

Approche expérimentale de la notion d'indice d'octane (I.O.)

par Daniel SCACHE,
E.N.N.A. de Villeneuve-d'Ascq

et Stanislas ANTONIK,
Laboratoire de cinétique et de chimie de la combustion,
Université des Sciences et Techniques de Lille I.

A) INTRODUCTION.

* 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'auto-inflammation 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.

Signalons que la nature exacte des phénomènes qui contribuent à la libération de l'énergie potentielle chimique des gaz frais n'est pas encore totalement élucidée : pour certains auteurs, il s'agirait d'explosions dites normales et pour d'autres de détonations.

* 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.

* Dans un précédent article [1], nous avons étudié les aspects thermodynamique et cinétique de la combustion normale dans les moteurs à allumage commandé. Le sujet de ce second mémoire sera centré sur l'une des combustions anormales responsable du phénomène de cliquetis ; la notion d'indice d'octane en découlera.

* Au moyen d'un moteur expérimental, à taux de compression réglable, nous analyserons 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 d'auto-inflammation, la sensibilité de celles-ci à différents paramètres moteurs sera envisagée.

B) DIFFERENTES FORMES DE COMBUSTION ; CAS DES MOTEURS A ALLUMAGE COMMANDE ET A ALLUMAGE PAR COMPRESSION (DIESEL).

1) Déflagration et détonation.

* Il existe plusieurs types de combustions vives avec flamme suivant les conditions physiques et aérodynamiques du milieu réactionnel. Dans l'hypothèse d'un combustible et d'un comburant convenablement mélangés au préalable et d'une combustion en phase gazeuse, la flamme peut se propager soit à vitesse subsonique (déflagration), soit à une vitesse supersonique (détonation).

1) DÉFLAGRATION.

* C'est la flamme la plus courante mieux connue sous sa configuration spatiale de flamme de diffusion (flamme du réchaud à gaz, du bec Bunsen en dehors du cône ou de la bougie. Il y a toujours mouvement relatif du mélange combustible par rapport à la flamme : dans la chambre de combustion d'un moteur à allumage commandé, la flamme ou le front de flamme se déplace dans une enceinte contenant le mélange combustible-comburant ; la vitesse de propagation de la flamme dépend de l'influence des conditions aérodynamiques sur celle-ci :

— En l'absence de turbulence, l'écoulement est caractérisé par un profil de vitesses laminaires suivant la loi de POISEUILLE. La vitesse de propagation de la flamme est de l'ordre de quelques dizaines de mètres par seconde. La propagation de la déflagration se fait essentiellement par *conductivité thermique* : la fraction de mélange gazeux en train de brûler chauffe la tranche de gaz frais voisine et y projette par diffusion des radicaux libres.

— Si des forces de « friction » interviennent entre les veines du fluide ou au contact des parois (de la chambre de combustion) ou au droit des soupapes, des tourbillons pénètrent dans le volume gazeux ; il apparaît donc un champ de vitesses dans les différents volumes de fluide, c'est-à-dire que chacun d'entre eux est soumis à une vitesse fluctuante qui se superpose à la vitesse moyenne de l'écoulement : les échanges thermiques y sont donc favorisés ce qui a essentiellement pour effet de « friper » le front de flamme et donc d'augmenter la vitesse de combustion par augmentation de la surface des échanges.

— Application : forme de la chambre de combustion.

Pour obtenir un bon rendement, il faut que la combustion du mélange air-essence se trouvant dans le cylindre soit aussi rapide et complète que possible (combustion isochore) soit, pour chiffrer, une durée de combustion $< 0,002$ s.

Si le mélange était parfaitement au repos dans le cylindre, la combustion durerait quelques dixièmes de seconde, soit plusieurs tours de vilebrequins [2]. Pour augmenter la vitesse de combustion, on favorise la turbulence du mélange air-essence, ce qui est partiellement réalisé dans le carburateur et dans le collecteur d'admission. C'est un des critères retenus pour la forme de la chambre de combustion.

