



*Séance solennelle de l'Académie des sciences / 22 novembre 2011
Discours des nouveaux Membres sous la coupole de l'Institut de France*

L'exploration de la combustion : turbulence, dynamique, conditions extrêmes

Sébastien Candel

Messieurs le Président et Vice-président de l'Académie des sciences,
Madame et Monsieur les secrétaires perpétuels,
chère consœurs et chers confrères,
mesdames et messieurs, chers amis.

Pour parler de la combustion, il est naturel de tenir un discours enflammé et je brûlais d'envie de faire cet exposé. La combustion est sans nul doute à la source de la civilisation. L'homme maîtrise le feu depuis 1/2 million d'années, mais il sait allumer le feu depuis seulement 30000 ans. La science de la combustion, c'est-à-dire la compréhension des mécanismes, est bien plus récente. Il y avait bien quelques théories comme celle du phlogistique, que l'on peut qualifier de « fumeuses ». Mais il a fallu attendre les travaux de Lavoisier, il y a deux cents ans, pour disposer d'une représentation convenable des réactions chimiques. Un siècle plus tard, la première théorie des flammes est proposée par Mallard et Le Chatelier. La théorie moderne des flammes et des détonations est issue des travaux de Zeldovich, Frank Kamenetski, Chapman, Jouguet, Von Neumann réalisés dans la première moitié du XX^e siècle. La combustion est aujourd'hui essentielle à beaucoup d'activités humaines, elle fait rouler la plupart des voitures, voler les avions et les fusées, elle procure 85% de l'énergie primaire. Je ne parle ici que des aspects positifs de la combustion mais il y a aussi les risques et la pollution qu'elle induit et qu'on s'emploie à réduire.

La combustion continue de poser des questions difficiles. Subtile combinaison de dynamique des fluides, cinétique chimique, thermodynamique et phénomènes de transport, elle associe toutes les difficultés de ces quatre disciplines. Comme les vitesses de réaction suivent des lois exponentielles (d'Arrhenius), les problèmes sont mathématiquement raides. Les zones de

réaction sont minces, de l'ordre de quelques dixièmes de mm, mais l'écoulement est le plus souvent turbulent ce qui donne aux problèmes de combustion un caractère fondamentalement multi-échelle. Le grand prix Nobel Richard Feynman, que j'ai eu la chance de connaître au Caltech, disait que la turbulence était le grand problème non résolu de la physique classique. La combustion turbulente allie les complexités de la turbulence à celles de la cinétique chimique en un problème doublement complexe, un problème que j'ai abordé par le biais d'une analyse de la production, du transport et de la destruction de surface de flamme, accompagnée d'une représentation des taux de réaction locaux. Cette modélisation a eu un certain succès et elle est couramment utilisée pour décrire la combustion dans les moteurs.

Pour traiter de problèmes aussi difficiles, il fallait combiner analyse théorique expérimentation, modélisation et simulation, un ensemble que j'ai essayé de mettre en oeuvre. Nous devions jouer avec le feu et faire feu de tout bois. Cette période a été celle du développement de la Computational Fluid Dynamics, la CFD, la mécanique des fluides numérique qui, à partir des années 70 a permis l'analyse de problèmes d'écoulement de plus en plus complexes, et celle de diagnostics optiques et laser exploitant les possibilités nouvelles offertes par le rayonnement cohérent et l'acquisition d'images numériques.

Avec cette stratégie combinée nous avons analysé la structure des flammes, les conditions d'allumage et d'extinction, la dynamique des flammes, les conditions qui conduisent aux instabilités de combustion et le contrôle actif de ces phénomènes. De la Computational Fluid Dynamics devenue classique nous sommes passés dans les années 90 à ce que j'ai appelé la Computational Flame Dynamics, la dynamique des flammes numérique, le sigle est le même mais la complexité est plus grande. Nous savons maintenant calculer des flammes turbulentes dans les conditions extrêmes qui règnent dans les moteurs fusées où la pression dépasse la valeur critique, alors que la température d'injection est inférieure à la température critique, des conditions qu'on peut qualifier de transcritiques. Il fallait pour cela avoir la connaissance préalable du sujet et nous l'avions au travers d'une série d'expériences systématiques réalisées, avec mon équipe, sur des flammes d'oxygène liquide et d'hydrogène ou de méthane à haute pression. Le problème de la turbulence n'est pas résolu sur le fond, mais le calcul des écoulements turbulents a progressé d'une façon étonnante. Nous savons traiter des problèmes simples, nous savons désormais résoudre des questions complexes et envisager des applications de plus en plus réalistes.

Pour terminer cet exposé, j'aimerais évoquer trois étapes de mon parcours :

- D'abord, ma formation à la recherche au cours de quatre années passées au California Institute of Technology ou j'ai préparé une thèse de PhD sous la direction de Frank Marble, lui-même un des élèves du grand Theodor Von Karman. Cette période au Caltech m'a donné une impulsion initiale déterminante.
- Ensuite, mon retour à l'Ecole Centrale Paris comme professeur à partir de 1978, avec la responsabilité des options Air-Espace puis Mécanique Aéronautique Energie que j'ai pilotées pendant plus de 30 ans et dans lesquelles j'ai formé plus de mille élèves ingénieurs dont certains sont aussi devenus docteurs. A Centrale, j'ai rejoint une unité propre du CNRS installée sur le campus. J'aimerais mentionner l'aide constante du secteur SPI du CNRS (les sciences pour l'ingénieur du CNRS) dirigé à l'époque par notre confrère Michel Combarrous. Je dois évidemment beaucoup à mon équipe et à tous les doctorants qui ont participé à nos travaux.
- Enfin, mes élections comme correspondant, puis comme membre de cette Compagnie, pour lesquelles je vous remercie bien sincèrement. Elles m'ont ouvert des pans entiers de la connaissance et m'ont donné l'occasion de rencontrer des personnalités exceptionnelles. Vous comprendrez combien je suis heureux d'être parmi vous et de participer à la vie de cette Académie, « tout feu tout flamme ».