET Francis	Electronique, électrotechnique, automatique
M. PARSY Fernand	Mécanique
M. PASZKOWSKI Stéphan	Analyse numérique
Mlle PAUPARDIN Colette	Biologie physiologie végétales
M. PECQUE Marcel	Chimie organique
M. PERROT Pierre	Chimie appliquée
M. PERTUZON Emile	Physiologie animale
M. PETIT Francis	Chimie organique, minérale et analytique
M. PONSOLLE Louis	Chimie physique
M. PORCHET Maurice	Biologie animale
M. POVY Lucien	Automatique
M. RACZY Ladislas	Electronique
M. RAOULT Jean-François	Géologie structurale
M. RICHARD Alain	Biologie animale
M. RIETSCH François	Physique des polymères
M. ROGALSKI Marc	Analyse
M. ROY Jean-Claude	Psychophysiologie
M. SCHAMPS Joël	Spectroscopie moléculaire
Mme SCHWARZBACH Yvette	Géométrie
M. SIMON Michel	Sociologie
M. SLIWA Henri	Chimie organique
M. SOMME Jean	Géographie
Mlle SPIK Geneviève	Biochimie
M. STERBOUL François	Informatique
M. TAILLIEZ Roger	Génie alimentaire
M. THERY Pierre	Electronique, électrotechnique, automatique
M. TOULOTTE Jean-Marc	Automatique
M. TURREL Georges	Spectrochimie infrarouge et Raman
M. VANDORPE Bernard	Chimie minérale
M. VAST Pierre	Chimie inorganique
M. VERBERT André	Biochimie
M. VERNET Philippe	Génétique
M. VILETTE Michel	Résistance des matériaux

M. WALLART Francis	Spectrochimie Infrarouge et Raman
M. WARTEL Michel	Chimie Inorganique
M. WATERLOT Michel	Géologie générale
M. WERNER Georges	Informatique fondamentale appliquée
M. WOSNIAK Michel	Hydrométallurgie
Mme ZINN Justin Nicole	Algèbre

ÊTRE HOMME

C'EST ÊTRE RESPONSABLE

C'EST SENTIR QU'EN APPORTANT SA PIERRE À L'EDIFICE

ON CONTRIBUE À CONSTRUIRE LE MONDE

ANTOINE DE SAINT-EXUPÉRY

A MA FEMME,

A MES ENFANTS,

A CEUX QUI M'ONT AIDÉ.



J'ai effectué ce travail au Laboratoire de Cinétique et de Chimie de la Combustion de Monsieur le Professeur LUCQUIN. Après plus de vingt années entrecoupées de nombreuses difficultés, je termine sous la conduite du même professeur les études supérieures entreprises avec quelques collègues instituteurs en 1963. A l'époque, Monsieur LUCQUIN nous avait déjà aidés à franchir de nombreux obstacles dûs à une longue interruption d'études ; c'est l'une des raisons pour lesquelles j'ai tenu à préparer cette thèse dans son laboratoire. Entouré d'une équipe de chercheurs compétents et disponibles, il a su créer un climat de motivation tel que je souhaite, à mon tour, transférer les méthodes originales et fructueuses de la recherche aux jeunes enseignants dont j'assure la formation : l'esprit qui règne dans son laboratoire me persuade en effet de la nécessité pour tout enseignant de bénéficier des apports de la recherche ; j'espère que cette collaboration pourra se prolonger.

Monsieur ANTONIK, quant à lui, m'a apporté à une époque où j'en avais particulièrement besoin, un sujet de recherche extrêmement fécond qui correspondait à mes possibilités. Il m'a permis d'acquérir très rapidement les connaissances fondamentales pour entreprendre ces recherches ; je le remercie vivement.

Je remercie aussi Monsieur THOMAS d'avoir accepté d'effectuer des essais sur le moteur expérimental ; les confrontations et les échanges que nous avons eus ont largement contribué au caractère expérimental du sujet. J'exprime également ma profonde reconnaissance à Monsieur DEVYST que j'ai souvent sollicité ; malgré un travail extérieur important, l'accueil qu'il m'a réservé était suffisamment chaleureux pour faire oublier la température (glaciale) de la salle de manipulations!

Monsieur BAYEN, Chargé de Mission au Ministère de la Recherche et de l'Industrie a bien voulu nous honorer de sa présence. Je le remercie personnellement de s'être intéressé à mes travaux ; le soutien moral permanent dont il a fait preuve à mon égard m'a encouragé à persévérer dans cette voie.

Les conseils éclairés de Monsieur DELFOSSE en Thermodynamique ainsi que la rigueur expérimentale de Mademoiselle BAILLET ont contribué efficacement à rendre très profitable mon séjour au laboratoire. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma sincère amitié.

J'ai toujours rencontré auprès du personnel de laboratoire l'aide efficace, l'accueil bienveillant et la volonté de coopération. Ainsi notre travail a été considérablement facilité grâce à l'assistance technique efficace fournie par Madame CALONNE pour la frappe, Madame SAINLEGER pour le tirage de cette thèse ainsi que par Monsieur BARTIER, Monsieur LHOYEZ pour les dessins et leur reproduction, Monsieur MAILLE pour la réalisation délicate de pièces de verre et enfin Mademoiselle LEMENU pour la réalisation de certaines expériences. Je les remercie tous très sincèrement.

## INTRODUCTION GENERALE

Dans un moteur à allumage commandé, on appelle combustion anormale toute combustion qui ne résulte pas de la propagation du front de flamme amorcé par l'étincelle. Il existe plusieurs formes de combustions anormales pouvant résulter soit de l'autoinflammation des gaz frais, soit d'allumages incontrôlés provoqués par des "points chauds" ou des dépôts dans la chambre de combustion, soit des deux phénomènes simultanés, nous restreindrons cette étude au premier type de combustion incontrôlée.

Pour augmenter le rendement du moteur, on est conduit à augmenter le taux de compression dans la chambre ; malheureusement, cette élévation du taux de compression se traduit par l'apparition d'inflammations spontanées qui sont à l'origine du cliquetis ; ce phénomène peut provoquer des pertes de puissance et même parfois des destructions importantes, justifiant ainsi les nombreux travaux qui y sont consacrés.

Dans ce domaine, pour optimiser la conception du moteur avec le choix des carburants, on a classé ces derniers selon leur aptitude à résister au cliquetis ; on a traduit cette tendance par un indice appelé indice d'octane. Une normalisation de la méthode s'est avérée indispensable par suite de l'internationalisation du parc automobile et des carburants.

Les essais sur moteur sont longs et onéreux ; aussi les recherches se sont-elles orientées vers des méthodes plus rapides avec des appareils moins coûteux et nécessitant un volume moindre de carburant. Les expériences de Male (1) ont permis de mettre en évidence des flammes froides\*

---

\* flamme froide (2) : combustion incomplète et faiblement exothermique produisant par exemple des aldéhydes et du monoxyde de carbone

dans la chambre de combustion, devant le front de flamme et avant l'inflammation normale des gaz frais. Pourtant deux écoles restent en présence en ce qui concerne le rôle de ces explosions froides vis à vis de l'apparition du phénomène de cliquetis :

- celle qui y attribue un rôle prépondérant dans la mesure où elles génèrent des inflammations normales dites de second stade à l'origine du cliquetis (3) (4) (5) (6) (7) (8) (9) (10) (11)

- celle qui, sans nier leur existence, minimise la relation causale entre la flamme froide et ce type de combustion anormale : le cliquetis apparaît alors comme une conséquence de l'interaction du champ aérodynamique sur les phénomènes de combustion (12).

L'objet de cette étude sera centré sur l'influence de certains paramètres moteurs sur le cliquetis puis sur une estimation simple de ce phénomène.

- Sur un moteur expérimental, à taux de compression ajustable, nous identifierons le phénomène de cliquetis; nous rechercherons systématiquement son apparition avec des mélanges appropriés d'hydrocarbures. Dans des conditions spécifiques de fonctionnement du moteur, il sera possible de déterminer les limites d'inflammabilité et de cliquetis: la sensibilité de celles-ci à différents paramètres sera envisagée.

- Avec un appareil statique, nous établirons une corrélation entre certaines caractéristiques de la flamme froide et l'indice d'octane ; un indice d'octane lié à l'explosion froide sera ainsi attribué à certains hydrocarbures et carburants commerciaux. Une extension de cette méthode, par remplacement des hydrocarbures de référence, permettra d'affecter un indice de cétane à certains gas-oils.

BIBLIOGRAPHIE - INTRODUCTION GENRALE

- (1) Male T. - 3<sup>th</sup> Symposium on Combustion and Flame - The William and Vilkins Co., p.721, (1949)
- (2) Lucquin M. - Nouveau Traité de Chimie Minérale, Tome XIII, 1<sup>er</sup> fascicule - Editions Masson, Paris (1961)
- (3) Prettre M. - Deuxième congrès mondial du pétrole, sec. 4, 3, (1934)
- (4) Serruys M. - Publications Sci. et téch. du Ministère de l(Air n°103, (1937)
- (5) Affleck W.S., Fisch A. - COmbustion and FLame 12, 243, (1968)
- (6) Fish A., Read I.A., Affleck W.S., Haskell W.W. - Combustion and Flame 13, 39, (1969)
- (7) Lewis B. et Von Elbe G. - Combustion flames and explosions of gases, Academic press Inc. New York and London, 191, (1961)
- (8) Fenske E.R., Pasyk L.F. - Determining a parameter such as octane number of a hydrocarbon composition utilizing cool flame combustion. US Patent 3531, 255, (1970)
- (9) Antonik S., Delfosse L., Baillet C., - Bull. Soc. Chim. Fr., n°6, 1887 (1973)
- (10) Karbassian A., Ben Aïm R.I., Chamboux J. et Viossat V. - Revue de l'I.F.P., 36, n°6, 801, (1981)
- (11) Stepanski Ya, Yu., Yablonskii G.S. - Fiz. Gorenia i vzriva n°1, 57 (1982)
- (12) Maly R., Ziegler G. - Passenger car meeting Troy, Michigan (7-10 Juin 1982)

## 1ÈRE PARTIE

### ESSAIS SUR LE MOTEUR A ALLUMAGE COMMANDE A TAUX DE COMPRESSION VARIABLE.

#### INTRODUCTION

#### A) LA COMBUSTION NORMALE DANS LES MOTEURS À ALLUMAGE COMMANDE.

- I) Vitesse de combustion normale et vitesse de déflagration laminaire
- II) Evolution de la pression et de la température dans la chambre de combustion
  - 1) Principe de fonctionnement du moteur à allumage commandé
  - 2) Evolution des paramètres physiques dans la chambre de combustion lors d'une combustion normale
  - 3) Importance de la notion de durée de combustion ; définitions du coefficient de remplissage et du rapport volumétrique de compression
- III) Diagramme de Clapeyron
  - 1) Cycle théorique de Beau de Rochas
  - 2) Cycle réel ; rôle de l'avance à l'allumage
- IV) Conclusion

#### B) DESCRIPTION DU BANC D'ESSAI À TAUX DE COMPRESSION VARIABLE TD 43 EN VERSION ALLUMAGE COMMANDE ; MÉTHODE EXPÉRIMENTALE.

- I) Description du banc d'essai
  - 1) Le moteur
  - 2) Le frein
  - 3) Les consoles

- a) La console instrumentation
- b) La console commande - contrôle
- 4) L'indicateur électronique
- 5) L'analyse des gaz

## II) Méthode expérimentale

- 1) Détermination de la richesse
  - a) Définition
  - b) Equation de combustion
  - c) Expression de la richesse
- 2) Utilisation des oscillogrammes
  - a) Combustions normale et anormale
  - b) Méthode d'examen des oscillogrammes
- 3) Etablissement des limites d'inflammabilité et de cliquetis
  - a) Choix du repère
  - b) Limites
  - c) Conditions expérimentales
  - d) Précision des résultats
- 4) Déplacement du minimum du domaine de cliquetis en fonction du pourcentage d'isooctane dans le mélange n-heptane - isooctane

## III) Les carburants utilisés

### C) RÉSULTATS

- I) Origine de l'autoinflammation dans les moteurs à allumage commandé
- II) Différenciation de la combustion normale et du cliquetis ; influence de l'avance à l'allumage
  - 1) Distinction entre combustion normale et cliquetis  
1 2
  - 2) Examen des oscillogrammes 2 3 4

3) Examen des oscillogrammes 4 5 6 7 ; influence sur le cliquetis de l'avance à l'allumage

III) Limites d'inflammabilité et de cliquetis ; examen des domaines délimités (fig.3)

1) Limites d'inflammabilité

- a) Pour le kérosène
- b) Pour l'essence ordinaire
- c) Pour le super-carburant

2) Limites de cliquetis

3) Examen des oscillogrammes obtenus dans les différents domaines (2ème série d'oscillogrammes)

IV) Influence des facteurs mécaniques sur les limites obtenues

1) Influence de l'avance à l'allumage

- a) Sur les limites d'inflammabilité
- b) Sur les limites de cliquetis

2) Influence de la vitesse de rotation et de la charge sur les limites

- a) Sur les limites d'inflammabilité
- b) Sur les limites de cliquetis

V) Déplacement des limites de cliquetis pour différents pourcentages en iso-octane dans le mélange n-heptane - iso-octane

VI) Variations du couple moteur et de la pression maximale en fonction de la richesse à taux de compression constant

#### D) DISCUSSION ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

I) Relation entre les facteurs étudiés et le cliquetis

1) Au niveau des limites d'inflammabilité

2) Domaine compris entre les limites d'inflammabilité et de cliquetis : zone A



3) Au niveau des limites de cliquetis

- a) Effet de l'avance à l'allumage sur le cliquetis
- b) Effet de la vitesse de rotation (et de la charge) sur le cliquetis

4) Domaine du cliquetis

II) Interprétation du diagramme taux de compression -  
richesse (fig.3)

III) Conclusion

E) CONCLUSION DE LA PREMIÈRE PARTIE

PREMIERE PARTIE

ESSAIS SUR LE MOTEUR À ALLUMAGE COMMANDÉ  
À TAUX DE COMPRESSION VARIABLE

## INTRODUCTION

La combustion d'un mélange gazeux introduit dans la chambre de combustion d'un moteur à allumage commandé est un phénomène complexe en raison des mouvements des fluides et de la variation du volume offert à la masse gazeuse. L'utilisation d'un moteur expérimental permet d'accéder à des paramètres physiques fondamentaux comme la variation de la pression dans la chambre au cours d'un cycle. De plus, la possibilité de modifier le taux de compression d'une part, et la nature du carburant d'autre part, rend possible l'étude du comportement de ce carburant en fonction du taux de compression et notamment les limites de fonctionnement normal dans des conditions déterminées.

## A) LA COMBUSTION NORMALE DANS LES MOTEURS À ALLUMAGE COMMANDÉ

### I) Vitesse de combustion normale et vitesse de déflagration laminaire

Lorsqu'une zone de combustion appelée flamme se propage avec une vitesse de l'ordre de quelques mètres par seconde par rapport au mélange inflammable, la propagation est dite subsonique : on parle alors de déflagration; ceci se produit dans la chambre de combustion des moteurs à allumage commandé lors d'une combustion normale. La connaissance de cette vitesse est de grande importance puisqu'elle permet de calculer la quantité de mélange brûlé par unité de temps, c'est-à-dire, en fait, la vitesse de combustion du combustible ; cette vitesse relative de la flamme par rapport aux gaz frais admet une composante normale par rapport au front de flamme qui seule conditionne la vitesse de libération d'énergie par combustion.

Si le profil des vitesses suit la loi d'écoulement de Poiseuille (1) (2), le régime de déflagration est laminaire ; on peut alors négliger les fluctuations erratiques de la vitesse par rapport au mouvement ordonné des particules du fluide, c'est-à-dire négliger l'influence du champ aérodynamique sur la flamme. La vitesse de déflagration est alors appelée vitesse fondamentale laminaire laquelle ne dépend alors que du mélange combustible considéré (3). Cette grandeur mesurable permet de caractériser l'aptitude d'un carburant à brûler plus ou moins vite, c'est-à-dire en fait sa vitesse de combustion que nous allons traduire quantitativement (4) :

- soit  $M_b$  la masse des gaz brûlés contenus dans le cylindre à un instant de date  $t$ ,  $M$  la masse totale des gaz ; nous allons exprimer l'évolution de la fraction brûlée en fonction du temps à partir du rapport  $M_b/M = x$  ; en effet, si  $v_1$  est la vitesse de déflagration en régime laminaire supposée constante le long du front de flamme, on peut alors déterminer l'expression de la

vitesse de combustion par le rapport  $dx/dt$  ;

-  $M dx$  est la masse de gaz frais brûlés pendant l'intervalle de temps  $dt$

$$M dx = \rho_f \cdot S \cdot v_1 \cdot dt$$

où  $\rho_f$  est la masse volumique des gaz frais et  $S$  l'aire du front de flamme ;  $v_1 \cdot dt$  est la distance parcourue par le front de flamme pendant l'intervalle de temps  $dt$ , d'où :

$$dx/dt = 1/M \cdot \rho_f \cdot S \cdot v_1$$

- Dans cette hypothèse, la vitesse de combustion  $dx/dt$  est proportionnelle à la vitesse de déflagration  $v_1$ . Comme il est possible d'accéder à la mesure de cette dernière (4) on pourra donc en déduire la vitesse de combustion normale et surtout étudier les facteurs qui seront susceptibles de l'influencer.

Mises à part quelques exceptions comme l'éthylène et l'acétylène, la vitesse fondamentale laminaire varie peu d'un hydrocarbure à l'autre (5), l'air étant utilisé comme comburant ; il en sera donc de même de la vitesse de combustion normale qui lui est proportionnelle.

hydrocarbure	vitesse laminaire en $\text{cm.s}^{-1}$
méthane	43,4
propane	45,6
n-heptane	42,2
isooctane	41,0
benzène	47,6
méthanol	48,0

## II) Evolution de la pression et de la température dans la chambre de combustion

### 1) Principe de fonctionnement du moteur à allumage commandé

Le moteur à quatre temps à allumage commandé réalise partiellement la transformation de l'énergie chimique en énergie mécanique : un mélange d'air et de combustible en proportions convenables est enflammé dans un cylindre obturé à une extrémité par une paroi fixe qui est la culasse et dont l'autre extrémité est munie d'un piston mobile réalisant un volume variable : toute modification de la pression dans le volume compris entre la partie haute du piston et la culasse (c'est-à-dire dans la chambre de combustion) entraîne un déplacement de celui-ci. C'est le cas des réactions de combustion qui provoquent dans le milieu où elles évoluent une augmentation de température et de pression liée à une expansion des gaz brûlés.

2) Evolution des paramètres physiques dans la chambre de combustion (3) (4)

A partir du noyau enflammé, le front de flamme se développe dans toutes les directions et se propage dans la chambre de combustion. Au fur et à mesure que les gaz frais sont transformés en produits de combustion, une quantité de chaleur proportionnelle à la masse transformée est libérée, ce qui accroît la température des gaz essentiellement à l'arrière du front de flamme ; il en résulte que la pression augmente, d'autant plus que le mouvement ascendant du piston comprime également le fluide.

A ces effets, vient s'ajouter une perturbation aérodynamique créée par le passage de la flamme et le mouvement tourbillonnaire des gaz ; il s'en suit que les variations de la pression dans le cylindre résultent de la superposition de ces différents facteurs. Les diagrammes : angle de rotation - pression et volume - pression traduisent macroscopiquement cette évolution de la pression (fig. A<sub>2</sub> et fig. A<sub>3</sub>).

Front de flamme dans  
l'hypothèse d'une propagation  
de forme sphérique

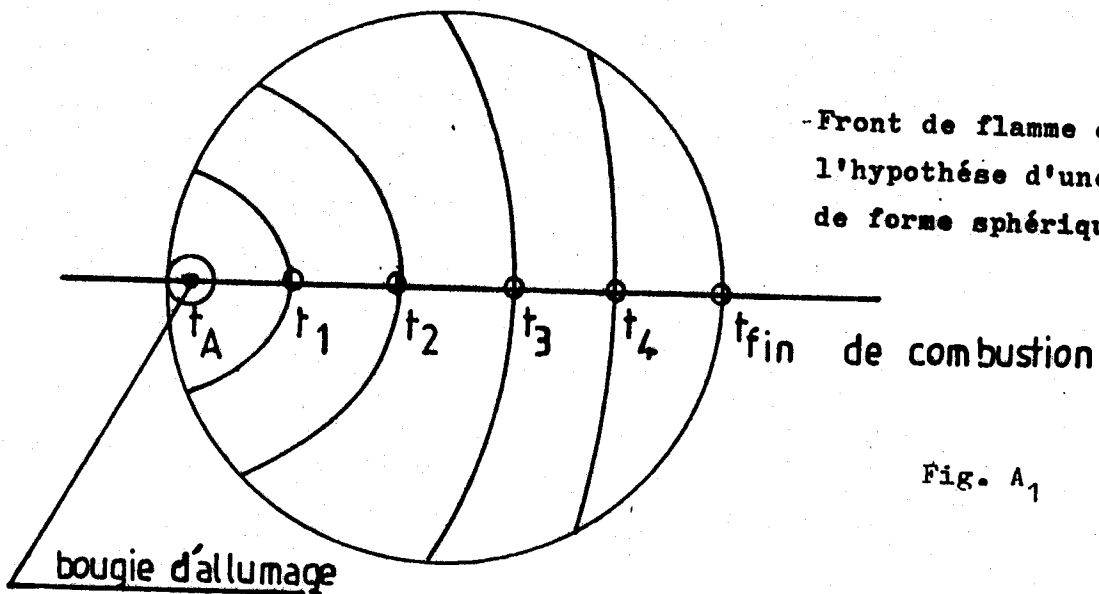


Fig. A<sub>1</sub>

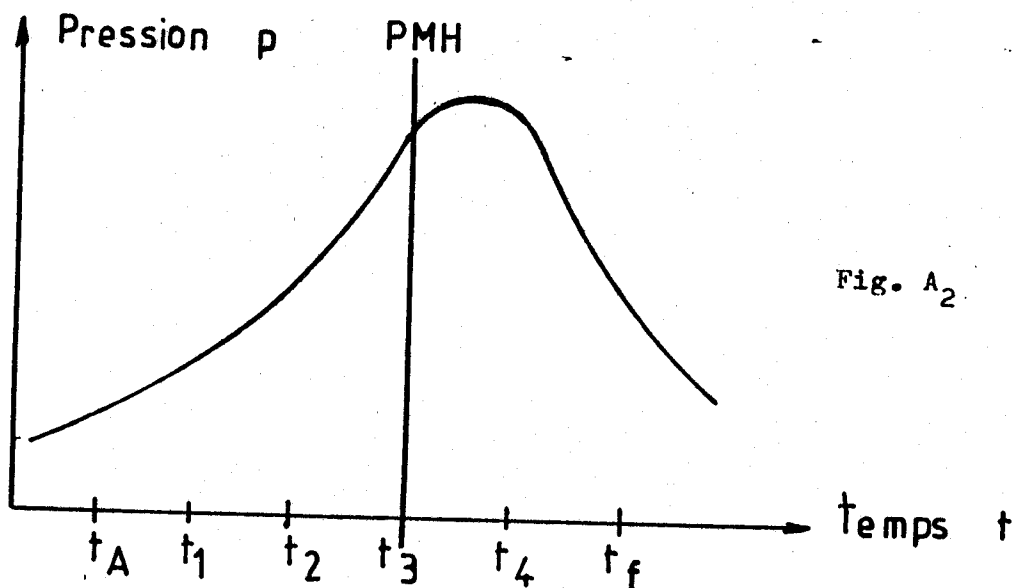


Fig. A<sub>2</sub>

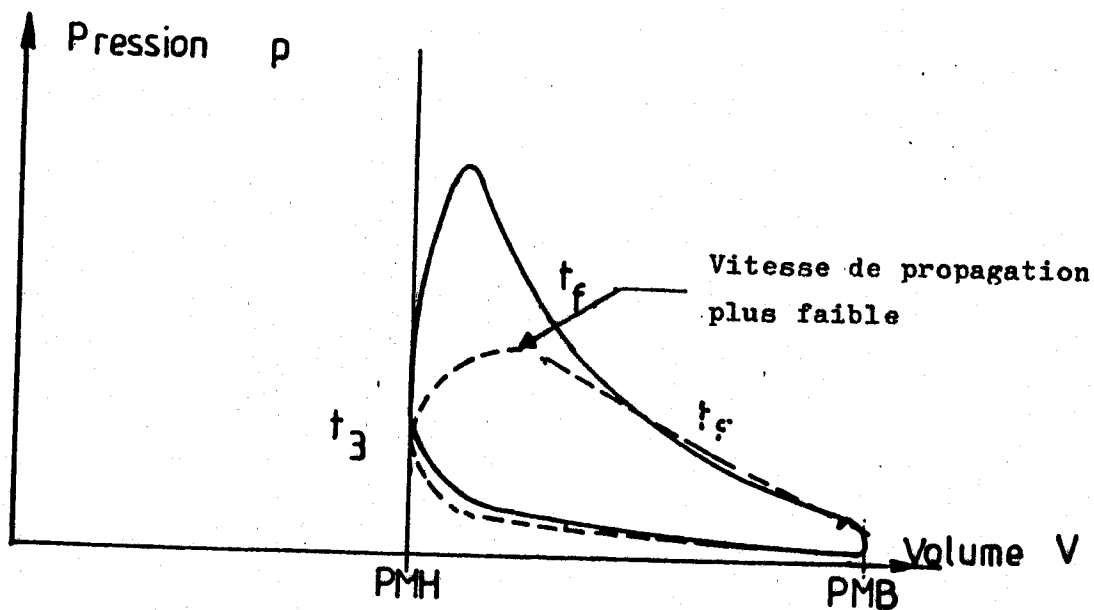


Fig. A<sub>3</sub>

Comme nous l'avons fait remarquer, la vitesse de propagation de la flamme est faible en régime subsonique (déflagration) ; on peut donc admettre en première approximation que la pression est uniforme dans l'ensemble de la chambre de combustion et par conséquent identique dans les gaz brûlés et les gaz frais séparés par le front de flamme (3).

La température des gaz frais est essentiellement fonction de la pression uniforme, mais variable, suivant la position du vilebrequin ; elle dépend donc de la vitesse de combustion, comme en témoigne l'allure du diagramme P(V) : une vitesse rapide favorise une combustion isochore et une évolution adiabatique de la température des gaz frais en fonction de la pression.

3) Importance de la notion de durée de la combustion ; définitions du coefficient de remplissage et du rapport volumétrique de compression

La recherche du meilleur rendement thermique d'un moteur implique le choix d'une durée de combustion très courte de la masse gazeuse ; il convient donc d'adopter une vitesse linéaire de déplacement du front de flamme élevée (fig.A3). Comme la vitesse de propagation de la flamme croît avec la pression (3), il convient d'obtenir en fin de compression la plus grande pression compatible avec le carburant utilisé, c'est-à-dire le meilleur remplissage possible pour un rapport volumétrique de compression donné.

Le coefficient de remplissage caractérise l'aspiration ; c'est le rapport entre la masse d'air admise et celle qui occuperait la cylindrée dans les conditions qui règnent dans le milieu ambiant (conditions normales):

$$C_r = \frac{m_{adm.}}{\rho_o V_o} < 1$$

où :  $\rho_o$  est la masse spécifique du milieu ambiant



$V_0$  est le volume de la cylindrée.

On admet approximativement que le remplissage varie comme l'ouverture du papillon des gaz (obturateur); en diminuant la compression, on réduit le remplissage.

La course du piston est limitée entre deux positions extrêmes, l'une correspond au volume minimal  $v^*$  qui est celui de la chambre de combustion (Point Mort Haut) et l'autre au volume maximal  $V + v$  (Point Mort Bas) où  $V$  est la cylindrée qui dépend de la course du piston et de l'alésage, c'est-à-dire le diamètre du cylindre. On appelle rapport volumétrique de compression  $\epsilon$  le quotient  $(V+v)/v$  souvent improprement qualifié de taux de compression ; il dépend des moteurs mais sa valeur est en général voisine de 9 : 1\*\* actuellement.

### III) Diagramme de Clapeyron (V, P)

En coordonnées (V, P) nous allons rappeler le cycle de Beau de Rochas théorique puis réel afin de :

- préciser le rôle de l'avance à l'allumage qui sera un paramètre que nous ferons varier lors de l'étude du cliquetis

- comparer les différents oscillogrammes obtenus dans ce même repère avec le moteur expérimental.

#### 1) Cycle théorique\*\*\* (fig. 1a)

Le cycle à 4 temps se reproduit, identique à lui-même, tous les deux tours du vilebrequin (6) ; il comprend les phases successives suivantes :

- Admission de mélange carburé pendant le déplacement du piston entre le P.M.H. vers le P.M.B., le cylindre

\*  $v$  est appelé aussi volume ou espace mort

\*\* le rapport volumétrique de compression est donc ramené à l'unité et doit donc s'exprimer en toute rigueur, 9 : 1 par exemple ; par la suite, nous n'écrivons que 9

\*\*\* annexe thermodynamique

étant mis en communication avec le mélange par l'ouverture de la soupape d'admission (ABC).

- Fermeture de la soupape d'admission et compression du mélange entre le P.M.H et le P.M.B. Une étincelle provoque l'inflammation du mélange avant la fin de la compression; en première approximation, cette dernière peut être considérée comme adiabatique (CD).

- Combustion et détente (adiabatique), le piston revenant au P.M.B. (DE et EF).

- Ouverture de la soupape d'échappement et expulsion des gaz brûlés pendant le retour au P.M.H. ; la fermeture de la soupape d'échappement s'effectue aux environs du P.M.H. (FGA).

En ce qui concerne l'ouverture des soupapes d'admission et d'échappement, elle est provoquée par un système de poussoirs et de culbuteurs actionnés par un arbre à cames tournant à demi-vitesse de celle du vilebrequin. La fermeture de ces soupapes est assurée par la détente d'un ressort qui a été comprimé pendant l'ouverture. La conception actuelle réduit la longueur de la chaîne cinématique par le système arbres à cames en tête agissant directement sur les culbuteurs.

## 2) Cycle réel ; rôle de l'avance à l'allumage (7)

En fait, pratiquement, l'évolution réelle dans le cylindre du mélange gazeux diffère sensiblement du cycle théorique de Beau de Rochas pour les raisons suivantes:

- la vitesse de combustion étant finie, il est indispensable d'enflammer le mélange avant l'arrivée au P.M.H. pour obtenir un rendement maximal, d'où la nécessité d'une avance à l'allumage d'autant plus que la phase de combustion s'étale sur environ  $60^\circ$  de rotation et donc après le P.M.H. ; le profil du cycle dans le repère (V,P) dépend de l'avance à l'allumage et de la vitesse

de combustion (fig. 1b)

- en raison des échanges avec la paroi et avec le piston, les lois de compression et de détente ne peuvent plus être considérées comme rigoureusement adiabatiques

- pour assurer une durée de passage suffisante aux gaz à l'endroit des soupapes, on est conduit d'une part à augmenter la durée de l'admission en retardant sa fermeture et d'autre part, à avancer l'ouverture de la soupape d'échappement par rapport au P.M.B. (fig.2), ce qui entraîne aussi des déformations du cycle à ces deux niveaux.

L'admission du mélange s'effectue à une pression inférieure à la pression atmosphérique (dépression) et le refoulement des gaz d'échappement à une pression supérieure ; il existe donc une zone du diagramme correspondant à un travail absorbé (\*) par le système et donc perdu mécaniquement ; son importance dépend de la pression d'admission et du calage de la distribution : les quatre temps du cycle ne sont donc pas égaux .

#### IV) Conclusion

La vitesse fondamentale laminaire caractérise la vitesse de réaction d'un mélange ; le comportement des carburants en regard du phénomène de combustion est régi essentiellement par la vitesse laminaire (8). En accord avec les théories admises sur la propagation des flammes sous ce régime et dans le cas des moteurs à allumage commandé, (9) on peut énoncer les remarques suivantes:

- Dans la gamme des carburants usuels, la vitesse de combustion normale dépend peu de la structure chimique des hydrocarbures qui entrent dans la composition de ces carburants ; la confirmation en est donnée par le fait que le réajustement de l'avance à allumage varie peu d'un carburant à l'autre.

---

\* A ce travail absorbé, en-dessous de la pression atmosphérique, correspond une aire balayée en sens inverse du cycle moteur

- Les phénomènes liés à l'inflammation spontanée des gaz frais (c'est-à-dire sans apport initial d'énergie électrique) seront tributaires de la température des gaz frais en fin de compression et aussi de la nature du carburant ; or la température atteinte dépend de la vitesse de combustion normale et les limites d'explosion sont spécifiques de la nature de l'hydrocarbure.

B) DESCRIPTION DU BANC D'ESSAI À TAUX DE COMPRESSION VARIABLE TD 43 EN VERSION ALLUMAGE COMMANDÉ ; MÉTHODE EXPERIMENTALE

Ces essais ont été réalisés à l'Université de Valenciennes, au laboratoire de Thermodynamique-Energétique, en collaboration avec Jean-Pascal Devyst et Daniel-Gaston Thomas.

I) Description du banc d'essai (photographie n°1)

Les organes essentiels de ce banc sont :

- le moteur à taux de compression réglable qui peut être utilisé en allumage commandé ou en allumage par compression : les essais ont été effectués en version allumage commandé .
- le carburateur et le système d'allumage
- la machine à courant continu ou frein
- la console instrumentation et la console commande-contrôle
- l'indicateur électronique de diagramme
- la centrale d'analyse des gaz.

1) Le moteur (photographie n°2)

Le moteur équipant le banc est dérivé du moteur allemand FARYMAN A.30 marine qui est un DIESEL 4 temps, refroidi par eau. Ce moteur peut développer 9 kW à 3000 tr/min ; il comporte un seul cylindre. Pour former le banc à taux de compression variable TD 43, ce moteur

a subi essentiellement trois séries de modifications.