* Un mélange combustible-comburant s'enflamme seulement dans certaines conditions de pression et de composition. Pour un

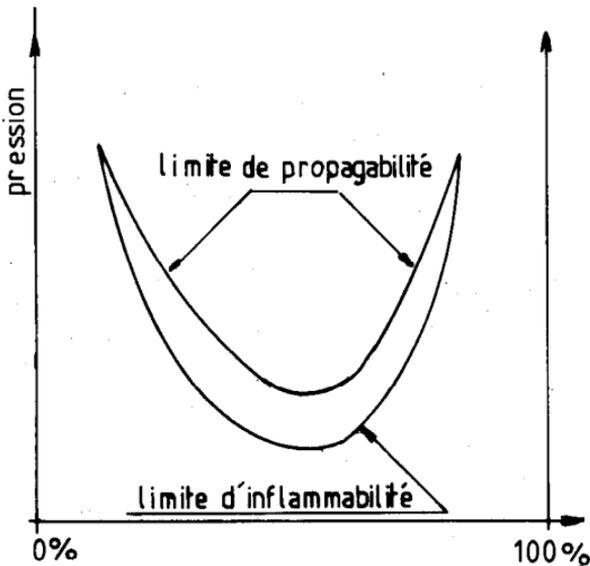


Fig. 1. — Composition (en volume) du combustible dans le mélange combustible-air.

combustible gazeux donné, on peut établir un diagramme (pression/composition du mélange avec l'air ou l'oxygène) où figurent deux régions : une région où l'inflammation est possible et une région où le combustible ne peut pas s'enflammer. Ces deux zones sont séparées par une courbe qui représente la *limite d'inflammabilité*.

Cela signifie seulement qu'il y a possibilité de propagation de la zone de combustion indépendamment de l'intervention extérieure d'une source d'énergie (étincelle) ou en son absence (auto-inflammation).

Le terme « limite de propagabilité » serait donc plus adéquate (fig. 1).

2) DÉTONATION.

* Dans certaines conditions, une déflagration peut s'accélérer et sa vitesse peut atteindre une vitesse supersonique de l'ordre de Mach 5 à 8 (1), on parle alors de détonation.

* Une détonation se compose d'une onde de choc interférant avec une onde de combustion. L'onde de choc élève la pression et la température des gaz frais en avant du front de flamme générant une onde de combustion par auto-inflammation (2) de ces

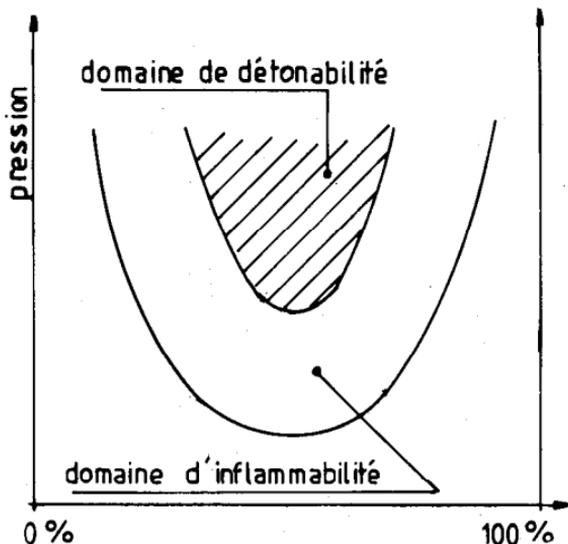


Fig. 2. — Combustion (en volume) du combustible dans le mélange combustible-air.

(1) Le nombre de Mach est le rapport entre la vitesse de propagation d'un phénomène et la vitesse du son.

(2) Paragraphe suivant.

gaz frais. L'énergie dégagée par cette dernière entretient l'onde de choc.

* Pour qu'il y ait détonation, il faut que le mélange gazeux soit inflammable : le domaine de détonabilité se situe donc dans le domaine d'inflammabilité (fig. 2).

II) Explosion ou auto-inflammation (fig. 3).

* Suivant la nature du combustible et selon les conditions physiques et aérodynamiques du milieu, la combustion peut présenter différentes modalités [3]. En particulier, une combustion vive peut succéder à une oxydation lente si le mélange initial est porté à une température suffisante ou si l'exothermicité de cette oxydation lente est suffisante : c'est l'explosion ou auto-inflammation. On appelle température d'auto-inflammation la température minimale à laquelle celle-ci peut se produire tandis que le délai d'auto-inflammation représente le temps que met le mélange initial pour exploser lorsqu'il est instantanément porté à sa température d'auto-inflammation (ou à une température plus élevée); ce délai est d'ailleurs d'autant plus court que la température est plus élevée.

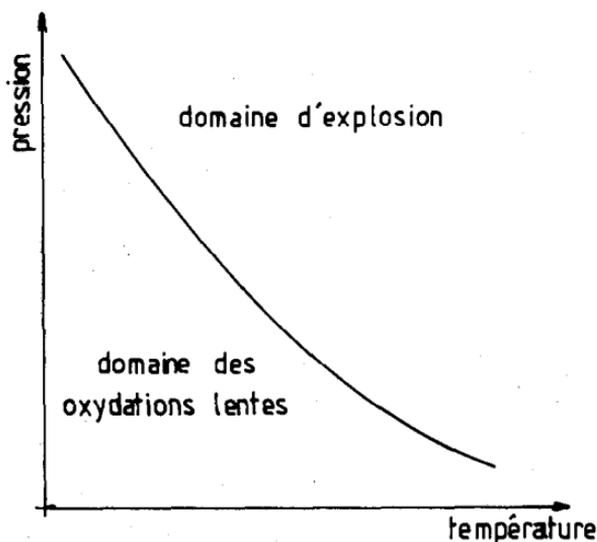


Fig. 3. — Diagramme isochore très simplifié pression-température.

