

Développement d'un modèle en vue de la prédiction du rallumage d'un foyer de turboréacteur à haute altitude

Véronique Quintilla^a, Renaud Lecourt^b, Gérard Lavergne^b

^a SNECMA MOTEURS–YKC, site de Villaroche, 77550 Moissy–Cramayel, France

^b ONERA–DMAE, centre de Toulouse, BP 4025, 31055 Toulouse cedex, France

Reçu le 18 février 2002 ; accepté après révision le 17 septembre 2002

Note présentée par Sébastien Candel.

Résumé

Dans le contexte du rallumage d'une chambre de turboréacteur après extinction en vol, un modèle a été développé afin de décrire l'allumage électrique d'un noyau de gouttes de combustible à basse pression et faible température. Le modèle permet de résoudre les équations de conservation de la masse, des espèces et de l'énergie en tenant compte des différents phénomènes physiques et chimiques inhérents au processus d'allumage. Le modèle d'allumage et les premiers résultats issus de l'application de ce modèle à une configuration expérimentale sont présentés dans cette Note. *Pour citer cet article* : V. Quintilla et al., C. R. Mécanique 330 (2002) 811–818.

© 2002 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

combustion / allumage / étincelle / noyau de gouttes / écoulement diphasique / cinétique détaillée / haute altitude

Development of a model to predict the ignition performance of a turbojet engine at high altitude

Abstract

Within the context of turbojet engine re-ignition after in-flight extinction, a thermo-diffusive model has been developed to describe the electrical ignition, at low pressure and low temperature, of a cluster of fuel droplets. The model involves the resolution of the conservation equations of mass, species and energy. It also takes into account the various physical and chemical phenomena occurring during the ignition process. This Note presents the ignition model and preliminary results of this model applied to an experimental configuration. *To cite this article*: V. Quintilla et al., C. R. Mécanique 330 (2002) 811–818.

© 2002 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

combustion / ignition / spark / cluster of drops / two-phase flow / detailed chemical kinetics / high altitude

Adresse e-mail : gerard.lavergne@oncert.fr (G. Lavergne).

*Abridged English version***1. Introduction**

The ignition performance of an aircraft engine is usually expressed in terms of the range of flight conditions over which combustion can be reestablished after a flameout has occurred at high altitude. Usually, a Mach-altitude domain in which combustion can be established is used to represent the ignition performance of an aircraft engine. Nowadays, the prediction of this domain is mostly based on empirical rules that are not suitable for emerging technologies, such as lean premixed prevaporized combustors. In this context, the objective is to develop a computational tool able to predict the probability of re-ignition for a turbojet engine combustion chamber according to the two-phase flow conditions and the igniter location.

The fact that the ignition process is not a single-step mechanism but actually occurs in three distinct phases has allowed us to make a subsequent advance in understanding gas turbine ignition [1]. Phase 1 is the formation of a kernel of flame of sufficient size and temperature to be able to propagate. Phase 2 is the subsequent flame propagation from this kernel to the entire primary zone of one sector of the combustion chamber. Phase 3 is the spread of flame from a lighted sector to an adjacent unlighted sector. The model presented in this Note only focuses on the first step of the process, that is to say the ignition of a cluster of fuel droplets to create a kernel of hot gas that will be carried, according to the spark plug location, into the primary re-circulating zone to allow the combustion propagation.

The precise mechanism whereby a combustible mixture leads to ignition has for a long time been the subject of speculation and experimentation, and has undergone several interpretations in the light of various new theories [2–4]. Most of these theories are based on the idea that the transient ignition source, usually an electric spark, must supply to the combustible mixture enough energy to create a volume of hot gas that just justifies the necessary and sufficient condition for propagation, namely that the rate of heat release by combustion exceeds the rate of heat loss to the surroundings by turbulent diffusion. The rate of heat release is governed mainly by the effective fuel/air ratio adjacent to the plug, which should be close to stoichiometric, and by the size and temperature of the kernel, which are determined by the energy and duration of the spark. The rate of heat loss from the kernel is largely imposed by the local conditions of velocity, turbulence, and by the quantity of excess fuel present in the ignition zone.

