

Opération

" mille classes, mille chercheurs " :

INITIATION A LA RECHERCHE EN CHIMIE-PHYSIQUE SUR L'EXEMPLE DE L'OXYDATION DE SUBSTANCES ORGANIQUES ET L'APPLICATION A L'AMELIORATION DE L'INDICE D'OCTANE

par Jean MELIN, Lycée Jeanne-d'Arc, Nancy,
et François BARONNET, E.N.S.I.C., Nancy.

Dans le but de développer ses relations avec les jeunes élèves de l'enseignement secondaire, le C.N.R.S. proposait l'opération « Mille classes - Mille chercheurs » à la rentrée scolaire de septembre 1985. Chacun des chercheurs, volontaire pour participer à cette expérience, devait prendre une classe en charge et, en accord avec le professeur concerné définir le programme de ses interventions. Devant la défiance du grand public vis-à-vis de la Chimie résultant pour une part de la présentation qui en est faite par les médias, ceux-ci en retenant surtout les aspects négatifs (pollution par exemple) et la désaffection des étudiants pour cette discipline, quelques chimistes et physico-chimistes ont saisi cette occasion pour mieux faire connaître la Chimie et ses diverses branches et l'importance de l'industrie chimique sur le plan économique. Cette opération était également l'occasion de montrer l'importance de la recherche, tant fondamentale que finalisée en Chimie, Chimie-Physique et Génie Chimique.

Cette opération s'étendait naturellement aux domaines scientifiques relevant de Départements du C.N.R.S. autres que le Département Chimie [Mathématiques et Physiques de Base (MPB), Sciences physiques pour l'Ingénieur (SPI), Terre, Océan, Atmosphère, Espace (TOAE), Sciences de la Vie, Sciences de l'Homme et de la Société...], mais nous décrivons ici uniquement une expérience poursuivie avec un Laboratoire associé dépendant du Département Chimie.

1. MISE EN PLACE DE L'OPERATION.

Le Lycée Jeanne-d'Arc de Nancy est situé à proximité de l'Ecole Nationale Supérieure des Industries Chimiques, une des cinq écoles d'ingénieurs de l'Institut National Polytechnique de Lorraine. Les programmes de Sciences physiques et de Géographie des classes de Première S sensibilisent les élèves aux problèmes énergétiques. Les adolescents sont souvent intéressés par les

engins mécaniques et les moteurs qui les propulsent. Les dégâts provoqués par « les pluies acides » dont l'origine est attribuée à la pollution atmosphérique constituent un sujet d'actualité d'une grande importance pour l'économie et l'environnement ; ils ont fait parfois l'objet d'articles à sensation dans la presse. Ces raisons sont à l'origine d'une collaboration fructueuse entre la classe de Première S₃ du Lycée Jeanne-d'Arc (Professeur responsable : M. Jean MELIN) et M. François BARONNET, Directeur de Recherche au Laboratoire de Chimie Physique des Réactions (Unité Associée au C.N.R.S. n° 328) et dont l'équipe de recherche (Physico-Chimie des Hydrocarbures) est située à l'E.N.S.I.C. Le thème retenu était : « Contribution apportée par la recherche fondamentale en Chimie Physique à l'adaptation des carburants aux contraintes liées aux économies d'énergie et à la lutte contre la pollution ».

II. DEROULEMENT DE L'OPERATION.

L'opération s'est déroulée en plusieurs étapes, chacune d'entre elles faisant intervenir tout ou partie de la classe suivant la motivation des élèves.

1) Exposés généraux devant toute la classe.

Trois exposés du chercheur ont successivement traité les questions suivantes :

- présentation générale du laboratoire et de ses thèmes de recherche ainsi que du C.N.R.S. à l'échelon régional et national,
- problèmes énergétiques liés à l'abaissement de la consommation de pétrole brut en France et à la montée en puissance du nucléaire ; conséquences pour l'industrie pétrolière française : modification des structures de marché, approvisionnement des unités de pétrochimie (vapocraquage par exemple), traitement des coupes lourdes,
- évolution des carburants et lutte contre la pollution atmosphérique : problème du plomb dans les carburants, pollution atmosphérique globale et pollution attribuée à l'automobile (dont les « pluies acides ») ; adaptation des carburants, des moteurs et épurateurs catalytiques ; rôle de la recherche fondamentale et finalisée pour la résolution de ces problèmes.

Ces exposés peuvent être considérés comme une approche différente et complémentaire de certaines parties du programme de Première S, par exemple : « Sources d'énergie utilisables sur la terre - Présentation des ressources organiques naturelles - Chaîne carbonée des alcanes - Insaturation dans la chaîne carbonée - Composés aromatiques ».

2) Visite du Laboratoire par l'ensemble de la classe.