III) Moteurs à allumage commandé et à allumage par compression (type DIESEL).

* Il en résulte que dans le cas des moteurs à allumage commandé, le terme moteur à explosion est impropre : la combustion normale correspond à une déflagration commandée et pro-

voquée par un apport d'énergie extérieure sous forme d'étincelle au niveau de la bougie. A partir du point d'allumage, le front de flamme se propage à une vitesse de quelques dizaines de mètres par seconde et brûle les gaz frais sur son passage. Compte tenu de l'augmentation de pression due à l'expansion des gaz brûlés et au mouvement ascendant du piston pendant la compression, ces gaz frais se trouvent portés à une température supérieure à leur température d'auto-inflammation (3) : le mélange peut donc exploser en avant du fond de flamme *sans* étincelle, générant des ondes de pression nocives pour les matériaux, c'est le cliquetis.

Au niveau du carburant, il faudra donc que la totalité de celui-ci soit brûlée, c'est-à-dire qu'il ait un délai d'auto-inflammation suffisamment long par rapport à la durée de la combustion normale... si on veut réduire le cliquetis.

En conclusion, dans le cas des moteurs à allumage commandé, l'auto-inflammation est un phénomène parasite.

* En limitant la comparaison au stade de la combustion, la différence essentielle entre un moteur à allumage commandé et un moteur type DIESEL réside dans le mode d'inflammation du carburant. Si dans une masse d'air suffisamment comprimée pour que sa température atteigne une valeur déterminée, on introduit un combustible finement pulvérisé, la combustion se déclenche par auto-inflammation : celle-ci représente donc ici la combustion « normale ».

Le phénomène d'auto-inflammation résulte dans ce cas de deux facteurs :

- un rapport volumétrique de compression élevé : 22/1,
- une haute température engendrée par ce rapport : 600 °C.

Le combustible s'enflamme donc spontanément au contact de l'air chaud et sans le secours, en général, d'une étincelle électrique. L'injection du fuel s'effectue, en fin de course de compression, sous forte pression (100 à 300 bars). L'auto-inflammation s'effectue avec un certain retard lié au fait que le combustible doit, au préalable, emprunter à l'air comprimé dans la chambre la chaleur qui lui est nécessaire pour atteindre sa température d'auto-inflammation.

Le mélange combustible-air est dans ce cas hétérogène : il n'existe pas de front de flamme mais une multitude de foyers d'inflammation indépendants et se situant au niveau de chaque gouttelette.

(3) Les combustibles pour ces moteurs, par exemple de C₆ à C₈ possèdent des températures d'auto-inflammation de l'ordre de 250 °C.

C) ETUDE EXPERIMENTALE.**I) Définitions.**

* Le rapport volumétrique de compression et le coefficient de remplissage ont été définis précédemment [1].

* 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 de carburant associée à une certaine masse de comburant, dans ce mélange, et la masse de carburant qu'il faudrait associer à cette même masse de comburant pour obtenir un mélange stoechiométrique [4].

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

— La richesse se détermine à partir de l'équation de combustion [4] et l'analyse des gaz d'échappement.

* La charge peut désigner trois notions :

— Dans la chambre de combustion, c'est le mélange des gaz frais en avant du front de flamme ; on l'appelle souvent charge résiduelle.

— La notion de force (chargé à l'essieu pour un véhicule).

— Sur le moteur expérimental que nous avons utilisé, c'est l'intensité du courant (4) (de charge) de la dynamo (5) accouplée au moteur thermique.

II) Dispositif expérimental.

1) LE MOTEUR A TAUX DE COMPRESSION RÉGLABLE [5] ; (fig. 4 et fig. 5).

* Dans un moteur à taux de compression fixe :

— L'ensemble cylindre - culasse - carter est solidaire.

— L'axe du vilebrequin occupe une position déterminée et *définitive* par rapport à l'ensemble précédent au P.M.H. : le volume mort est donc constant.

* Dans un moteur à taux de compression ajustable, l'ensemble cylindrique - culasse (5) est mobile par rapport au carter (1) : en agissant sur (7), on peut donc faire varier le volume mort et ainsi modifier le taux de compression.