- Le réglage du taux de compression a été rendu possible de 5 à 18 (de 5 à 10 en allumage commandé et de 10 à 18 en version allumage par compression). La variation du taux de compression est réalisée par le déplacement de l'ensemble chemise-culasse par rapport à l'attelage mobile logé dans le carter ; ce déplacement fait varier le volume mort sans modifier la course du piston entre le point mort bas et le point mort haut. Une diminution du volume mort entraîne une augmentation du taux de compression et réciproquement.

- Une distribution hydraulique supplée la distribution initialement constituée de l'ensemble : arbre à cames poussoirs et culbuteurs ; la distance arbre à cames - culbuteur est, en effet, variable dans le moteur expérimental.

- Au niveau de la carburation et de l'allumage :

. Le moteur est équipé d'un carburateur SOLEX; un jeu de buses de diamètres différents permet de régler le débit tandis que par le calibrage de l'orifice du gicleur d'alimentation, on règle la richesse\* du mélange.

. L'allumage est obtenu par l'ensemble bobine, rupteur et bougie ; le calage de l'avance à l'allumage peut se faire en tous points du cycle, à l'arrêt et pendant le fonctionnement du moteur.

## 2) Le frein

Le frein est constitué par une machine à courant continu, susceptible de fonctionner dans des conditions réversibles. En génératrice, elle absorbe la puissance développée par le moteur thermique au niveau de l'arbre, puissance qui est redissipée ensuite par effet Joule dans des résistors ; en modifiant la résistance de ces derniers, on peut donc jouer sur la charge de la dynamo

---

\* la richesse est définie dans le paragraphe suivant

(pleine charge, trois quarts de charge\*...) et régler ainsi la puissance de ce moteur thermique. Toute variation du courant de charge entraîne une modification de la position du papillon réglant l'admission des gaz frais.

En fonctionnement moteur, la dynamo permet le démarrage du moteur ainsi que la mesure de la puissance disponible sur l'arbre, c'est-à-dire le couple à une vitesse de rotation donnée\*\*

### 3) Les consoles

#### a) La console instrumentation

L'ensemble des informations recueillies au niveau du moteur thermique est regroupé sur un panneau qui indique :

- la vitesse de rotation,
- le couple,
- la puissance,
- la température d'entrée de l'eau de refroidissement,
- la température de sortie de l'eau de refroidissement,
- la température des gaz d'échappement,
- le débit d'air,
- le débit d'eau de refroidissement.

---

\* Un ampèremètre placé dans le circuit de charge permet de contrôler la variation du courant de charge. D'une manière plus générale, la charge d'une machine est la puissance absorbée ou fournie par la machine : elle dépend donc de la vitesse de rotation et du couple. Dans le langage des techniciens de l'automobile, c'est "l'effort sur la jante".

\*\* En égalant, à l'équilibre le couple moteur (inconnu) au couple résistant, on détermine le couple moteur.

## b) La console commande-contrôle

Outre les fonctions de commande et de contrôle, cette console supporte aussi les résistors de charge ainsi que les circuits d'alimentation.

4) L'indicateur électronique

Cet indicateur de cycle est composé :

- d'un capteur de pression piezoélectrique logé dans la chambre de combustion,
- d'un générateur de fonction rotatif, délivrant des signaux proportionnels au volume balayé par le piston,
- d'un marqueur d'angle de rotation du vilebrequin.

L'ensemble des informations recueillies, après amplification et mise en forme, est visualisé sur un oscilloscope : on peut suivre l'évolution de la pression en fonction du temps ainsi que le tracé des diagrammes volume-pression.

5) L'analyse des gaz (photographie n°3)

Les effluents gazeux sont envoyés vers une centrale d'analyse des gaz qui nous renseigne, de manière continue sur la composition des gaz d'échappement, en ce qui concerne : le dioxyde de carbone, le monoxyde de carbone, le méthane, l'hydrogène et l'oxygène.

La centrale d'analyse des gaz met en oeuvre:

- trois analyseurs à infrarouge, COSMA type RUBIS 3000, pour les trois premiers produits,
- un analyseur SIEMENS basé sur la conductibilité thermique de l'hydrogène,
- un analyseur COSMA, type RUBIS 3000 utilisant les propriétés paramagnétiques de l'oxygène.

II) Méthode expérimentale1) Détermination de la richesse

## a) Définition

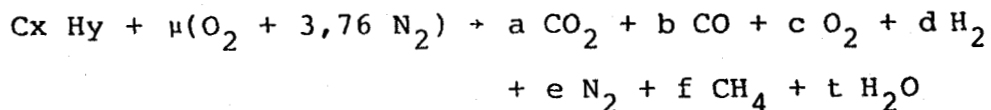
Le dosage de la quantité d'essence à mélanger à l'air admis dans le moteur est repéré par la richesse  $r$  : c'est le rapport qui existe entre la masse du carburant associée à une certaine masse de comburant, dans ce mélange, et la masse de combustible qu'il faudrait associer, à cette même masse de comburant pour obtenir un mélange stoechiométrique (4).

Les mélanges pauvres (en combustible) ont une richesse plus petite que 1 et les mélanges riches (en combustible) ont une richesse plus grande que 1.

## b) Equation de combustion (4)

Pour établir l'équation de combustion, on fait l'hypothèse que l'air est un mélange binaire d'oxygène et d'azote ayant respectivement des teneurs volumiques de 21 et 79 pour cent. D'autre part, on néglige les imbrûlés autres que le méthane ainsi que le carbone solide pouvant être présents à l'échappement. Les gaz qui demeurent sont donc : l'azote, le monoxyde et le dioxyde de carbone, le méthane et l'hydrogène.

Les carburants actuellement utilisés sont des mélanges complexes d'hydrocarbures ; il n'est pratiquement pas possible de définir leur composition exacte ; on peut cependant les caractériser par une formule fictive qui donne globalement le nombre d'atomes de carbone et le nombre d'atomes d'hydrogène. L'équation de combustion théorique peut s'écrire :



## c) Expression de la richesse (4)

Finalement,  $x$ ,  $y$  et  $\mu$  étant déterminés par l'analyse des gaz, l'expression de la richesse  $r$  se réduit à :



$$r = \frac{\frac{(x + \frac{y}{4}) \cdot 137,4}{4}}{12,011 x + 1,008 y} = \frac{x + \frac{y}{4}}{\mu}$$

$$\frac{\mu \cdot 137,4}{12,011 x + 1,008 y}$$

## 2) Utilisation des oscillogrammes

### a) Combustions normale et anormale

Pour distinguer les phases de combustions normale et anormale, nous avons eu recours aux symptômes suivants:

- un bruit aigu, parfois intermittent, ressemblant à celui d'une percussion ; ce bruit se reproduit à chaque cycle ou seulement à certains cycles

- au niveau du diagramme angle de rotation  $\alpha$  du vilebrequin - pression P, soit ( $\alpha$ , P)

- . un pic de pression important, celle-ci pouvant atteindre 50 bars

- . une zone dendritique qui se traduit par des "aspérités" lors de la détente, sur l'oscillogramme

- des bouffées noires dénotant la formation de suies dans les gaz d'échappement.

A ce type de combustion anormale, on donne le nom de cliquetis.

### b) Méthode d'examen des oscillogrammes

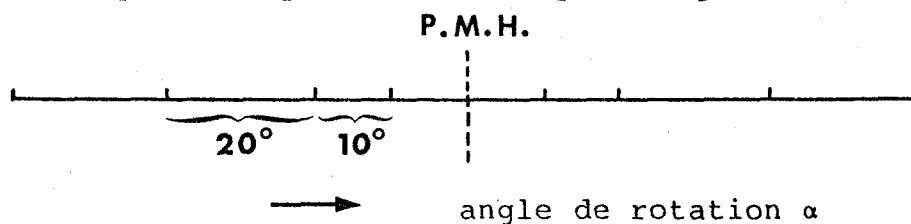
Pour simplifier les comparaisons, nous assimilerons les oscillogrammes obtenus (avec leur numérotation) aux points de fonctionnement moteur associés : nature du carburant, type d'allumage, présence ou absence d'étincelle, avance à l'allumage, rapport volumétrique de compression et richesse du carburant utilisé.

L'examen des oscillogrammes permet :

- la distinction des phases de combustion et la durée approximative de celles-ci, connaissant la fréquence de balayage

- l'appréciation de la valeur de la pression régnant dans la chambre connaissant la sensibilité du capteur et le coefficient d'amplification des voies d'entrée de l'oscilloscope

- la localisation du P.M.H. par le marquage : une base de temps incorporée induit périodiquement un signal



de faible amplitude sur une ligne de base située à la partie inférieure de l'oscillogramme

- le calcul du rendement à partir du diagramme (V,P).

### 3) Etablissement des limites d'inflammabilité et de cliquetis

#### a) Choix du repère

Le repère imposé par les possibilités et les conditions de fonctionnement du moteur est : richesse  $r$  - taux de compression  $\epsilon$ , soit  $(r, \epsilon)$ .

#### b) Limites

En allumage commandé, les taux de compression extrêmes sont 5 et 10 ; nous avons fait varier ces taux d'unité en unité. A un taux de compression donné et dans des conditions déterminées de fonctionnement du moteur, on fait croître progressivement la richesse du mélange puis on calcule les richesses minimale et maximale entre lesquelles on assiste à une combustion normale ; le lieu géométrique de ces points constitue la limite d'inflammabilité. Le résultat est confirmé à l'aide d'oscillogrammes réalisés à l'intérieur du domaine ainsi défini.

Pour certains taux de compression et compte tenu du carburant utilisé, on observe des combustions avec cliquetis ; les critères d'identification de ce dernier ayant été précisés antérieurement (par. II), on détermine les limites de cliquetis\*, comme précédemment dans le même repère ( $r, \epsilon$ ). Une confirmation supplémentaire de l'existence d'un domaine d'autoinflammation nous est fournie par le fait que le moteur peut continuer de fonctionner, même après coupure de l'allumage.

#### c) Conditions expérimentales

La charge et l'avance à l'allumage ont été maintenues constantes, soit respectivement  $15^\circ$  et  $25^\circ$ . Dans ces conditions, la vitesse de rotation optimale compatible avec un régime de fonctionnement régulier et stable du moteur est de  $900 \pm 50 \text{ tr.min}^{-1}$ .

#### d) Précision des résultats

Les limites ont été obtenues avec le moteur continuant à fonctionner à une vitesse réduite mais constante. Cette condition est indispensable ; en effet, la richesse du mélange ne peut être calculée qu'en régime stable. De plus, ces limites sont sensibles au paramètre vitesse de rotation ; il est donc nécessaire de préciser celle-ci.

Pour fixer quantitativement la précision de ces mesures, nous avons provoqué l'arrêt pour différents points de fonctionnement moteur. Comme il n'est pas possible de faire varier le taux de compression à richesse constante, l'incertitude des mesures se réduira à un segment d'incertitude parallèle à "l'axe" des richesses. En raisonnant sur les seules limites d'inflammabilité, l'arrêt du moteur serait obtenu :

---

\* ces limites de cliquetis seront aussi appelées limites d'autoinflammation pour rappeler le phénomène de combustion qui est à l'origine du cliquetis

- du côté des mélanges riches, en ajoutant + 0,05 unité de richesse

- du côté des mélanges pauvres, en retranchant + 0,05 unité de richesse.

4) Déplacement du minimum du domaine de cliquetis en fonction du pourcentage d'isooctane dans le mélange n-heptane - isooctane

A un taux de compression donné, nous avons d'abord recherché les conditions permettant d'obtenir un cliquetis maximal (vitesse de rotation et couple). Gardant ces paramètres constants, on détermine ensuite, à ce taux, les richesses extrêmes entre lesquelles on observe le cliquetis. Si ce dernier se produit effectivement, on règle à un taux immédiatement inférieur et on recommence l'essai jusqu'à disparition de la combustion anormale. On "encadre" ainsi le minimum du domaine d'autoinflammation entre deux valeurs du taux de compression.

III) Les carburants utilisés

Le caractère polycarburant du banc permet une alimentation par un grand nombre de combustibles différents suivant la version d'allumage. Certains carburants, comme le kérosène, peuvent même être utilisés en allumage commandé ou par compression.

Trois carburants ont été utilisés : le kérosène, l'essence ordinaire et le supercarburant ; trois raisons nous ont guidés dans ce choix, outre leur intérêt sur le marché actuel :

- leur résistance au cliquetis est très différente: le kérosène offre une faible résistance tandis que celle de l'essence et surtout du super est nettement plus élevée. Comme la vitesse de propagation de la flamme est peu différente d'un hydrocarbure à l'autre, on pourra apprécier l'importance du délai d'autoinflammation de chacun de

ces trois combustibles ainsi que les facteurs susceptibles de le modifier.

- L'énergie de combustion de ces trois combustibles ramenée à l'unité de masse (pouvoir calorifique) varie peu d'un hydrocarbure à l'autre comme le montre le tableau suivant :

Produit	Pouvoir calorifique supérieur k J.kg <sup>-1</sup>	Pouvoir calorifique inférieur k J.kg <sup>-1</sup>
Essence ordinaire	46 398	43 472
Supercarburant	45 562	42 636
Kérosène	45 771	43 054

Ce ne sont donc pas les faibles variations du pouvoir calorifique qui, en modifiant la pression moyenne dans la chambre, pourraient influencer le comportement du carburant vis à vis du cliquetis.

- Entre l'essence ordinaire et le supercarburant, les différences essentielles résident dans la nature des hydrocarbures, leur pourcentage respectif et le taux d'additifs.

Avec leur spécificité, ces trois carburants ont été employés dans le même moteur TD 43. Néanmoins, du fait de leurs propriétés physicochimiques différentes, il n'a pas été toujours possible de les utiliser avec certains régimes de fonctionnement du moteur. Parmi les caractéristiques des carburants qui ont restreint notre étude, citons l'aptitude à la formation d'un mélange correctement vaporisé et dosé ainsi que les effets de la vaporisation endothermique.

## C) RÉSULTATS

### I) Origine de l'autoinflammation dans les moteurs à allumage commandé

Dans les moteurs modernes, avec les carburants utilisés, la température des gaz non brûlés est supérieure à la température d'autoinflammation de la plupart des hydrocarbures\* ; se superposant au front de flamme normal, un nouveau front de flamme se crée : il provoque une augmentation locale importante de la pression accompagnée de vibrations de grande amplitude de la masse gazeuse, à l'origine du cliquetis.

### II) Différentiation de la combustion normale et du cliquetis ; influence de l'avance à l'allumage

Nous baserons essentiellement cette étude sur l'examen des oscillogrammes en coordonnées angle de rotation - pression totale P dans la chambre de combustion, soit ( $\alpha$ , P) ; pour mieux visualiser le phénomène de cliquetis, nous avons choisi comme carburant le kérosène qui y présente une faible résistance (première série d'oscillogrammes).

#### 1) Distinction entre combustion normale et cliquetis

Les états associés à 1-2 permettent la comparaison du comportement de deux carburants différents, avec le même moteur, fonctionnant en allumage commandé et dans les mêmes conditions expérimentales :

- le kérosène seul peut fonctionner sans étincelle
- dans les conditions indiquées, la combustion s'effectue avec cliquetis pour le kérosène seulement
- l'examen comparé des deux oscillogrammes met en relief :

. une combustion progressive avec le supercarburant:1

---

\* environ 235°C pour le n-heptane et environ 580°C pour le méthane en mélanges stoechiométriques avec l'air

. une longue phase de combustion où la pression croît progressivement suivie d'une augmentation très rapide de celle-ci ; des fluctuations de pression sont observables en 2 pendant la détente (zone dendritique)

. l'ordre de grandeur des pressions maximales obtenues est sensiblement le même, soit 50 bars.

Avec le kérosène, le moteur à allumage commandé peut fonctionner en auto-allumage ; dans les mêmes conditions expérimentales, il s'arrête de fonctionner en quelques secondes avec de l'essence ordinaire et quasi instantanément avec du supercarburant. Or, la résistance au cliquetis croît dans l'ordre : kérosène, essence ordinaire, supercarburant.

## 2) Examen des oscillogrammes 2-3-4

Dans les mêmes conditions :

- en 3, en l'absence d'étincelle comme en 2, le cliquetis n'apparaît plus et la pression maximale est nettement plus faible (21 bars)

- en 4, avec étincelle, le cliquetis n'apparaît pas

Sans allumage, on observe tantôt l'état 2, tantôt l'état 3, de manière aléatoire. La présence d'une étincelle, avec le kérosène comme carburant, ne privilégie aucune des deux formes de combustion.

## 3) Examen des oscillogrammes 4-5-6-7 : influence sur le cliquetis de l'avance à l'allumage

La forme du diagramme est tributaire de l'avance à l'allumage ; la tendance au cliquetis augmente avec l'avance à l'allumage. De plus, en 5, on peut observer un phénomène de dispersion cyclique\* à une richesse trop

---

\* dispersion cyclique : il s'agit d'une dispersion importante des courbes de pression ; ce phénomène est en grande partie imputable aux mouvements désordonnés des gaz dans le cylindre du moteur

élevé.

III) Limites d'inflammabilité et de cliquetis ; examen des domaines délimités (fig.3)

1) Limites d'inflammabilité

a) Pour le kérosène

Cette limite varie peu avec la richesse vers les mélanges pauvres : pour un taux de compression variant de 5 à 10, elles sont comprises entre 0,6 et 0,7 ; le régime stable du moteur, d'ailleurs difficile à maintenir, est très sensible à toute variation de la richesse. A l'extérieur de cette limite, vers des richesses plus faibles, le moteur s'arrête de fonctionner : l'énergie dégagée par l'étincelle ne peut pas enflammer le mélange. Pour des richesses supérieures, le mélange est inflammable et la flamme se propage.

Du côté des richesses plus élevées, nous n'avons pu obtenir les limites en conservant les conditions initiales et avec le carburateur utilisé : la viscosité du kérosène, par rapport aux essences, est telle que c'est ce paramètre qui limite l'arrivée des gaz frais et provoque donc l'arrêt du moteur et non l'augmentation de richesse. Qu'il s'agisse de l'établissement des limites d'inflammabilité ou de celles de cliquetis, c'est cette contrainte qui a limité l'obtention du diagramme complet ; il n'est donc pas étonnant de retrouver parmi l'ensemble des caractéristiques d'un combustible, le critère de viscosité suivant les conditions d'utilisation et notamment la température.

b) Pour l'essence ordinaire

Cette limite varie peu avec la richesse du côté des mélanges pauvres ; elle présente un minimum extrapolé pour une richesse comprise entre 1,2 et 1,3. Du côté des mélanges riches, la pente  $dc/dr$  est plus faible. A l'extérieur de cette limite, le moteur ne fonctionne plus.



c) Pour le supercarburant

Dans les mêmes conditions expérimentales, les limites d'inflammabilité du supercarburant s'identifient pratiquement avec celles de l'essence ordinaire. Nous avons pu d'ailleurs le vérifier dans d'autres conditions:

- même avance à l'allumage ( $25^\circ$ ) mais charges différentes allant de 25% à 40%

- à charge identique, soit 15% mais avec des avances à l'allumage différentes :  $10^\circ$  et  $20^\circ$ .

## 2) Limites de cliquetis

Qu'il s'agisse de l'essence ordinaire ou de l'essence super, ces limites :

- se situent à l'intérieur du domaine d'inflammabilité
- sont comprises entre 0,7 et 1,7 pour la richesse
- présentent un minimum au voisinage du stoechiométrique ( $r = 1$ ).

Le domaine d'autoinflammation (ou domaine d'apparition du cliquetis) présente une aire plus grande pour l'essence ordinaire que pour le supercarburant. Dans les limites autorisées et au voisinage du stoechiométrique, l'accroissement du taux de compression fait apparaître le cliquetis d'abord avec l'essence ordinaire puis le supercarburant. Le minimum se déplace vers des richesses plus faibles quand on utilise l'essence ordinaire puis le supercarburant.

A l'intérieur de ces limites de cliquetis, le moteur peut fonctionner ou plutôt continuer à fonctionner si on supprime l'étincelle électrique : l'apport d'énergie initiale n'est donc plus indispensable pour enflammer les gaz frais fortement comprimés. La durée de fonctionnement, sous un tel régime, est d'autant plus longue que la résistance au cliquetis du carburant est plus faible ; c'est ainsi

qu'avec les conditions initiales et un taux de compression de 10, l'arrêt du moteur, après coupure de l'allumage, s'est produit après :

- 3s avec le supercarburant
- 20s avec l'essence ordinaire
- 1min avec le kérosène

pour une richesse voisine du stoechiométrique.

A l'intérieur des limites d'inflammabilité et à l'extérieur des limites de cliquetis

- du côté des faibles richesses et pour des taux de compression compris entre 8 et 10, il peut y avoir arrêt du moteur avant la disparition du cliquetis, surtout pour le super avec ou sans étincelle ; la proximité des limites d'inflammabilité et le cliquetis en est la cause

- du côté des richesses plus élevées et toujours à un taux de compression donné, deux cas peuvent se présenter à partir d'un régime de cliquetis :

. si le moteur fonctionne dans des conditions d'autoallumage et que l'on augmente la richesse, il y a arrêt du moteur pour les trois carburants,

. s'il y avait allumage par étincelle, le fonctionnement du moteur devient normal.

### 3) Examen des oscillogrammes obtenus dans les différents domaines (deuxième série d'oscillogrammes)

Nous avons effectué des oscillogrammes dans les domaines délimités avec de l'essence ordinaire et une avance à l'allumage fixe.

→ entre la limite d'inflammabilité et la limite de cliquetis: **A**

- au voisinage du stoechiométrique et correspondant à une richesse de 1,1 à 1,2, richesse voisine des conditions

de fonctionnement du parc automobile (oscillogrammes I et II).

- pour des mélanges riches (oscillogrammes III et IV).

+ dans le domaine de cliquetis : B (oscillogrammes V et VI).

Les oscillogrammes I—III—V sont relatifs aux paramètres angle de rotation—pression, tandis que II—IV—VI utilisent les paramètres volume - pression.

#### Zone A

I—II c'est une zone de combustion normale ; l'examen du diagramme (V, P) montre que la compression du mélange est pratiquement isochore, ce qui correspond à l'aire maximale du diagramme pour une valeur donnée de l'énergie libérée par combustion. De plus les phases d'admission et d'échappement sont pratiquement isobares donc sans perte de charge.

III—IV c'est une zone où on n'observe pas de cliquetis mais où l'effet conjugué du taux de compression et surtout de la richesse provoque une dispersion cyclique importante. L'examen du diagramme (V, P) montre qu'une partie de la chaleur de combustion est perdue, diminuant ainsi le rendement.

#### Zone B

V—VI c'est une zone de cliquetis où on trouve de manière aléatoire des phases de cliquetis et de fonctionnement normal ; on peut d'ailleurs comparer ces résultats obtenus avec de l'essence ordinaire aux oscillogrammes 2 et 6 de la première série, relatifs au kérosène.

#### IV) Influence des facteurs mécaniques sur les limites obtenues

##### 1) Influence de l'avance à l'allumage

###### a) Sur les limites d'inflammabilité

Dans les limites de fonctionnement du moteur (avance comprise entre 0° et 40°), la modification de

l'avance ne joue pas sur la limite commune d'inflammabilité de l'essence ordinaire et de l'essence super ; nous l'avons vérifié pour 6 richesses différentes (0,7 ; 0,9 ; 1,0 ; 1,2 ; 1,6 ; 2,0).

b) Sur les limites de cliquetis

Le taux de compression a été fixé à 10 pour obtenir le maximum de cliquetis lorsqu'on utilise l'essence ordinaire. Nous avons fait varier l'avance jusqu'au point mort haut (P.M.H. avance nulle), à 3 richesses différentes et à proximité du stoechiométrique :

- richesse 0,9

Avance Allumage (°)	Cliquetis
20	+
15	+
10	+
-----	
5	0
0	0

- avec des richesses  $r = 1$  et  $r = 1,2$  nous avons obtenu une disparition du cliquetis pour une même avance, comprise entre 10° et 5°.

En diminuant l'avance, les limites de cliquetis sont relevées et on assiste à une disparition du phénomène. Il semblerait donc intéressant de réduire cette avance, mais on assiste alors à une diminution du rendement et de la puissance effective recueillie au vilebrequin.

Exemples	AA(°)	rendement (%)
	20	26 (rendement optimal)
	0	10

Une diminution de l'avance à l'allumage :

- réduit le cliquetis,
- diminue le rendement.

Ce relèvement des limites de cliquetis confirme les résultats obtenus lors de l'examen des oscillogrammes  $P_{(\alpha)}$  dont la forme dépend de l'avance. Le réglage de celle-ci est un paramètre important en ce qui concerne la suppression du cliquetis ; au cours de cette opération, il est nécessaire de tenir compte des différents régimes de fonctionnement susceptibles d'intervenir.

## 2) Influence de la vitesse de rotation et de la charge sur les limites

L'obtention d'un régime de fonctionnement régulier nécessite un compromis entre la vitesse de rotation et la charge ; il a été impossible de dissocier ces deux facteurs, surtout au niveau de la détermination des limites d'inflammabilité.

Les conditions expérimentales au cours des différents essais ont été les suivantes :

- carburant : essence super
- taux de compression : 8 - 9 - 10
- avance à l'allumage : 25°

Nous donnons les valeurs des richesses maximales et minimales aux limites.

### a) Sur les limites d'inflammabilité

Résultats :

- taux de compression 10 et charge 15%
  - . 900 tr|min : 0,65 < richesse < 2,40
  - . 1200 tr|min : 0,77 < richesse < 2,10
- taux de compression 10 et charge 75%

- taux de compression 10 et charge 75%
  - . 900 tr/min :  $0,77 < \text{richesse} < 2,2$
- taux de compression 7 et charge 15%
  - . 900 tr/min :  $0,68 < \text{richesse} < 2,00$
  - . 1250 tr/min :  $0,80 < \text{richesse} < 1,95$

L'augmentation de la charge et de la vitesse de rotation relève les limites d'inflammabilité du diagramme établi à 900 tr/min ; avec une charge de 15% la limite du côté des fortes richesses est la plus affectée ; la charge et la vitesse de rotation agissent dans le même sens. Du côté des faibles richesses, il faut admettre plus de carburant pour que la vitesse du moteur croisse ; c'est l'inverse du côté des plus fortes richesses.

b) Sur les limites de cliquetis (fig.4)

Dans les conditions d'établissement du diagramme le cliquetis apparaît à un taux de compression de 9 avec le supercarburant. Avec la même charge, il disparaît à 1200 tr/min, ce résultat a été confirmé à 1500, 1800 et 2000 tr/min, en augmentant la charge, le cliquetis disparaît.

Le tableau suivant où le taux a été maintenu à 10 et la charge à 15% reflète l'évolution du domaine de cliquetis.

nb de tours/min	richesse minimale $r_m$	richesse maximale $r_M$	différence $\Delta r = r_M - r_m$	présence du cliquetis
1500	1,07	1,27	0,20	+
1250	0,92	1,60	0,68	+
1000	0,80	1,62	0,79	+
900	0,70	1,67	1,07	+

En conclusion :

- les limites de cliquetis sont relevées lorsque la vitesse de rotation du moteur augmente ; corrélativement,

le domaine d'existence du cliquetis se réduit :

- à taux de compression donné, l'importance du cliquetis diminue avec la vitesse de rotation
- le maximum de vitesse de rotation à charge donnée correspond à une richesse de 1,2
- le minimum de la zone de cliquetis se déplace vers les plus grandes richesses quand la vitesse de rotation augmente.

V) Déplacement des limites de cliquetis pour différents pourcentages en iso-octane dans le mélange n-heptane-iso-octane

L'examen des courbes montre que :

- les limites de cliquetis sont relevées quand le pourcentage en iso-octane augmente (fig.5)
- le lieu de ces minimums croît avec le pourcentage d'iso-octane (fig.6). Dans ces conditions expérimentales, cette courbe constitue une relation\* entre le pourcentage d'iso-octane et le taux de compression minimum provoquant l'apparition du cliquetis. Il est donc possible d'utiliser cette bijection pour traduire, dans les mêmes conditions, l'apparition du phénomène de cliquetis : c'est ce qu'on appelle l'indice d'octane d'un carburant dont l'étude sera abordée dans la deuxième partie. C'est ainsi que pour l'essence ordinaire, cet indice est de 93,8 et, pour le supercarburant, il est compris\*\* entre 97,5 et 100.

VI) Variation du couple moteur et de la pression maximale en fonction de la richesse à taux de compression constant

L'examen des figures 7 et 8 montre l'existence d'un maximum au voisinage du stoechiométrique ; l'allure

---

\* dans d'autres conditions, la relation sera autre et donc l'indice différent.

\*\* dans le deuxième cas, le moteur cliquette à un taux de compression de 9 mais non à 8,5, d'où les indices extrêmes.

dissymétrique des courbes vers les mélanges riches et les mélanges pauvres est confirmée par la troisième série d'oscillogrammes :  $P_1$ ,  $P_2$  d'une part,  $P_3$ ,  $P_4$ ,  $P_5$  et  $P_6$  d'autre part.

Du côté des faibles richesses, la proximité du domaine de cliquetis et les limites pratiquement parallèles à l'axe des taux de compression peuvent traduire les comportements observés. Vers les mélanges riches, l'élévation de pression constatée avant l'inflammation normale pourrait être liée à l'existence d'une flamme froide ; ce phénomène s'accroît lorsque la richesse augmente.

VII) Evolution de la température des gaz d'échappement en fonction de la richesse à taux de compression constant

Dans les conditions d'essais suivantes :

- essence ordinaire
- pleine charge
- taux de compression 10
- vitesse de rotation  $900 \pm 50$  tr/min.

L'examen du tableau ci-dessous montre :

richesse	température des gaz d'échappement en °C
0,77	490
0,79	500
0,88	515
1,12	475
1,26	445
1,43	440
1,66	410
1,76	405
2,08	400

que la température des gaz d'échappement décroît de part et d'autre du stoechiométrique.



## D) DISCUSSION ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

L'appareillage utilisé n'a pas permis de prendre en compte l'ensemble des paramètres influençant le cliquetis\*. Nous allons interpréter l'action des différents facteurs étudiés sur ce type de combustion anormale en analysant leurs effets sur les limites et les différents domaines qu'elles déterminent.

### I) Relation entre les facteurs étudiés et le cliquetis

#### 1) Au niveau des limites d'inflammabilité

L'avance à l'allumage et la nature du carburant n'interviennent pas : les limites d'inflammabilité de l'essence ordinaire et du supercarburant se superposent. De plus, comme le taux d'additifs peut varier d'un carburant à l'autre, l'action de ceux-ci se limiterait au niveau des seules limites de cliquetis ; nous n'avons pu le vérifier faute de carburant non dopé en quantité suffisante. La position des limites d'inflammabilité est tributaire de la charge et de la vitesse de rotation et donc de la vitesse de combustion normale (parag. A).

#### 2) Domaine compris entre les limites d'inflammabilité et de cliquetis (A)

C'est dans ce domaine que s'avèrent réunies les meilleures conditions propres à favoriser une combustion normale. De l'examen des oscillogrammes  $P = f(V)$ , II et IV, il est aisé de constater que le travail susceptible d'être recueilli sur l'arbre sera plus important en II qu'en cas IV. Effectivement, les courbes traduisant la relation entre la pression moyenne<sup>\*\*</sup> et la richesse présentent

---

\* il s'agit essentiellement de la température et de la pression d'admission des gaz frais, des dépôts et de la forme de la chambre de combustion .

\*\* pression moyenne : entre le couple C, la vitesse de rotation N et la puissance existe la relation :  $P = C.N$  ; ramenée au litre du cylindrée :  $P/V = C/V.N$  où le rapport C/V qui a les dimensions d'une pression est appelée pression moyenne.

un maximum correspondant à une richesse comprise entre 1,1 et 1,2. C'est donc, dans cette zone A, et au voisinage du stoechiométrique, que l'on favorisera les combustions normales les plus énergétiques. Ces résultats viennent donc confirmer les travaux antérieurs (10) (11) en ce qui concerne le choix d'une richesse appropriée.

### 3) Au niveau des limites de cliquetis

#### a) Effet de l'avance à l'allumage sur le cliquetis

Dans les limites d'un fonctionnement normal du moteur, la pression maximale, au P.M.H. est d'autant plus élevée que l'allumage se produit plus tôt. Cette augmentation de pression, jointe à celle provoquée par le mouvement du piston risque donc d'autant plus de porter le mélange dans des conditions d'autoinflammation. L'avance à l'allumage joue donc un rôle important sur l'apparition du cliquetis.

Deux cas peuvent se présenter :

- le régime de cliquetis est atteint avant que le piston soit parvenu au point mort haut, c'est-à-dire pendant la compression ; on assiste alors aux manifestations signalées antérieurement
- le piston franchit le P.M.H. avant que n'apparaisse le cliquetis ; il se produit alors une augmentation du volume assez rapide pour que, la température des gaz n'étant pas encore trop élevée, la combustion se continue par tranches de gaz frais avant que la masse totale ne s'autoenflamme : on n'observe pas alors de combustion anormale.

#### b) Effet de la vitesse de rotation (et de la charge) sur le cliquetis

A un taux de compression donné, l'augmentation de la vitesse de rotation relève les limites de cliquetis. Or, la vitesse de rotation est sensiblement proportionnelle à la vitesse de combustion normale : l'accroissement de celle-ci diminue donc les risques de cliquetis.

### 4) Domaine de cliquetis

Comme nous l'avons signalé précédemment, (CII,1, oscillogramme 2), l'auto-inflammation se traduit par une

augmentation quasi-instantanée de la pression : l'explosion a lieu "en bloc" dans le seul volume des gaz frais résiduels. Son intensité est variable car elle dépend de la fraction des gaz frais qui s'autoenflamment (nous l'avons observé pour des valeurs comprises entre 50 et 60 bars). Par suite de la différence de pression avec le reste de la chambre, il se produit en un point donné de celle-ci, des fluctuations de pression d'amplitude décroissante (zone dendritique observée). De nombreuses études (12) ont montré que la fréquence des oscillations varie avec la dimension et la géométrie de la chambre ; ces oscillations peuvent exciter en vibration forcée la structure du moteur ; si on y ajoute les transferts thermiques intenses au niveau des parois de la chambre (13) (14), il s'établit donc pendant cette phase de combustion anormale des contraintes préjudiciables au rendement et à la longévité du moteur thermique.