2. Model formulation

The physical system of interest in this work is schematized in Fig. 1. A monodisperse spray of droplets is placed in an oxidizing environment at atmospheric pressure. No fuel vapor is present in the cloud interior at the beginning of the simulation. The initial temperature within the cloud is uniform and set equal to the ambient value inside the combustion chamber. The liquid particles stay inert in the gas, and their distribution is characterized by a constant density n . Due to the very short time during which the energy is released by the spark-plug, the cluster is also supposed to be motionless. For the zero-dimensional model development, the assumption is made that the spherical symmetry is respected and that there is no spatial dependence inside the cluster. Then, the temperature and the species mass fractions are uniform inside the system, which implies that gradients only exist at the interface between the cluster and the outer environment (Fig. 2). These gradients are expressed by relations (1) and (2).

The model uses an implicit method to solve the continuity equation, as well as the equation of conservation for the species mass fractions and temperature (Eqs. (3)–(6)). By means of source terms, the governing equations for the gas phase take into account the different physical phenomena occurring inside and all around the cluster of drops – namely electrical discharge, vaporization [5], turbulent transfers and chemical kinetics [6].

3. Application

To predict ignition in an industrial code environment, a numerical procedure including the ignition model has been developed (Fig. 3). This procedure has been tested on an experimental configuration performed at ONERA to understand better the ignition process for pressure and temperature close to atmospheric conditions [7]. The experimental set-up is composed of an air supply, a plenum chamber, an airblast injection system, an industrial igniter and a parallelepipedic combustion chamber fitted out with a visualization window (Fig. 4). A first set of experiments has been performed to determine the appropriate parameters, in terms of equivalence ratio, air pressure drop and spark plug location, to obtain ignition. Then, in the most favorable conditions, a second set of experiments has been carried out to have the entire sequence of the combustion chamber re-light, including the ignition of a kernel close to the igniter location.

Then, this experiment has been simulated and the two-phase flow has been computed with the code MSD-LSD developed at ONERA. The application of the 0D model on this configuration has allowed to study ignition for three different spark-plug locations. The procedure used is the following one. Fuel and air are injected at the same time during 3 s, while the spark plug is discharging at a frequency of 3 Hz. At each time of the spark release, the parameters necessary for the ignition prediction of the cluster of drops – such as the number N and the mean diameter D_p of the liquid particles, the turbulence kinetic energy k and its dissipation rate ε – are determined at the igniter location in a sphere whose radius has a given value close to the experimental one. These parameters, which are characteristic of the two-phase flow and the spark plug location, are used as input data for the ignition model presented in this note. Finally, the simulation of ignition has given results in accordance with those observed experimentally, i.e., ignition only for the intermediate location of the spark-plug at 55 mm far from the injection system. For this position, the temporal evolution of the temperature and the species mass fractions inside the cluster during the ignition process has been analyzed (Figs. 5 and 6).

1. Contexte de l'étude

En vol, certains événements tels que l'ingestion de glace, d'eau ou de gaz d'échappement peuvent induire l'extinction du foyer d'un turboréacteur aéronautique. La possibilité de rallumer la chambre de combustion rapidement est une des conditions requises par les procédures de qualification des moteurs et constitue une des limites au domaine de vol d'un avion. Ce rallumage, que l'on souhaite obtenir à haute altitude, doit être réalisé dans des conditions à priori défavorables : faible pression, basse température, moteur en autorotation. A ces conditions de fonctionnement drastiques, vient s'ajouter la complexité du phénomène d'allumage qui met en jeu différents processus physiques et chimiques tels que la pulvérisation d'un combustible liquide, l'apport d'énergie, le chauffage, l'évaporation et le mélange du combustible avec l'air ambiant, l'initiation des réactions chimiques ainsi que des phénomènes très fortement instationnaires voire chaotiques. La modélisation détaillée et la simulation numérique prédictive de l'allumage d'une chambre de combustion sont, encore aujourd'hui, hors de portée. Il importe néanmoins d'étudier certains aspects de cet allumage pour essayer de répondre aux questions que se posent les industriels, et pour fournir un outil d'aide à la conception en tentant de prédire la meilleure position de la bougie qui pourrait assurer un allumage quasi-systématique de la chambre.