(4) C'est cette désignation que nous retiendrons pour la suite.

(5) Paragraphe suivant.

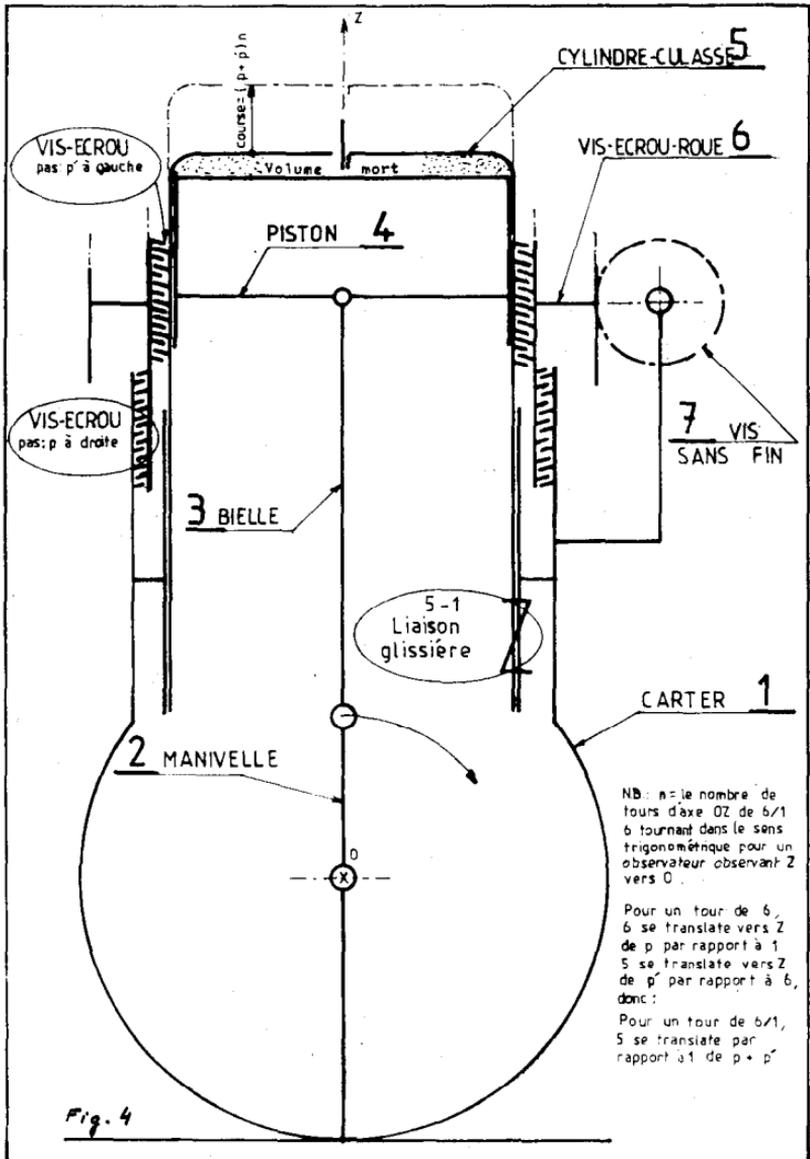


Fig. 4. — N.B. : n = le nombre de tours d'axe OZ de 6/1.
 6 tournant dans le sens trigonométrique pour un observateur observant Z vers O .

Pour un tour de 6, 6 se translate vers Z de p par rapport à 1 et 5 se translate vers Z de p' par rapport à 6, donc :

Pour un tour de 6/1, 5 se translate par rapport à 1 de $p + p'$.

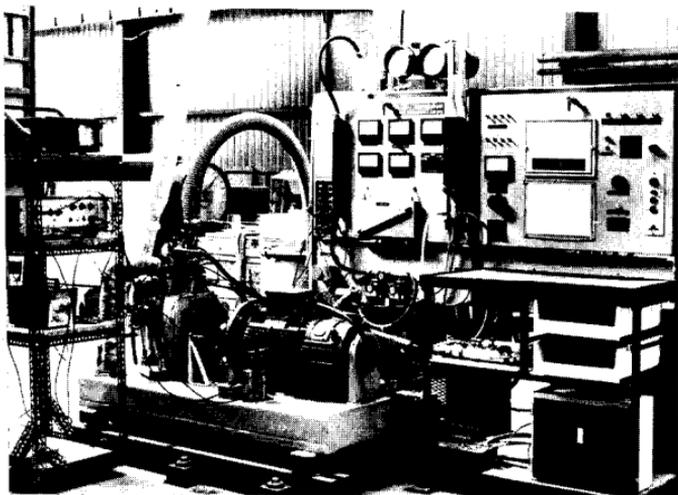


Fig. 5

2) LES ORGANES ANNEXES.