Cette visite a été organisée de la manière suivante :

- présentation des principaux axes de recherche du Laboratoire (Cinétique chimique en phase gazeuse et applications, Photo-physique et Photochimie, Electrochimie et Photoélectrochimie) et des appareillages et méthodes mis en œuvre (chromatographie, spectroscopies, lasers, informatique, etc.).
- visite du Laboratoire par petits groupes, axée sur des expériences caractéristiques relevant des domaines précités.

De telles visites permettent de montrer aux élèves que la recherche poursuivie dans les universités et au C.N.R.S., malgré son caractère fondamental, n'est pas isolée des problèmes posés par l'industrie et l'environnement socio-économique, en particulier par les contrats passés avec l'industrie et grâce aux structures de concertation mises en place (groupes de travail université-industrie, séminaires et rencontres internationales...).

3) Visite du F.I.T.

Le Festival de l'Industrie et de la Technologie était la manifestation, on ne peut plus opportune, pour montrer aux élèves quelques résultats technologiques concrets de la recherche appliquée à l'industrie. L'ensemble de la classe s'est donc rendu à La Villette pour une visite du F.I.T., rendue possible grâce à la participation financière de l'ANVAR qui a réglé la moitié des frais occasionnés par ce déplacement, l'autre moitié restant à la charge des élèves. Cette subvention de l'ANVAR a été accordée dans le cadre d'un Projet d'Action Educative (PAE), mettant à contribution le professeur de Sciences physiques en collaboration avec le professeur de Sciences naturelles.

4) Dossier sur les pollutions liées à l'utilisation des hydrocarbures.

Les élèves ont rassemblé un certain nombre d'articles traitant du sujet, parus dans la presse à grand tirage, la presse spécialisée et quelques revues de vulgarisation scientifique. Il faut y ajouter le rapport au Premier ministre « Pollution atmosphérique et pluies acides » dit rapport Valroff et le rapport de l'Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques (rapporteur G. LE BAILL) sur les formes de pollution atmosphérique à longue distance dites « pluies acides ».

5) Manipulations au Laboratoire.

Une dizaine d'élèves, très motivés, ont reçu un complément d'explications et une formation très élémentaire aux techniques de laboratoire.

Le phénomène expérimental à la base des manipulations qui seront confiées aux élèves, à savoir l'oxydation non isotherme d'alcanes et plus précisément les flammes froides, a fait l'objet d'une présentation originale sous forme d'un film intitulé « Flammes normales, Flammes froides » dû à J. P. SAWERYSSIN et H. TOURBEZ de l'Université de Lille et distribué par le Service du Film de Recherche Scientifique (MEN/CNDP). Grâce à l'utilisation d'un tube intensificateur d'images et à des caméras ciné et vidéo, les phénomènes liés à l'oxydation et à la combustion en système non agité ont pu être visualisés *in situ* dans un réacteur statique analogue à celui utilisé sur les montages de Nancy.

Cette présentation était beaucoup plus intéressante qu'une démonstration de laboratoire car les phénomènes ne sont pas observables directement et ne se traduisent que par des courbes sur des enregistreurs si l'on se borne aux mesures usuelles (pression et température).

Puis en se relayant par groupes de deux ou trois, ils ont exécuté un mini-programme de recherche en une vingtaine de séances sur un appareillage existant et provisoirement libre.

6) Montage audiovisuel.

Quelques élèves, passionnés par les montages audiovisuels, ont préparé un compte rendu de la visite du F.I.T. et des expériences de laboratoire sous forme de diapositives accompagnées de commentaires et de musique appropriée. Ce montage a été présenté au cours de trois séances : aux élèves de la classe, aux élèves du lycée et aux parents d'élèves.

III. EXPERIENCES DE LABORATOIRE.

1) Bases scientifiques.

a) PHÉNOMÈNE DE FLAMME FROIDE.

L'oxydation des hydrocarbures saturés en phase gazeuse est assez complexe ; elle donne lieu à des réactions lentes et à des combustions classiques (inflammations) ; mais dans des domaines de pression de quelques dizaines à quelques centaines de torr et de température (vers 300 °C) dépendant de la nature et de la structure des hydrocarbures, il se produit également un phénomène intermédiaire connu sous le nom de « flamme froide ». Il s'agit d'une élévation transitoire de température du milieu réactionnel pouvant atteindre 100 à 200 °C au-dessus de la température de consigne et d'une durée de quelques secondes. L'augmentation transitoire de température conduit à une pulsation de pression en réacteur fermé s'accompagnant d'une faible émission lumineuse correspondant à l'émission du formaldéhyde excité. La

flamme froide peut être unique ou se répéter plusieurs fois à des intervalles de temps plus ou moins réguliers, le phénomène prenant alors une allure pseudo-périodique. Elle ne se produit pas immédiatement après introduction des réactifs dans l'enceinte de combustion, mais après une durée variable (entre une fraction de seconde et plusieurs secondes, voire plusieurs minutes ou dizaines de minutes) appelée période d'induction (*cf* fig. 1 et 2).