Pour comprendre le processus d'allumage d'un foyer de turboréacteur aéronautique, trois phases peuvent être distinguées [1]. La première réside en l'allumage local au niveau de la bougie d'un noyau de gouttes de taille et de température suffisantes pour permettre le développement et la propagation de la flamme. La deuxième phase est la propagation de la combustion du noyau à la zone primaire d'un secteur de la chambre. Enfin, la dernière étape est l'extension de l'allumage du précédent secteur à un secteur adjacent encore éteint. Le modèle présenté dans cette note se concentre sur la première étape du processus complet,

à savoir, l'allumage local au voisinage de la bougie d'un nuage de gouttes afin de créer un noyau de gaz chauds qui sera entraîné, en fonction de la position de la bougie, vers une zone de recirculation pour permettre la propagation de la combustion et la stabilisation de la flamme dans la chambre.

Le mécanisme précis selon lequel un mélange purement gazeux est capable de s'allumer a fait l'objet de nombreuses études tant sur le plan expérimental que numérique [2–4]. La plupart de ces interprétations reposent sur le fait qu'une source transitoire doit apporter suffisamment d'énergie à un volume du mélange, dont la taille doit excéder une certaine valeur critique, pour permettre à l'allumage de se produire et à la flamme de se propager de façon autonome. De manière analogue aux études réalisées en monophasique (une seule phase gazeuse), le modèle présenté dans cette note vise à prédire l'allumage en diphasique d'un noyau de gouttes de combustible soumis à une étincelle électrique, pour des conditions de pression et de température défavorables (faible pression, basse température). Cette approche se distingue des lois empiriques globales actuellement utilisées dans l'industrie par le fait qu'elle permet de donner une description détaillée du processus d'allumage et de mettre en évidence l'importance du positionnement de la bougie pour pouvoir obtenir le rallumage de la chambre.

2. Formulation du modèle

La représentation du système physique retenu pour l'établissement du modèle d'allumage présenté dans cette note est donnée en Fig. 1. Un nuage de gouttes monodisperses est placé dans un milieu oxydant. La température initiale du gaz dans le nuage de gouttes est uniforme et égale à la température dans la chambre de combustion. Nous supposons qu'il n'y a pas de combustible prévaporisé à l'intérieur du noyau au début du calcul et que les gouttes restent immobiles tout au long de leur existence. La distribution spatiale de la phase liquide au sein du noyau est homogène et caractérisée par une densité n – nombre de gouttes par unité de volume – constante. Du fait de la durée très courte de l'étincelle (de l'ordre de 40 μ s), le déplacement du paquet de gouttes au niveau de la bougie est faible et le nuage peut donc être considéré comme immobile durant la décharge électrique. Pour le développement du modèle zéro-dimensionnel, la symétrie sphérique du problème est respectée. Nous supposons de plus qu'il n'y a pas de dépendance spatiale à l'intérieur du nuage de rayon r_k , ce qui implique que la répartition de la température et des fractions massiques des espèces chimiques est uniforme à l'intérieur du système. Les gradients relatifs à ces différentes grandeurs n'existent qu'à l'interface entre le noyau et l'environnement extérieur (Fig. 2). Les expressions de ces gradients sont données par les relations (1) et (2), où $Y_i(r = r_k^+)$ et $T(r = r_k^+)$ correspondent respectivement aux valeurs de la fraction massique Y_i et de la température T régnant à l'extérieur du noyau, et où l_t désigne l'échelle de longueur de la turbulence.

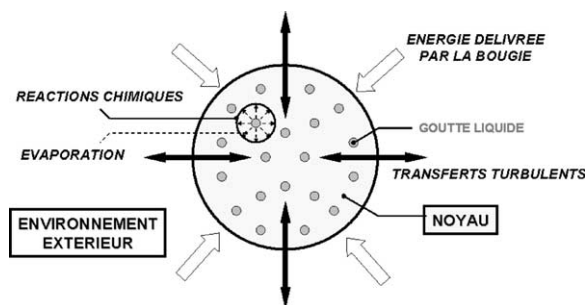


Figure 1. Représentation du noyau de gouttes.
Figure 1. Representation of the cluster of drops.