* Au moteur expérimental représenté ci-dessus étaient joints :

- Un frein constitué par une machine à courant continu, susceptible de fonctionner dans des conditions réversibles.
- Une centrale d'analyse des gaz d'échappement : nous n'en exploiterons pas les résultats dans cet article.
- Un « indicateur » électronique composé :
 - d'un capteur de pression piezoélectrique logé dans la chambre de combustion,
 - d'un générateur de fonctions rotatif, délivrant des signaux proportionnels au volume balayé par le piston,
 - d'un marqueur d'angle de rotation du vilebrequin et de localisation de P.M.H.

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.

3) LES CARBURANTS UTILISÉS.

* Le caractère polycarburant du moteur permet une alimentation par un grand nombre de combustibles différents suivant la version d'allumage. Certaines 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'auto-inflammation 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. 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.

* Nous avons également utilisé comme carburants des mélanges *n*-heptane/isooctane (6) à des concentrations volumiques variables ; l'intérêt de ce choix réside essentiellement au niveau de la méthodologie : approche expérimentale de la notion d'indice d'octane.

III) Méthode expérimentale.

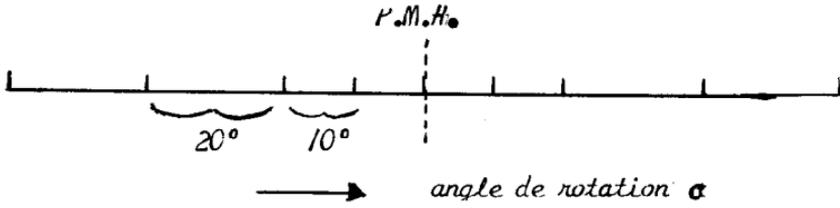
Nous l'exposerons sommairement.

1) EXAMEN DES OSCILLOGRAMMES (fig. 6 et fig. 7).

Ils permettent :

- 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 incorporé induit périodiquement un signal

(6) Isooctane ; triméthyl-2, 2, 4 pentane.



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).

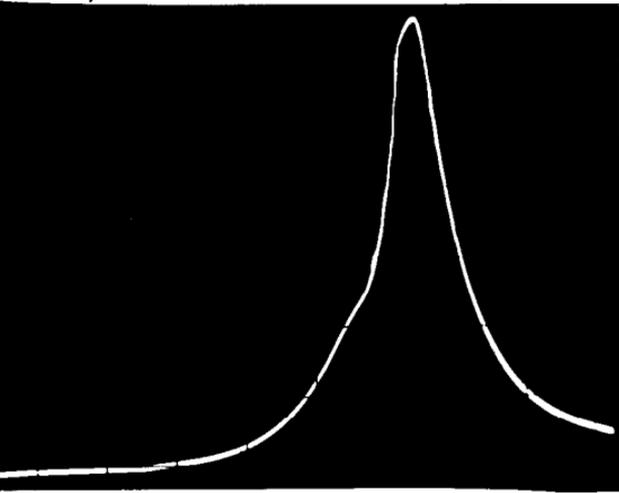


Fig. 6

- Supercarburant.
- Allumage commandé.
- Avec étincelle.
- Avance 10°.
- Taux de compression 10.
- 1 200 tr/min.
- Richesse 1,29.
- $P_M = 49$ bars.
- Combustion normale.

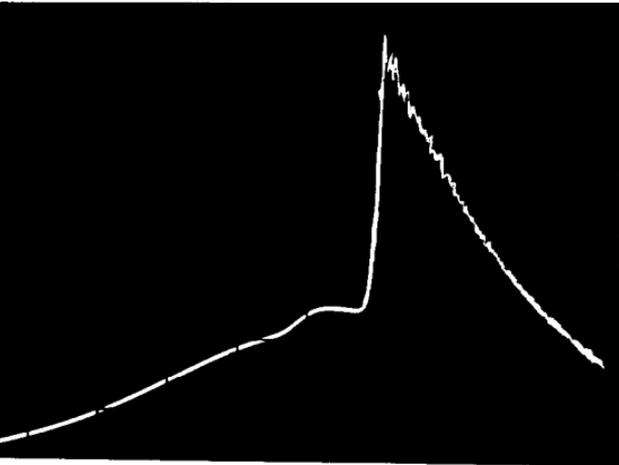


Fig. 7

- Kérosène.
- Sans étincelle.
- Taux de compression 10.
- 1 200 tr/min.
- Richesse 1,32.
- $P_M = 53$ bars.

2) ETABLISSEMENT DES LIMITES D'INFLAMMABILITÉ ET D'AUTO-INFLAMMATION [6].