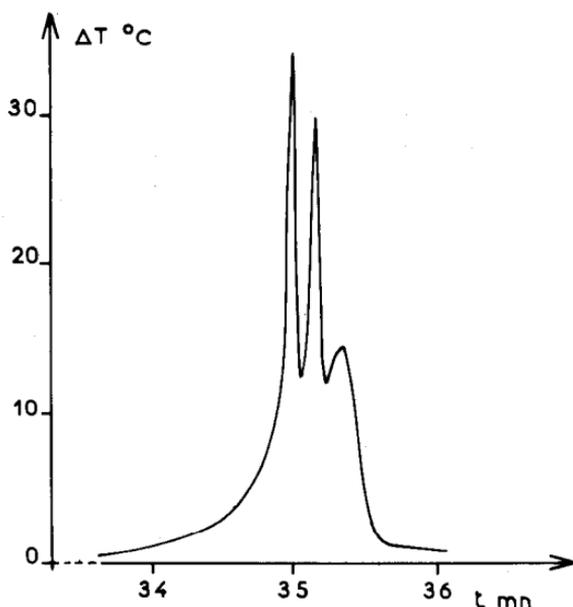


Fig. 1. — Enregistrements de température sur un mélange propane-oxygène (2/1). Température initiale : 323 °C ; Pression initiale : 292 torr (résultats du Laboratoire).

b) CLIQUETIS DES MOTEURS.

L'augmentation du taux de compression dans la chambre de combustion est un moyen efficace pour accroître la puissance spécifique des moteurs et diminuer les consommations. Mais, lorsque l'indice d'octane du carburant (qui traduit en fait la résistance à l'auto-inflammation spontanée) est insuffisant, les combustions deviennent anormales et sont appelées parfois improprement détonantes provoquant ainsi le cliquetis des moteurs à allumage commandé qui est la manifestation audible de ces combustions anormales. La plupart des auteurs admettent maintenant que le cliquetis est provoqué par une auto-inflammation spontanée du mélange air-carburant non encore brûlé, appelé « end-gas », fortement comprimé à la fois par le mouvement du

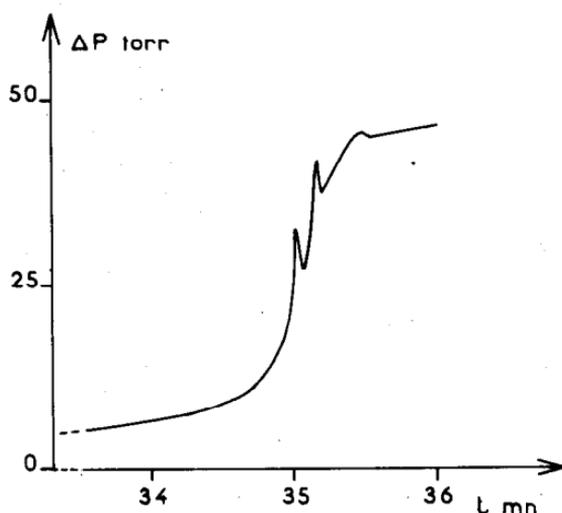


Fig. 2. — Enregistrements de pression sur un mélange propane-oxygène (2/1). Mêmes conditions que fig. 1 (résultats du Laboratoire).

piston et l'augmentation de pression des gaz déjà brûlés (cf. fig. 3), plus précisément par le front de flamme de la combustion normale initiée par l'étincelle à la bougie.

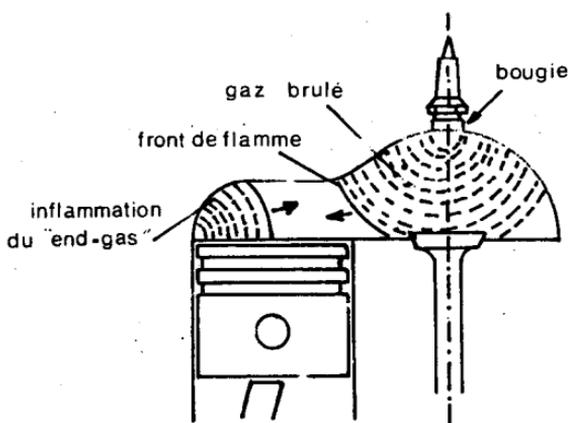


Fig. 3. — Schéma de principe d'une chambre de combustion montrant la compression du « end-gas » par le front de flamme.

c) FLAMMES FROIDES ET CLIQUETIS DES MOTEURS.