## II) Interprétation du diagramme taux de compression-riche (fig.3)

Nous allons interpréter qualitativement le positionnement du domaine de cliquetis vers les taux de compression élevés et plutôt du côté des mélanges pauvres.

Nous avons déjà abondamment discuté des effets de l'augmentation du taux de compression sur les gaz frais résiduels ; nous ne les reprendrons donc pas ici.

L'examen du tableau du paragraphe C VII montre que la température des gaz d'échappement dépend de la richesse et notamment vers les mélanges riches. Or, on peut supposer en première approximation que l'écart de température est sensiblement le même depuis la fin de compression (et l'explosion) et la "lecture" faite au niveau des gaz d'échappement. Il en résulte que la température atteinte juste avant l'explosion décroît de part et d'autre du stoechiométrique. Par conséquent, les mélanges s'autoenflamment plus difficilement

vers les mélanges pauvres et surtout riches. La confirmation en est donnée par le relèvement des limites de cliquetis de part et d'autre du stoechiométrique et notamment l'absence de cliquetis du côté des mélanges riches.

Une modification notable du dosage correct du mélange carburé (ou trop riche ou trop pauvre) entraîne une augmentation de la température d'auto-inflammation de ce mélange et le rend alors plus difficile à s'autoenflammer : la résistance au cliquetis augmente, c'est ce que l'on observe à l'intérieur du domaine d'inflammabilité et de part et d'autre du domaine d'auto-inflammation où les limites de cliquetis se relèvent du côté des mélanges riches comme vers les mélanges pauvres. Avec les conditions imposées au moteur, l'examen de la figure 3 montre, par exemple, que le cliquetis disparaît au-delà d'une richesse supérieure à 1,7 pour un taux de compression de 10. Corrélativement, l'existence d'un (seul) minimum pour des richesses voisines du stoechiométrique montre que les températures d'auto-inflammation les plus basses correspondent à des richesses voisines de 1 (en fait légèrement supérieures à 1). Néanmoins, l'utilisation de mélanges trop riches ou trop pauvres provoque une diminution de puissance ou de couple (fig.7 et deuxième série d'oscillogrammes III et IV) et introduit les inconvénients inhérents à l'emploi de dosages défectueux.

Mais l'aspect thermodynamique ne doit pas faire oublier que la vitesse de combustion normale est d'autant plus grande que la température d'inflammation est plus basse ; or, dans les limites d'une déflagration, une augmentation de la vitesse de combustion tend à réduire le cliquetis. Il faut donc tenir compte des facteurs thermodynamiques et cinétiques pour tenter d'expliquer le positionnement des limites de cliquetis, en particulier, entre la vitesse de combustion normale (front de flamme) et celle qui conduit à l'auto-inflammation des gaz frais, la première l'emporte

vers les mélanges riches, y réduisant davantage le cliquetis.

### III) Conclusion

La réduction du cliquetis peut être provoquée par tout facteur qui augmente la vitesse de déflagration laminaire ou (et) qui réduit la vitesse de la réaction conduisant à l'auto-inflammation. Les additifs usuels, comme le plomb tétraéthyle ou tétraméthyle, utilisés pour augmenter la résistance au cliquetis sont sans action sur la vitesse de déflagration laminaire (10) ; il en résulte que les additifs ne peuvent qu'influencer la vitesse de la réaction conduisant à l'auto-inflammation des gaz frais.

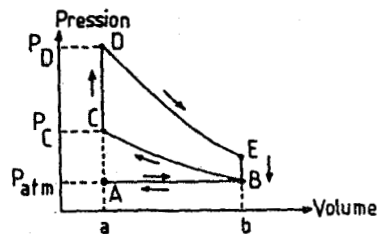
### E) CONCLUSION DE LA PREMIÈRE PARTIE

L'étude de la forme des diagrammes angle de rotation-pression permet d'observer les différentes phases de combustion dans un moteur ; les diagrammes volume-pression contribuent à la détermination des performances énergétiques. L'établissement des limites d'inflammabilité et de cliquetis, dans des conditions expérimentales données, détermine des zones de combustion normale et anormale dans le repère richesse  $r$ -taux de compression  $\epsilon$ . De la déformation du diagramme par déplacement de ces limites, il est possible d'apprécier le degré d'influence des facteurs mécaniques et chimiques sur le cliquetis ; des oscillogrammes viennent confirmer ces résultats.

Les résultats obtenus pour les "indices" de l'essence ordinaire et du supercarburant à partir de mélanges d'isooctane et de  $n$ -heptane sont compatibles avec les indices "normalisés". La possibilité de traduire le comportement du carburant vis-à-vis du cliquetis, revient donc, dans ce cas, à relier le taux de compression minimum provoquant l'apparition du cliquetis au pourcentage d'isooctane. C'est une méthode semblable que nous utiliserons pour estimer l'aptitude d'un carburant à résister au cliquetis : elle sera basée sur une autre manifestation de la combustion : la flamme froide.

Annexe thermodynamique : rendement théorique du cycle de Beau de Rochas

1) Cycle théorique



2) Rendement théorique du cycle de Beau de Rochas

hypothèse

Nous assimilerons la transformation B C D E à celle d'un gaz parfait, de masse constante (soupapes fermées); on supposera de plus que les chaleurs spécifiques  $c_p$  à pression constante et  $c_v$  à volume constant ne sont pas modifiées au cours du cycle.

calculs

. Posons  $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$  et  $\epsilon = \frac{b}{a}$  où  $\epsilon$  est le rapport volumétrique de compression.

. Soit  $T_A$  la température en A et B (température extérieure) et  $T_u$  la température de chaleur cédée par unité de masse au fluide au cours de l'explosion.

. Le travail indiqué  $W_i$  est représenté par la différence des aires aDEb et aABb ; il est équivalent à la différence des quantités de chaleur que le gaz parfait reçoit de C en D et cède de E en B.

Rapporté à l'unité de masse, il vaut donc :

$$W_i = C_v [(T_D - T_C) - (T_E - T_A)]$$

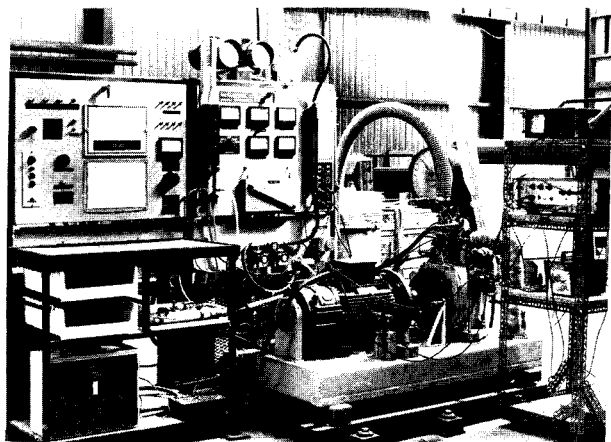
D'où le rendement théorique :

$$\eta_{th} = \frac{W_i}{Q_u} = 1 - \frac{T_E - T_A}{T_D - T_C}$$

$$\text{Comme } \frac{T_D}{T_E} = \frac{T_C}{T_A} = \frac{T_D - T_C}{T_E - T_A} = \epsilon^{\gamma-1}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\epsilon^{\gamma-1}}$$

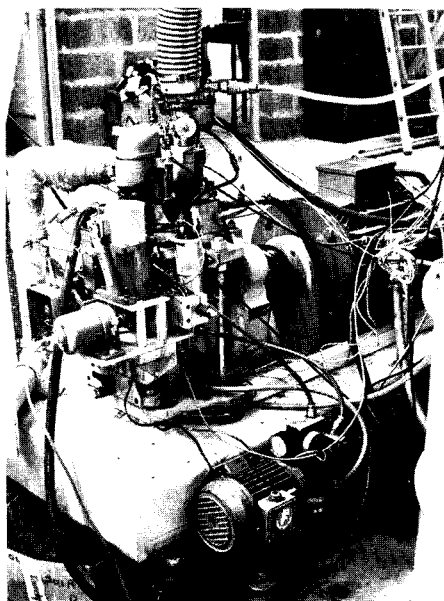
Ce rendement est donc indépendant de la température et , de la pression initiales. Il augmente rapidement avec le rapport de compression volumique.



1 Vue d'ensemble du banc d'essai.



3 La centrale d'analyse des gaz.



2 Le moteur.



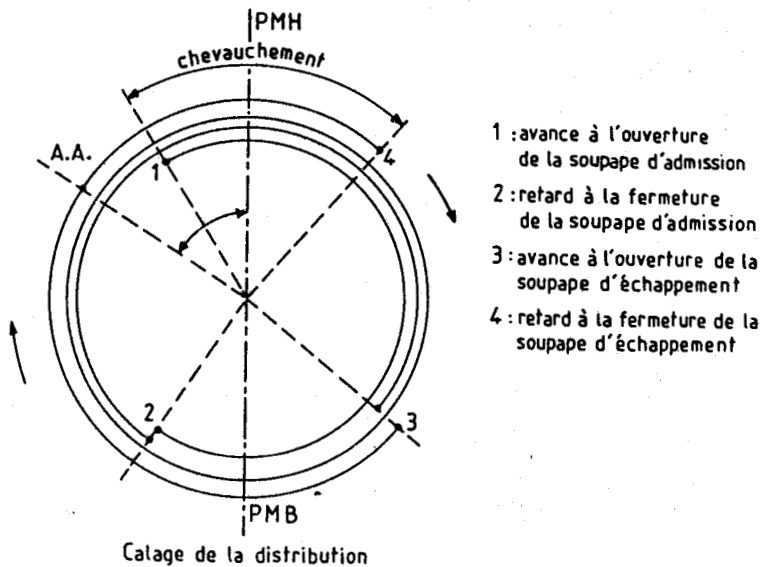
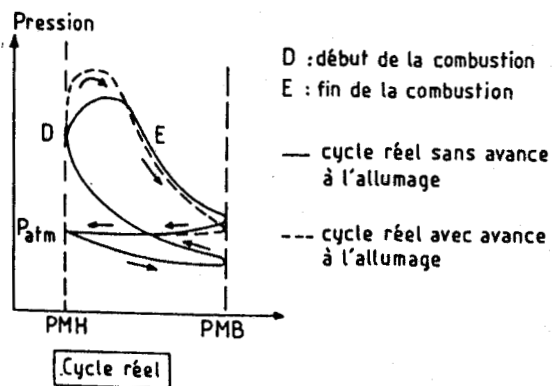
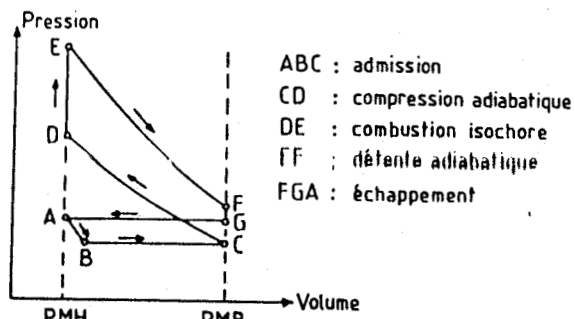


Fig.1a - 1b

Fig.2

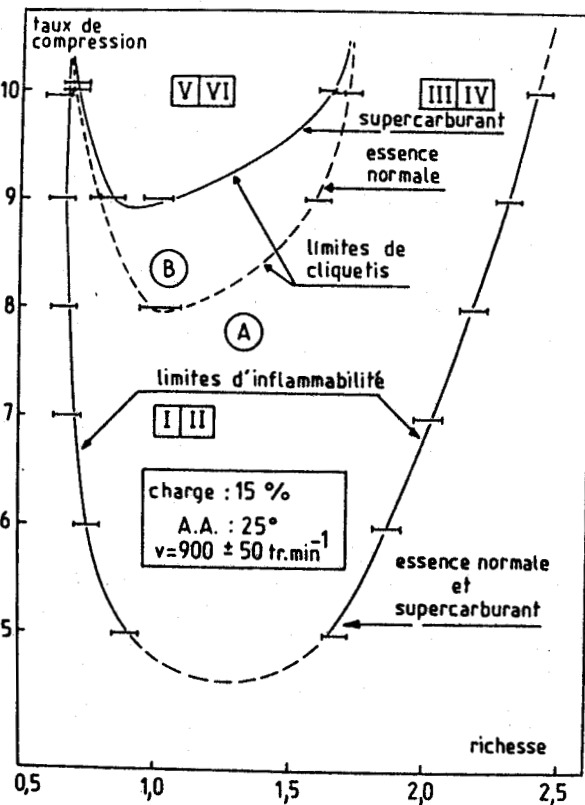


Fig.3

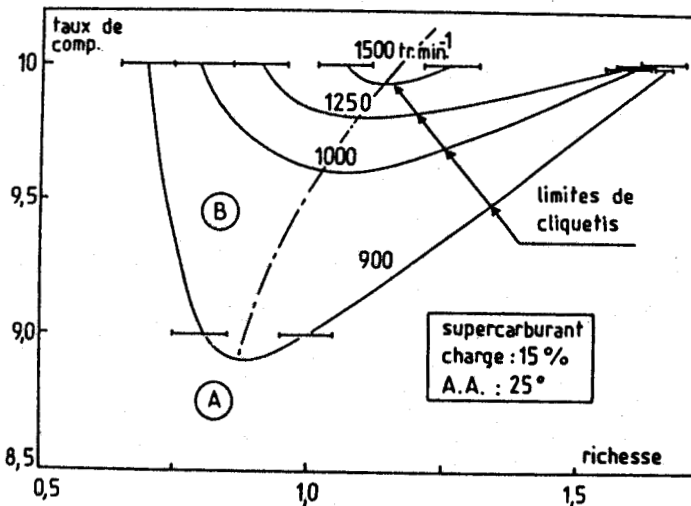


Fig.4

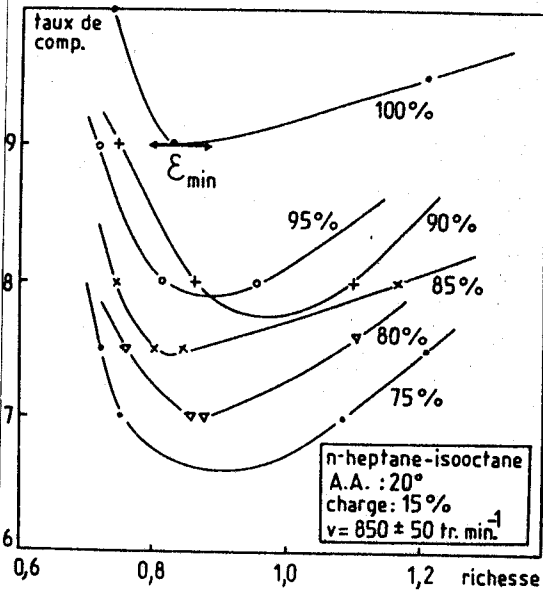


Fig. 5

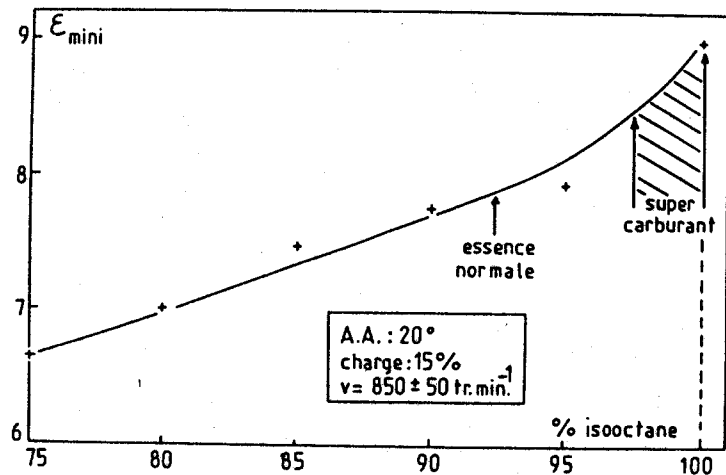


Fig. 6

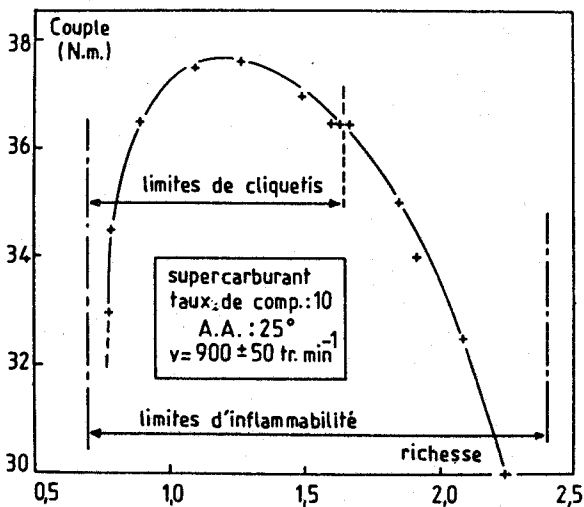


Fig. 7

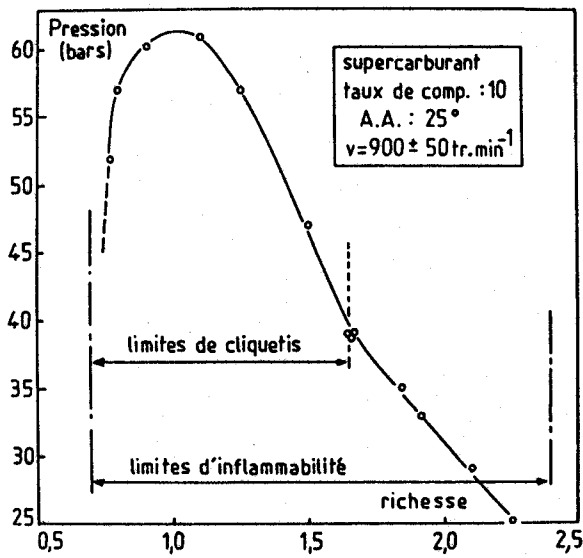
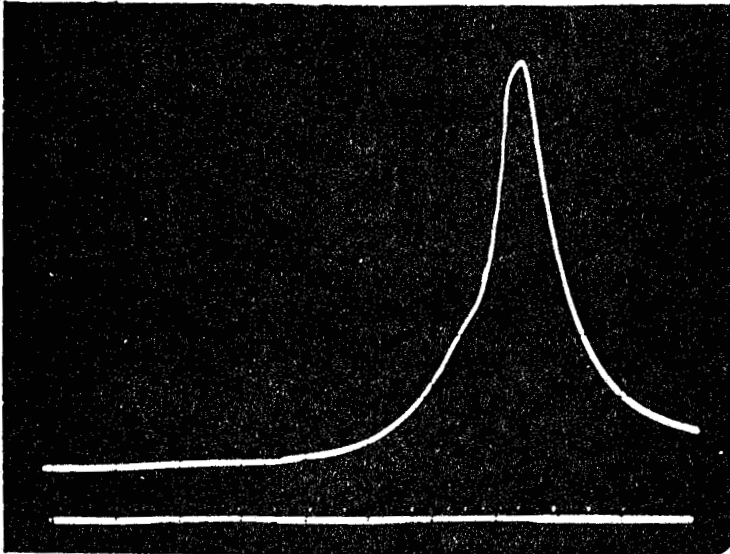


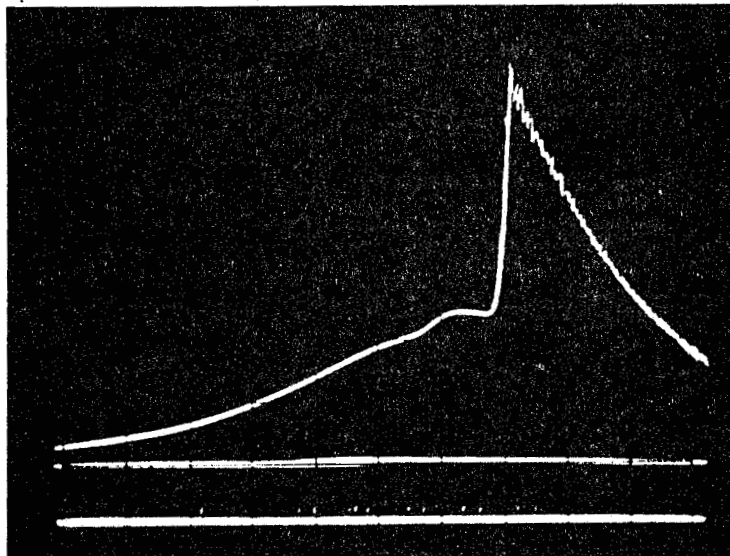
Fig. 8

1 ère série d'oscillogrammes

- super carburant
- allumage commandé
- avec étincelle
- avance 10°
- taux de compression 10
- 1200 tr/min
- richesse 1,29

$$P_M = 49 \text{ bars}$$

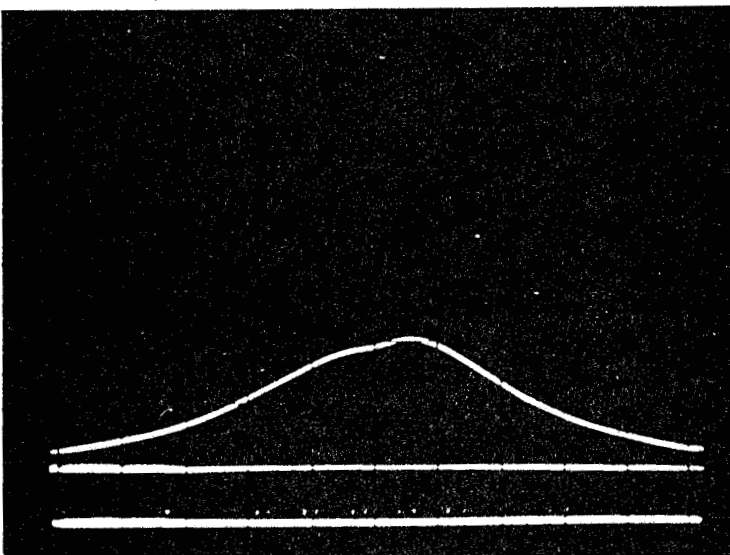
1



- kérosène
- allumage commandé
- sans étincelle
- avance 10°
- taux de compression 10
- 1200 tr/min
- richesse 1,32

$$P_M = 53 \text{ bars}$$

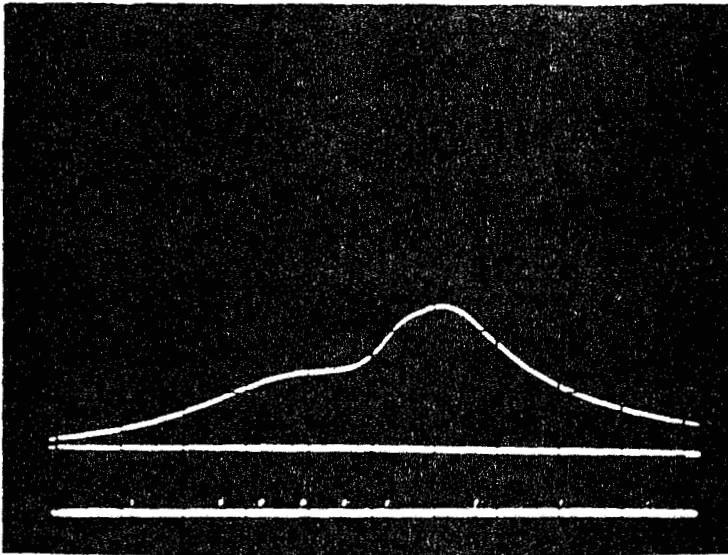
2



- kérosène
- allumage commandé
- sans étincelle
- avance 10°
- taux de compression 10
- 1200 tr/min
- richesse 1,30

$$P_M = 21 \text{ bars}$$

3

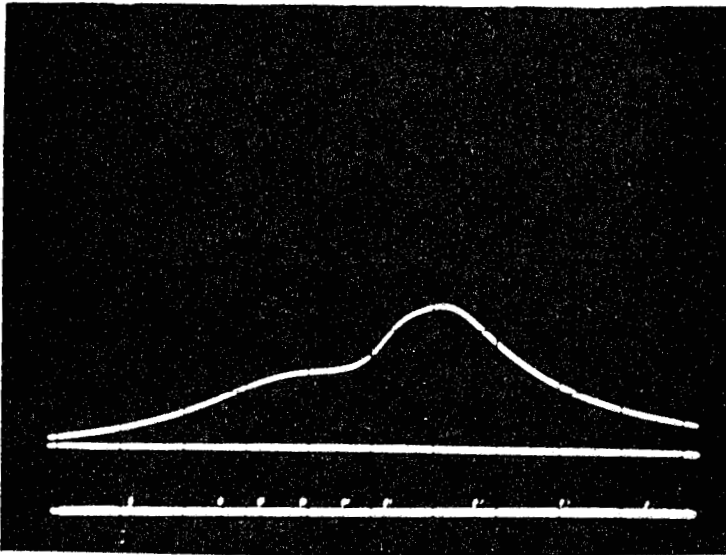
1 ère série d'oscillogrammes (suite)

- kérosène
- allumage commandé
- avec étincelle
- avance 10°
- taux de compression 10
- 1200 tr/min
- richesse 1,23

$P_M = 24$  bars

4

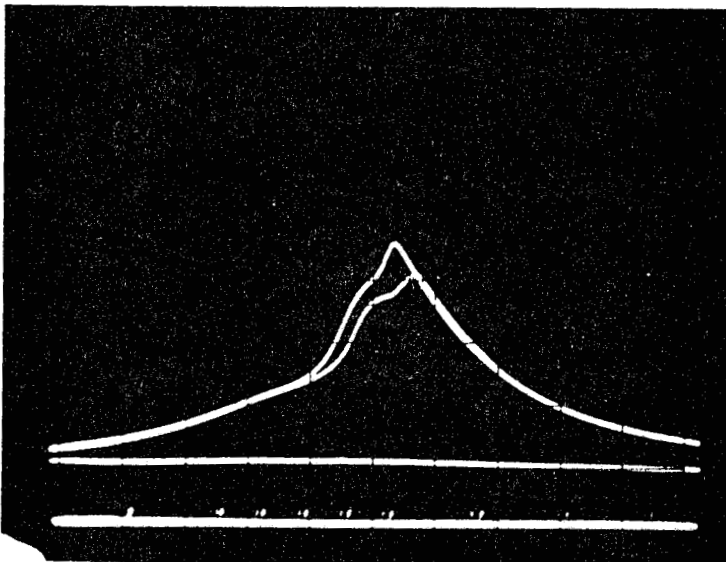
## 1 ère série d'oscillogrammes (suite)



- kérosène
- allumage commandé
- avec étincelle
- avance 10°
- taux de compression 10
- 1200 tr/min
- richesse 1,23

$$P_M = 24 \text{ bars}$$

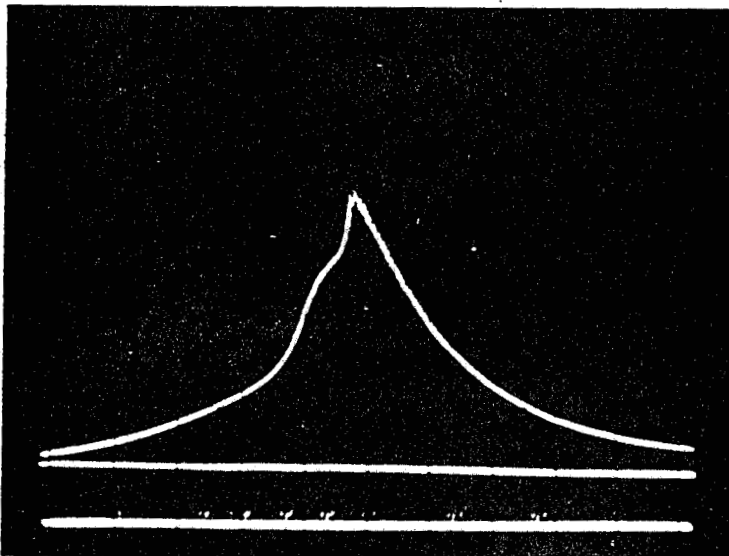
4



- kérosène
- allumage commandé
- avec étincelle
- avance 20°
- taux de compression 10
- 1200 tr/min
- richesse 1,35

$$P_M = 32 \text{ bars}$$

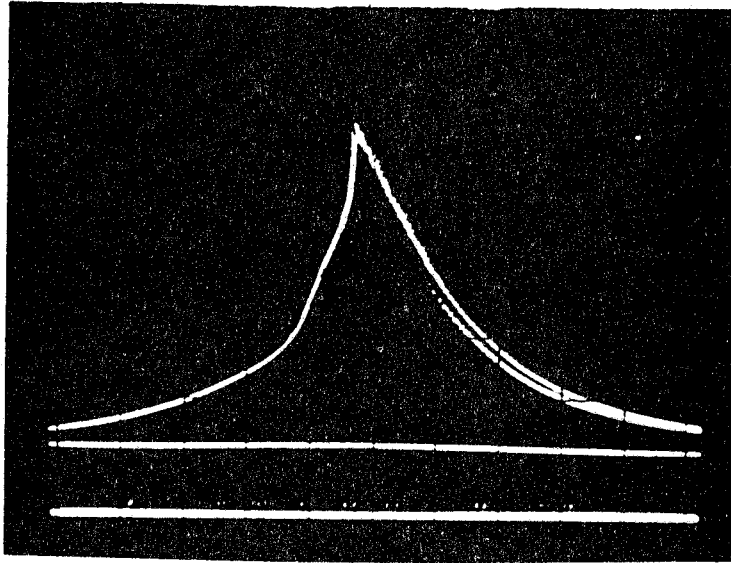
5



- kérosène
- allumage commandé
- avec étincelle
- avance 30°
- taux de compression 10
- 1200 tr/min
- richesse 1,22

$$P_M = 40 \text{ bars}$$

6

1 ère série d'oscillogrammes (suite)

- kérosène
- allumage commandé
- avec étincelle
- avance 40°
- taux de compression 10
- 1200 tr/min
- richesse 1,24

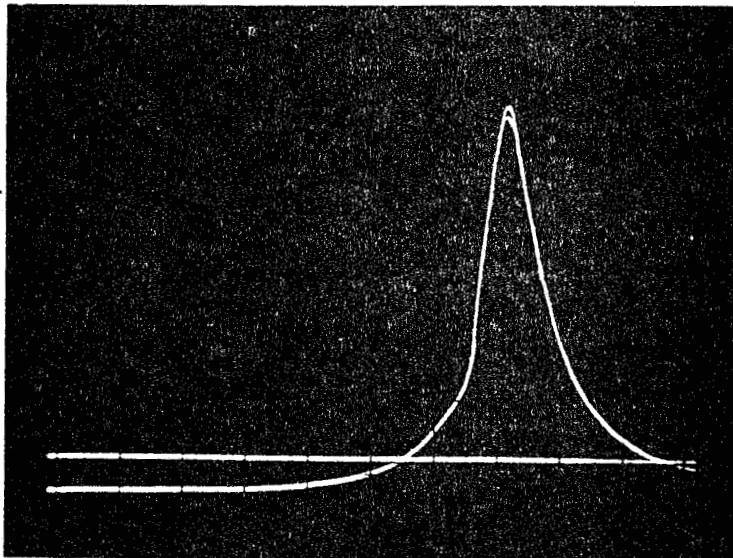
$P_M = 41$  bars

7

2 ème série d'oscillogrammes

- Allumage commandé
- Essence ordinaire
- Avance à l'allumage 20°

Domaine compris entre les limites d'inflammabilité et de cliquetis : A

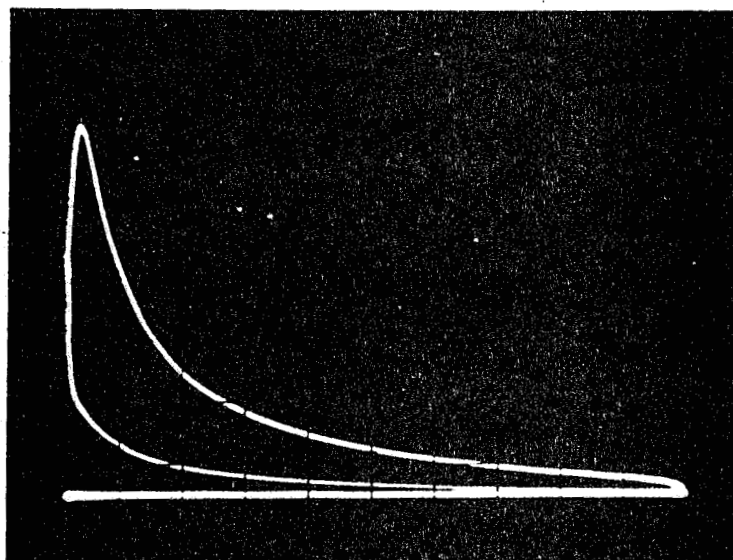


- taux de compression 7
- 3/4 de charge
- richesse 1,10
- 1200 tr/min

$$P = f(t)$$

$$P_M = 41 \text{ bars}$$

I



- taux de compression 7
- 3/4 de charge
- richesse 1,10
- 1200 tr/min

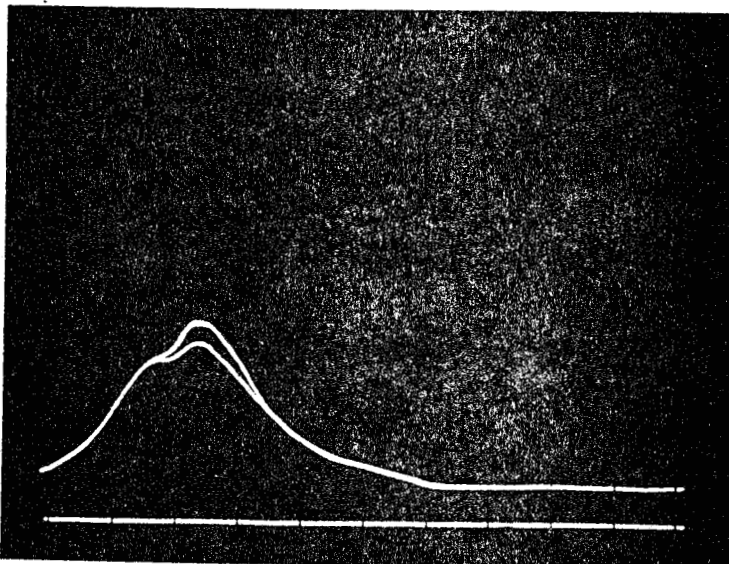
$$P = f(V)$$

II

2 ème série d'oscillogrammes (suite)