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

* 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 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, on détermine les limites de cliquetis (7) comme précédemment dans le même repère (r, ε) . Une confirmation supplémentaire de l'existence d'un domaine d'auto-inflammation nous est fournie par le fait que le moteur peut continuer de fonctionner, même après coupure de l'allumage.

3) 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'auto-inflammation entre deux valeurs du taux de compression.

* C'est une méthode similaire qui permettra de définir un indice d'octane suivant une technique normalisée.

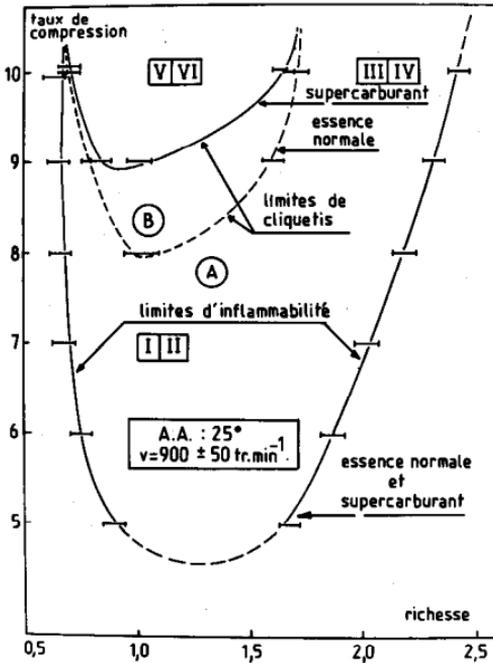
(7) Ces limites de cliquetis seront aussi appelées limites d'auto-inflammation pour rappeler le phénomène de combustion qui est à l'origine du cliquetis.

IV) Résultats.

1) ÉTABLISSEMENT DES LIMITES D'INFLAMMABILITÉ ET D'AUTO-INFLAMMATION (fig. 8).

a) Limites d'inflammabilité obtenues avec une charge de 15 %.

* Cette limite varie peu avec le taux de compression du côté des mélanges pauvres ; elle présente un minimum extrapolé pour une richesse comprise entre 1,2 et 1,3. A l'extérieur de cette limite, le moteur ne fonctionne plus. Dans les mêmes conditions expérimentales, les limites d'inflammabilité du supercarburant s'identifient pratiquement avec celles de l'essence ordinaire.

Fig. 8. — Taux de compression ϵ /richesse.

b) Limites d'auto-inflammation obtenues à pleine charge (8).

* Qu'il s'agisse d'essence ordinaire ou de supercarburant, ces limites :

- se situent à l'intérieur du domaine d'inflammabilité,
- sont comprises entre 0,7 et 1,7 pour la richesse,

(8) Voir page 709.

— présentent un minimum au voisinage du stoechiométrique ($r = 1$).

* Le domaine d'auto-inflammation (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.

* 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 pour une richesse voisine du stoechiométrique :

- 3 s. avec le supercarburant,
- 20 s. avec l'essence ordinaire,
- avec le kérosène, le moteur continue de tourner en « cliquetant ».

2) DÉPLACEMENT DES LIMITES D'AUTO-INFLAMMATION A PLEINE CHARGE POUR DIFFÉRENTS POURCENTAGES EN ISOOCTANE DANS LE MÉLANGE *n*-HEPTANE/ISOOCTANE (fig. 10).

L'examen des résultats montre que :

- Les limites d'auto-inflammation sont relevées quand le pourcentage en isooctane augmente (fig. 9).
- Le lieu de ces minimums croît avec le pourcentage d'isooctane comme le montre la courbe (fig. 10).

Dans ces conditions expérimentales, cette courbe constitue une relation (9) entre le pourcentage d'isooctane 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 ainsi que pour l'essence ordinaire, cet indice est de 93,8 et, pour le supercarburant, il est compris (10) entre 97,5 et 100.

(9) Dans d'autres conditions expérimentales, la relation sera autre et donc l'indice différent.

(10) Dans le deuxième cas, le moteur « cliquette » à un taux de compression de 9 mais non à 8,5, d'où les indices extrêmes.