D'un point de vue physico-chimique, l'auto-inflammation du « end-gas » est une inflammation dite de 2^e stade, c'est-à-dire que si l'on examine de manière plus précise l'allure du profil de tem-

pérature en fonction du temps (fig. 4), l'inflammation proprement dite apparaît être précédée par une flamme froide qui, au lieu de s'éteindre, paraît basculer vers l'inflammation. Des auteurs tels que FISH en Grande-Bretagne ont montré qu'il y avait

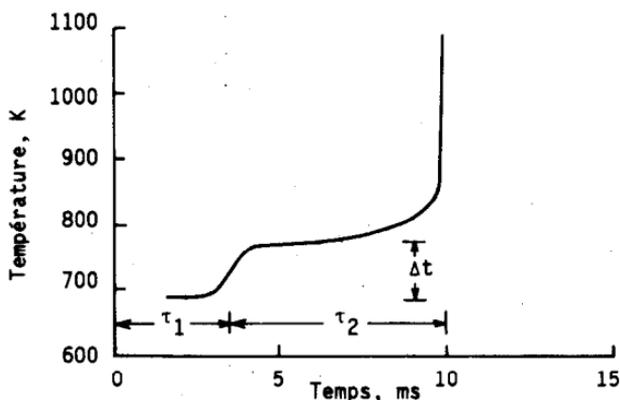


Fig. 4. — Enregistrement d'une inflammation de 2^e stade en machine à compression rapide. Mélange isoctane 90 %, *n*-heptane 10 % avec de l'air (stoechiométrie 0,9) [d'après L. J. KIRSCH et C. P. QUINN].

une corrélation entre l'intensité de cette flamme froide mesurée par l'augmentation de pression correspondante Δp et le délai τ_2 séparant la flamme froide de l'inflammation proprement dite :

$$\tau_2 = k \Delta p^{-1.5 \pm 0.2}.$$

En d'autres termes, plus la flamme froide est intense, plus le délai la séparant de l'auto-inflammation proprement dite est court. Ceci peut d'ailleurs s'expliquer qualitativement si l'on considère que la flamme froide forme d'appréciables quantités de substances organiques dont des aldéhydes, des peroxydes ou des hydroperoxydes qui, par leur réactivité, peuvent contribuer à l'auto-inflammation (notion de branchement dégénéré due à SEMENOV).

Par conséquent, des études portant sur le délai et l'intensité des flammes froides peuvent constituer une méthode d'approche du très important problème de l'auto-inflammation spontanée, compte tenu de son rôle dans la combustion dans les moteurs.

Il faut d'ailleurs noter à ce propos que l'auto-inflammation spontanée dans les moteurs à allumage commandé, dont le cliquetis constitue un phénomène apparent, peut avoir des effets destructeurs au niveau mécanique par les ondes de pression engendrées par une brusque inflammation de l'ensemble de la

charge mais aussi au niveau échanges thermiques par le brusque accroissement du flux thermique aux parois pouvant se traduire par exemple par des pistons percés.

d) ETUDES DE LABORATOIRE.

Le but de la mise au point précédente, brève et nécessairement incomplète, était de faire ressortir l'analogie de nature et de propriétés des flammes froides observées dans un appareillage de laboratoire et de celles précédant et contrôlant l'inflammation de 2^e stade, y compris à des pressions et à des températures plus élevées correspondant à celles rencontrées dans un moteur en fin de compression. Cette propriété permet donc de penser que les résultats acquis dans un montage de laboratoire sont transposables au cas d'un moteur, d'un point de vue qualitatif au moins. Ce point de vue a été corroboré par diverses études de nature expérimentale comme celles de FISH qui a montré que les produits formés en régime flammes froides étaient les mêmes dans un montage statique de laboratoire à pression sub-atmosphérique, dans une machine à compression rapide reproduisant les conditions atteintes en fin de compression dans un moteur et dans un moteur expérimental RICARDO.

Il a été confirmé également par des simulations (comme celles de QUINN et co-auteurs) à partir de modèles mécanistiques faisant intervenir aussi des paramètres physiques et thermiques (exothermicité des réactions, capacité calorifique des constituants, échanges aux parois,...). Ces modèles mis au point pour rendre compte des résultats sur machine à compression rapide, se sont révélés, par la simple adaptation des paramètres physiques, parfaitement capables de simuler les résultats obtenus en appareillage de laboratoire sur un exemple tel que celui du *n*-butane.

Remarquons aussi que des appareils commerciaux pour l'estimation des indices d'octane, évitant de passer par la procédure relativement lourde et fastidieuse de mesure sur moteur CFR, ont été développés à partir de cette analogie : ce sont les appareils ARCA-FOXBORO 81 L (appareil de laboratoire) et 81 P (appareil de process permettant de suivre en continu l'indice d'octane de la production d'une unité).

Notre démarche a été la suivante : nous avons choisi une réaction de laboratoire comme réaction modèle et sur cette réaction nous étudions l'influence de diverses substances organiques utilisables comme constituants de carburants. Si la substance ajoutée retarde l'apparition de la flamme froide de la réaction modèle, on peut penser *a priori* qu'elle aura un rôle favorable sur l'auto-inflammation spontanée et qu'elle pourra la retarder suffisamment pour permettre la propagation du front de flamme

issu de l'étincelle à la bougie dans la quasi-totalité de la chambre de combustion.