- Allumage commandé
- Essence ordinaire
- Avance à l'allumage 20°

Domaine compris entre les limites d'inflammabilité et de cliquetis: A

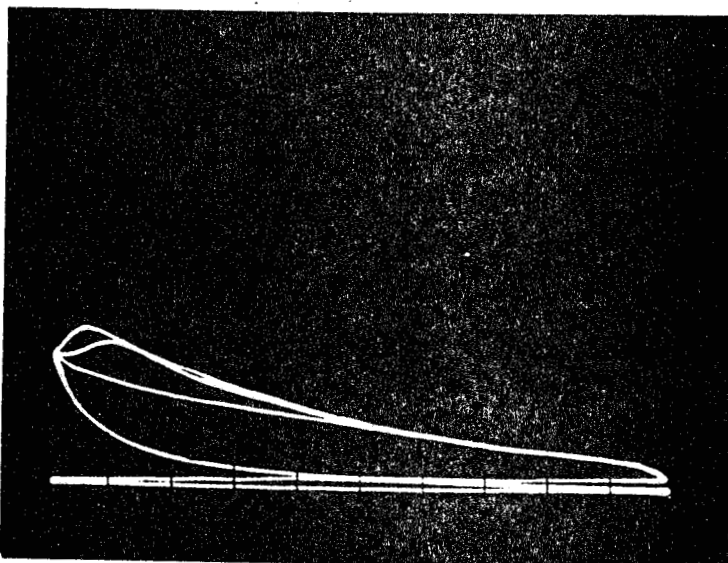


- taux de compression 7
- 1/2 charge
- richesse 2,10
- 1200 tr/min

$$P = f(t)$$

$$P_M = 18 \text{ bars}$$

III



- taux de compression 7
- 1/2 charge
- richesse 2,10
- 1200 tr/min

$$P = f(V)$$

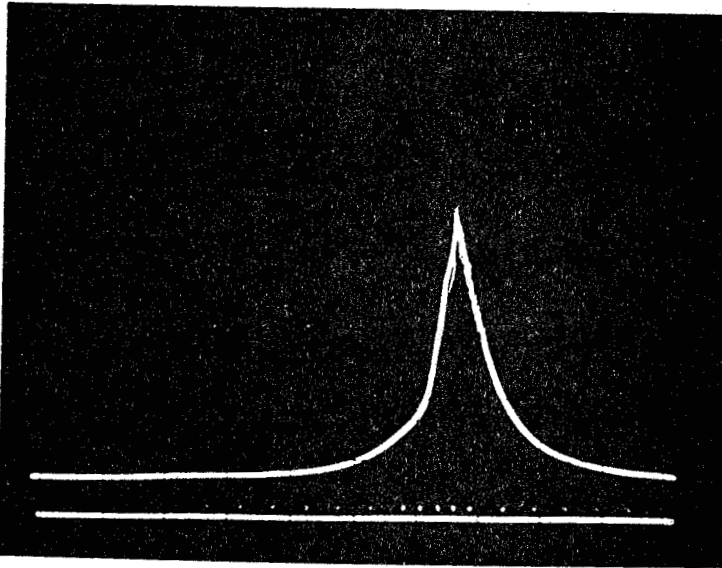
IV



2 ème série d'oscillogrammes (suite)

- Allumage commandé
- Essence ordinaire
- Avance à l'allumage 20°

Domaine compris entre les limites d'inflammabilité et de cliquetis: 1

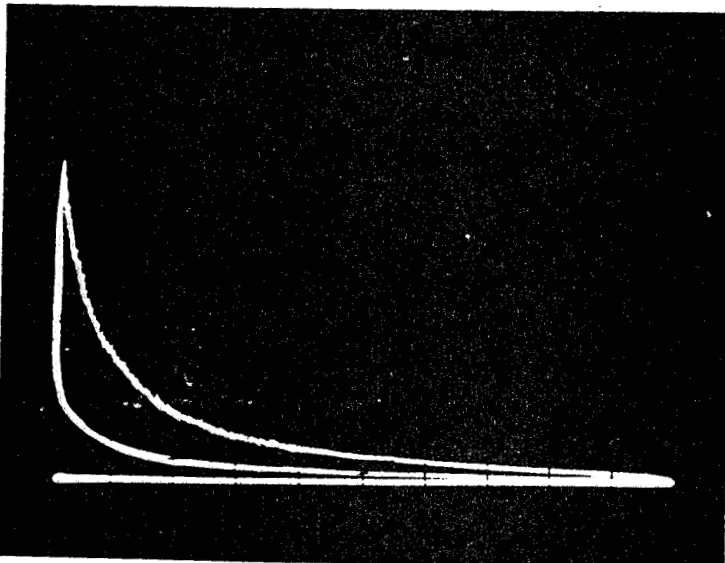


- taux de compression 10
- 3/4 de charge
- richesse 1,15
- 1000 tr/min

$$P = f(t)$$

$$P_M = 32 \text{ bars}$$

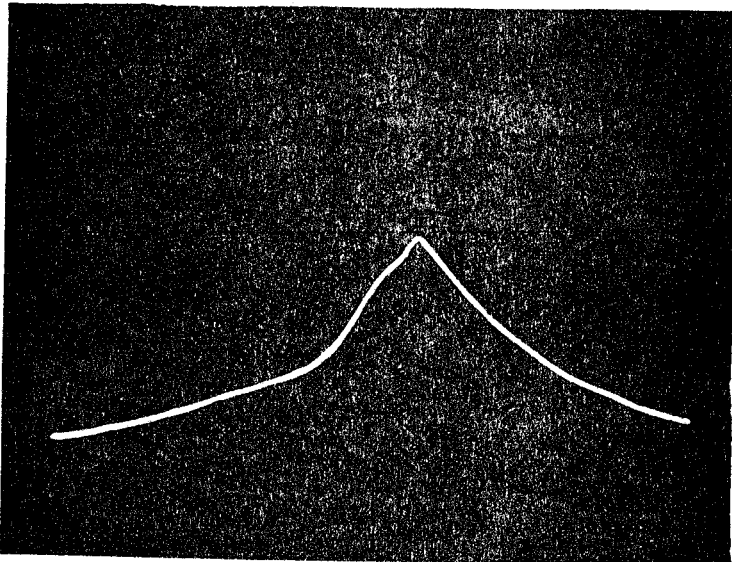
V



- taux de compression 10
- 3/4 de charge
- richesse 1,15
- 1000 tr/min

$$P = f(V)$$

VI

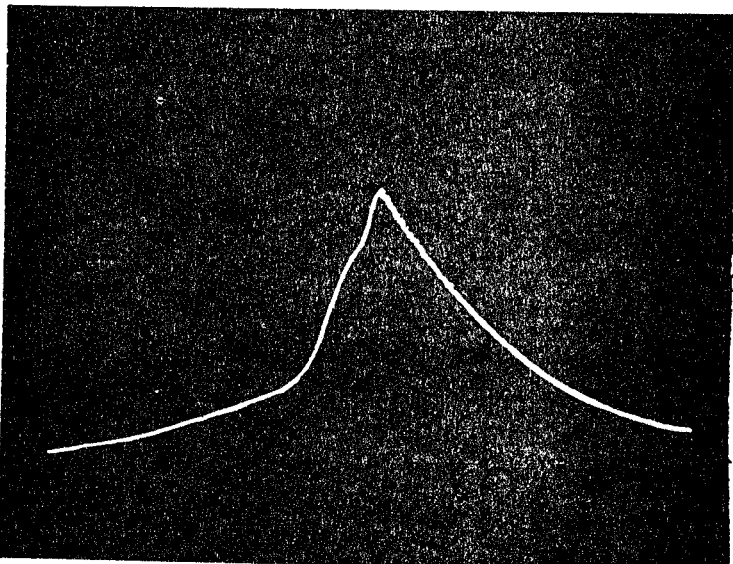


- taux de compression 10
- avance à l'allumage 25°
- vitesse de rotation 900 tr/min

$$r=0,77$$

$$P_M = 52 \text{ bars}$$

**P<sub>1</sub>**

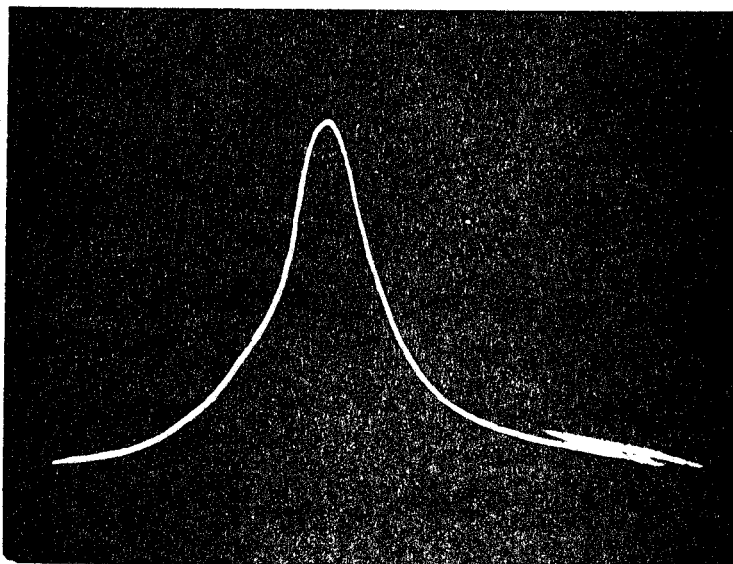


- taux de compression 10
- avance à l'allumage 25°
- vitesse de rotation 900 tr/min

$$r=0,80$$

$$P_M = 57 \text{ bars}$$

**P<sub>2</sub>**



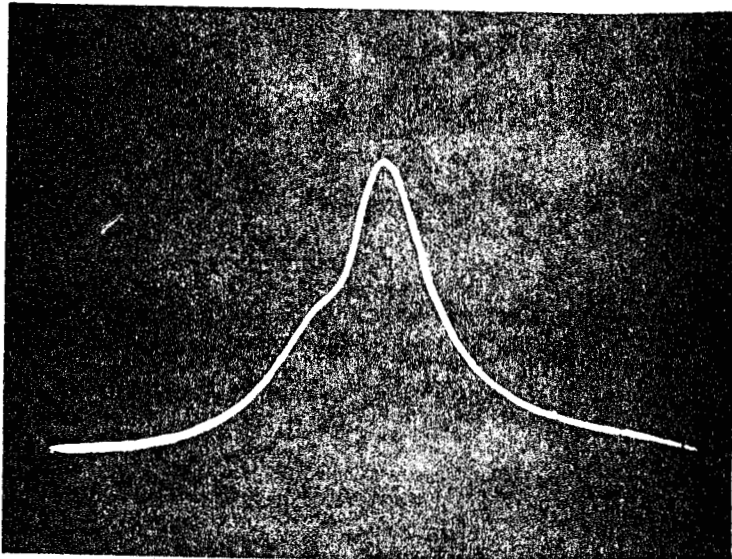
- taux de compression 10
- avance à l'allumage 25°
- vitesse de rotation 900 tr/min

$$r=1,65$$

$$P_M = 39 \text{ bars}$$

**P<sub>3</sub>**

57  
3 ème série d'oscillogrammes (suite)

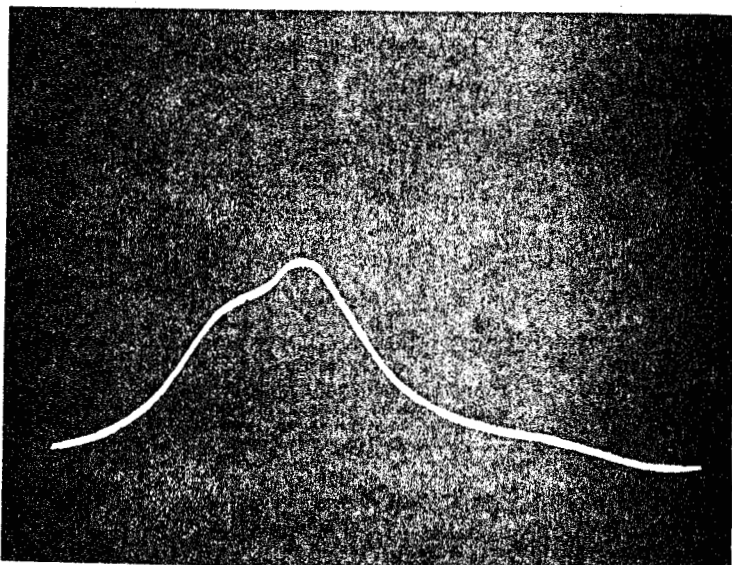


- taux de compression 10
- avance à l'allumage 25°
- vitesse de rotation 900 tr/min

$$r=1,85$$

$$P_M = 35 \text{ bars}$$

P<sub>4</sub>

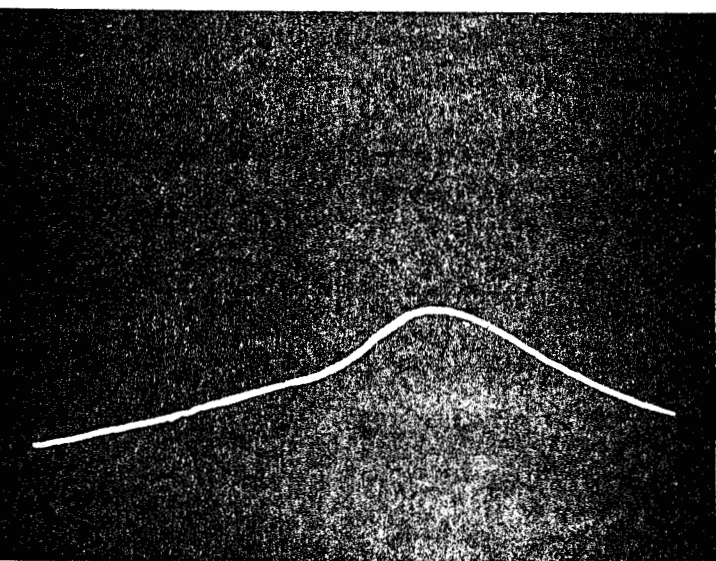


- taux de compression 10
- avance à l'allumage 25°
- vitesse de rotation 900 tr/min

$$r=1,91$$

$$P_M = 33 \text{ bars}$$

P<sub>5</sub>



- taux de compression 10
- avance à l'allumage 25°
- vitesse de rotation 900 tr/min

$$r=2,25$$

$$P_M = 25 \text{ bars}$$

P<sub>6</sub>

BIBLIOGRAPHIE - lière partie

- (1) Brun E.A., Martinot A., Mathieu J. - Mécanique des fluides, tome II, Dunod (1976)
- (2) Comolet R. - Dynamique des fluides réels ; turbomachines, tome II, P.91, Masson (1975)
- (3) Richard J. - Mécanique des fluides appliquée aux moteurs à capsulisme - Technique de l'Ingénieur, Moteurs thermiques, vol. B3, p.369
- (4) Serruys M. - Bases chimiques et énergétiques de la combustion - Technique de l'Ingénieur, Moteurs thermiques, vol. B3, p.366
- (5) Gibbs J.G., Calcotte J.F. - Engng, 4, 226 (1959)
- (6) Rocard Y. - Thermodynamique - Masson (1967) p.182
- (7) Guerber R. - Le moteur - tome 1, Technique et Vulgarisation (1977)
- (8) Salé B. - Thèse Paris publiée par l'I.F.P., vol. XIII, n°6, p.1040 et n°9 page 1279 (1958)
- (9) Van Tiggelen A - Oxydations et combustions, tome 1, Editions Techn., Paris (1968)
- (10) Vichnievsky R., Salé B. - Problèmes de la combustion dans les moteurs alternatifs, rapport I.F.P., n°261 (30 Juin 1952)
- (11) Vichnievsky R., Salé B. - Thermodynamique appliquée à l'étude des moteurs à combustion interne - SENNAC, Paris 1962
- (12) Anonyme - Knocking of Combustion Engines - International Symposium, Volkswagen, Wolfsburg, Nev 26-27, (1981)

- (13) Douaud A. - Revue de l'Institut Français du Pétrole, vol.38, numéro 5, Septembre-Octobre (1983)
- (14) Trapy I. - Les transferts thermiques dans les moteurs à combustion interne : Mesures et modélisations, Revue générale de thermique n°2333, mai (1981)

## 2ÈMÈ PARTIE

### DETERMINATION D'UN INDICE D'OCTANE ET D'UN INDICE DE CETANE PAR UTILISATION DE CARACTERISTIQUES LIEES A L'EXPLOSION FROIDE.

#### INTRODUCTION

#### CHAPITRE I

#### DÉTERMINATION D'UN INDICE D'OCTANE

#### A) MÉTHODES ACTUELLES DE DÉTERMINATION D'UN INDICE D'OCTANE.

I) Notion d'indice d'octane (I.O.)

II) Définition

III) Méthodes de détermination actuelles de l'indice d'octane

1) Méthodes normalisées

a) Le moteur C.F.R.

b) Méthodes de mesures normalisées

2) Méthodes basées sur la composition des essences

3) Méthodes liées à l'inflammation froide et à l'oxydation lente

a) Utilisation de la limite d'explosion froide

b) Mesure de l'intensité thermique de la flamme froide

c) Méthode basée sur la relation entre l'élévation de température et l'oxydation lente

2) Application à la détermination de l'indice d'octane de certaines essences

- a) Essences sans additif fournies par la Société Française des pétroles B.P.
- b) Effets de certains additifs sur l'indice d'octane mesuré à l'aide de la période d'induction

II) Résultats des analyses chimiques

1) Analyses polarographiques

- a) L'aldéhyde formique
- b) Le peroxyde d'hydrogène
- c) Conclusions

2) Analyses chromatographiques

- a) Evolution du nombre de moles de monoxyde et de dioxyde de carbone en fonction du temps à deux pourcentages en iso-octane différents : 80 et 100%
- b) Variation du nombre de moles de monoxyde et de dioxyde de carbone après la flamme froide en fonction du pourcentage en iso-octane

3) Analyses par spectroscopie infrarouge

- a) L'acétone
- b) La quantité totale d'hydrocarbures légers

4) Récapitulation des résultats des analyses

- a) Le long de la limite de la flamme froide
- b) A pression constante

D) DISCUSSION ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS.

- I) Etude comparée des résultats
- II) Corrélation entre les mécanismes d'oxydation des hydrocarbures et l'indice d'octane déterminé à partir d'une caractéristique de la flamme froide
- III) Influence des additifs utilisés sur l'indice d'octane
- IV) Conclusion

<p>CHAPITRE II</p> <p>DÉTERMINATION D'UN INDICE DE CÉTANE</p>
---

A) PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU MOTEUR À ALLUMAGE PAR COMPRESSION.

- I) Principe
- II) Cycle du moteur DIESEL en coordonnées de Clapeyron ; rendement
  - 1) Cycle théorique de Jōule
  - 2) Rendement
  - 3) Cycle réel

B) INDICE DE CÉTANE D'UN GAS-OIL.

- I) Définition ; méthodes expérimentales normalisées
- II) Calculs d'un indice assimilable à l'indice de cétane
  - 1) Méthode normalisée A.S.T.M.D. 975
  - 2) Autres déterminations de l'indice de cétane par le calcul
  - 3) DIESEL index
  - 4) Estimation d'un indice de cétane pour les esters d'acide gras

C) MÉTHODE EXPÉRIMENTALE UTILISÉE POUR LA DÉTERMINATION D'UN INDICE DE CÉTANE À PARTIR D'UNE CARACTÉRISTIQUE DE LA FLAMME FROIDE.

D) RÉSULTATS.

- I) Injection du combustible puis admission du comburant
  - 1) Diagramme d'explosion du n-hexadécane dans l'oxygène
  - 2) Identification des limites d'explosion froide en fonction du % en n-hexadécane dans le repère ( $\theta, P$ )
    - a) Déplacement des limites d'explosion froide en fonction du % en n-hexadécane dans le repère ( $\theta, P$ )



- b) Etude du déplacement de la limite de la première flamme froide, des variations de l'intensité lumineuse et de la période d'induction de cette première flamme froide en fonction du pourcentage de n-hexadécane
- 3) Applications à la détermination d'un indice de cétane
  - a) Première série de résultats
    - $\alpha$ ) Cas des hydrocarbures
    - $\beta$ ) Cas des mélanges d'hydrocarbures : gas-oils
  - b) Deuxième série de résultats
    - $\alpha$ ) Cas des hydrocarbures
    - $\beta$ ) Cas des gas-oils

II) Admission du comburant suivie d'une injection du combustible

- 1) Modification des conditions opératoires
- 2) Evolution de la période d'induction de la flamme froide en fonction du choix du couple d'hydrocarbures de référence
  - a) Couple n-hexadécane-méthyl- $\alpha$  naphtalène
  - b) Couple n-heptane-isooctane
  - c) Couple n-tétradécane-méthyl- $\alpha$  naphtalène

E) DISCUSSION ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

- I) Injection du combustible dans le réacteur vide
- II) Injection du combustible dans le réacteur contenant de l'air en équilibre thermique avec le four
- III) Interprétation et discussion des résultats

### CHAPITRE III

#### CORRÉLATION ENTRE LES INDICES D'OCTANE ET DE CÉTANE

A) ÉTUDE COMPARÉE DES DEUX INDICES OBTENUS.

I) Au niveau de la méthode

II) Au niveau des caractéristiques de la flamme froide

B) CORRÉLATION ENTRE LES INDICES D'OCTANE ET DE CÉTANE.

DEUXIEME PARTIE

DÉTERMINATION D'UN INDICE D'OCTANE ET D'UN INDICE  
DE CÉTANE PAR UTILISATION DE CARACTÉRISTIQUES  
LIÉES À L'EXPLOSION FROIDE.

## INTRODUCTION

. Le rendement d'un moteur à allumage commandé croît avec le taux de compression ; or les essais sur les moteurs montrent que cette opération est limitée par l'apparition du cliquetis. On traduit la tendance à cette combustion anormale par une grandeur appelée indice d'octane.

. Les méthodes normalisées utilisées pour repérer cet indice sont longues et onéreuses ; aussi, des méthodes plus rapides, basées sur l'oxydation lente ou froide ont-elles été proposées pour déterminer un indice d'octane et un indice de cétane.

. Nous envisageons, dans la deuxième partie, une méthode simple pour accéder à ces indices ; il s'agit de l'utilisation de certaines caractéristiques liées à l'explosion froide ; une étude comparée de ces deux indices pour un même hydrocarbure sera ensuite effectuée.

CHAPITRE I

DÉTERMINATION D'UN INDICE D'OCTANE

## A) MÉTHODES ACTUELLES DE DÉTERMINATION D'UN INDICE D'OCTANE.

### I) Notion d'indice d'octane (I.O.)

Pour traduire la résistance au cliquetis d'un carburant, on compare le carburant à tester à celui d'un couple d'hydrocarbures vis à vis de l'apparition de ce phénomène. Cette démarche a conduit à la notion d'indice d'octane\* ; qualitativement, plus il est élevé, plus la résistance de ce carburant au cliquetis est importante.

### II) Définition

On utilise les deux hydrocarbures de référence suivants :

- l'isooctane (triméthyl-2,2,4 pentane) dont la valeur antidétonante a été fixée à 100,
- l'heptane normal dont la valeur antidétonante a été fixée à 0.

Ces deux hydrocarbures doivent satisfaire à certains critères physicochimiques stricts au moment de leur emploi comme carburant dans le moteur expérimental (1) et notamment au niveau :

- de la masse volumique
- de la teneur en additifs, comme le plomb tétraéthyle
- du point de cristallisation.

Par définition, l'indice d'octane d'un carburant est le nombre entier le plus proche, du pourcentage en volume d'isooctane dans un mélange isooctane-n-heptane, dont les caractéristiques antidétonantes\*\* équivalent à celles du carburant étudié ; les méthodes de comparaison utilisées correspondent à des conditions de fonctionnement bien déterminées sur moteur C.F.R. (Cooperative Fuel Research).

Dans le cas où les qualités antidétonantes du

---

\* En toute rigueur, il ne s'agit donc pas d'une mesure.

\*\* Ce terme désigne ici la résistance au cliquetis.

produit à étudier sont supérieures à celles de l'isooctane, une échelle extrapolée est utilisée avec comme carburant l'isooctane additionné de plomb tétraéthyle ; ce dernier, par la fraction ajoutée, fixant l'indice d'octane ; une relation permettant de déterminer cet indice au-delà de 100 a été établie :

$$\text{I.O.*} = 100 + f(T)$$

où T est la quantité de plomb tétraéthyle dans l'isooctane, exprimée en ml par U.S. Gallon ou ml par 3,785 l.

### III) Méthodes de détermination actuelles de l'indice d'octane

Nous rappellerons les méthodes normalisées puis les méthodes liées à la composition chimique des essences et enfin celles qui utilisent certaines caractéristiques de l'oxydation lente.

#### 1) Méthodes normalisées

##### a) Le moteur C.F.R.

Les déterminations d'indice d'octane correspondant aux deux méthodes décrites ci-dessous, se font sur le moteur expérimental (1) (2). C'est un moteur à taux de compression variable, du même type que celui décrit précédemment. Il peut supporter le cliquetis pendant des phases prolongées.

##### b) Méthodes de mesures normalisées

Nous ne décrivons que les deux méthodes les plus couramment utilisées au laboratoire de l'Institut Français du Pétrole (I.F.P.). Toutes les conditions de fonctionnement sont décrites dans la norme AFNOR M 07-026 (2) et les normes A.S.T.M D 2699-68 et D 2700-68 (1). Les différences essentielles se situent au niveau de l'avance à l'allumage et de la vitesse de rotation :

---

\* Indice d'octane =  $100 + \frac{28,28 T}{1,0 + 0,73 T + \sqrt{1,0 + 1,47 T - 0,035 T^2}}$   
(au-dessus de 100)

- méthode  $F_1$  ou "Recherche" : l'avance à l'allumage est de  $13^\circ$  et la vitesse de rotation au moteur  $600 \pm 6$  tr.min<sup>-1</sup>.

- méthode  $F_2$  ou "Moteur" : l'avance à l'allumage est variable et la vitesse de rotation du moteur  $900 \pm 9$  tr.min<sup>-1</sup>.

Le moteur C.F.R. fonctionnant dans les conditions standardisées, correspondant à la méthode utilisée, on fait varier le taux de compression jusqu'à obtenir une certaine intensité de cliquetis fixée une fois pour toutes et dénommée cliquetis standard. On se reporte à une table de référence donnant, en fonction de l'indice d'octane, le taux de compression qui provoque l'intensité de cliquetis standard avec les mélanges d'isooctane et de n-heptane; on peut alors déterminer en un premier temps l'indice d'octane du carburant de manière approchée. Sans modifier le taux de compression, on "encadre" alors cette valeur avec deux mélanges de référence, différant au plus de 2 points, et on note les intensités de cliquetis correspondantes ; l'indice d'octane de l'échantillon est déterminé par interpolation. La richesse du mélange est réglée, dans chaque cas, à la valeur donnant le maximum d'intensité de cliquetis.

## 2) Méthodes basées sur la composition des essences

Sur la base de certaines propriétés liées à la composition chimique des essences, les auteurs ont élaboré des modèles mathématiques valables pour chaque type d'essence (reformat, essences légères, ...). Les mesures des différentes caractéristiques étudiées ont été obtenues par R.M.N. (3) ou par chromatographie en phase gazeuse (4). Néanmoins, les méthodes s'avèrent encore longues et limitées à certaines catégories d'essences.

## 3) Méthodes liées à l'inflammation froide et à l'oxydation lente



a) Utilisation de la limite d'explosion froide (5)

Pour les auteurs, le cliquetis est essentiellement lié à un phénomène de combustion de basse température qui se manifeste par l'existence d'explosions froides ; elles sont suivies d'une explosion normale de second stade, si la pression est suffisante. C'est cette inflammation de second stade qui a lieu dans le cliquetis. A partir d'une caractéristique de l'inflammation froide, ils ont ainsi pu déterminer un indice d'octane à l'aide d'une technique d'injection (6).

b) Mesure de l'intensité thermique de la flamme froide

A partir de l'élévation de température du milieu réactionnel qui accompagne l'oxydation froide des hydrocarbures, il a été construit un appareil (7) (8) basé sur cet effet thermique ; c'est ce critère qui a été retenu par les auteurs pour déterminer un indice d'octane.

Plus récemment, d'autres chercheurs (9) ont utilisé, avec différentes formes de réacteur, la corrélation dynamique entre l'indice d'octane et la température maximale atteinte en un point du réacteur, à une distance déterminée de l'entrée de celui-ci. En ce qui concerne les réacteurs cylindriques, la dépendance est linéaire pour les mélanges d'hydrocarbures primaires (isooctane-n-heptane) ; au niveau des réacteurs sphériques, après avoir constaté que les inflammations étaient accompagnées d'autooscillations thermiques à caractère périodique, les auteurs ont mis en évidence une proportionnalité entre l'I.O. et la période d'induction (celle-ci correspondant à une élévation de température de 1 K). Après un étalonnage préalable avec les hydrocarbures étalons, un indice d'octane a été déterminé pour différentes essences par cette méthode.

c) Méthode basée sur la relation entre l'élévation de température et l'oxydation lente

L'oxydation de l'hydrocarbure est réalisée en régime statique ; on mesure l'élévation de température associée à la réaction lente. Cette élévation de température est quasi proportionnelle à la vitesse d'oxydation (10) (11) et est donc reliée à l'I.O. qui dépend de la vitesse d'oxydation et du délai d'autoinflammation. Après étalonnage, un indice d'octane peut être déterminé (12) .

## B) MÉTHODE EXPÉRIMENTALE.

### I) Méthode utilisée pour déterminer un indice d'octane à partir d'une caractéristique de la flamme froide

Si les vibrations qui engendrent le cliquetis ont, à leur origine, une inflammation normale prématurée provoquée par une flamme froide, il est alors possible de déterminer l'indice d'octane d'un carburant en utilisant une (ou plusieurs) manifestation(s) liée(s) à cette flamme froide ; il suffira, en effet, d'apprécier quantitativement une des caractéristiques de la flamme froide pour l'échantillon, puis de rechercher le mélange isooctane-n-heptane convenablement choisi qui provoque le même effet, pour le même phénomène avec la même installation.

Cinq types de mesures physiques peuvent convenir pour atteindre cet objectif :

— la limite de flamme normale de second stade ( $FN_2$ ) qui correspond à la pression à laquelle se produit ce type d'explosion à une température donnée du réacteur.

— l'intensité lumineuse de la flamme froide seule, dans le domaine où celle-ci n'est pas suivie d'une flamme normale, c'est-à-dire à une pression plus faible dans le diagramme d'explosion.

— la limite d'explosion froide.

— le délai d'explosion froide défini comme étant l'intervalle de temps qui sépare l'introduction des réactifs et le maximum d'intensité de la flamme froide.

— l'effet thermique associé à l'inflammation froide.

Le cliquetis est provoqué par une inflammation en deux stades : flamme froide suivie d'une flamme normale; mais il n'est pas nécessaire d'utiliser cette inflammation de deuxième stade pour caractériser un combustible ; en effet, la flamme froide seule suffit car les caractéristiques de l'inflammation de deuxième stade sont tributaires de celles de la flamme froide qui la précède. On peut donc se contenter d'effectuer des mesures à des pressions relativement plus basses où l'on n'observe que ces flammes froides. Par conséquent, nous ne retiendrons pas, au niveau des mesures physiques citées, la détermination de la limite de flamme normale de second stade. De même, comme l'élévation maximale de température détectable en un point un réacteur est liée aux autres manifestations de la flamme froide, comme l'intensité lumineuse, nous nous limiterons à la mesure de cette dernière. Seuls les critères limite, intensité lumineuse et délai d'explosion de la première\* flamme froide seront donc retenus ; des comparaisons justifiées seront alors possibles puisqu'on s'attache à un seul et même phénomène: la flamme froide.

En modifiant le pourcentage d'isooctane  $x$  dans le mélange n-heptane - isooctane, nous avons suivi chacune des caractéristiques précédentes. En quantifiant celles-ci, il est alors possible de traduire graphiquement le lien entre la grandeur considérée et le pourcentage d'isooctane  $x$ .

En définitive, nous avons obtenu :

- la limite d'explosion froide ; pression totale  $p = f(x)$ .
- à pression constante, variation de l'intensité lumineuse

---

\* Dans des conditions expérimentales données, certains hydrocarbures possèdent plusieurs flammes froides ; il s'agira toujours par la suite de la première flamme froide.

I, soit  $I = g(x)$ .

- à la même pression, évolution de la période d'induction  $\tau$ , soit  $\tau = h(x)$ .

On détermine ensuite cette même grandeur dans les mêmes conditions avec le carburant étudié et on recherche sur la courbe d'étalonnage précédemment établie le mélange iso-octane - n-heptane qui correspond à la même valeur de la grandeur mesurée : la teneur en iso-octane de ce mélange représente un indice d'octane relatif à cette caractéristique de la flamme froide. Il y aura donc un indice d'octane (I.O.), affecté à chacune des manifestations de la flamme froide suivante :

- la limite : I.O.<sub>L</sub>
- l'intensité lumineuse : I.O.<sub>I</sub>
- la période d'induction : I.O. <sub>$\tau$</sub>

L'intérêt de cette démarche est triple :

- ce nombre, unique, va pouvoir traduire la quantitativité du lien : il y aura donc relation, au sens physique du terme, entre une grandeur attachée à la flamme froide et le pourcentage d'iso-octane  $x$ .