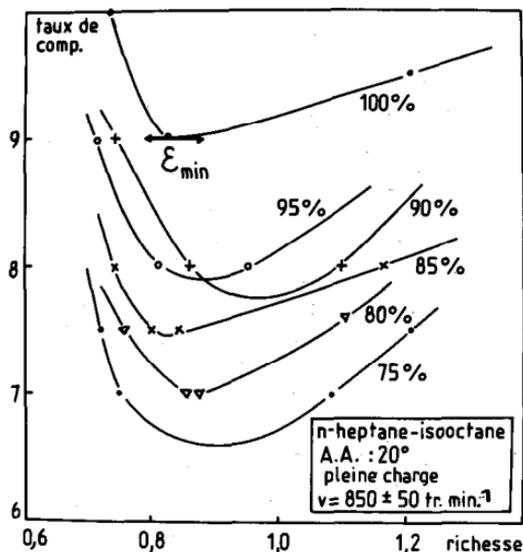


Fig. 9. — Taux de compression ϵ /richesse en *n* heptane/isooctane.

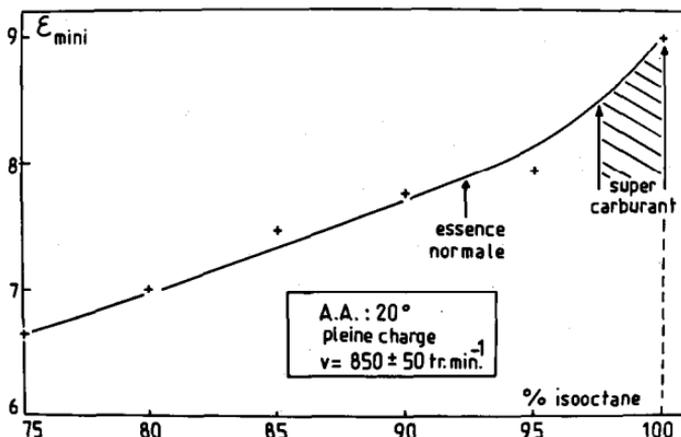


Fig. 10. — Taux de compression minimum ϵ_{\min} /richesse.

L'appareillage utilisé n'a pas permis de prendre en compte l'ensemble des paramètres influençant le cliquetis (11). Nous

(11) 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.

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) Domaine compris entre les limites d'inflammabilité et d'auto-inflammation.

C'est dans ce domaine que s'avèrent réunies les meilleures conditions propres à favoriser une combustion normale. Effectivement, les courbes traduisant la relation entre la pression moyenne (12) et la richesse présentent 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 [7] [8] en ce qui concerne le choix d'une richesse appropriée.

II) Au niveau des limites d'auto-inflammation.

1) EFFET DE L'AVANCE A 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'auto-inflammation. L'avance à l'allumage joue donc un rôle important sur l'apparition du cliquetis.

Deux cas peuvent se présenter :

- L'auto-inflammation se produit avant que le piston soit parvenu au point mort haut, c'est-à-dire pendant la compression ; on assiste alors aux manifestations signalées antérieurement (cliquetis).
- Le piston franchit le P.M.H. avant que n'apparaisse l'auto-inflammation ; 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'auto-enflamme : on n'observe pas alors de cliquetis.

(12) Voir annexe.

2) 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.

III) Domaine de cliquetis (à l'intérieur des limites d'auto-inflammation).

Comme nous l'avons signalé précédemment, 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'auto-enflamment (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 [9] 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 [10] [11], il s'établit donc pendant cette phase de combustion anormale des contraintes préjudiciables au rendement et à la longévité du moteur thermique.

D) METHODES NORMALISEES DE DETERMINATION DE L'INDICE D'OCTANE D'UN CARBURANT.

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 (13) ; 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.

(13) En toute rigueur, il ne s'agit donc pas d'une mesure.

Ces deux hydrocarbures doivent satisfaire à certains critères physico-chimiques stricts au moment de leur emploi comme carburant dans le moteur expérimental [10] 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 (14) 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 quantités antidétonantes du 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 :

$$\text{I. O. (15)} = 100 + f(T)$$

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 normalisées de l'indice d'octane.

1) LE MOTEUR C.F.R.

Les déterminations d'indice d'octane correspondant aux deux méthodes décrites ci-après, se font sur un moteur expérimental [12] [13]. 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.

2) MÉTHODES DE MESURES NORMALISÉES DE L'INDICE D'OCTANE.

Nous ne décrivons que les deux méthodes les plus couramment utilisées. Toutes les conditions de fonctionnement sont

(14) Ce terme désigne ici la résistance au cliquetis.

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

décrites dans la norme A.F.N.O.R. M 07-026 [13] et les normes A.S.T.M. D 2699-68 et D 2700-68 [12].

Les différences essentielles se situent au niveau de l'avance à l'allumage et de la vitesse de rotation :

- Méthode F_1 ou « recherche » : l'avance à l'allumage est de 13° et la vitesse de rotation du moteur 600 ± 6 tr. min⁻¹.
- Méthode F_2 ou « Moteur » : l'avance à l'allumage est variable et la vitesse de rotation du moteur 700 ± 9 tr. min⁻¹.