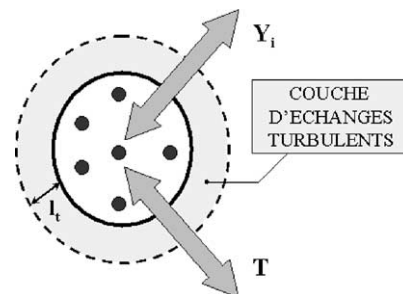


Figure 2. Transfers à travers la couche d'échange.
Figure 2. Transfers through the exchange film.

$$[(\nabla Y_{i;i=1,\dots,N_{\text{esp}}}) \cdot \vec{n}]_{(r=r_k)} = \frac{Y_i(r=r_k^+) - Y_i}{l_t} \quad (1)$$

$$[\nabla T \cdot \vec{n}]_{(r=r_k)} = \frac{T(r=r_k^+) - T}{l_t} \quad (2)$$

Compte tenu de ces hypothèses, l'approche thermo-diffusive retenue pour décrire l'allumage d'un noyau de gouttes au voisinage de la bougie permet de dégager le scénario suivant : l'énergie délivrée par l'étincelle électrique contribue à augmenter progressivement la température à l'intérieur du noyau. Après une phase de chauffage, les gouttes s'évaporent produisant ainsi des vapeurs de combustible dans le système. Si la température du milieu est suffisante, les réactions chimiques s'amorcent et conduisent à l'allumage du noyau si le dégagement d'énergie lié au processus chimique compense les pertes thermiques qui se produisent hors du noyau. D'un point de vue numérique, le modèle développé est basé sur la résolution implicite des équations de conservation locales intégrées sur le volume sphérique de rayon r_k que constitue le noyau de gouttes étudié :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = n\dot{m} \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial Y_{C_{10}H_{22}}}{\partial t} = n\dot{m}(1 - Y_{C_{10}H_{22}}) + \frac{3\rho D_t}{r_k} (\nabla Y_{C_{10}H_{22}} \cdot \vec{n})|_{r=r_k} + W_{C_{10}H_{22}} \dot{\omega}_{C_{10}H_{22}} \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial Y_i}{\partial t} = -n\dot{m}Y_i + \frac{3\rho D_t}{r_k} (\nabla Y_i \cdot \vec{n})|_{r=r_k} + W_i \dot{\omega}_i, \quad i = 1, \dots, 112 \quad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\rho c_p} \left[\frac{P_{\text{electr}}}{V_k} - n\dot{m} \left(\frac{1 + B_T}{B_T} \right) c_{pv}(T_{\text{ref}})(T - T_s) + \frac{3\lambda_t}{r_k} (\nabla T \cdot \vec{n})|_{r=r_k} - \sum_{i=1}^{113} h_i W_i \dot{\omega}_i \right] \quad (6)$$

Le membre de droite des relations (3)–(6) laisse apparaître les termes sources relatifs aux différents phénomènes physiques participant au processus d'allumage, à savoir :

- *L'apport d'énergie électrique par la bougie au noyau* (terme fonction de la densité volumique de puissance délivrée par la bougie : P_{electr}/V_k). On suppose que cette énergie électrique libérée est convertie essentiellement en énergie thermique et on néglige, dans une première approche, la formation radicalaire résultant de la présence de l'étincelle.
- *Le chauffage et l'évaporation des gouttes de carburant* (termes faisant intervenir le débit d'évaporation \dot{m}). Le sous-modèle introduit pour décrire le processus d'évaporation correspond au modèle de conduction infinie d'Abramzon et Sirignano [5], qui tient compte du chauffage de la goutte, et qui suppose que la conduction de la chaleur à l'intérieur de la goutte se produit de manière infiniment rapide comparativement aux échanges massique et thermique qui se produisent autour de la goutte. La température au sein de la goutte est alors uniforme et ne dépend que du temps.
- *Les transferts turbulents entre le noyau et l'environnement extérieur*, qui s'expriment à partir des gradients donnés en (1) et (2), du coefficient de diffusion turbulente D_t et du coefficient de conductivité thermique turbulente λ_t . Pour la modélisation globale des transferts turbulents des espèces et de la chaleur, nous faisons l'hypothèse que ces échanges se produisent à la périphérie du noyau diphasique dans une couche, dont l'épaisseur est égale à l'échelle de longueur de la turbulence l_t .
- *Le processus chimique* (termes en $W_i \dot{\omega}_i$ et $h_i W_i \dot{\omega}_i$, où, W_i , $\dot{\omega}_i$ et h_i désignent respectivement la masse molaire, le taux de réaction molaire et l'enthalpie massique de l'espèce i), dont la cinétique est régie par un mécanisme détaillé de l'oxydation du n-décane comprenant 113 espèces et 691 réactions [6].