- en associant la variabilité de ce nombre avec le % d'iso-octane, nous aurons la possibilité de comparer ces différents indices entre eux et avec un indice obtenu par une méthode normalisée, l'indice "Recherche" par exemple; nous tenterons de justifier l'importance des écarts éventuels.

- enfin, de par le fait qu'une relation répétable se dégage, celle-ci pourra être modélisée ; il sera possible d'en extraire par une extension-généralisation, des renseignements intéressants et notamment pour des indices d'octane supérieurs à 100 (13).

II) Choix des conditions expérimentales ; limites de validité de la méthode

Le repère physique utilisé comme critère de détermination de cet indice sera donc la première flamme froide; c'est donc dans le seul domaine d'existence de celle-ci que nous situerons les conditions opératoires et ceci à l'exclusion de tout autre domaine du diagramme d'explosion. Simultanément, la possibilité de se situer dans ce domaine, compte tenu de l'appareillage et de la nature de l'hydrocarbure ou du carburant à tester, conditionnera les limites d'utilisation de la méthode.

En général, le domaine d'explosion froide de la majorité des hydrocarbures en phase gazeuse présente un minimum correspondant à des concentrations globales en hydrocarbure comprises entre 30 et 50% par rapport à l'oxygène et à des températures situées entre 260°C et 340°C.

Ce sont essentiellement ces critères qui ont fixé les conditions expérimentales :

- 40% d'hydrocarbure par rapport à l'oxygène, soit 11,8% par rapport à l'air.

- température du réacteur : 319°C

Trois remarques s'imposent en ce qui concerne les limites de la méthode :

- le minimum du domaine flamme froide de l'isooctane se situe alors au-dessous de 700 torr, pression accessible avec notre installation. A cette pression, pour des mélanges n-heptane - isooctane dont le pourcentage en isooctane est inférieur à 80%, on observe en outre une flamme normale de second stade ; cette limitation s'avère sans conséquence pratique pour l'objectif visé : en effet, les essences les moins résistantes au cliquetis ont des indices supérieurs à 90.

- si l'hydrocarbure\* ou le carburant à tester ne présente

---

\* cas des aromatiques

pas de flamme froide dans nos conditions opératoires ou s'il présente une autre manifestation de la combustion, il n'est pas alors possible de lui attribuer un indice d'octane par cette méthode.

Les résultats obtenus avec l'oxygène comme comburant sont moins reproductibles qu'avec l'air : c'est ce dernier comburant qui a donc été retenu ; ce choix de l'air comme comburant permettra des comparaisons avec les indices d'octane "normalisés", carburants de référence et comburant étant identiques.

### III) Description de l'appareil et des instruments de mesures

Les réactions sont étudiées par la méthode classique du pyromètre qui consiste à introduire le mélange gazeux dans un réacteur préalablement vidé (fig.1). Lorsque l'hydrocarbure est liquide ou lorsqu'il s'agit d'additifs, le réactif est introduit au moyen d'une seringue (fig.2) ; la vaporisation s'effectue dans l'enceinte réactionnelle (14).

L'appareil utilisé présente des parties communes avec celui décrit dans le D.E.A. (13) ; nous insisterons essentiellement sur les modifications qu'il a subies et notamment au niveau des appareils de contrôle et d'enregistrement. Cet appareil comprend :

- un réacteur et ses accessoires
- une installation d'introduction et de stockage des gaz
- des appareils de mesure et de contrôle ainsi que des appareils d'enregistrement.

L'appareillage permet de suivre l'évolution de quatre paramètres :

#### la pression

. un manomètre à mercure permet de connaître la pression du mélange azote - oxygène introduite dans le réacteur.

. une jauge différentielle (Bell-Howell) connectée d'une part au vide primaire et d'autre part au réacteur permet d'introduire l'hydrocarbure à la pression désirée; cette jauge différentielle a été par la suite remplacée par une jauge absolue (C.E.C. 1000-04, Bell-Howell). Dans les deux cas, la jauge a été chauffée à 290°C.

#### la période d'induction

Au niveau du robinet d'admission des réactifs, un contact à renversement de mercure relié à l'appareil enregistreur ferme un circuit électrique lorsque la position de ce robinet permet l'entrée des gaz ; une impulsion au niveau de l'enregistreur repère alors le début du phénomène.

#### la température du four

La température est repérée à l'aide d'un thermocouple chromel-alumel.

#### l'intensité de l'effet lumineux

Il est suivi à l'aide d'un photomultiplicateur RCA-1P21 ; après amplification, le signal de sortie est recueilli sur un enregistreur.

### IV) Dispositifs et protocole d'analyse

#### 1) Méthodes d'analyse et instrumentation

Les produits de combustion dosés et les méthodes associées sont récapitulés dans le tableau ci-dessous.

<u>Produits de combustion</u>	<u>Méthode d'analyse</u>
- formaldéhyde et peroxyde d'hydrogène	polarographie
- acétone et certains hydrocarbures	spectroscopie infrarouge
- monoxyde et dioxyde de carbone	chromatographie en phase gazeuse

Après avoir suivi le déroulement de la réaction par effet de pression ou effet lumineux sans effectuer d'analyse, on repère les instants de piégeage souhaités. On renouvelle l'expérience dans les mêmes conditions et à l'instant choisi, on détend les produits de combustion dans une enceinte appropriée. Les produits de combustion y sont ensuite "isolés" par fermeture de robinets amont et aval.

a) Dosages polarographiques

Le polarographe utilisé est un "Radiometer" type  $PO_4$  comprenant une électrode à goutte de mercure et une électrode au calomel saturé ; les électrolytes employés sont une solution de chlorure de lithium 0,05 M et d'hydroxyde de lithium 0,05 M. Les gaz dissous et notamment l'oxygène sont chassés par barbotage préalable de l'azote pendant 10 minutes.

A la sortie du réacteur, par détente et refroidissement les produits de la combustion sont piégés ; réchauffés à température ambiante puis dissous dans l'eau, ils subissent une électrolyse dans la cellule électrochimique du polarographe. L'examen des courbes intensité-potential permet après étalonnage d'identifier le produit puis de le doser.

b) Absorption infrarouge

L'appareil utilisé est un spectrophotomètre Perkin-Elmer, modèle 257. L'absorption est réalisée en phase gazeuse ; les fenêtres de la cellule sont en chlorure de sodium.

Après avoir réalisé le vide dans cette cellule, on y détend les produits de la combustion ; la cellule est ensuite logée dans le compartiment à échantillons du spectrophotomètre. Les intensités des bandes d'absorption sont indiquées par leur transmission  $T$  et leur densité optique  $D$ .



### c) Analyses chromatographiques

Le dosage du monoxyde et du dioxyde de carbone a été réalisé en phase gaz en utilisant un chromatographe Perkin-Elmer Sigma 2. Le gaz porteur est l'hélium ; le débit est fixé à  $30 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ . Le système de détection est un catharomètre.

Les deux oxydes de carbone sont séparés sur une même colonne de charbon actif ; la granulométrie de cette colonne est de 60 - 80 mesh, (1 mesh  $\approx$  0,1 mm). La température de la colonne a été fixée à :

- 40°C pour le monoxyde de carbone
- 200°C pour le dioxyde de carbone.

Les températures de l'injecteur et du détecteur sont respectivement de 55°C et 120°C.

Les faibles quantités de produits à la sortie du réacteur ont nécessité l'emploi d'une pompe Toppler d'un litre pour comprimer les gaz isolés ; un septum adapté dans un ajutage "torion" permet le prélèvement d'une fraction de ces gaz comprimés à l'aide de la seringue à gaz ; ceux-ci sont ensuite injectés dans le chromatographe.

### 2) Choix du protocole d'analyse

Les analyses des différents produits de combustion ont été menées :

- dans les mêmes conditions expérimentales que l'étude des caractéristiques physicochimiques liées à la flamme froide (parag. B<sub>II</sub>).

- avec différents pourcentages du couple n-heptane - iso-octane.

Toutes les opérations ont été menées avec le maximum de standardisation.

Les analyses ont été effectuées :

- le long de la limite de la flamme froide obtenue à partir du diagramme  $p = f(x)$ .

- à pression constante, immédiatement après l'obtention de la flamme froide pour différents pourcentages en hydrocarbures de référence.

- à pression constante, pour un mélange déterminé de ces hydrocarbures, en fonction du temps  $t$ .

Il n'a pas été toujours possible de mener à terme toutes les expérimentations ; en particulier, pour certains mélanges d'hydrocarbures de référence, la nécessité d'utiliser de faibles pressions en combustible\* (inférieures à 80 torr) ne nous a pas permis de doser certains produits, même après les avoir comprimés.

#### V) Technique d'injection

##### 1) Méthode

La méthode utilisée a été décrite en détail antérieurement dans le Diplôme d'Etudes Approfondies (13).

##### 2) Détermination de la pression de l'hydrocarbure injecté

Elle s'effectue en deux stades :

. On prédétermine d'abord le volume d'hydrocarbure à injecter pour que la pression finale dans le réacteur corresponde à la fraction désirée dans le mélange combustible-comburant.

. Cette opération est ensuite affinée à l'aide de la jauge de pression qui a été étalonnée dans les mêmes conditions expérimentales.

---

\* essentiellement pour conserver les mêmes conditions expérimentales et donc localiser les réactions au seul domaine des flammes froides.

Un exemple de mode de calcul a été donné antérieurement (13).

## VI) Produits utilisés

L'azote et l'oxygène proviennent de la Société "Air Liquide" ; ils sont purifiés par passage dans un piège refroidi à  $-80^{\circ}\text{C}$  ; nous avons utilisé de l'air reconstitué pour nous rapprocher des conditions réelles de fonctionnement et limiter les risques de pollution par les impuretés de l'air atmosphérique.

Les hydrocarbures utilisés, sauf les essences, sont livrés par la "Phillips Petroleum Company" et la Société "Fluka" ; ils titrent toujours un pourcentage de pureté supérieur à 99,5%.

Les essences nous ont été aimablement fournies par la société française des pétroles B.P..

Les gasoils nous ont été livrés par la société française PEUGEOT.

## C) RÉSULTATS

Nous distinguerons les résultats d'ordre physicochimiques des résultats obtenus par analyse de certains produits de combustion.

### I) Résultats d'ordre physicochimique

1) Etude systématique de la relation entre une caractéristique de la flamme froide et le pourcentage d'isooctane x dans le mélange n-heptane-isooctane ; application à la détermination d'un indice d'octane de certains hydrocarbures

a) Etablissement de la limite du domaine d'explosion froide dans l'air :  $P = f(x)$  ; résultats

Cette étude a déjà été entreprise avec l'oxygène comme comburant (5). Les auteurs avaient alors signalé

que la corrélation entre l'indice obtenu et l'indice d'octane "Recherche" était assez bonne dans le cas des hydrocarbures paraffiniques. L'explication proposée pour expliquer les écarts importants avec les autres familles d'hydrocarbures repose sur :

- une période d'induction très différente pour des hydrocarbures ayant même limite d'explosion froide.

- la température choisie, éloignée de celle qui correspond au minimum du lobe du domaine d'explosion froide.

La figure 3a représente l'évolution de la pression totale P en fonction du pourcentage de la pression totale P en fonction du pourcentage d'isooctane x. Au niveau de la limite flamme froide et réaction lente, on constate :

- qu'elle est comprise entre 45 et 670 torr.

- après un palier correspondant à des faibles pourcentages en isooctane, l'allure de la courbe est constamment croissante. Pour des indices supérieurs à 80, c'est-à-dire dans le domaine des essences automobiles, la pente importante rend la méthode plus sensible que pour la détermination des indices inférieurs. Nous avons donc procédé à une expansion de cette courbe entre 80 et 100% d'isooctane (fig. 3b).

- après modélisation (13), la fonction  $P = f(x)$  a été extrapolée pour des indices supérieurs à 100.

Après avoir recherché les limites d'explosion froide de certains hydrocarbures et leur avoir affecté un indice d'octane à l'aide de la courbe  $P = f(x)$ , nous avons dressé le tableau I. A titre de comparaison, nous avons rappelé l'indice "Recherche" et l'indice obtenu avec l'oxygène comme comburant. La dernière colonne indique le délai de la première flamme froide après la limite obtenue.

L'examen des résultats montre que, mis à part le diméthyl-2,2 butane et le diméthyl-2,3 butane, les indices obtenus dans l'air présentent des écarts plus importants

par rapport à l'indice "Recherche" ; on peut donc raisonnablement penser que, pour la majorité des hydrocarbures utilisés, l'emploi des limites de flamme froide ne permet pas de déterminer l'aptitude au cliquetis, traduit par l'indice "Recherche".

COMBUSTIBLE	LIMITE DE FF EN torr	INDICE "RECHERCHE"	INDICE DANS L'OXYGENE	I.O. <sub>L</sub> DANS L'AIR	DELAI DE LA PREMIERE FF APRES LA LIMITE EN s
DIMETHYL-2,3 BUTANE	575	96	> 100	98,4	4
DIMETHYL-2,2 BUTANE	300	89	93	90,9	6
METHYL-2 BUTANE	245	100	99	86,1	10
METHYL-3 PENTANE	135	86	85	63,5	12
N-HEPTANE	45	0	0	0	3
"ISOOCTANE"	685	100	100	100	6
DECENE-1	75	3	25	37	15
OCTENE-2, CIS-TRANS	125	74	59,5	60	9
CYCLOPENTANE	145	141	78	66	21
CYCLOHEXANE	65	110	50	32,5	18
TETRAHYDROFURANE	105	90	65	52,5	10

TABLEAU I

b) Evolution de l'intensité lumineuse de la flamme froide (I) en fonction du pourcentage en isooctane x :  $I = g(x)$  ; résultats

Les mesures ont été effectuées à une pression totale constante et égale à 700 torr ; elles ont porté sur des mélanges n-heptane - isooctane dont le pourcentage en isooctane x est égal ou supérieur à 80.

Dans ce domaine, la courbe expérimentale observée montre que l'intensité lumineuse augmente lorsque le mélange s'enrichit en n-heptane (fig.5).

La méthode déjà utilisée au paragraphe précédent permet d'affecter un indice d'octane basé sur la mesure de l'intensité

lumineuse de différents hydrocarbures (tableau II) ; parmi ceux-ci, nous n'avons retenu que ceux dont l'indice risquait d'être supérieur à 80. Nous figurons également le délai de la flamme froide obtenu à cette pression.

COMBUSTIBLE	I UNITE ARBITRAIRE	INDICE "RECHERCHE"	I.O. <sub>L</sub>	I.O. <sub>I</sub>	DELAI EN s.
DIMETHYL-2,3 BUTANE	0,163	96	98,4	97,0	8,5
ISOOCTANE	0,058	100	100	100	11
ISOPENTANE	0,054	100	86,1	100	9
DIMETHYL-2,2 BUTANE	0,166	89	90,9	97	6
HEPTANE + 80% ISOOCTANE	1,000	80	80	80	2,7

TABLEAU II

La corrélation entre l'indice "Recherche" et l'indice obtenu par la détermination de l'intensité lumineuse de la flamme froide n'est pas satisfaisante.

- c) Evolution de la période d'induction de la flamme froide ( $\tau$ ) en fonction du pourcentage en isooctane  $x$  :  $\tau = h(x)$  ; résultats

Les conditions expérimentales sont les mêmes que celles du paragraphe précédent b).

La courbe expérimentale observée  $\tau = h(x)$  montre que la période d'induction de la première flamme froide reste sensiblement constante pour  $80 < x < 85$  puis croît très rapidement au-delà de 85% en isooctane (fig. 6).

Il est possible d'affecter un indice d'octane  $I.O._\tau$  relatif à la détermination de la période d'induction  $\tau$  (tableau III).

L'examen du tableau III et les observations qualitatives effectuées au cours des enregistrements suscitent quelques

Combustible	Période d'induction $\tau$ à 700 torr en s	Indice I.O. <sub>c</sub>	Indice "Recherche"
THF	0,8	< 80	90
Méthyl-2 pentane	2,0	< 80	82
Méthyl-3 pentane	2,7	86,5	86
Cyclopentane	4,5	93,5	141
Diméthyl-2,2 butane	6,0	96,0	89
Diméthyl-2,3 butane	8,5	97,0	96
Isopentane	9,0	98,5	100
Isooctane	11,0	100	100
Cyclohexane	13	> 100	110

remarques.

- Les écarts entre les deux indices restent importants pour certains hydrocarbures.

- A part le cyclopentane, l'indice "Recherche" et l'indice d'octane correspondant à la mesure de la période d'induction (I.O.<sub>c</sub>) croissent avec la période d'induction de la flamme froide (fig.7), période correspondant à cette pression.

- Les écarts constatés les plus importants concernent essentiellement les indices "Recherche" supérieurs à 100. Rappelons que, dans ce cas, les indices "Recherche" sont obtenus par une autre méthode (paragraphe A.II).

## 2) Application à la détermination de l'indice d'octane de certaines essences

a) Essences sans additifs fournies par la Société Française des pétroles B.P.

Connaissant, à 0,1 unité près, l'indice d'octane de ces trois essences, nous avons pu tester les trois méthodes précédentes permettant de déterminer un indice d'octane

(tableau IV).

Essence	Indice "Recherche"	I.O. <sub>L</sub>	I.O. <sub>I</sub>	I.O. <sub>T</sub>
1	89,9	82	-	90,0±0,5
2	90,9	82,8	-	91,0±0,5
3	92,6	84,6	-	92,0±0,5

TABLEAU IV.

Nous n'avons pu déterminer un indice octane correspondant à l'intensité lumineuse de la flamme froide (I.O.<sub>I</sub>) pour aucune de ces trois essences : dans les mêmes conditions expérimentales, l'intensité du phénomène était supérieure à toute valeur obtenue lors de l'établissement de la courbe expérimentale,  $I = g(x)$ . D'ailleurs, de par l'intensité du signal obtenu, il est difficile de savoir si le phénomène est :

- une flamme froide intense : dans ce cas, I.O.<sub>I</sub> est inférieur à 80

ou

- une flamme normale de second stade : la méthode ne permet pas alors d'affecter un indice octane à cette essence.

De l'examen des résultats du tableau IV, il apparaît que :

- la méthode utilisée convient mieux pour les essences, mélanges d'hydrocarbures, que pour les seuls hydrocarbures.

- c'est l'utilisation de l'indice correspondant à la mesure de la période d'induction, soit I.O.<sub>T</sub> qui se rapproche le plus de l'indice "Recherche". C'est donc, avec cette dernière méthode que nous évaluerons la sensibilité de ces carburants à certains additifs.



b) Effets de certains additifs sur l'indice d'octane des essences mesuré à l'aide de la période d'induction (fig.8 et fig.9)

<u>Nature de l'additif</u>	<u>Choix de l'additif</u>
- alcool absolu	indice d'octane nettement supérieur à 100
- oxyde de méthyle et de tertiobutyle	préconisé pour relever l'indice d'octane des essences (15) (16)

### Résultats

- l'effet de l'alcool est plus important que celui de l'étheroxyde.
- on atteint un palier de "saturation" en indice d'octane pour l'étheroxyde.

## II) Résultats des analyses chimiques

### 1) Analyses polarographiques

Deux produits ont été suivis :

#### a) L'aldéhyde formique

Le long de la limite de la flamme froide du diagramme  $P = f(x)$  : le nombre de moles de cet aldéhyde croît lorsque le pourcentage en isooctane  $x$  croît dans le mélange  $n$  heptane-isooctane (fig.10a) ; le dosage a été effectué 30s après le début de l'injection, donc après la première flamme froide quel que soit le pourcentage en isooctane. Néanmoins, comme la pression varie continûment, c'est le rendement par rapport à un des réactifs qu'il faut prendre en compte : nous avons choisi d'exprimer le rendement  $\eta$  par rapport à l'oxygène\*. Dans ce cas, l'examen de la figure 10b montre que ce rendement décroît lorsque le pourcentage en isooctane croît.

---

\* Ce rendement est le rapport du nombre de moles d'atomes du produit formé au nombre de moles d'atomes d'oxygène initiales introduites.

A pression constante, le nombre de moles de cet aldéhyde et le rendement décroissent lorsque le pourcentage  $x$  augmente (fig.11a et 11b).

b) Le peroxyde d'hydrogène

Comme pour l'aldéhyde formique, le rendement exprimé par rapport à l'oxygène initial diminue lorsque le pourcentage en isooctane croît (fig.12a et fig.12b); le dosage ayant aussi été effectué 30s après le début de l'injection.

A pression constante, le nombre de moles contenues dans le réacteur et le rendement par rapport à l'oxygène décroissent avec le pourcentage en isooctane (fig.13a et fig.13b). L'allure de ces courbes rappelle  $\tau = g(x)$  relative à l'évolution de la période d'induction à cette même pression.

c) Conclusions

Au niveau de la limite de la flamme froide puis à pression constante, le rendement par rapport à l'oxygène du formaldéhyde et celui du peroxyde d'hydrogène varient dans le même sens; ces rendements diminuent quand le pourcentage en isooctane augmente.

2) Analyses chromatographiques

Les analyses ont porté sur le monoxyde et le dioxyde de carbone. Par suite des basses pressions du côté des faibles pourcentages en isooctane dans le diagramme  $P = f(x)$  (fig.3a), les essais n'ont pu être réalisés au niveau de la limite de la flamme froide ; nous reproduisons les résultats obtenus à la pression constante de 700 torr; les courbes traduisant l'évolution du nombre de moles du produit considéré ou la variation de son rendement ont même allure à pression constante ; nous ne représenterons donc que la première série de courbes.

a) Evolution du nombre de moles de monoxyde et de dioxyde de carbone en fonction du temps à deux pourcentages en isooctane différents: 80 et 100% (fig.14 et fig.15)

. la concentration des deux produits se stabilise après 5 minutes de réaction, ce qui se traduit par un palier,

. le nombre de moles de monoxyde de carbone est toujours supérieur à 80% qu'à 100% d'isooctane quel que soit le degré d'avancement de la réaction,

. le nombre de moles de dioxyde de carbone croît plus rapidement à 80% qu'à 100% dans la première phase de la réaction ; puis la tendance s'inverse et au niveau du palier, la quantité de dioxyde de carbone est plus importante à 100% d'isooctane,

. pour un pourcentage donné en isooctane, la fraction de monoxyde de carbone présente au niveau du palier est plus grande que celle du dioxyde de carbone.

b) Variation du nombre de moles de monoxyde et de dioxyde de carbone après la flamme froide, en fonction du pourcentage en isooctane (fig.16 et 17)

Leur quantité diminue lorsque le pourcentage en isooctane augmente ; cette tendance est plus accentuée pour le monoxyde de carbone que pour le dioxyde de carbone.

### 3) Analyses par spectroscopie infrarouge

Nous avons essentiellement suivi certains dérivés carbonylés et la quantité totale d'hydrocarbures légers.

En ce qui concerne les dérivés carbonylés, le fait que les essais ont eu lieu en phase gazeuse limite

l'analyse aux seuls produits ayant un nombre d'atomes de carbone inférieur à quatre. De plus, la confrontation des spectres obtenus avec ceux\* de l'acétone, du propanal, de l'acétaldéhyde et du formaldéhyde, montre que la fraction d'acétone est vingt fois plus importante que celle des autres produits ; c'est donc pratiquement l'acétone que nous avons suivie avec des traces des autres produits de combustion (nous ne les mentionnerons plus par la suite).

Nous ne reproduisons que les essais effectués à une pression de 700 torr comme pour les analyses chromatographiques.

a) L'acétone

La fraction d'acétone croît constamment en fonction du temps jusqu'à atteindre un palier au bout de deux minutes quelles que soient les proportions du mélange. (fig.18).

A un instant donné, la quantité d'acétone croît lorsque le pourcentage d'isooctane augmente (fig.19).

b) La quantité totale d'hydrocarbures légers

Leur quantité varie peu en fonction du temps, nous n'avons donc pas traduit leur évolution. Quant à leur variation en fonction du pourcentage d'isooctane, on peut remarquer une légère diminution lorsque le pourcentage en isooctane croît.

4) Récapitulation des résultats des analyses

a) Le long de la limite de flamme froide

Le rendement en formaldéhyde et en peroxyde d'hydrogène décroît lorsque le pourcentage en isooctane croît ; aucun des autres produits n'a pu être dosé.

b) A pression constante

→ En fonction du temps. Le rendement en :

---

\* Les différents produits ont été utilisés dans une plage de concentration proche de celle des produits de combustion effectivement obtenus après réaction.

- monoxyde et dioxyde de carbone augmente ;

. pour le monoxyde de carbone, il est toujours supérieur à 80% qu'à 100% en isoctane.

. pour le dioxyde de carbone, le rendement est d'abord supérieur à 80% en isoctane qu'à 100% ; après 1 minute, la tendance s'inverse.

- l'acétone augmente ; sa concentration est toujours supérieure à 100% qu'à 80%.

- la quantité totale d'hydrocarbures légers reste sensiblement constante.

→ après la première flamme froide.

Le rendement des deux oxydes de carbone diminue quand le pourcentage d'isoctane croît.

## D) DISCUSSION ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

### I) Etude comparée des résultats

A partir d'une caractéristique de la flamme froide, nous avons déterminé un indice d'octane. De l'examen des trois premiers tableaux de résultats, on peut faire les remarques suivantes :

- L'écart avec l'indice "Recherche" est d'autant plus important que le délai de la première flamme froide après la limite est plus important (fig.4).

- L'indice d'octane des hydrocarbures cycliques est supérieur à celui des isomères linéaires (cf indice "Recherche") ; de plus, pour les trois hydrocarbures cycliques étudiés, les indices "Recherche" sont supérieurs aux indices repérés à partir d'une caractéristique de la flamme froide.

- Les écarts les plus importants concernent essentiellement les indices "Recherche" supérieurs à 100 ; or, dans ce cas, la méthode  $F_1$  aboutissant à cet indice subit une modification (par. A<sub>II</sub>).

II) Corrélation entre les mécanismes d'oxydation des hydrocarbures et l'indice d'octane déterminé à partir d'une caractéristique de la flamme froide

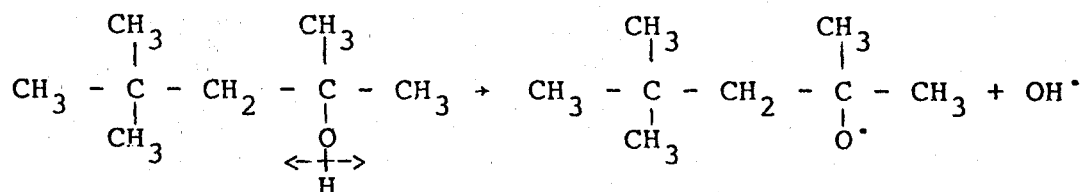
De l'examen des tableaux de résultats, il s'avère que les résultats les plus satisfaisants sont obtenus à partir de la détermination de la période d'induction de la première flamme froide. On pourrait donc déplorer que la courbe  $\tau = f$  (% isooctane) varie peu pour les mélanges allant de 80 à 85% d'isooctane ; mais les essences ordinaires ont toujours des indices supérieurs à 85% : la précision, par cette méthode, n'en est donc pas affectée.

En ce qui concerne l'allure de cette courbe (fig.6), elle correspond à deux types d'observations faites au laboratoire dans le cadre de l'étude des mécanismes d'oxydation du néopentane (17) et du n-décane (14). Elle est en relation avec l'existence de mécanismes d'oxydation concurrentiels appelés  $L_1$  et  $L_2$  (18, 19). Rappelons que les mécanismes  $L_1$  et  $L_2$  sont caractérisés notamment par des étapes de ramification différentes mettant en jeu respectivement les hydroperoxydes et les peracides. Les figures 21a et 21b représentent les allures de la période  $\tau$  en fonction de la concentration d'hydrocarbure dans l'oxygène sur une isotherme dans le cas du néopentane et du n-décane. En opérant ainsi, on passe donc d'un domaine paramétrique où prédomine le mécanisme  $L_2$  à un autre où le mécanisme  $L_1$  prévaut ; au premier sont associés des délais courts et au second des délais longs.

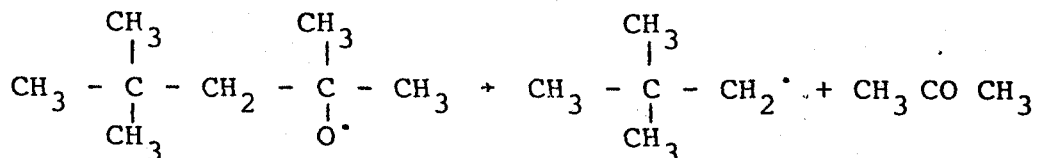
Etant donné la complexité des phénomènes de combustion d'une part et la proportion variable des composants des essences, l'étude des mécanismes d'oxydation avec celles-ci est pratiquement impossible ; aussi, restreindrons-nous la portée de cette discussion au seul cas d'un mélange de deux hydrocarbures, l'un ayant tendance à augmenter l'indice d'octane, l'autre à le diminuer. En limitant ainsi le choix des hydrocarbures, il nous sera possible d'estimer l'importance relative des deux mécanismes ,

donc des délais et leur incidence sur l'indice d'octane. C'est essentiellement en s'attachant aux produits de décomposition issus des hydroperoxydes moléculaires et des peracides qu'on appréciera la prépondérance de ces mécanismes.

- au mécanisme  $L_1$  est associée la formation d'acétone par décomposition ; par exemple de l'hydroperoxyde suivant :



puis coupure en  $\beta$  de ce radical alcoxy libérant l'acétone:



ce radical formé étant susceptible de libérer aussi de l'acétone après oxydation (20).

- au mécanisme  $L_2$  est associée la formation des acides organiques et des oxydes de carbone par décomposition des peracides.

Ayant ainsi justifié le suivi des principaux produits de combustion et notamment l'acétone et les oxydes de carbone, l'examen du tableau ci-dessous établi à la pression constante de 700 torr montre que le rendement:

- en oxydes de carbone diminue avec le pourcentage d'isooctane ; ce rendement varie plus avec le monoxyde qu'avec le dioxyde de carbone.

- en acétone est important et augmente avec le pourcentage d'isooctane.

produit suivi	% isooctane	
	80% isooctane	100% isooctane
monoxyde de carbone	6,03	2,18
dioxyde de carbone	2,27	1,16
acétone (et les fractions de dérivés carbonylés)	7,5	11,8

En nous limitant à ces trois produits, on peut donc conclure que le mécanisme  $L_1$  l'emporte sur le mécanisme  $L_2$  quand l'indice d'octane croît. Il en résulte que, dans le cas des deux hydrocarbures de référence étudiés, le fait de passer de mélanges riches en n-heptane, hydrocarbure linéaire, à d'autres riches en isooctane, hydrocarbure ramifié, fait basculer progressivement du mécanisme du type  $L_2$  au type  $L_1$ ; ceci explique le comportement similaire des courbes 2la et 2lb avec celle de la figure 6 où n'apparaît que le mécanisme  $L_1$ , du côté des mélanges riches en isooctane.

Il faut cependant remarquer que ces deux mécanismes sont toujours compétitifs et que d'autre part la réactivité du n-heptane est plus grande que celle de l'isooctane: cette remarque pourrait expliquer la présence d'hydrocarbures légers dès la phase initiale de la réaction et leur faible variation quand le pourcentage d'isooctane augmente.

Les études de Delfosse (14) ont montré l'influence de la structure de l'hydrocarbure sur le minimum de l'explosion froide et sur "l'aire" du domaine de flammes froides. Le fait d'utiliser une caractéristique de la flamme froide pour exprimer un indice d'octane rend donc dépendant la structure de l'hydrocarbure et l'indice ainsi obtenu.



Pour les essences non dopées, cet indice résulte de l'influence et de la compétition des mécanismes sous-jacents qui affectent :

- spécifiquement les différentes familles d'hydrocarbures
- quantitativement le mélange global suivant la proportion de ces différentes familles.

Un désaccord important subsiste dans le tableau III, entre l'I.O.<sub>r</sub> et l'indice "Recherche" du cyclopentane et du tétrahydrofurane. Outre que la méthode  $F_1$  est modifiée lorsque les indices sont supérieurs à 100 ( $A_{II\ 1b}$ ), on peut remarquer qu'il s'agit, dans ce cas, de cycles faciles à ouvrir. Avec l'appareillage et la technique utilisés les délais même courts demeurent égaux à quelques secondes alors que, dans le moteur, ces délais sont de l'ordre de la milliseconde ; il s'en suit que nous assistons vraisemblablement avec notre méthode à la combustion des produits d'ouverture du cycle et notamment du pentane : la similitude des diagrammes d'explosion du cyclopentane, et du n-pentane a d'ailleurs déjà été mise en évidence (21).

### III) Influence des additifs utilisés sur l'indice d'octane

L'action de ces deux additifs se traduit par une augmentation de la période d'induction de la première flamme froide.

Il semble qu'avec les additifs et les essences utilisés, il ne soit pas indispensable de pousser le "reformage" afin d'obtenir des indices d'octane élevés pour les essences sans additif ; en effet, on peut constater que plus l'indice de l'essence non dopée est faible, plus sa sensibilité à l'additif utilisé est importante. En se fixant une limite supérieure en pourcentage d'additif égale à 10%, l'indice d'octane maximum correspondant est de 97 : le coût de l'additif et la modification éventuelle

de la conception du moteur sont à considérer.

#### IV) Conclusion

L'accord avec l'indice "Recherche" reste limité à un certain nombre d'hydrocarbures ; néanmoins, par sa simplicité , sa rapidité et son prix de revient, cette méthode, basée sur la quantification d'une caractéristique de la flamme froide ouvre des perspectives intéressantes pour l'estimation d'un indice d'octane.