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.

E) CONCLUSION.

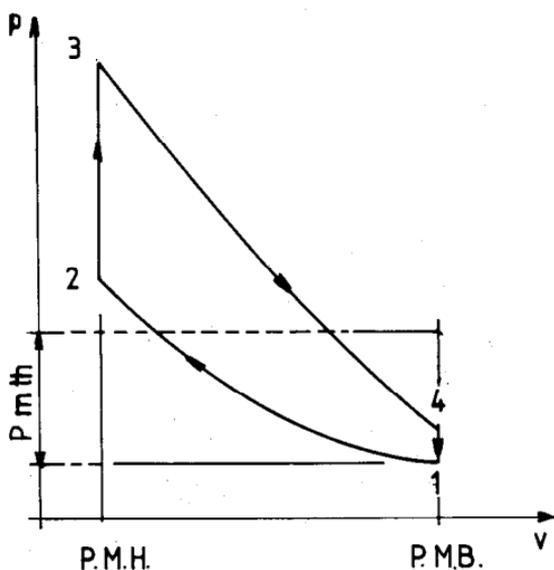
La réduction du cliquetis peut être provoquée par tout facteur qui augmente la vitesse de déflagration laminaire ou (et) qui réduit la vitesse de la réaction conduisant à l'auto-inflammation. Les additifs usuels, comme le plomb tétraéthyle ou tétraméthyle, utilisés pour augmenter la résistance au cliquetis sont sans action sur la vitesse de déflagration laminaire [14] ; il en résulte que les additifs ne peuvent qu'influencer la vitesse de la réaction conduisant à l'auto-inflammation des gaz frais. Toute modification du pourcentage d'additifs à base de plomb, voire son élimination, orientera donc la conception du moteur ainsi que le choix des carburants.

ANNEXE : **PRESSION MOYENNE**

* En considérant le rectangle ayant pour surface celle du cycle 1, 2, 3, 4, 1, correspondant à l'énergie mécanique disponible et pour longueur le volume du cylindre compris entre le P M B et le P M H, sa largeur est appelée pression moyenne du cycle théorique P_{mth} . La pression moyenne est un élément de comparaison commode entre les cycles des moteurs : elle permet de juger la qualité des cycles (comparaison par exemple avec le cycle de CARNOT ou entre le cycle de JOULE, type DIESEL et le cycle de BEAU DE ROCHAS, type moteur à allumage commandé).

* En considérant le cycle réel (B.U.P. n° 699), on détermine la pression moyenne effective.

* Rappelons que le cycle, au sens thermodynamique du terme correspondant à 1, 2, 3, 4, 1 ; l'admission et l'échappement sont des *opérations mécaniques de transvasement* ; en particulier, pendant ces deux phases, *il ne peut être question d'échange de chaleur*.



Nous remercions René HONNART, Professeur au L.E.P. de Villeneuve-d'Ascq, pour sa participation au dessin technique du moteur à taux de compression réglable.

BIBLIOGRAPHIE

-
- [1] D. SCACHE et S. ANTONIK (B.U.P. n° 699).
 - [2] *Technologie de l'automobile E.T.A.I.*
 - [3] S. ANTONIK, *Actualité chimique*, 1985, n° 1 - 2, 73.
 - [4] M. SERRUYS, *Bases chimiques et énergétiques de la combustion - Technique de l'ingénieur, Moteurs thermiques*, vol. B 3.
 - [5] *Thèse DE VUYST*, Université de Valenciennes, 1985.
 - [6] *Thèse SCACHE*, Université de Lille I, 1984.
 - [7] R. VICHNIEVSKY, B. SALE, *Problèmes de la combustion dans les moteurs alternatifs*, rapport I.F.P., n° 261.
 - [8] R. VICHNIEVSKY, B. SALE, *Thermodynamique appliquée à l'étude des moteurs à combustion interne*, Sennac, Paris, 1962.
 - [9] Anonyme, *Knocking of Combustion Engines - International Symposium*, Volkswagen Wolfsburg, Nev 26 - 27, 1981.
 - [10] A. DOUAUD, *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, vol. 38, n° 5, septembre - octobre 1983.
 - [11] I. TRAPY, *Les transferts thermiques dans les moteurs à combustion interne : Mesures et modélisations*, *Revue générale de thermique* n° 2333, mai 1981.
 - [12] *Manual for Rating Motor Fuels by Research and Motor Methods A.S.T.M.*
 - [13] *Méthodes d'essais des produits pétroliers* ; Publication du Bureau de Normalisation du Pétrole, 1964.
 - [14] *Thèse A. M. DIAMY*, Paris, 1967.
-