Nous avons choisi comme réaction de référence l'oxydation en flamme froide du *n*-pentane. Cet alcane s'oxyde relativement facilement dans les conditions des essais de laboratoire et ses propriétés physiques (tension de vapeur en particulier) sont bien adaptées au mode opératoire que nous décrirons dans ce qui suit. Par ailleurs son indice d'octane (valeur de l'indice recherche 62) paraissait bien adapté à de tels essais, n'étant ni trop haut, ni trop bas ce qui permettait d'avoir des essais significatifs.

2) Montage.

Le dispositif expérimental, relativement simple, comporte des appareils d'utilisation courante et les mesures y sont immédiates et à lecture directe. Il s'agit du montage statique classique dérivé de l'appareillage de MALLARD et LE CHATELIER ; un réacteur cylindrique thermostaté placé dans un four cylindrique muni d'un régulateur de température électronique ; un manomètre à mercure ; des réserves, pour le mélange réactif, pour l'hydrocarbure de référence, l'additif et l'oxygène. Un enregistreur relié à un thermocouple chromel alumel fixe ($\varnothing = 0,08$ mm) placé au centre du réacteur permet de relever les variations de température de la phase gazeuse en fonction du temps avec un temps de réponse suffisamment court. La période d'induction est mesurée au moyen d'un chronomètre (cf fig. 5) et peut être contrôlée par les enre-

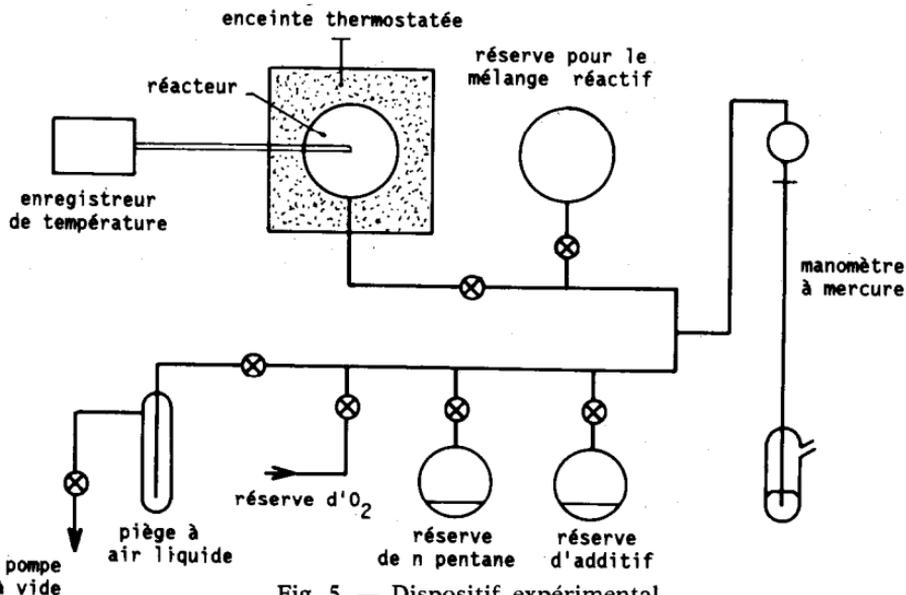


Fig. 5. — Dispositif expérimental.

gistrements graphiques. Au préalable l'appareillage est vidé de tous les gaz qu'il peut contenir au moyen d'une pompe à palettes, ensuite les réactifs sont homogénéisés dans la réserve ; la composition initiale du mélange réactif étant définie grâce au manomètre (addition successive des divers constituants à des pressions connues) ; enfin le mélange gazeux est introduit dans le réacteur à l'instant $t = 0$. L'évolution de la température est donc suivie à partir de cet instant initial. Si nécessaire, la pression dans le réacteur à l'aide d'un capteur et l'émission lumineuse à l'aide d'un tube photomultiplicateur peuvent aussi être suivies en continu.

L'oxydation du *n*-pentane par de l'oxygène en présence de divers additifs a été étudiée dans le domaine de pression et de température où ce mélange produit habituellement des flammes froides : une pression de 92 torr (12 300 Pa) et une température de 290 °C ont été retenues.

Un mélange équimolaire d'oxygène et de substance organique est introduit dans le réacteur, la période d'induction est mesurée à l'aide du chronomètre et l'augmentation de température produite par la flamme froide au moyen de l'enregistreur relié au thermocouple. Une fraction variable de *n*-pentane est remplacée par l'additif étudié. La notation suivante est habituellement utilisée :

P_a = pression partielle de l'additif,

P_n = pression partielle de *n*-pentane,

τ_0 = période d'induction de la première flamme froide pour le *n*-pentane seul,

τ = période d'induction de la première flamme froide pour le mélange *n*-pentane + additif.

Les variations de τ/τ_0 en fonction de $P_a/(P_a + P_n)$ sont ensuite étudiées ; plus le rapport τ/τ_0 est supérieur à 1, traduisant ainsi l'effet inhibiteur sur l'apparition de la première flamme froide, plus la substance ajoutée pourrait exercer une action anti-détonante.