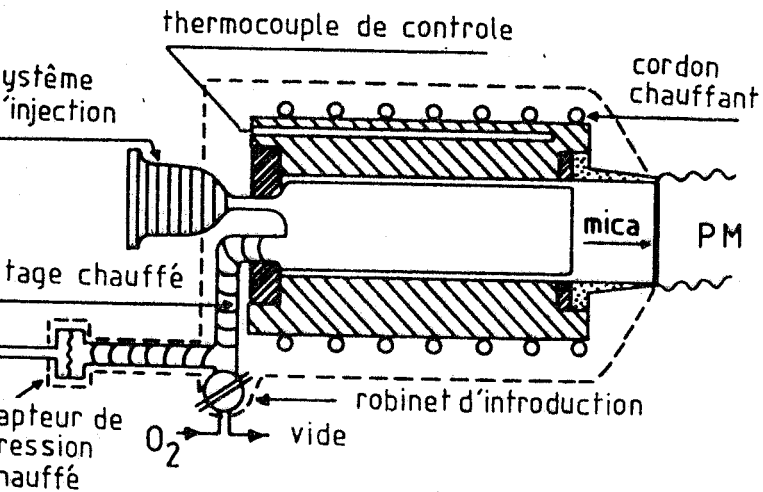


Fig. 1

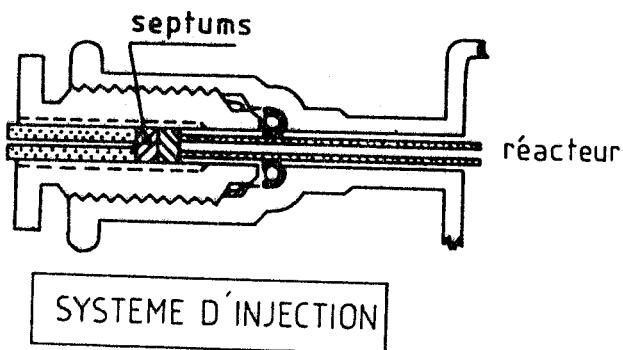


Fig. 2

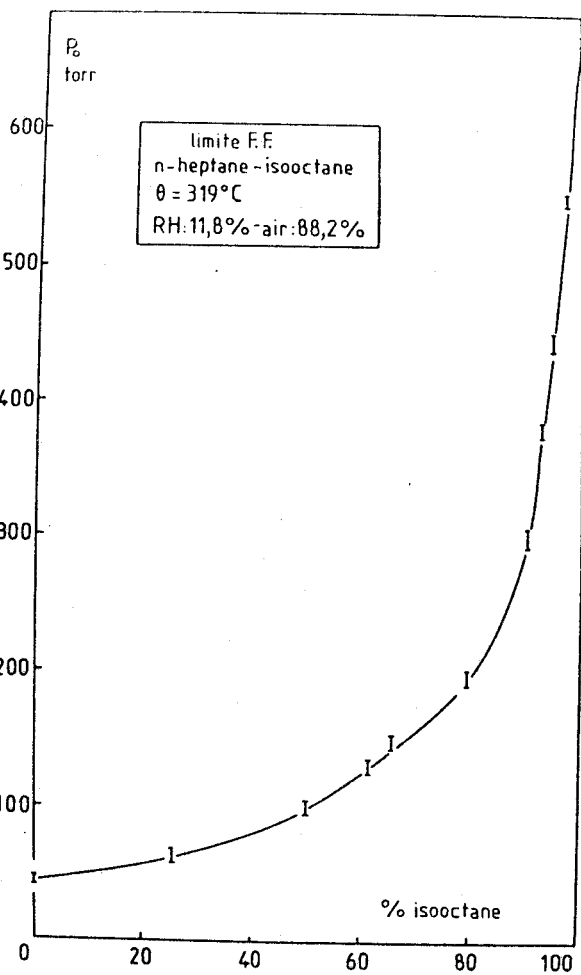


Fig. 3a

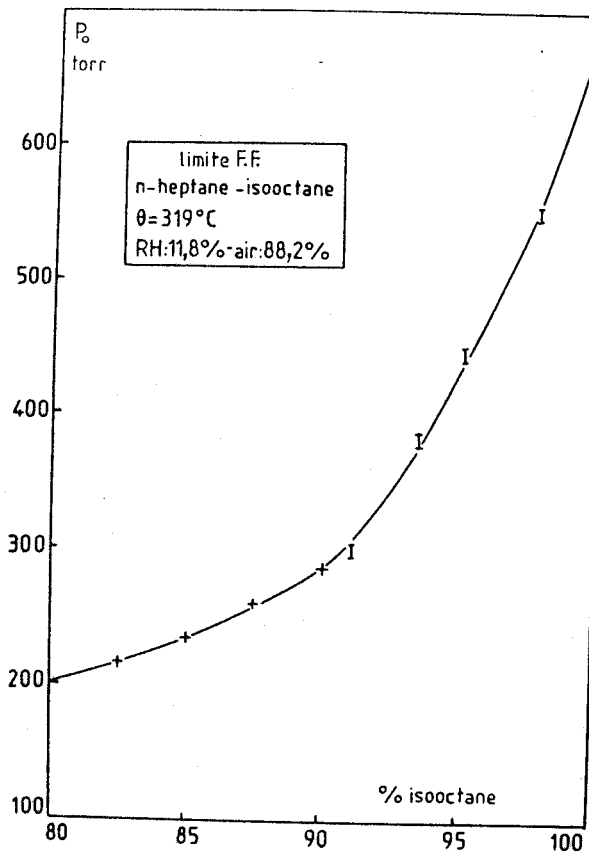


Fig. 3b

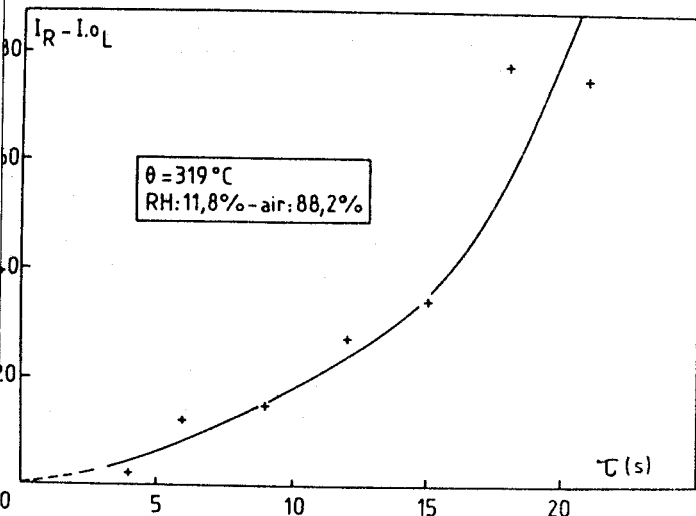


Fig.4

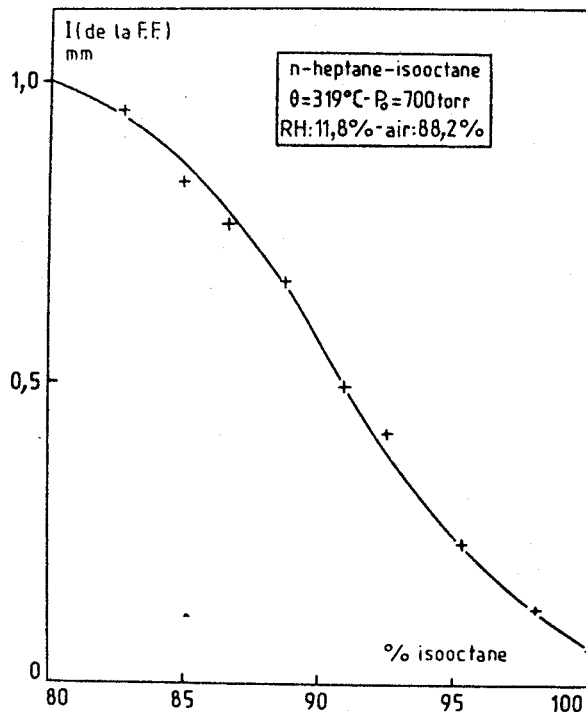


Fig.5

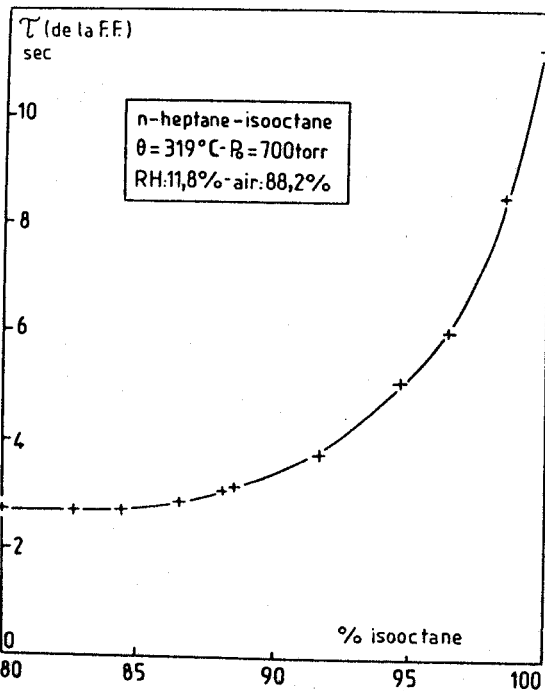


Fig.6

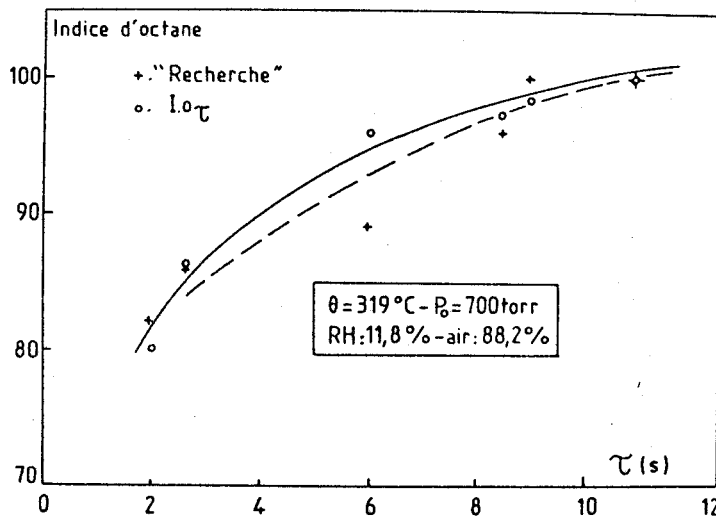


Fig.7



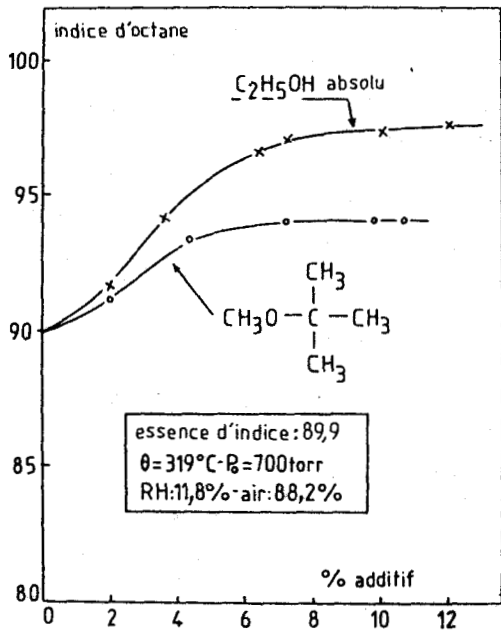


Fig. 8

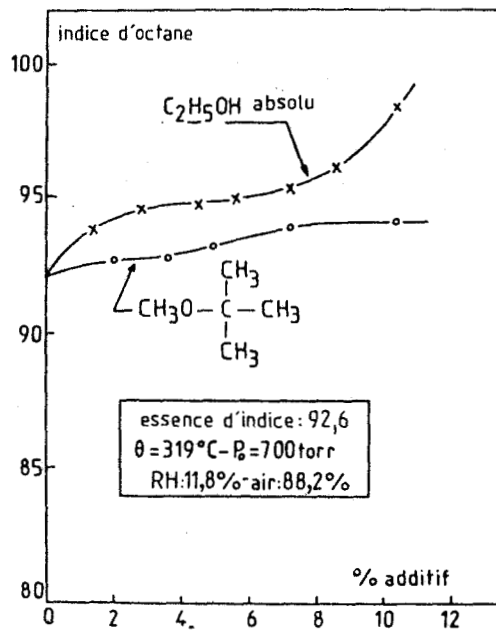


Fig. 9

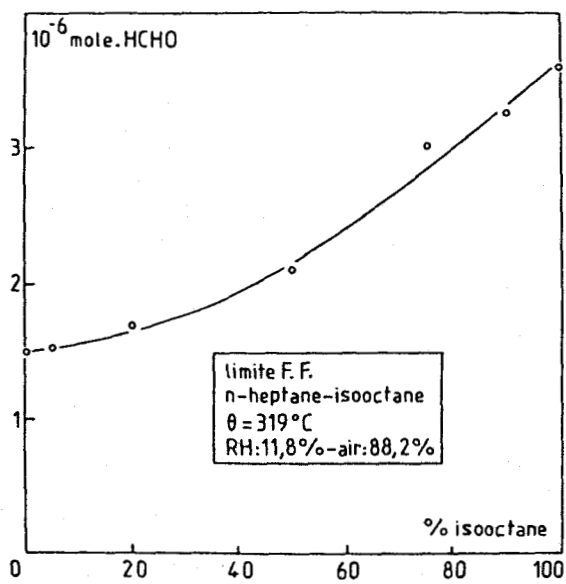


Fig. 10a

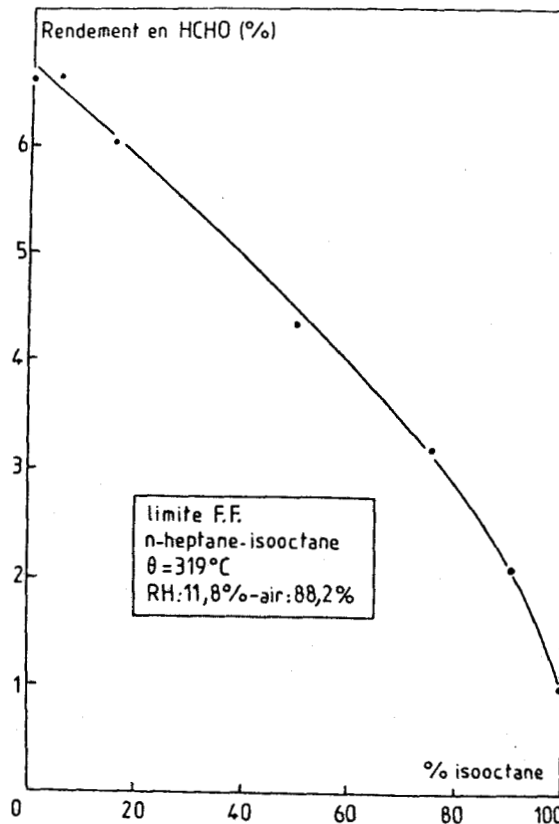


Fig. 10b

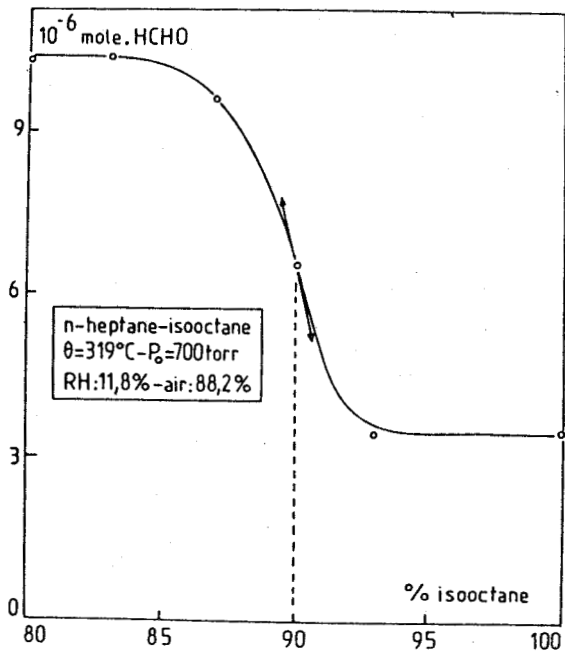


Fig. 11a

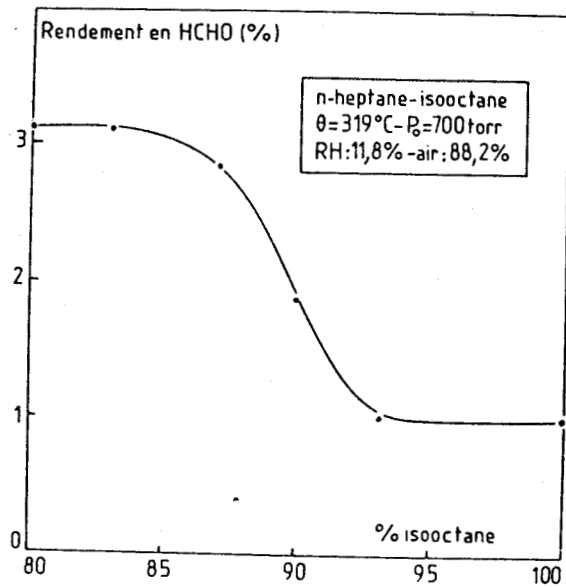


Fig. 11b

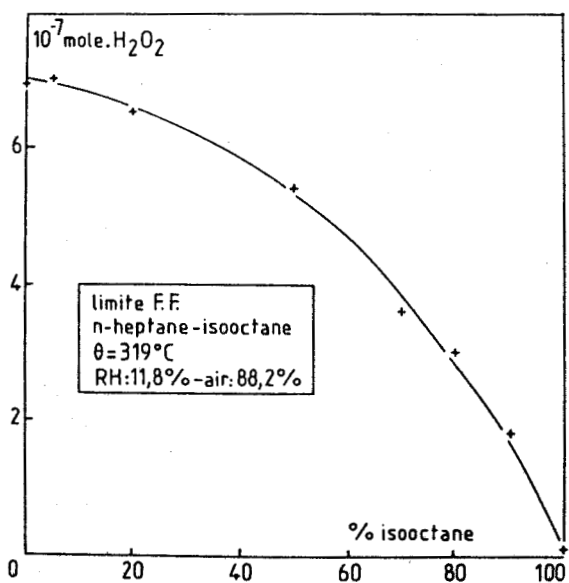


Fig. 12a

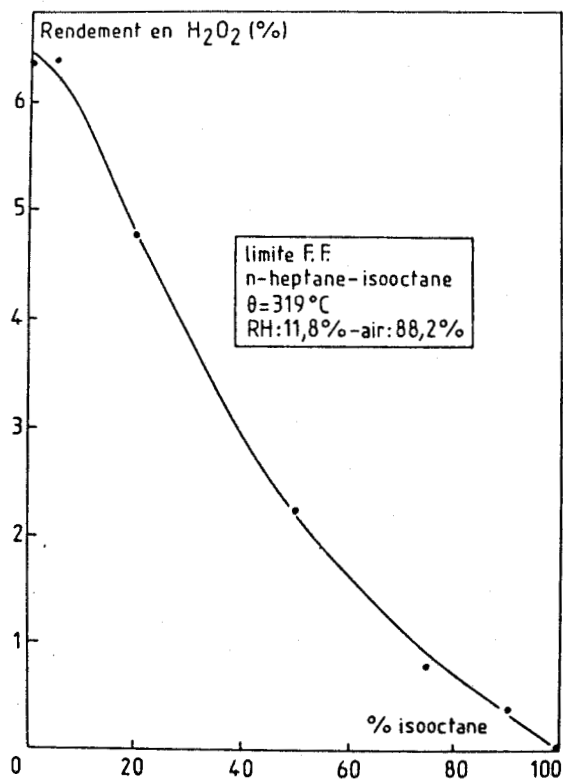


Fig. 12b

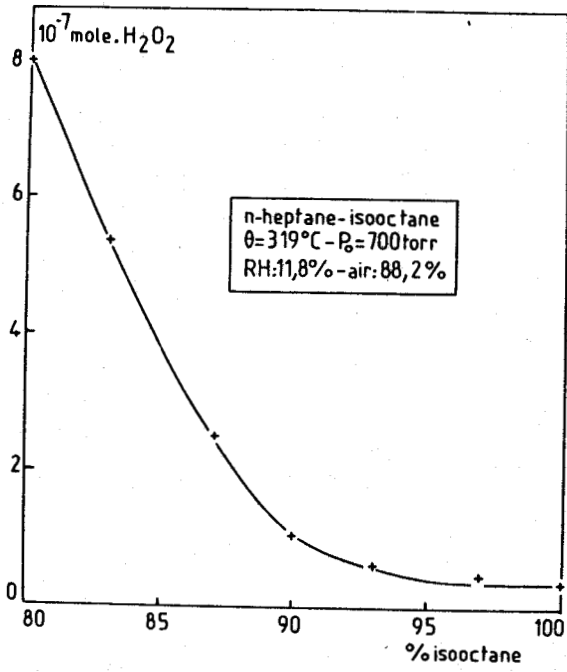


Fig. 13a

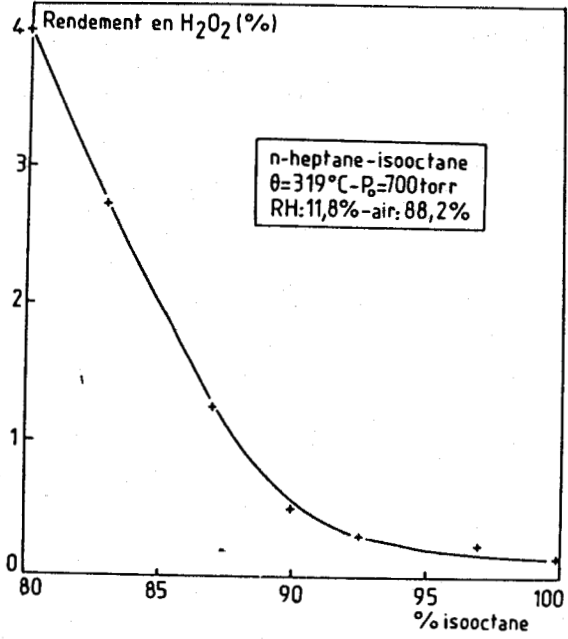


Fig. 13b

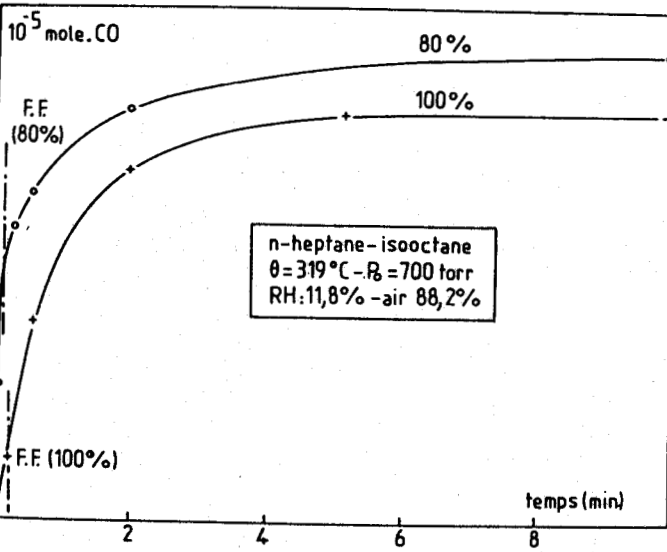


Fig. 14

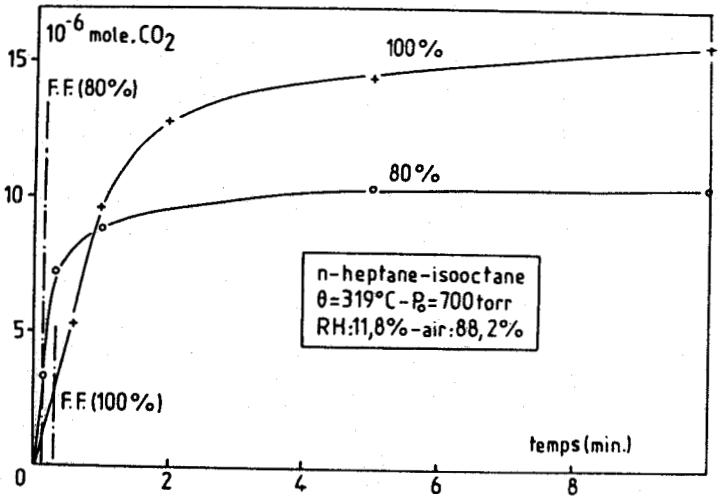


Fig. 15

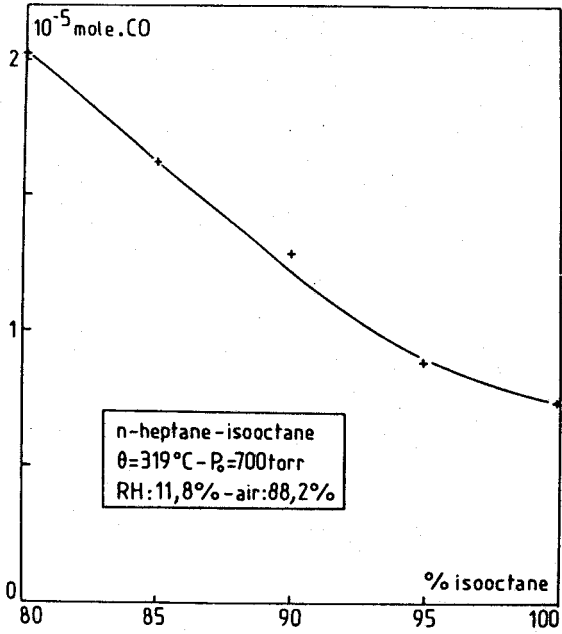


Fig.16

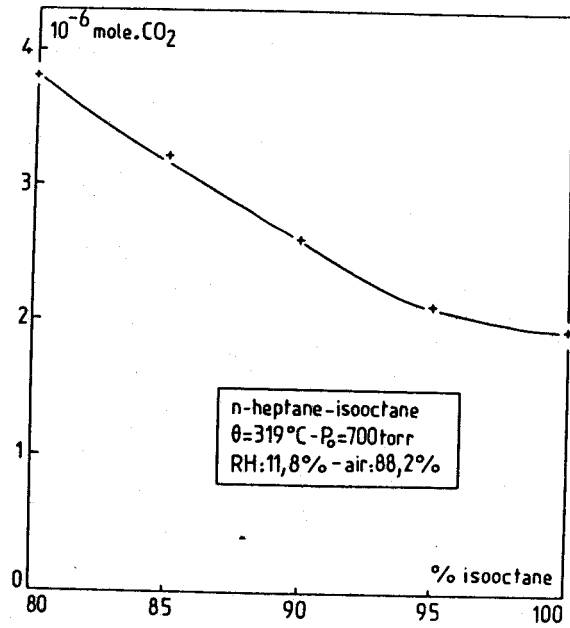


Fig.17

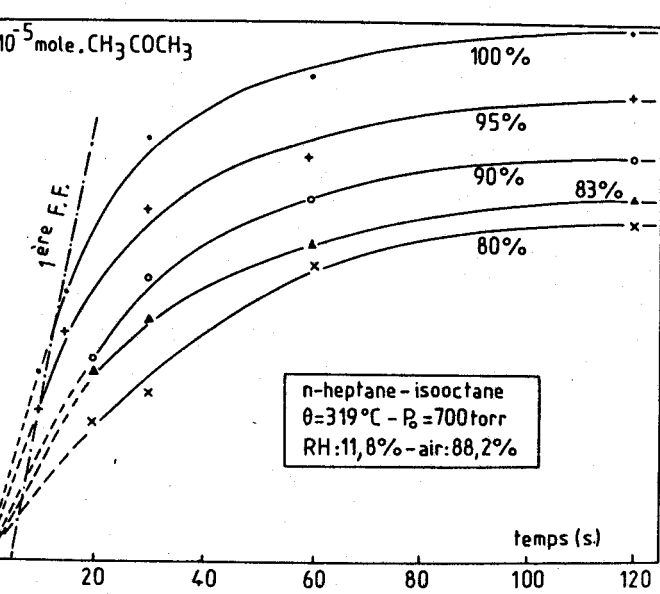


Fig.18

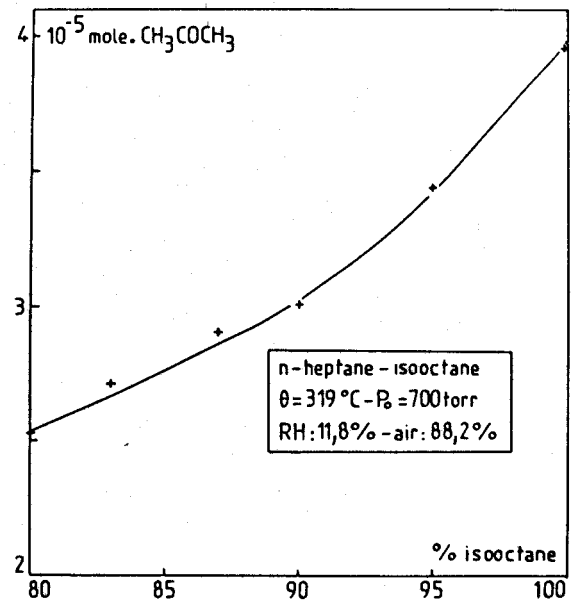


Fig.19



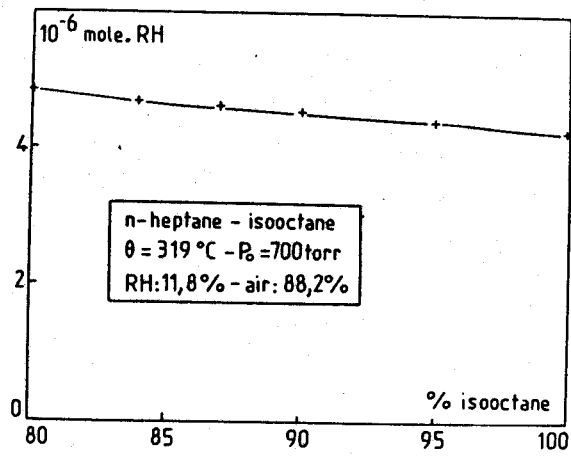


Fig.20

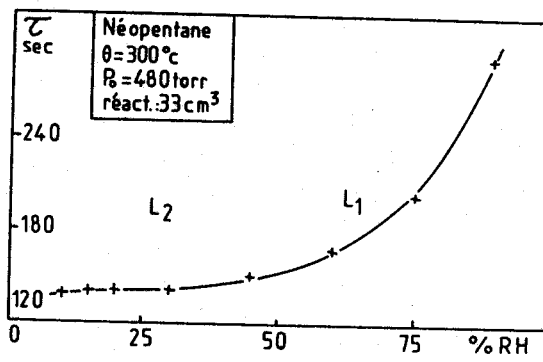


Fig.21a

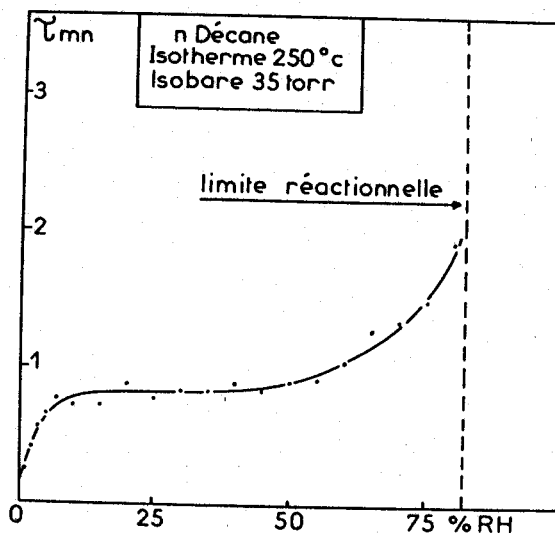


Fig.21b

BIBLIOGRAPHIE

- (1) Manual for Rating Motor Fuels by Research and Motor Methods. A.S.T.M. Publication, 6ème édition, (1969)
- (2) Méthodes d'essais des produits pétroliers ; Publication du Bureau de Normalisation du Pétrole, (1964)
- (3) Myers M.E., Stollsteimer Jr. J., Wims M. - Anal. Chem. 47, n°13, 2301, (Nov. 1975)
- (4) Lurgeau C., Espiau B., Barras F. - Rev. Inst. Franc. du Pétrole, XXXIV, n°4, 669, (1979)
- (5) Antonik S., Delfosse L., Baillet C. - Bull. Soc. Chim. de France, n°6, 1887, (1973)
- (6) Baillet C., Delfosse L., Lucquin M. - C.R. Acad. Sci., Paris, série C, 272, 1446, (1971)
- (7) Fenske E.R., Pasik L.F. - Determining a parameter such as octane number of a hydrocarbon composition utilising cool flame combustion, - Brevet U.S., 3531, 255, (1970)
- (8) Arcas Model 81L, Laboratory octane analyzer, Foxboro analytical - A division of the Foxboro Company
- (9) Stepanskii Ya. You., Lablonski E.S., Bykov U.I. - Recherches sur la dépendance des caractéristiques du processus d'oxydation froide des mélanges d'hydrocarbures vis à vis de leurs indices d'octane - Fiz. Gerenia Uzryva, vol.18, n°1, (1982)
- (10) Diamy A.M. - These de doctorat de Sciences Physiques, Paris, (1967)
- (11) Ben Aïm R.I., Lucquin M. - Oxydation and Combustion Reviews, vol.1, Tipper (editor) Elsevier Publishing Company, Amsterdam (1965)
- (12) Karbassian A., Ben Aïm R.I., Chamboux J., Viossat V. - Revue de l'Institut Français du Pétrole, vol.36, n°6, (1981)

- (13) Scache D. - D.E.A., paragr. V, (1981)
- (14) Delfosse L. - Thèse Lille, CNRS AO 9147, p.13, (1973)
- (15) European Chemical Newq, (1975), p.41
- (16) Chemteck, (1975), p.518
- (17) Antonik S. et Lucquin M. - Bull. Soc. Chim., 2796, (1968)
- (18) Antonik S. et Lucquin M. - Bull. Soc. Chim., 4043, (1968)
- (19) Antonik S. et Lucquin M. - Bull. Soc. Chim., 2271, (1972)
- (20) Antonik S. - Thèse Lille, CNRS AO 5287, (1971)
- (21) Lucquin M. - Bull. Soc. Chim., 1003, (1958)

CHAPITRE II

DÉTERMINATION D'UN INDICE DE CÉTANE

## A) PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU MOTEUR À ALLUMAGE PAR COMPRESSION.

On ne peut améliorer autant qu'on le souhaiterait le rendement des moteurs à allumage commandé en augmentant le taux de compression pour des raisons liées à la fois à la nature du carburant et aux contraintes accrues apportées aux matériaux. Dans les moteurs à allumage par compression, du type DIESEL, les obstacles signalés précédemment disparaissent si l'explosion est remplacée par une combustion progressive à pression constante.