Dans ce paragraphe, nous donnons à titre indicatif les temps caractéristiques des différents phénomènes impliqués dans le processus d'allumage. Ceux-ci sont évalués pour une pression de 1 bar, une température initiale du gaz et des gouttes de 288 K, un rayon du noyau de 3 mm, un diamètre moyen des gouttes de 35 μm , un paramètre de distance (ratio entre la distance inter-goutte et le diamètre moyen des gouttes) de 10, une énergie cinétique turbulente de 5 $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$, et une longueur caractéristique de la turbulence l_t de

l'ordre du mm. On considère également que la bougie délivre une énergie de 0.5 J pendant 0.04 ms. Les échelles de temps les plus courtes correspondent d'une part, au temps de dépôt d'énergie (égal à la durée de l'étincelle), et d'autre part, au temps d'homogénéisation défini comme le temps de diffusion turbulente sur la distance inter-goutte, et dont l'ordre de grandeur est de 1/100 ms. Ces temps caractéristiques sont dix fois inférieurs au temps de chauffage des gouttes et au délai d'allumage, qui sont tous deux de l'ordre de 1/10 ms. Le temps de transit des gouttes dans le noyau, de l'ordre de 1 ms, est nettement supérieur au délai d'allumage, ce qui permet de considérer les gouttes immobiles pendant l'étude de ce dernier phénomène. Enfin, l'évaporation des gouttes nécessite une durée plus importante, de l'ordre de quelques ms. En résumé, la durée de l'étincelle est suffisamment brève pour permettre à la bougie de chauffer rapidement le noyau de gouttes. Une fois chauffées, les gouttes atteignent leur température de saturation, commencent à s'évaporer et produisent des vapeurs de combustible qui se mélangent rapidement avec l'oxygène gazeux pour permettre les réactions chimiques et l'allumage.

3. Application

Le modèle d'allumage présenté dans la deuxième section de cette note a été utilisé dans l'environnement d'un code de calcul industriel afin de prédire l'allumage d'une chambre de combustion aéronautique au voisinage de la bougie. Pour cela, une procédure numérique a été mise en place (Fig. 3). Tout d'abord, le champ aéro-diphasique est simulé à l'aide d'un code de calcul aérodynamique Navier–Stokes 2D ou 3D auquel est couplé un module diphasique lagrangien destiné à étudier le comportement de la phase liquide dans la chambre de combustion. A partir du calcul de ce champ, on détermine ensuite au niveau de la bougie, dans une sphère dont on a au préalable fixé le rayon, les paramètres nécessaires à l'application du modèle d'allumage 0D. Ces paramètres sont, pour l'écoulement aérodynamique, les valeurs moyennes des grandeurs turbulentes k et ε , et pour la phase liquide, le diamètre moyen et le nombre de gouttes présentes dans la sphère d'étude au moment de l'étincelle électrique. Enfin, ces paramètres sont utilisés comme données pour le modèle d'allumage, qui permet de prédire si l'inflammation se produit à proximité de la bougie. Notons que pour conclure au rallumage complet de la chambre, il faudrait étudier la propagation de la combustion depuis la zone allumée au niveau de la bougie à l'ensemble de la géométrie. L'étude de cette étape n'est pas entreprise dans cette note, où nous nous limitons à la prédiction de l'allumage local d'un noyau de gouttes au voisinage de la bougie.