3) Additifs étudiés et résultats.

a) INFLUENCE D'ADDITIFS CONNUS :

L'influence d'additifs que l'on peut considérer comme des références comme le *n*-heptane (indice d'octane 0), l'isooctane des pétroliers (triméthyl-2, 2, 4 pentane, indice d'octane 100) le MTBE (méthyl tert-butyl éther) a d'abord été examinée afin de contrôler la fiabilité de l'appareillage et l'habileté des jeunes manipulateurs (*cf* fig. 6).

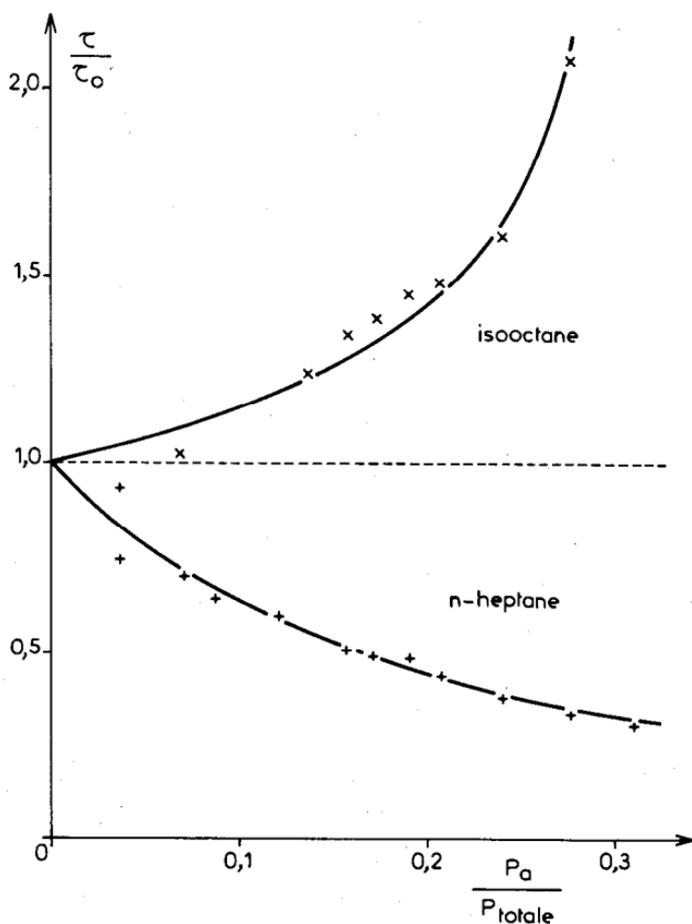


Fig. 6. — Variations relatives de la période d'induction de la première flamme froide du *n*-pentane. L'effet inhibiteur de l'isooctane et l'effet accélérateur du *n*-heptane apparaissent clairement.

b) INFLUENCE D'AUTRES ADDITIFS :

Une étude prospective, mettant à contribution d'autres réactifs a ensuite été entreprise. Des éthers oxydes comme l'éthyl butyl éther et l'éthyl tert-butyl éther (ETBE), des composés hétérocycliques comme le furanne et le méthyl-furanne (sylvane), un alcool, l'éthanol ont successivement été éprouvés (*cf* fig. 7).

4) Discussion et interprétation.

L'indice d'octane d'un carburant, défini à partir de mélanges *n*-heptane-isooctane, est une valeur liée à son pouvoir antidéto-

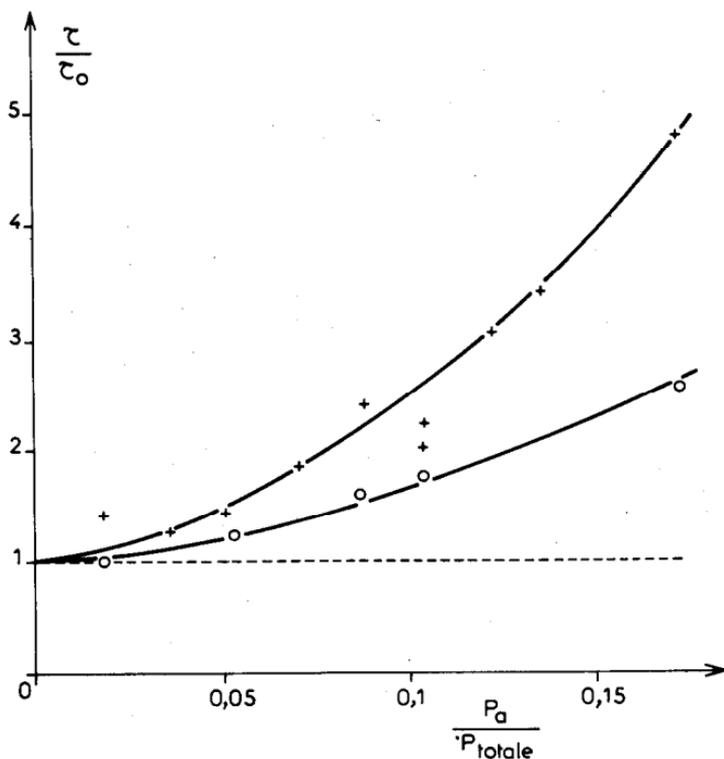


Fig. 7. — Variations relatives de la période d'induction de la première flamme froide du *n*-pentane :