Bien que le moteur de type DIESEL ne soit qu'un exemple (important) des moteurs à allumage par compression, nous assimilerons l'un à l'autre au niveau de la combustion.

### I) Principe (1)

Par compression, on élève la température du comburant ; si la température atteinte est suffisante, l'injection d'un hydrocarbure liquide, susceptible de se vaporiser, porte le mélange réactionnel dans les conditions d'autoinflammation : le brouillard s'enflamme et brûle quel que soit l'excès d'air. Les différences essentielles entre les deux types de moteur se situent donc au niveau de :

- l'admission : c'est le mélange carburant et comburant qui est comprimé dans le cas d'un moteur à allumage commandé, alors que dans le moteur à compression, c'est d'abord le comburant qui est comprimé.

- l'aspect physique des constituants : le mélange est hétérogène pendant la phase de combustion dans le cas du moteur DIESEL.

- l'inflammation du mélange : il s'agit d'une autoinflammation pour les moteurs à allumage par compression et d'une inflammation déclenchée par une étincelle (électrique) dans le cas des moteurs à allumage commandé.

A ces trois remarques se rattachent des notions thermodynamiques, physiques et chimiques qui différencient le phénomène de combustion, suivant la conception envisagée. Nous restreindrons la portée de cette étude aux phénomènes liés à l'inflammation, l'autoinflammation et au délai d'autoinflammation du carburant dans un moteur de conception fondamentalement différente de celle du moteur à allumage commandé (2).

## II) Cycle du moteur DIESEL en coordonnées de Clapeyron; rendement

### 1) Cycle théorique de Joule (3) (4)

Le fonctionnement du moteur DIESEL à quatre temps est le suivant (fig. 1a) :

1er temps : le piston s'éloigne du fond du cylindre et aspire de l'air pendant toute sa course ; ce premier temps est représenté par le segment AB (admission).

2ème temps : le piston revient et comprime l'air enfermé dans le cylindre : cette compression, qui est représentée par l'adiabatique BC, va jusque 40 et même 50 bars ; elle élève la température de l'air (600°C) pour que le liquide combustible puisse s'enflammer par autoinflammation.

3ème temps : à ce moment, l'aiguille d'injection laisse passer le liquide combustible ; celui-ci est lancé sous forme de gouttelettes par de l'air comprimé. Les gouttelettes s'enflamment à mesure qu'elles arrivent dans le cylindre et, on peut admettre que la combustion se fait à pression constante, suivant CD ; on arrête l'arrivée du liquide combustible quand le piston a accompli approximativement le dixième de sa course ; puis les gaz se détendent adiabatiquement suivant DE.

4ème temps : après une brusque chute de la pression (EB), le piston revient et chasse les gaz brûlés à l'extérieur; l'échappement est représenté par le segment BA.

## 2) Rendement

Le rendement thermodynamique dépasse 45% ; il augmente lorsque l'on tend vers une combustion à volume constant\* C'D' et C". Le rendement du moteur type DIESEL est donc supérieur à celui du moteur à allumage commandé.

## 3) Cycle réel (5)

Le cycle réel diffère notablement du cycle théorique: (fig. 1b) ; la combustion ne s'effectue jamais exactement à pression constante ; il y a toujours une légère augmentation de pression au début de la combustion (parcours CD) et la pression ne diminue pas brusquement de E en B. Les causes qui diminuent le rendement sont celles rencontrées dans le moteur à allumage commandé.

La vitesse initiale des gouttelettes pénétrant dans la chambre de combustion doit être compatible avec la vitesse de rotation du moteur. L'autoinflammation se produit avec un certain retard par rapport au début de l'injection.

## B) INDICE DE CÉTANE D'UN GAS-OIL

### 1) Définition ; méthodes expérimentales normalisées

Les conditions thermodynamiques propres à l'autoinflammation étant requises (température et pression), c'est l'aptitude d'un carburant à s'auto-enflammer qui le différencie d'un autre, dans les mêmes conditions. Comme l'indice d'octane, il ne s'agit pas d'une grandeur physicochimique définie, mais d'une comparaison du comportement, vis à vis de l'autoinflammation, d'un gas-oil avec des mélanges formés de deux hydrocarbures de référence : le n-hexadécane\*\* et le méthyl-naphtalène ; au n-hexadécane (ou cétane) qui s'auto-enflamme

---

\* Annexe thermodynamique

\*\* le n-hexadécane a remplacé le n-hexadécène comme hydrocarbure de référence : en effet, ce dernier est instable au cours du temps.

rapidement après pulvérisation dans la chambre, on attribue un indice de cétane égal à 100 tandis qu'au méthyl-naphtalène qui s'auto-enflamme plus difficilement, on affecte un indice de cétane égal à 0.

Cette comparaison s'effectue sur moteur C.F.R. DIESEL (6). Deux méthodes normalisées sont utilisées actuellement (7) :

- Méthode de coïncidence d'autoinflammation : par modification du taux de compression, on recherche les proportions de mélange qui admettent le même délai que le carburant étudié.

- Méthode du retard à l'inflammation : le taux de compression étant fixé, on alimente le moteur avec le combustible à étudier. Au même taux de compression, on recherche les proportions de mélange de référence qui admettent le même délai que le carburant à tester.

Les spécifications françaises relatives aux gas-oils moteurs imposent un indice de cétane égal ou supérieur à 50.

## II) Calculs d'un indice assimilable à l'indice de cétane

La détermination expérimentale de l'indice de cétane étant longue et onéreuse, on a recherché des méthodes basées sur le calcul.

### 1) Méthode normalisée A.S.T.M.D. 975

Elle permet de déterminer un indice de cétane à partir de la masse volumique et du point milieu de la courbe de distillation du carburant considéré\*.

---

\* Annexe : caractéristique des carburants



## 2) Autres déterminations de l'indice de cétane par le calcul

Deux autres relations permettent de donner une valeur approximative de l'indice de cétane.

- Indice de cétane = point d'aniline\* (°C) - 15,5
- Indice de cétane = 0,72 DIESEL index + 10

## 3) DIESEL index

Cet indice est donné par la relation :

$$\text{DIESEL index} = \frac{\text{point d'aniline (°F)} \cdot \text{densité A.P.I.}}{100}$$

## 4) Estimation d'un indice de cétane pour les esters d'acide gras (8)

Dans la perspective d'utilisation d'huiles végétales dans les moteurs de type DIESEL, l'auteur propose une relation du même type que celle du paragraphe 3) pour des dérivés méthylés d'esters d'acides gras ; il aboutit à une formule:

$$\text{Cétane index} = 58,1 + 2,8 \left( \frac{n-8}{2} \right) \cdot 15,9. \quad (\text{nombre de double liaisons})$$

où n est le nombre d'atomes de carbone de la chaîne carbonée aliphatique.

## C) MÉTHODE EXPÉRIMENTALE UTILISÉE POUR LA DÉTERMINATION D'UN INDICE DE CÉTANE À PARTIR D'UNE CARACTÉRISTIQUE DE LA FLAMME FROIDE

- Comme pour l'étude de l'indice d'octane, nous avons tenté de déterminer un indice de cétane à partir d'une caractéristique de la flamme froide : limite, intensité et période d'induction de la flamme froide, soit respectivement I.C.<sub>L</sub>, I.C.<sub>I</sub>, I.C.<sub>T</sub>.

---

\* La détermination du point d'aniline consiste à repérer la température à laquelle un mélange à parties égales d'hydrocarbures et d'aniline devient complètement miscible.

- La méthode de détermination de cet indice ainsi que les conditions expérimentales étant identiques à celles de l'indice d'octane ; il sera donc possible de procéder à une comparaison des indices obtenus, vue sous l'aspect du seul carburant, c'est-à-dire son aptitude à l'autoinflammation ; le choix d'un carburant adapté en découle.

- La technique d'injection employée sera identique à celle qui a servi à déterminer un indice d'octane, comme pour ce dernier nous injecterons, en un premier temps, le combustible dans le réacteur vide puis le comburant (air). L'admission du comburant puis du combustible qui se rapproche davantage des conditions de fonctionnement du moteur à compression sera également envisagée : les phénomènes liés à la vaporisation du combustible liquide injecté seront alors à considérer.

Ce sont ces travaux qui ont fait l'objet de notre étude expérimentale.

## D) RÉSULTATS

### I) Injection du combustible puis admission du comburant

#### 1) Diagramme d'explosion du n-hexadécane dans l'oxygène (fig. 2)

Ce diagramme, établi en phase gazeuse, met en évidence les trois domaines caractéristiques : réaction lente, flamme froide et flamme normale de second stade ( $FN_2$ ); dans le domaine des flammes froides, on observe, dans certaines conditions, deux flammes froides. La limite de deuxième stade est peu perturbée et les lobes peu marqués. Ces caractéristiques ont déjà été signalées pour le n-décane (9) et semblent être spécifiques des hydrocarbures lourds.

#### 2) Identification des limites d'explosion froide en fonction du % en hexadécane dans le repère ( $\theta$ , P)

##### a) Déplacement des limites d'explosion froide

en fonction du % en n-hexadécane dans le repère ( $\theta$ , P)

L'examen de la figure 3 montre que :

- les limites de la flamme froide sont relevées et donc la réactivité diminue quand le pourcentage en n-hexadécane diminue ; dans le domaine de température et de pression explorées ( $200^{\circ}\text{C} < \theta < 360^{\circ}\text{C}$ ,  $P_t < \text{pression atmosphérique}$ ), nous n'avons pas mis en évidence de flamme froide pour le composé aromatique étalon.

- pour des températures comprises entre  $240^{\circ}\text{C}$  et  $360^{\circ}\text{C}$  et à pression constante, l'intensité de la première flamme froide et sa période d'induction augmentent quand la température diminue ; ceci a été vérifié pour cinq valeurs de la pression totale : 100, 120, 130, 140 torr .

- les limites du domaine de flammes froides sont peu nettes au-delà de  $330^{\circ}\text{C}$ .

b) Etude du déplacement de la limite de la première flamme froide, des variations de l'intensité lumineuse et de la période d'induction de cette première flamme froide en fonction du pourcentage de n-hexadécane.

- la limite de flamme froide se relève quand le % de cétane diminue, donc la réactivité diminue dans ce sens (fig. 4) ; ceci confirme les résultats du paragraphe précédent ainsi que le rôle respectif des hydrocarbures étalons dans cette phase de la combustion.

- l'intensité de la flamme froide décroît linéairement avec le % de cétane ; elle est plus élevée sur l'isobare 80 torr qu'à 60 torr (fig. 5).

- la période d'induction croît quand le % de cétane diminue ; sa durée est toujours plus importante à 60 torr qu'à 80 torr (fig. 6).

3) Applications à la détermination d'un indice de cétane

## a) Première série de résultats

## α) cas des hydrocarbures

- L'isobare à 60 torr a été choisi pour la mesure de la période d'induction et l'intensité lumineuse de la flamme froide.

hydrocarbure	IC <sub>L</sub>	IC <sub>r</sub>	IC <sub>I</sub>
{ Octane	42	79	81
{ Octène 1	16	pas de FF	pas de FF
Nonane	49	87	82
{ n décane	52	87	89
{ Décène 1	28	pas de FF	pas de FF
{ Dodécane	54	90	92
{ Dodécène 1	39	pas de FF	pas de FF, limite proche
{ Tétradécane	78	100	100
{ Tétradécène 1	45	53	49
{ Hecadécane	100	100	100
{ Hexadécène 1	47	63	54

- Certains hydrocarbures ne possèdent pas de flamme froide dans les conditions de l'expérience ; il n'est alors pas possible de leur attribuer un indice de cétane avec cette méthode.

- L'examen des figures 7 et 8 montre que l'indice de cétane augmente avec le nombre d'atomes de carbone pour les hydrocarbures saturés aliphatiques dont le nombre d'atomes de carbone est compris entre 7 et 16. Cette remarque est compatible avec des travaux antérieurs (10) et confirme ainsi la validité de la méthode.

- Si on compare les indices des hydrocarbures saturés aliphatiques à ceux des alcènes homologues, l'indice de ces derniers est toujours inférieur ; les limites de flamme froide des hydrocarbures non saturés et ayant 1 seule double liaison en bout de chaîne sont relevées (fig. 9); nous avons pu, par ailleurs, le constater en recherchant

l'indice de cétane d'hydrocarbures saturés aliphatiques renfermant des traces d'impuretés et notamment des oléfines: leur indice est abaissé par rapport aux mêmes hydrocarbures saturés, sans oléfine. Pour confirmer ce résultat, nous avons effectué des mélanges octane-octène 1 dans des proportions différentes ; le choix de ce couple d'hydrocarbures a été guidé par le fait qu'ils présentent l'écart relatif en pression le plus important au niveau de la limite de la flamme froide. L'examen de la figure 10 montre que l'indice de cétane obtenu à partir de la limite de la flamme froide, soit  $IC_L$ , décroît quand la proportion d'octène 1 croît.

Dans la série des oléfines étudiées, l'indice de cétane  $IC_L$  augmente avec le nombre d'atomes de carbone (fig. 11) dans le cas où la double liaison est en bout de chaîne linéaire.

*β) cas des mélanges d'hydrocarbures : gas-oils*

Nous n'avons pu obtenir que deux gas-oils d'indice de cétane connu ; ils nous ont été livrés par la Société Française PEUGEOT ; nous les appellerons indices "PEUGEOT".

Les limites de flamme froide des gas-oils fournis se situent à des pressions supérieures à 60 torr ; avec les courbes d'étalonnages établies à 60 torr, c'est-à-dire intensité lumineuse et période d'induction, il n'a donc pas été possible d'affecter un indice de cétane  $IC_L$  et  $IC_T$ , à cette pression : les conditions expérimentales ne sont pas réunies pour l'obtention des seules flammes froides.

Les indices obtenus avec la limite de flamme froide ont donné les résultats suivants. L'indice obtenu est plus faible et présente un écart constant et dans le même sens par rapport à l'indice "PEUGEOT".

Carburant	IC <sub>L</sub>	Indice fourni par "PEUGEOT"
gas-oil normal 6A	42	52 ± 2
gas-oil AMOCO	34	44 ± 2

## b) Deuxième série de résultats

Afin :

- de compléter le tableau de résultats,
  - d'affiner les indices trouvés par rapport aux indices "fournis par" la Société "PEUGEOT",
- nous avons effectué de nouvelles courbes d'étalonnage à 80 torr pour obtenir une flamme froide avec ces gas-oils.

## a) cas des hydrocarbures

hydrocarbures	IC <sub>L</sub>	IC <sub>τ</sub>	IC <sub>I</sub>
Octane	42	60	75
Octène 1	16	pas de FF	pas de FF
n décane	52	75	77
Décène 1	28	31	34
undécane	53	76	76
Dodécane	54	77	75
Dodécène 1	39	47	44
Tétradécane	78	100	100
Tétradécène 1	45	45	38
Hecadécane	100	100	100
Hexadécène 1	47	51	46

TABLEAU II

Il y a confirmation en ce qui concerne :

- l'évolution de l'indice en fonction du nombre d'atomes de carbone,
- la comparaison entre les indices de cétane des hydrocarbures saturés aliphatiques et leurs homologues non saturés ayant une seule double liaison en bout de chaîne.

Remarques : des indices de cétane connus en plus grand nombre s'avèreraient indispensables pour les confronter avec nos résultats.

β) cas des gas-oils

Carburant	$II_L$	$IC_T$	$IC_I$	Indice "PEUGEOT"
gas-oil normal 6A	42	46	53	$52 \pm 2$
gas-oil AMOCO	34	43	37	$44 \pm 2$

Les indices obtenus sont plus faibles que les indices "PEUGEOT".

II) Admission du comburant suivie d'une injection du combustible

Outre les raisons évoquées au paragraphe C, il s'agit aussi de tenter, par cette méthode, d'obtenir des indices de cétane compatibles avec les indices fournis.

1) Modification des conditions opératoires

La température est maintenue à 319°C. Dans le réacteur, la pression d'admission de l'air, utilisé comme comburant, est la pression atmosphérique : c'est la pression la plus élevée compatible avec l'installation, maximisant de plus les effets liés à la vaporisation du combustible par rapport à une injection de celui-ci dans un réacteur vide ; dans cet ordre d'injection, nous n'avons envisagé que le cas des hydrocarbures étalons et le n-tétradécane.

Pour obtenir une concentration en hydrocarbure égale à 11,8% par rapport à l'air, comme dans l'étude précédente, il aurait fallu injecter 29  $\mu$ l d'hydrocarbure liquide dans le réacteur ; mais, dans ces conditions, la pression de vapeur calculée ne correspond pas à celle qui existe effectivement dans le réacteur par suite de condensations partielles comme en témoigne l'enregistrement des variations de pression. Les essais ont donc porté sur 1,2 et 3  $\mu$ l de carburant correspondant à des pourcentages allant de 0,5 à 4% d'hydrocarbure et ceci dans les limites d'obtention d'une flamme froide.

2) Evolution de la période d'induction de la flamme froide en fonction du choix du couple d'hydrocarbures de référence

Parmi les trois manifestations liées à la première flamme froide, c'est la période d'induction qui a présenté les critères de répétabilité les plus satisfaisants ; c'est donc celle-ci que nous avons retenue pour étudier l'évolution d'une caractéristique de la flamme froide en fonction du pourcentage d'un des deux hydrocarbures dans le mélange. Le choix des constituants de ce dernier sera guidé par les caractéristiques physiques de chacun d'entre eux.

a) Couple n hexadécane-méthyl- $\alpha$  naphthalène (fig.12a, 12b et 12c)

Les courbes d'évolution de la période d'induction traduisent l'existence d'un minimum, situé approximativement à 50% du mélange.

L'allure des courbes ne permet pas de déterminer:

- un seul indice de cétane du fait de l'existence d'un minimum,
- un indice comparable aux indices connus, avec une bonne approximation.

Nous avons donc recherché expérimentalement les causes de l'extrémum obtenu, en particulier au niveau des caractéristiques physiques.

L'examen du tableau ci-dessous montre que la masse

	formule	masse molaire g.mol <sup>-1</sup>	densité (à 4°C)	point d'ébullition (°C)	Indice de cétane
cétane	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	226	0,773	286,5	100
méthyl- $\alpha$ naphthalène	C <sub>11</sub> H <sub>10</sub>	142	1,016	244,8	0



molaire, le point d'ébullition et la densité sont très différents d'un hydrocarbure à l'autre - En vue de préciser l'influence de ces facteurs sur la possibilité de déterminer un indice de cétane à partir des phénomènes observés, nous avons utilisé des couples d'hydrocarbures étalons ayant des caractéristiques voisines.

b) Couple de n heptane-isooctane (fig. 13)

Les caractéristiques de ces deux hydrocarbures limitées à la densité et au point d'ébullition sont les suivantes :

	formule	masse molaire g.mol <sup>-1</sup>	densité (à 4°C)	Point d'ébullition (°C)	Indice de octane
n heptane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100	0,683	98,4	0
isooctane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114	0,691	99,2	100

Les écarts entre les trois caractéristiques : masse molaire, densité et point d'ébullition sont nettement plus faibles avec ces deux hydrocarbures qu'avec les hydrocarbures précédents : n-hexadécane et méthyl- $\alpha$ naphtalène.

L'examen de la figure 13 montre que le minimum observé précédemment fait place à un palier ; l'allure de la courbe obtenue n'est pas tributaire de l'ordre d'introduction des réactifs alors qu'elle en dépendait fortement dans le cas précédent comme en témoigne la comparaison entre les figures 6 et 12.

c) Couple n-tétradécane-méthyl- $\alpha$ naphtalène

Pour confirmer les résultats précédents, nous avons recherché un hydrocarbure dont les constantes physiques étaient plus proches de celles du composé aromatique de référence que le n-hexadécane ; c'est le n-tétradécane qui nous a semblé le mieux répondre à ces conditions d'autant

plus qu'ils présentent une structure chimique voisine. Les constantes physiques du n-tétradécane à comparer au méthyl- $\alpha$ naphtalène sont :

formule	masse molaire g.mol <sup>-1</sup>	densité (4°C)	Point d'ébullition (°C)	Indice de cétane
C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>	198	0,763	253,5	non déterminé

L'examen de la figure 14 montre :

- l'existence d'un palier comme pour le couple n-heptane-  
isooctane,
- que ce palier correspond à une période d'induction plus courte que dans le cas précédent.

L'utilisation de cette courbe pour déterminer un indice de "cétane" a donné des écarts plus importants qu'avec la méthode précédente (paragraphe D) ; on peut néanmoins envisager l'emploi d'un indice de tétradécane "pour estimer le délai d'autoinflammation ; le n-tétradécane se substituant au n-hexadécane.

## E) DISCUSSION ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Nous envisagerons la discussion sur le plan des phénomènes liés à la combustion du carburant dans le réacteur précédemment décrit (chap. I).

Nous tenterons d'expliquer :

- le rôle et l'importance du délai d'autoinflammation, donc de l'indice de cétane,
- l'existence d'un minimum de la période d'induction, vers 50% du mélange des hydrocarbures de référence,
- les différences de comportement réactionnel constatées lorsqu'on inverse l'ordre d'introduction des réactifs.

Nous raisonnerons à la fois sur l'aspect thermodyna-

mique et cinétique pour étudier l'influence des différents facteurs : physiques et chimiques.

### I) Injection du combustible dans le réacteur vide

Compte tenu du volume du réacteur, de sa température et du volume d'hydrocarbure introduit, celui-ci est entièrement vaporisé : le contrôle expérimental à l'aide de la jauge (étalonnée) et le calcul thermodynamique indiquent sensiblement la même pression intérieure ; les faibles écarts constatés sont dûs aux erreurs expérimentales.

Du fait de sa masse et de sa nature, le four présente une inertie thermique importante et peut être considéré comme une source de chaleur à température constante vis à vis du réacteur en Pyrex ; on peut donc considérer que du fait de la bonne conductivité thermique de l'hydrocarbure, l'équilibre thermique est rapidement réalisé au sein de la masse gazeuse.

La vaporisation étant pratiquement instantanée (puisque dans le vide) et l'introduction du comburant se faisant 30 secondes plus tard, on peut admettre que la combustion se fera entièrement en phase gazeuse ; de plus la vitesse de propagation de la flamme ne sera pas limitée par la vitesse de vaporisation de l'hydrocarbure qui est, à cet instant totalement vaporisé. La période d'induction de la flamme froide que nous avons mesurée est donc essentiellement liée au seul délai chimique.

### II) Injection du combustible dans le réacteur contenant de l'air en équilibre thermique avec le four

On peut admettre les étapes successives suivantes (11) :

- fractionnement et pulvérisation par chocs avec frottements au contact de l'air porté à 319°C ; le jet de combustible se trouve déchiqueté en gouttelettes de dimensions et de formes diverses : la tension superficielle du combustible

liquide tend à donner à la goutte une forme sphérique. Le taux et la durée de pulvérisation dépendent de la viscosité de l'hydrocarbure et donc de sa température (12).

- vaporisation de l'hydrocarbure ; dès que la pulvérisation s'est accomplie, les échanges thermiques s'accroissent et les parties les plus volatiles du gas-oil s'évaporent : le liquide subsistant "s'épaissit". L'évaporation se développant, une couche de vapeur de plus en plus importante entoure la goutte et tend à isoler cette dernière du milieu extérieur, air ou air et gaz brûlés ; l'équilibre thermique s'établit lorsque la quantité de chaleur reçue par la goutte est égale à la quantité de chaleur absorbée par l'évaporation. La condition cinétique qui va contribuer à l'obtention de cet équilibre sera donc essentiellement régie par la vitesse d'évaporation de la forme :

$$\frac{dm}{dt} = \gamma k S \frac{dP_p}{dR} \quad (10)$$

avec :

- m, masse de la goutte
- k, coefficient de diffusion
- $P_p$ , pression partielle de vapeur de combustible à la surface de la goutte
- $\frac{dP_p}{dR}$ , gradient de la pression partielle de vapeur de combustible dans le milieu à la distance R du centre de la goutte supposée sphérique.

- $\gamma$  est un coefficient

- . égal à 1 lorsqu'aucune molécule de vapeur de combustible ne se trouve dans l'air chaud

- . inférieur à 1 et décroissant au fur et à mesure que la goutte s'échauffe

- . égal à 0 lorsque la goutte ayant atteint sa température d'ébullition sous la pression partielle régnant dans le réacteur est enveloppée continûment d'une couche de vapeur.

En se vaporisant, l'hydrocarbure emprunte essentiel-

lement de la chaleur au milieu ambiant, c'est-à-dire à l'air du réacteur dont la capacité thermique est faible devant celle de l'ensemble {four + réacteur}. Isolons thermodynamiquement le volume de gaz contenu dans le réacteur ; celui-ci voit donc, en un premier temps sa température s'abaisser: cette diminution de la température est d'autant plus grande que la chaleur de vaporisation du combustible liquide est plus élevée. L'ensemble {four + réacteur} va donc rétablir l'équilibre thermique par transfert de chaleur vers le milieu réactionnel.

Avec cette première fraction d'hydrocarbure gazeux, la réaction de combustion va pouvoir s'effectuer. Puis la possibilité d'une nouvelle vaporisation va induire une nouvelle phase de combustion avec un nouvel échange de chaleur entre les parois, les gaz frais et les gaz brûlés. Au total, les concentration et température des couches gazeuses en contact avec la masse liquide évoluent en s'enrichissant progressivement dans le temps en fractions d'hydrocarbures de plus en plus lourds. Chaque couche progresse en s'éloignant de la fraction restée liquide ; au fur et à mesure de la poursuite des échanges thermiques, sa température croît. Lorsque la température d'autoinflammation correspondante est atteinte, l'inflammation se produit.

### III) Interprétation et discussion des résultats

La combustion réalisée à partir d'un combustible liquide, réduit en gouttes, dans un milieu gazeux généralement comburant ou éventuellement composé d'un mélange de combustible, de comburant et de gaz brûlés, suit un processus très différent de celui de la combustion des mélanges gazeux homogènes; au délai chimique, lié à la vitesse d'oxydation de l'hydrocarbure se superpose un délai physique essentiellement tributaire de la viscosité et de l'aptitude à la vaporisation du combustible.

A la notion de délai global d'autoinflammation se rattache, comme nous l'avons vu la notion d'indice de

cétane ; un indice de cétane élevé correspond à un combustible qui s'auto-enflamme rapidement, restreignant ainsi la part de combustion non contrôlée. Le nombre des études publiées ainsi que les données numériques relatives à ce sujet sont peu nombreuses ; néanmoins pour de nombreux carburants cet indice est voisin de 50.

Le délai d'autoinflammation dépend des conditions thermodynamiques du milieu (T et P) et de l'aptitude du carburant à s'autoinflammer (natures physique et chimique). Pour les hydrocarbures, ce délai peut être exprimé par la relation:

$$\delta = A \frac{1}{P^n} e^{-E/RT} \quad (13)$$

A : constante qui dépend essentiellement de la nature et de l'état de pulvérisation du combustible

P : pression

n : coefficient voisin de 1

E : énergie d'activation

T : température absolue en K

Cette relation met en relief le rôle important joué par les paramètres physiques température et pression.

La vaporisation de l'hydrocarbure est possible mais du fait de la présence d'air puis d'air et de gaz brûlés, elle ne peut se faire que progressivement et par étapes; les phases de combustion qui suivent sont elles-mêmes spatialement discontinues : il peut donc exister plusieurs fronts de flamme.

La combustion peut être hétérogène ; la répartition de la richesse est susceptible de varier d'un point à un autre du réacteur.

L'injection de mélanges d'hydrocarbures ayant

des viscosités et des températures d'ébullition différentes entraîne des vitesses de vaporisation différentes ; l'examen des enregistrements et l'évolution de la période d'induction montrent que le comportement du couple n-hexadécane-méthyl-anaphtalène diffère notablement du couple n-heptane-isooctane; or, pour ce dernier, les masses molaires et les températures d'ébullition sont voisines ; le remplacement du n-hexadécane par le n-tétradécane confirme l'importance des écarts entre les constantes physiques du couple.

A partir de ces différentes constatations, il est possible de rendre compte qualitativement de l'existence de certaines manifestations de la combustion.

Considérons un mélange de deux hydrocarbures A et B susceptibles de se vaporiser dans le réacteur. Une cinétique de vaporisation simultanée peut être qualitativement modélisée de deux manières différentes (fig. 15a et 15b).

. en (a) la concentration de B est supérieure à celle de A, quel que soit l'instant considéré ; le rapport  $[B]/[A]$  reste sensiblement constant jusqu'à l'équilibre où il prend la valeur  $[B_{eq}]/[A_{eq}]$ .

. en (b), la vitesse initiale de vaporisation de A, à partir du mélange, est supérieure à celle de B. Le rapport  $[B]/[A]$  évolue constamment depuis l'état initial jusqu'à l'équilibre où il atteint la valeur désirée. Il s'en suit que pendant un intervalle de temps traduit sur la figure b par  $\tau$ , les phénomènes observés et, en particulier, les inflammations éventuelles ne sont donc pas significatives. A partir de cette remarque une étude expérimentale et une modélisation pourraient être envisagées, permettant d'explicitier l'allure des courbes obtenues (fig. 12a, 12b et 12c).

Annexe thermodynamique : rendements thermodynamiques des moteurs à allumage par compression par un fluide supposé parfait.

. combustion à volume constant :

$$\eta = 1 - \frac{1}{\epsilon^\gamma - 1}$$

. combustion à pression constante :

$$\eta = 1 - \frac{\delta^{\gamma-1}}{\gamma \cdot \epsilon^{\gamma-1} \cdot \delta - 1}$$

avec

$\epsilon$  : taux de compression volumétrique

$\gamma$  : rapport des chaleurs spécifiques du fluide,  
 $\frac{C_p}{C_v}$  supposé constant

$\delta$  : rapport des volumes à la fin et au début de la combustion, soit sur le diagramme  $V_D/V_C$ .



Annexe : caractéristique des carburants : densité.

Dans les pays anglo-saxons, on mesure la "Specific Gravity", unité correspondant à la densité, c'est-à-dire au rapport de la masse d'un certain volume de produit à une température de 60°F à la masse du même volume d'un corps de référence (eau) à la même température (symbole : Sp.Gr.60/60F).

Les Américains utilisent également le degré A.P.I. défini par l'American Petroleum Institute (A.P.I.) :

$$\text{degré A.P.I.} = \frac{141,5}{\text{Sp.Gr. 60/60F}} - 131,5$$

Indice de cétane : norme A.S.T.M.D. 975

$$\text{Indice de cétane} = 0,49085 + 1,06577x - 0,001055x^2$$

avec

$$\begin{aligned} x = & 97,833 (\lg \text{ point milieu } ^\circ\text{F}^*)^2 + \\ & 2,2088 (\text{densité A.P.I.}) (\lg \text{ point milieu } ^\circ\text{F}) + \\ & 0,01247 (\text{densité A.P.I.})^2 - \\ & 423,51 (\lg \text{ point milieu } ^\circ\text{F}) - \\ & 4,7808 \text{ A.P.I.} + \\ & 419,59 \end{aligned}$$

. méthode de distillation : AFNOR M 07-002

\* point milieu °F : température en degrés Fahrenheit du point 50% de la courbe de distillation du combustible considéré.

BIBLIGRAPHIE

- (1) Monnot G. - La combustion dans les moteurs à allumage par compression - Revue de l'Institut Français du Pétrole - Réf. 15 O22-11, (septembre 1967)
- (2) Vichnievsky R. - Auto-inflammation et combustion dite détonante - Revue de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale, n°4, (1965)
- (3) Fleury P. et Mathieu J.P. - Chaleur, Thermodynamique, Etats de la matière - Editions EYrolles, (1968), p.500
- (4) Kling R. - Diagrammes thermodynamiques - Techniques de l'Ingénieur, Moteurs thermiques, vol. B3, p.304
- (5) Magot-Cuvry P. - Cycles à rendement maximal - Techniques de l'Ingénieur, Moteurs thermiques, vol. B3, p.364
- (6) A.S.T.M., Manuel of Engine Test Method for rating DIESEL Fuels by Cetane Methode, Publication (1963)
- (7) Vichnievsky R. - Les combustibles pour moteurs à allumage par compression - La Technique Moderne, n°12, (décembre 1954)
- (8) Klopfenstein W.E. - JAACS vol.59, n°12 (décembre 1982), p.533
- (9) Delfosse L. - Thèse Lille, C.N.R.S. AO 9147, p.13 (1973)
- (10) Brun R. - Science et technique du moteur DIESEL industriel et de transport - Editions Technip, (1976)
- (11) Serruys M. - Propagation de la combustion - Techniques de l'Ingénieur, Moteurs Thermiques, vol.B3, p.367
- (12) Richard J. - Mécanique des fluides appliquée aux moteurs à capsulisme - Techniques de l'Ingénieur, vol. B3, p.369
- (13) Van Tiggelen A. - Oxydations et combustions - Editions Technip, (1968)

CHAPITRE III
--------------

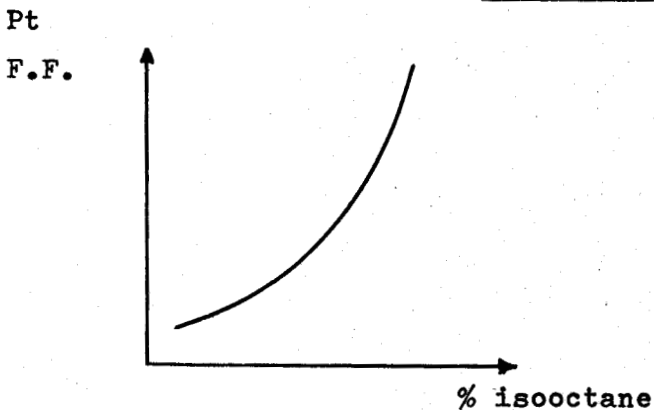
CORRÉLATION ENTRE LES INDICES D'OCTANE ET DE CÉTANE

A) ETUDE COMPARÉE DES DEUX INDICES OBTENUSI) Au niveau de la méthode

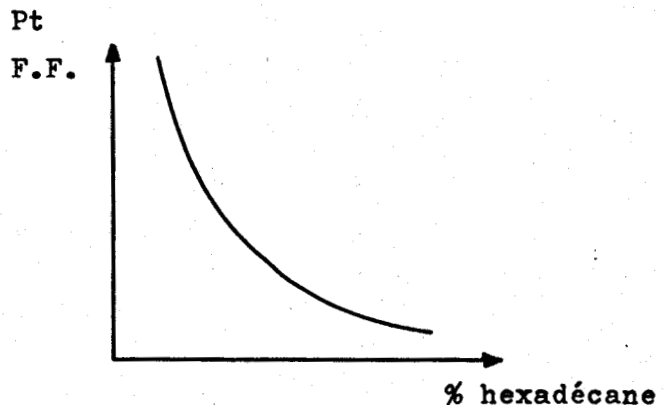
<u>indice d'octane</u>	<u>indice de cétane</u>	
injection du combustible dans le réacteur vide puis admission du comburant	même méthode que pour l'indice d'octane	inversion de l'ordre d'introduction des réactifs par rapport à la détermination de l'indice d'octane
<u>phénomènes associés</u> combustion homogène en phase gazeuse		pulvérisation, vaporisation et combustion hétérogène sans front de flamme continu

II) Au niveau des caractéristiques de la flamme froidea) limites F.F.

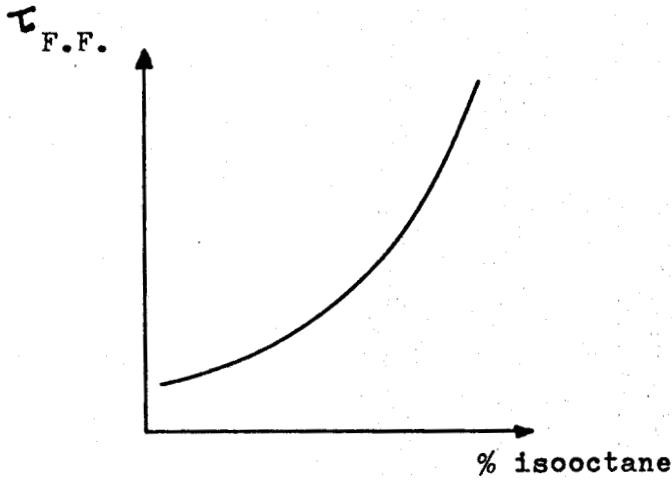
319°C 11,8% de RH/air



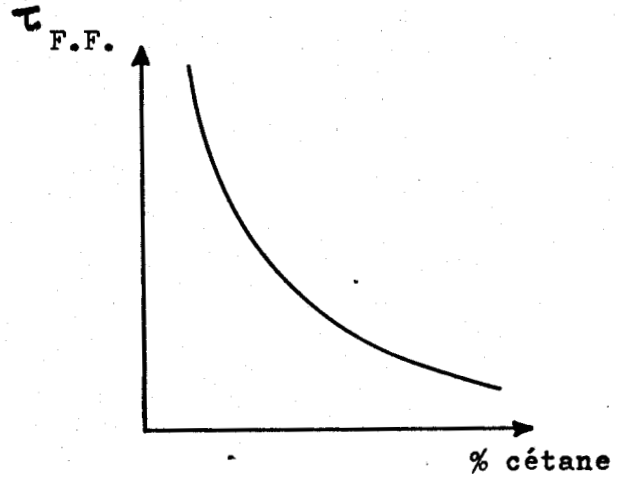
plus la limite F.F. est relevée  
plus la réactivité diminue et  
meilleure est l'indice d'octane



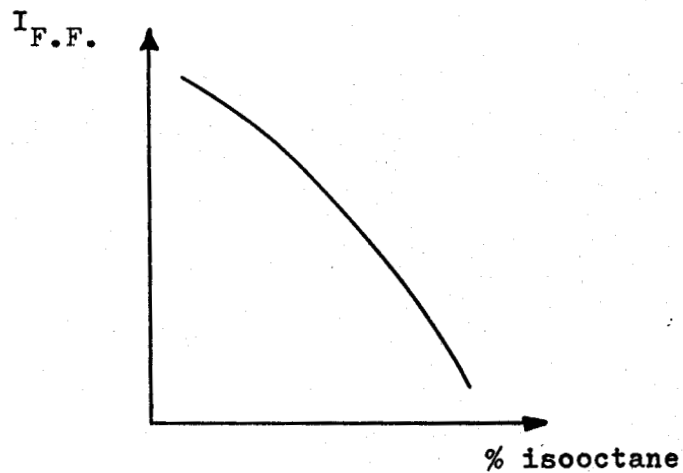
plus la limite F.F. est basse,  
plus la réactivité F.F. augmente  
et meilleur est l'indice de cétane

b) période d'induction  $\tau$  de la F.F.

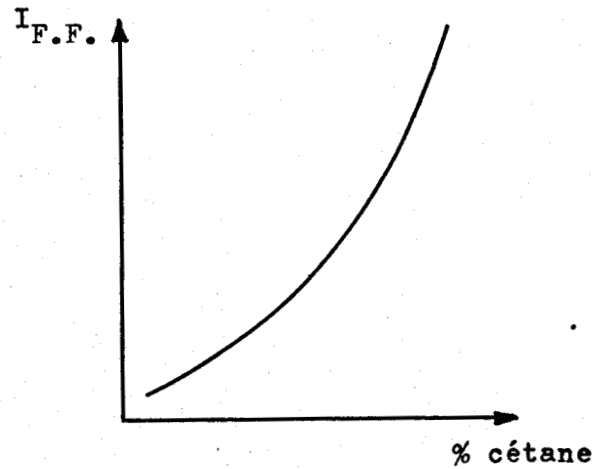
un délai d'autoinflammation long retarde l'apparition de la F.F. et de l'indice d'octane croît.



un délai d'autoinflammation court est lié à l'apparition rapide de la F.F. et augmente l'indice de cétane

c) intensité I de la F.F.

$I_{FF}$  diminue avec le % iso-octane



$I_{FF}$  augmente avec l'indice de cétane

## B) CORRÉLATION ENTRE LES INDICES D'OCTANE ET DE CÉTANE

Bien qu'il ne s'agisse que de méthodes comparatives dans tous les cas\* et qu'il ne peut donc être question de relation causale au sens strict entre les deux indices, nous avons représenté l'évolution de l'indice d'octane en fonction de l'indice de cétane ; les deux indices ont été obtenus avec la même méthode pour différents hydrocarbures (fig.16).

L'examen de cette figure montre que lorsque l'indice de cétane d'un hydrocarbure est élevé, son indice d'octane est faible et réciproquement.

A partir de ces constatations, Dumanois a proposé une méthode basée sur la détermination d'un indice de cétane à partir de son indice d'octane (1). Cette méthode consiste à mélanger à une essence d'indice d'octane connu une certaine quantité de gas-oil et à déterminer l'abaissement de l'indice d'octane correspondant.

C'est bien évidemment la notion de délai d'autoinflammation qui sous-tend ces deux indices : à un délai court correspond un indice de cétane élevé, et un indice d'octane bas ; c'est l'inverse pour les délais longs.

- Les délais courts sont favorisés par la présence d'hydrocarbures paraffiniques au détriment des aromatiques; le rôle des additifs employés pour augmenter l'indice de cétane, tel le nitrate d'éthyle ou d'amyle, se situe essentiellement au niveau de la réduction du délai chimique. Il ne semble pas cependant que l'on cherche à obtenir des carburants d'indice de cétane trop élevé ; en effet, d'une part la stabilité au stockage des gas-oils dopés pose des problèmes et d'autre part l'accroissement de cet indice, par augmentation du taux de paraffines par exemple, s'accompagne de variations d'autres propriétés

---

\* y compris pour les méthodes normalisées

du combustible comme la diminution du pouvoir calorifique par unité de volume. Dans ce but, on recherche le carburant ayant le plus faible indice compatible avec un fonctionnement correct du moteur.

- Les délais longs requièrent des hydrocarbures aromatiques ou (et) ramifiés ; la course aux indices d'octane de plus en plus élevés pour augmenter le taux de compression et donc le rendement impose actuellement l'usage d'additifs à base de plomb : leur effet se situe essentiellement au niveau de la réaction conduisant à l'autoinflammation des gaz frais résiduels.

Cycle du moteur à allumage par compression

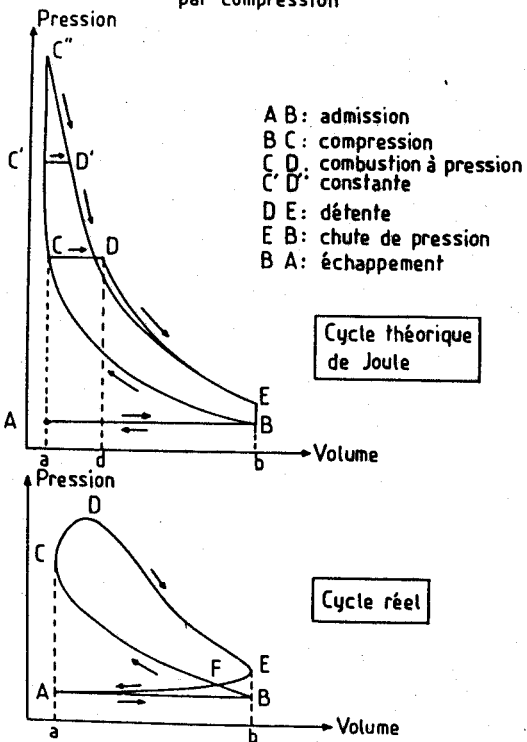


Fig.1a - 1b

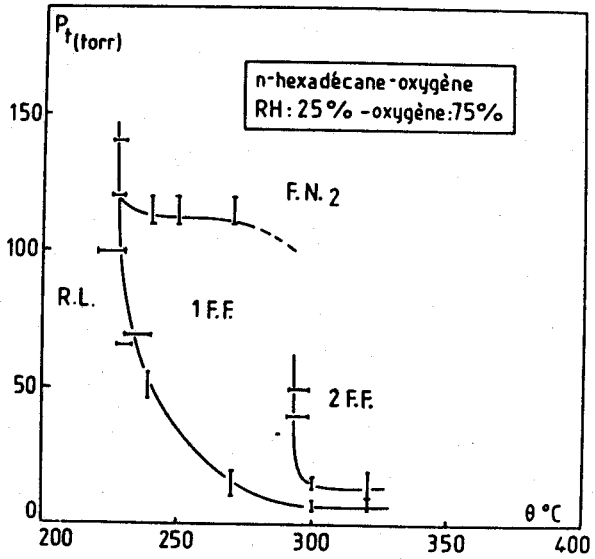


Fig.2

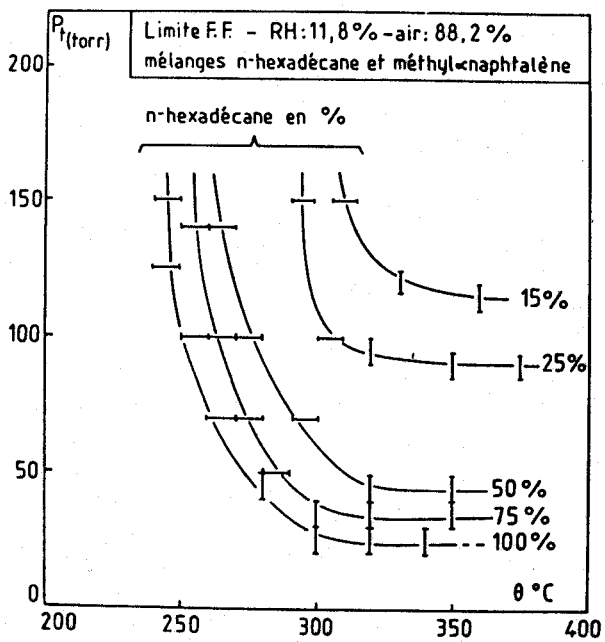


Fig.3

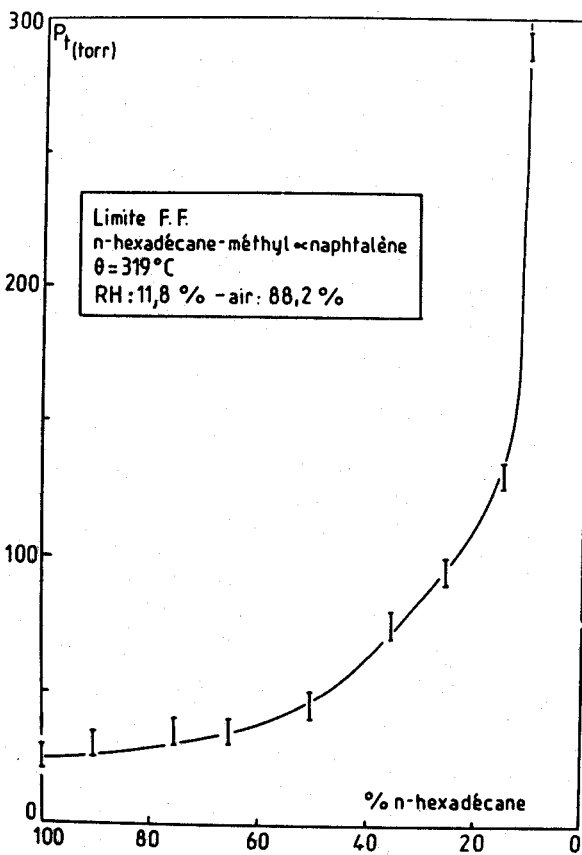


Fig.4



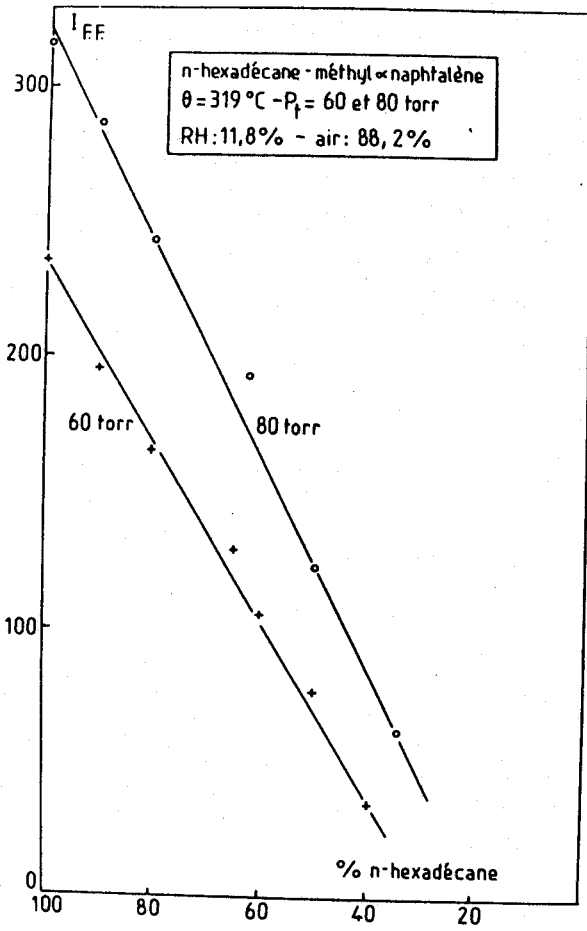


Fig.5

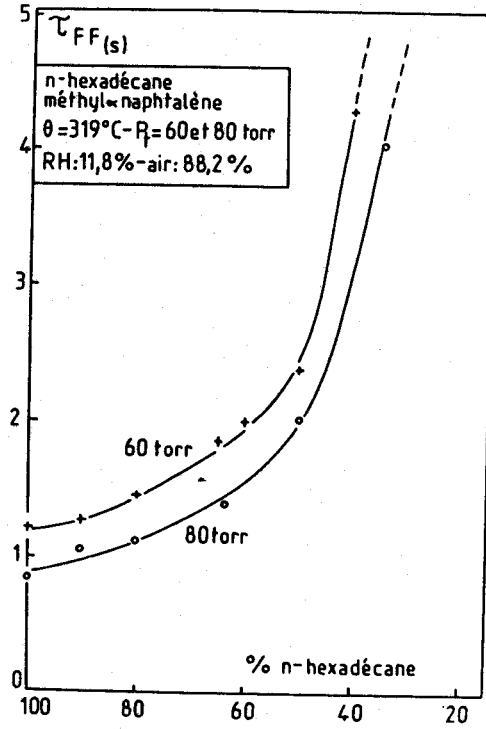


Fig.6

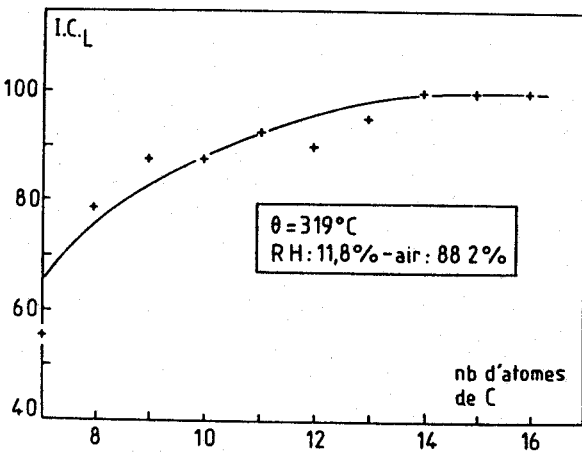


Fig.7

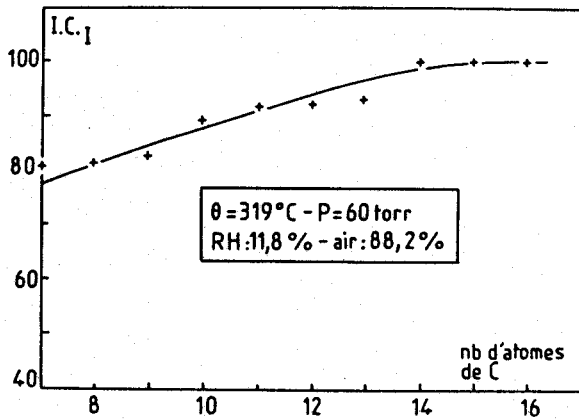


Fig.8

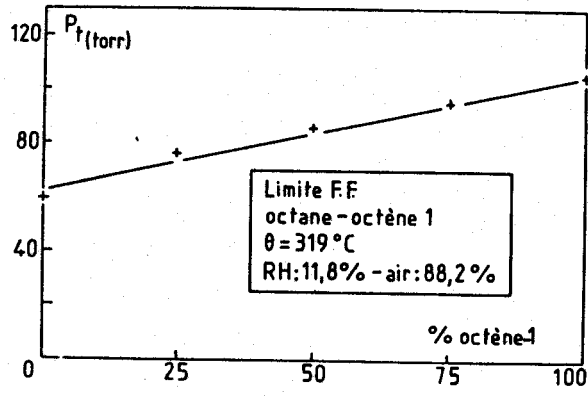


Fig.9

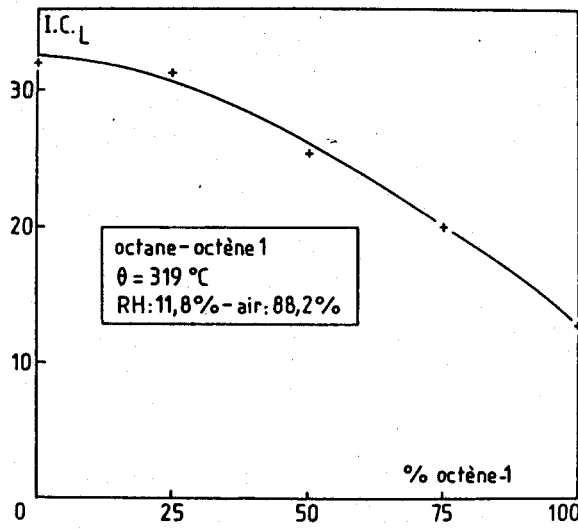


Fig.10

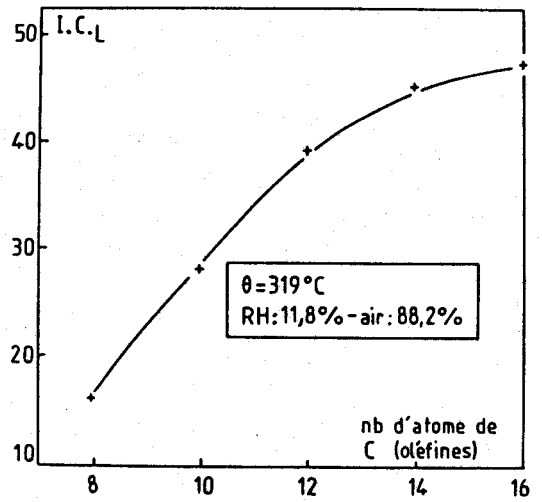


Fig.11

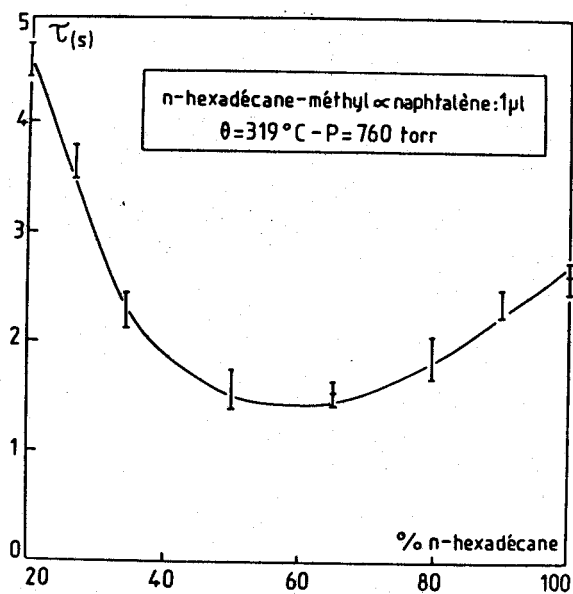


Fig. 12a

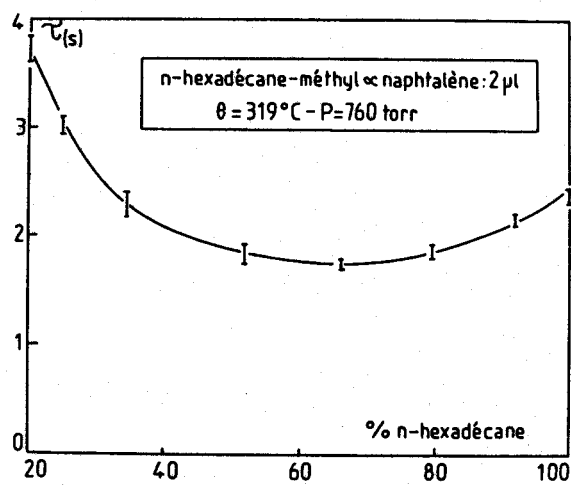


Fig. 12b

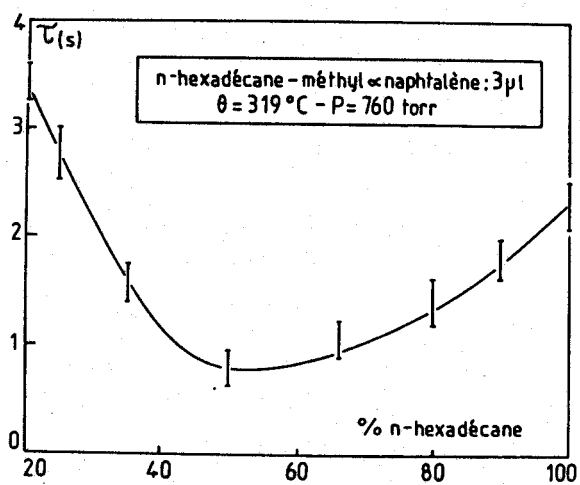


Fig. 12c

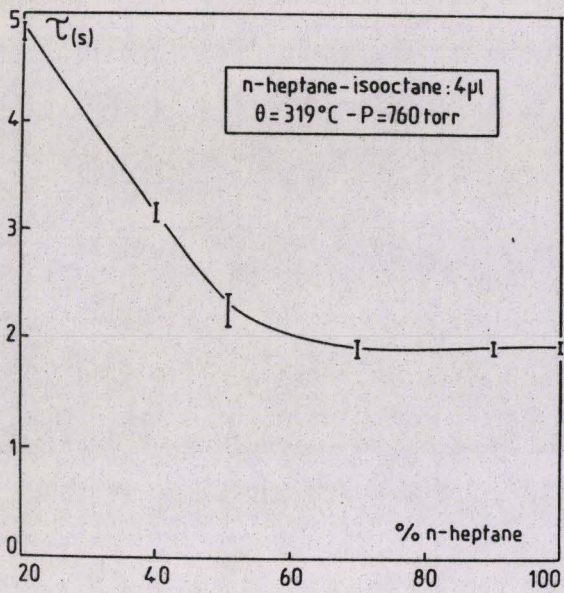


Fig. 13

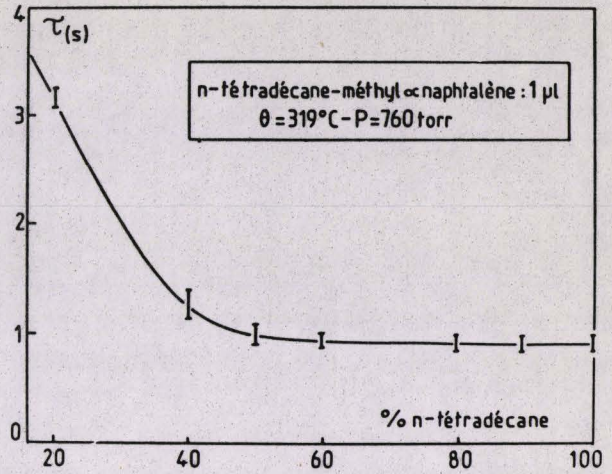


Fig. 14

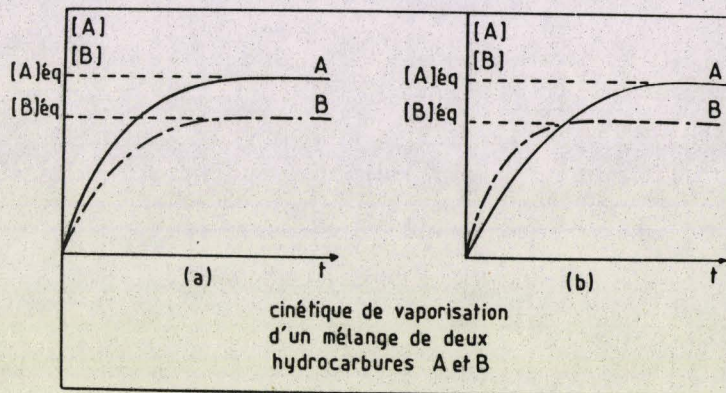


Fig. 15

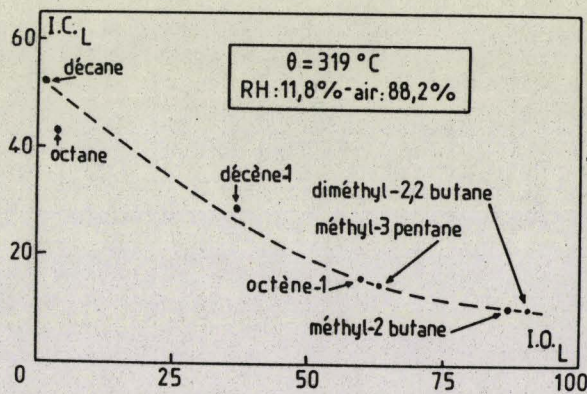


Fig. 16

BIBLIOGRAPHIE

- (1) Dumanois P. - Technologie des moteurs à combustion interne. Cours à l'Ecole Nationale des Moteurs, Paris, (1950)

### CONCLUSION GENERALE

Nous avons entrepris une étude du cliquetis sur un moteur à allumage commandé à taux de compression variable. Nous avons procédé ensuite à une estimation simple de ce phénomène en affectant un indice d'octane à certains hydrocarbures et carburants à partir de certaines manifestations liées à l'explosion froide.

Dans la première partie, à l'aide d'un moteur expérimental, nous avons d'abord identifié le phénomène de cliquetis; puis, nous avons repéré les limites d'inflammabilité et de cliquetis dans des conditions paramétriques déterminées ; l'influence de certains facteurs mécaniques et chimiques sur ces limites a été également envisagée ; il s'agit notamment du taux de compression, de la richesse, de la vitesse de rotation, de l'avance à l'allumage et de la nature de carburant. Le fait que le domaine d'existence de la zone de cliquetis soit localisé vers les taux de compression élevés et pour des richesses voisines du stoechiométrique, montre que les conditions d'autoinflammation sont favorablement réunies lorsque la pression, et donc la température, des gaz frais est suffisante en fin de compression. A partir de l'existence d'un minimum du domaine de cliquetis et en modifiant la proportion des hydrocarbures de référence\*, il a été possible d'élaborer une méthode quantitative de détermination du phénomène de cliquetis : l'accord avec les indices d'octane "Recherche" s'est avéré très satisfaisant.

La seconde partie de cette étude a été consacrée à la détermination d'un indice d'octane et d'un indice de cétane pour certains hydrocarbures, essences et gas-oils; la méthode est basée sur la quantification d'une caractéristique

---

\* isooctane et n-heptane

de la flamme froide. Des analyses chimiques ont permis de rendre compte de l'évolution de certains produits résultant de l'oxydation froide.

L'étude des résultats obtenus pour la détermination de l'indice d'octane par cette méthode montre que l'accord avec l'indice "Recherche" est satisfaisant pour un certain nombre d'hydrocarbures et essences. Les différences constatées peuvent s'expliquer par le fait que :

- la méthode utilisée pour déterminer l'indice "Recherche" est modifiée lorsque ces indices dépassent 100,

- le cliquetis ne se manifeste et donc l'indice "Recherche" ne se mesure pas dans des conditions de température, de pression et de richesse identiques pour tous les hydrocarbures; or, les essais effectués ont tous eu lieu dans les mêmes conditions expérimentales.

En ce qui concerne la détermination de l'indice de cétane, l'ordre d'introduction des réactifs joue un rôle important par suite des phénomènes liés à la vaporisation; l'absence de données numériques ne nous a pas permis d'établir des comparaisons en nombre suffisant pour tester l'efficacité de la méthode.

Une amélioration de la méthode consisterait avec le même appareillage :

- à prendre en compte, dans des conditions expérimentales données, simultanément l'indice d'octane-"limite" ( $IO_L$ ), l'indice d'octane-"intensité lumineuse" ( $IO_I$ ) et l'indice d'octane-"période d'induction" ( $IO_T$ ) ; par une méthode statistique et en augmentant le nombre de mesures, on attribuerait un "poids" statistique à chacun de ces indices en appréciant l'écart-type par rapport à l'indice "Recherche".

- à effectuer plusieurs séries de mesures à des pressions, températures et richesses différentes en essayant d'"encadrer" le mieux possible les conditions paramétriques régnant dans la chambre du moteur : température et richesse.

Le suivi de certains produits de combustion comme le formaldéhyde, le peroxyde d'hydrogène, le monoxyde et le dioxyde de carbone ainsi que l'acétone montre que l'oxydation du n-heptane et de l'isooctane, s'effectue selon deux mécanismes différents : le mécanisme  $L_2$  pour l'oxydation du n-heptane, hydrocarbure linéaire et le mécanisme  $L_1$  pour celle de l'isooctane, hydrocarbure ramifié ; la période d'induction courte relative à l'oxydation du n-heptane et des hydrocarbures aliphatiques aboutit à des indices d'octane faibles tandis qu'à l'oxydation de l'isooctane et des hydrocarbures "ramifiés" correspondent des périodes d'induction longues et des indices d'octane élevés.

Dans le cas des moteurs à allumage commandé, un indice d'octane élevé correspond à un carburant qui s'auto-enflamme difficilement dans la chambre, permettant ainsi la propagation du seul front de flamme normal. Pour parvenir à ce résultat, du côté de la conception de la chambre comme du choix du carburant, on cherche :

- à favoriser thermodynamiquement et cinétiquement la réaction conduisant à une déflagration laminaire,
- à retarder l'autoinflammation responsable du phénomène de cliquetis.

Pour les gas-oils, un indice de cétane élevé correspond à un carburant qui s'auto-enflamme rapidement après pulvérisation dans la chambre, limitant ainsi la combustion non contrôlée.



## Résumé

La première partie du travail porte sur l'étude du phénomène de cliquetis d'un moteur à allumage commandé. Elle est effectuée au moyen d'un moteur expérimental, polycarburant, à taux de compression réglable. La zone paramétrique d'existence du phénomène est située par rapport aux limites d'inflammabilité que nous avons établies. On détermine l'influence de la variation des divers paramètres sur les limites d'apparition du cliquetis, c'est-à-dire : la richesse du mélange, la vitesse de rotation du moteur et la charge, l'avance à l'allumage et la nature du carburant.

La seconde partie est consacrée à la détermination des indices d'octane et de cétane selon la méthode du "pyromètre" adaptée aux liquides. On réalise une étude comparative des diverses possibilités offertes pour mesurer ces indices, à partir du phénomène connu de flamme froide. Trois types de mesures sont testées pour atteindre ce but. Ce sont :

- la détermination de la limite de la flamme froide,
- la mesure comparée des intensités lumineuses des flammes froides,
- celle des périodes d'induction ou délai d'inflammation.

En ce qui concerne l'indice d'octane, la mesure des périodes d'induction semble préférable.

## Mots clés

CLIQUETIS - MOTEUR A TAUX DE COMPRESSION REGLABLE  
- FLAMME FROIDE - INDICE D'OCTANE - INDICE DE  
CETANE.