Cette procédure numérique a été appliquée sur une configuration expérimentale de l'ONERA visant à étudier l'allumage d'un brouillard air-kérosène à basse pression et faible température (1 bar et 288 K) dans une chambre de combustion muni d'un système d'injection réel de SNECMA [7]. Des mesures vélocimétriques et granulométriques ont été réalisées à l'aide du dispositif expérimental représenté en Fig. 4, afin de constituer une base de données au niveau du système d'injection permettant de définir les conditions limites et les conditions initiales indispensables pour la simulation de l'écoulement avec le code diphasique MSD-LSD développé à l'ONERA. Différents essais réalisés pour trois positions distinctes de la bougie (à 25, 55 et 120 mm en aval de l'injecteur) ont permis de mettre en évidence l'importance du positionnement de l'organe électrique dans le processus d'allumage. Un traitement d'images réalisé sur des clichés retraçant le scénario d'inflammation a également permis de préciser l'ordre de grandeur de la taille du noyau à considérer au niveau de la bougie.

Compte tenu de ces résultats, la chaîne de calcul de la Fig. 3 a été appliquée sur la configuration de l'ONERA afin d'étudier l'allumage d'un noyau de gouttes pour les trois positions de la bougie retenues lors de l'étude expérimentale. La procédure utilisée est la suivante : le combustible et l'air sont injectés en même temps pendant 3 s, et simultanément, la bougie émet des étincelles à une fréquence de 3 Hz. A chaque instant de décharge, on détermine dans une sphère de rayon 3 mm tangente à la bougie, les paramètres nécessaires à l'application du modèle 0D permettant de prédire l'allumage. Les simulations ont finalement données des résultats en accord avec ceux observés expérimentalement, à savoir, un allumage préférentiel pour la position de la bougie intermédiaire à 55 mm, et pas d'allumage pour la bougie placée

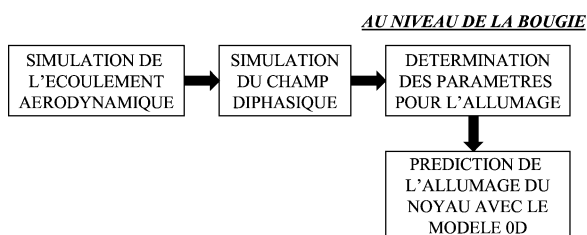


Figure 3. Procédure numérique de l’allumage à proximité de la bougie dans l’environnement d’un code industriel.

Figure 3. Numerical procedure of ignition near the spark-plug location in an industrial code environment.

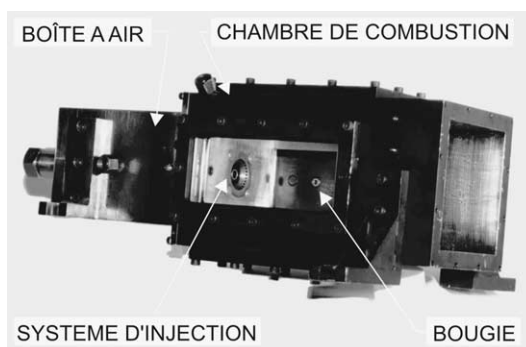


Figure 4. Dispositif expérimental de la configuration testée pour l’allumage.

Figure 4. Experimental set-up of the configuration tested for ignition.

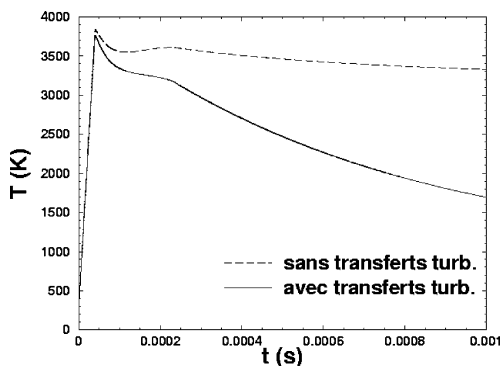


Figure 5. Évolution temporelle de la température du noyau.