+ additif éthyl-tert-butyl éter (ETBE),

o additif éthanol.

nant : 0 avec l'heptane pur, l'auto-inflammation est facile ; 100 avec l'isooctane pur, l'auto-inflammation est plus difficile. Par ailleurs, il est bien connu que l'addition de MTBE améliore l'indice d'octane des carburants. L'augmentation de la période d'induction de la première flamme froide avec l'isooctane et le MTBE comme additifs et la diminution de cette période d'induction avec le *n*-heptane sont en parfait accord avec les résultats déjà connus : comme nous l'avons vu, il existe une corrélation entre les phénomènes d'auto-inflammation dans les moteurs à allumage commandé et les flammes froides des substances organiques. Il faut cependant souligner que les résultats obtenus avec un montage statique de laboratoire ne sont pas quantitativement transposables à un moteur réel, les conditions de température et surtout de pression étant notablement différentes ; ils donnent

seulement une première indication sur les produits potentiellement utilisables. C'est ainsi que les expériences de laboratoire peuvent conduire à une sorte de « présélection » de produits potentiellement intéressants avec une technique expérimentale moins lourde que le moteur CFR.

Ainsi les essais d'orientation effectués avec les autres additifs ne sont pas sans intérêt. Ils justifient l'utilisation de l'éthanol comme composant de certains carburants, confirment l'effet inhibiteur de certains éthers oxydes en particulier de deux d'entre eux déjà utilisés commercialement dans des carburants à haut indice d'octane ; certains résultats originaux méritent d'être approfondis pour préciser le mode d'action de ces substances anti-détonantes et essayer d'en élucider les mécanismes réactionnels. Cet aspect pose d'ailleurs d'intéressants problèmes de cinétique des réactions complexes, tant d'un point de vue fondamental que d'un point de vue finalisé. C'est ainsi qu'une meilleure compréhension de l'action de substances capables de relever l'indice d'octane au niveau moléculaire pourrait être susceptible de favoriser la mise au point de nouvelles substances ayant un effet analogue.

CONCLUSION.

A quelques réserves près le bilan de cette opération « mille classes, mille chercheurs » est positif et, pour certains élèves, il s'agit d'une expérience très intéressante dont ils ont su tirer le meilleur profit. Pour le chercheur responsable et, à un degré moindre, pour le professeur de la classe, une action de ce genre nécessite un engagement personnel assez important et un investissement horaire qui n'est pas à négliger, ceci sans parler des problèmes matériels et financiers qui n'ont pas manqué de se poser.

Du point de vue pédagogique, il y a lieu de dégager deux niveaux de réceptivité :

Pour l'ensemble de la classe, le résultat est assez nuancé ; en effet, les élèves ont trop souvent tendance à considérer les sorties ou les exposés comme des dérivatifs et leur niveau d'attention n'est pas toujours très élevé dans ce genre d'activités ; en outre, ils éprouvent de grandes difficultés à tirer profit des exercices non didactiques. Cependant pour la majorité d'entre eux, le déplacement au F.I.T. et à Paris, la visite du laboratoire et les exposés sur le C.N.R.S., sur les problèmes d'approvisionnement en énergie, sur l'évolution des carburants et la lutte contre la pollution atmosphérique ont présenté un réel intérêt.

Cette expérience a été utile également en montrant aux élèves que les différentes matières au programme ne devaient pas être

considérées comme des entités séparées mais qu'il y avait en réalité une forte interdépendance. Certains élèves ont ainsi paru découvrir avec étonnement que les problèmes économiques (prix de l'énergie par exemple) pouvaient avoir d'importantes conséquences sur les industries pétrolières et chimiques (changement de procédés ou de matières premières, développement de recherches appliquées dans différents secteurs...).

Les quelques élèves motivés, soit par le travail de laboratoire, soit par le montage audiovisuel ont fourni un gros effort en supplément de leurs activités habituelles. Ils étaient très consciencieux et enthousiasmés par l'expérience. Les exercices de contrôle du dernier trimestre ont montré qu'ils avaient pris conscience de la démarche expérimentale en Sciences physiques, ce qui constitue un résultat très appréciable.

Du point de vue scientifique, l'interdépendance entre les flammes froides des substances organiques et les phénomènes d'auto-inflammation dans les moteurs à allumage commandé a pu être vérifiée. Quelques résultats originaux, obtenus avec des composés non encore expérimentés, ont même été dégagés. La réalisation des expériences de laboratoire exécutées par les élèves suscite quelques remarques :

- Elles ont été grandement facilitées par la proximité géographique entre le lycée et le laboratoire de recherche, ce qui ne posait aucun problème de déplacement.
- L'administration du Lycée, très favorable à l'expérience, et l'amabilité du personnel et des chercheurs en titre du laboratoire ont également contribué à la bonne marche de la collaboration.
- Il est indispensable de prévoir un sujet de recherche avec un montage simple, des mesures faciles et se prêtant à un emploi du temps par séquences courtes et irrégulières. Le nombre de sujets répondant à ces critères, accessibles à des élèves de Première et présentant à la fois un aspect original et motivant, c'est-à-dire suffisamment proche de problèmes actuels, est nécessairement limité.

Tout ceci explique que la même opération a été conduite de façon très différente par d'autres équipes ; cette diversité, révélée au cours d'une réunion de mise au point sur les actions menées dans l'Académie de Nancy-Metz, fait apparaître la richesse pédagogique de l'expérience.

En dehors de l'aspect strictement pédagogique, il nous semble que l'opération a eu d'intéressantes retombées au niveau d'une meilleure connaissance de la recherche fondamentale, de ses

structures et plus spécifiquement du C.N.R.S., domaine souvent présenté de manière erronée, voire caricaturale par les médias. Des contacts personnels ont montré que cet effet positif ne s'était pas limité aux élèves mais s'était étendu à leurs familles. Ces opérations, malgré leur impact nécessairement limité paraissent ainsi s'inscrire dans le cadre d'une meilleure information du grand public dans la ligne des expositions « Images de la Recherche ». A long terme, elles peuvent se révéler bénéfiques, y compris en éveillant de nouvelles vocations de jeunes chercheurs.

BIBLIOGRAPHIE

- *Rapport sur les formes de pollution atmosphérique à longue distance dites pluies acides*; rapporteur G. LE BAILL, Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques (décembre 1985).
- J. VALROFF, *Pollution atmosphérique et pluies acides*, rapport du Premier ministre, La Documentation Française, Paris (1985).
- *Le dossier du plomb additif des carburants automobiles*, Institut de Recherche des Transports, Note d'information n° 29 (novembre 1983).
- *Lead in petrol, an assessment of the feasibility and costs of further action to limit lead emissions from vehicles*, Department of Transport, Londres (1979).
- R. VICHNIEVSKY, *Les moteurs à combustion interne*, Courrier du C.N.R.S., n° 48 p. 23 (novembre 1982).
- M. BOHY, *L'évolution des carburants : même sans plomb, l'essence ne sera pas révolutionnaire*, L'Actualité Chimique; 1^{re} partie, p. 39 (septembre 1985), 2^e partie, p. 43 (octobre 1985).
- J. C. GUIBET et A. CHAUVEL, *Utilisation de produits organiques oxygénés comme carburants et combustibles dans les moteurs*, Editions Technip, Paris (1981).
- F. BARONNET, *Les flammes froides des hydrocarbures ; application à la technologie des moteurs et aux carburants*, L'Ingénieur des Industries Chimiques, E.N.S.I.C., Nancy (1975 et 1976).
- A. FISH, *The cool flames of hydrocarbons*, Angew. Chemie, Interna. Edit., 7, 45 (1968).
- S. W. BENSON, *The kinetics and thermochemistry of chemical oxydation with application to combustion and flames*, Progr. Energy Combust. Sci., 7, 125 (1981).

- L. J. KIRSCH et C. P. QUINN, *Progress towards a comprehensive model of hydrocarbon autoignition*, J. de Chimie phys. 82, 459 (1985).
- W. S. AFFLECK et A. FISH, *Two-stage ignition under engine conditions parallels that at low pressures*, 11th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh (1967).
- J. C. BROCARD, F. BARONNET et H. E. O'NEAL, *Chemical kinetics of the oxidation of methyl tert-butyl ether (MTBE)*, Combustion and Flame, 52, 25 (1983).
- L. J. ROGERS, *Microprocessor based continuous octane analyzer*, AID-CHEMPID Symposium, Houston (Texas), 23 mai 1978.
- S. ANTONIK, L. DELFOSSE et C. BAILLET, *Méthode simplifiée pour la mesure d'un indice d'octane*, Bull. Soc. Chim. Fr., 1887 (1973).
- A. KARBASSIAN, R. I. BEN AIM, J. CHAMBOUX et V. VIOSSAT, *Recherche d'une relation entre l'indice d'octane et l'oxydation lente de basse température d'une essence*, Rev. de l'Inst. Fr. Pétrole, 36, 801 (1981).
- G. DE SOETE, *Aspects fondamentaux de la combustion en phase gazeuse*, Technip, Paris (1976).

Remarque.

Cette bibliographie ne vise aucunement à être exhaustive mais à suggérer quelques lectures complémentaires et à citer quelques articles fondamentaux à partir desquels a été développée la méthodologie précédente.