Figure 5. Cluster temperature versus time.

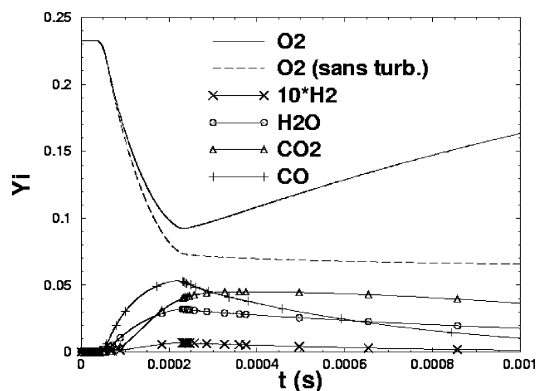


Figure 6. Évolution temporelle des espèces dans le noyau.

Figure 6. Species temporal evolution in the cluster.

à 25 et 120 mm. La détermination de la richesse locale au voisinage de la bougie pour ces trois positions montre que celle-ci est insuffisante (inférieure à 0.2) pour les positions à 25 et 120 mm, alors qu’elle est proche de la stœchiométrie pour la bougie placée à 55 mm. Les deux positions extrêmes sont donc situées respectivement trop en amont ou trop en aval par rapport au cône d’expansion du brouillard pour avoir la richesse locale nécessaire à l’allumage. Pour la bougie située à 55 mm, il est possible de tracer les évolutions temporelles de la température (Fig. 5) et des fractions massiques des espèces prépondérantes (Fig. 6). La simulation de l’allumage est réalisée pour 7610 gouttes de diamètre moyen 13.6 μm , une énergie cinétique turbulente de $4 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ et un taux de dissipation de cette énergie de $1120 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$. L’énergie délivrée par la bougie pendant 40 μs augmente la température du noyau de 288 K à 3880 K. Après une phase de chauffage, les gouttes s’évaporent, produisent des vapeurs de combustible qui se mélangent rapidement avec l’oxygène avant d’être consommées par la réaction chimique. Le processus de combustion s’effectue alors par un mécanisme complexe de réactions élémentaires. A haute température, des réactions d’initiation conduisent à la création d’espèces radicalaires, qui réagissent à leur tour avec d’autres molécules pour déclencher des réactions en chaîne. Les réactions d’initiation et en chaîne, endothermiques, expliquent la

baisse de température observée entre 40 μ s et 0.1 ms, intervalle de temps pendant lequel l'évaporation n'est pas encore significative. A partir de 0.1 ms, la température du noyau décroît de manière moins significative jusqu'à 0.23 ms. Cette phase, qui caractérise le début de l'allumage, coïncide avec la consommation de l'oxygène et la création simultanée des produits finaux CO₂ et H₂O. Notons enfin, que les transferts turbulents se caractérisent par un nouvel apport en O₂, ainsi que par la diffusion des autres espèces à l'extérieur du noyau. Le système tend alors vers un état d'équilibre, et le noyau uniquement composé d'air frais retrouve sa température initiale.

Les auteurs remercient Dr. M. Cazalens de SNECMA-Moteurs pour son soutien apporté à cette étude.

Références bibliographiques

- [1] A.W. Lefebvre, Gas Turbine Combustion, McGraw-Hill, 1983.
- [2] M. Champion, et al., Combustion and Flame 65 (1986) 319–337.
- [3] L. He, P. Clavin, Combustion and Flame 93 (4) (1991) 391.
- [4] G. Joulin, B. Deshaies, Combust. Sci. Technology 37 (1984) 99.
- [5] B. Abramzon, W.A. Sirignano, Int. J. Heat Mass Transfer 32 (9) (1989) 1605–1618.
- [6] D. Voisin, Cinétique chimique d'oxydation d'hydrocarbures et obtention d'un modèle pour la combustion du kérosène, Thèse Université d'Orléans, France, 1997.
- [7] V. Quintilla, K. Lavergne, R. Lecourt, G. Lavergne, Experimental and numerical study of spray ignition for in-flight re-light, 2002 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting.