

# Simulations prédictives d'un feu d'hydrocarbure en milieu ouvert et confiné

S. Suard<sup>a,c</sup>, A. Kacem<sup>a,c</sup>, H. Martin<sup>a</sup>, B. Porterie<sup>b,c</sup>

a. IRSN, Centre de Cadarache, BP3, 13115 St. Paul-Lez-Durance Cedex

b. Aix-Marseille Université, CNRS, IUSTI UMR 7343, 13453 Marseille

c. ETIC, IRSN-CNRS-AMU, 5 Rue Enrico Fermi, 13453 Marseille Cedex 13

## Résumé :

*Un modèle de pyrolyse, reposant sur un changement de phase, a été implémenté dans un code CFD. Cette approche, qui permet de prendre en compte le couplage entre le combustible et son environnement gazeux, a été développée dans l'objectif de réaliser des simulations prédictives d'incendie. Le modèle a été validé dans un premier temps sur des flammes d'heptane en milieu ouvert, pour trois diamètres de nappe. L'effet de la viciation de l'air sur le débit masse de combustible a ensuite été étudié sur le même type de foyer. Pour ces deux configurations, les résultats sont en bon accord avec les corrélations utilisées en sûreté incendie. Enfin, des simulations d'un feu de dodécane dans un compartiment ventilé mécaniquement ont également été réalisées et montrent des résultats encourageants.*

## Abstract :

*A simple phase change pyrolysis model has been implemented in a CFD code. This approach, taking into account the coupling between the fuel and its gaseous environment has been developed with the aim to perform predictive fire simulations. First, the model is validated on heptane flames in an open environment for three pool diameters. The air vitiation effect on the fuel mass loss rate is investigated. Model results are found to be in good agreement with correlations used in fire safety. Simulations of a dodecane pool fire in a compartment are also performed, showing encouraging results.*

**Mots clefs :** Incendie ; débit masse de combustible ; simulation prédictive

## 1 Introduction

Un enjeu majeur des études de sûreté dans le domaine de l'incendie est de pouvoir réaliser des simulations numériques « prédictives » de scénarios complexes. Ce terme signifie, dans la communauté incendie, que seule la donnée de la configuration est nécessaire, à savoir la géométrie, les propriétés thermiques des parois, le niveau de ventilation des locaux ainsi que la nature et la quantité de combustible. Ces simulations doivent ensuite déterminer assez précisément la puissance dégagée par le foyer, souvent fonction des conditions environnantes. Elle demeure indéniablement, de par les nombreux processus mis en jeu, un des paramètres de l'incendie les plus difficiles à prédire. Lorsque le milieu est bien ventilé, cette puissance est naturellement reliée à la perte de masse ou au débit masse de combustible. Dans le cas de combustibles liquides brûlant dans un milieu ouvert, le débit masse est généralement déterminé à l'aide d'une corrélation [1] faisant intervenir le diamètre du foyer et un paramètre d'extinction. Lorsque le milieu est confiné, la viciation de l'air affecte le processus de combustion en phase gazeuse en réduisant fortement la température de la flamme et des gaz et, par conséquent, le débit masse de combustible. Ce dernier peut alors être déterminé, lorsque la configuration le permet, par une corrélation [9] en fonction de la concentration en oxygène à la base du foyer et du débit masse de combustible en milieu ouvert. Plus récemment, des formulations analytiques ont été proposées pour des configurations en atmosphère normalement oxygénée [2] et sous-oxygénée [7, 13]. Ces modèles semi-globaux sont formulés suivant un bilan d'énergie à l'interface combustible/milieu

ambient en prenant en compte les transferts radiatifs et convectifs à la surface du foyer. En atmosphère sous-oxygénée, ils sont aussi fonction de la concentration en oxygène et du débit masse normalisé. Des codes CFD utilisant un modèle de pyrolyse à changement de phase ont également permis de déterminer le débit masse de combustible d'un feu de nappe d'hydrocarbure en milieu ouvert [8, 11]. Ces approches détaillées présentent l'avantage de ne pas être limitée par les hypothèses simplificatrices faites lors de l'établissement des corrélations ou des modèles semi-globaux.

L'objet de cette étude est de reprendre ces approches détaillées tout d'abord en atmosphère normalement oxygénée, puis de les étendre à une flamme en milieu vicié. La prédiction du débit masse d'un feu d'hydrocarbure dans un compartiment ventilé mécaniquement sera également abordée.

## 2 Modélisation

L'outil de simulation utilisé pour cette étude est le code de calcul ISIS [12, 6] développé par l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN). Ce code CFD, basé sur une formulation à bas nombre de Mach est dédié à la simulation numérique des incendies en milieux ouvert et confiné. La turbulence de l'écoulement est traitée suivant le formalisme de Favre. Le modèle de premier ordre  $k - \epsilon$  ainsi que l'hypothèse de Boussinesq permettent de fermer les différents termes turbulents introduits par la prise de moyenne. La combustion turbulente est basée sur une hypothèse de chimie rapide, à une étape, pilotée par le mélange turbulent. Une approche à deux variables, utilisant la fraction massique de combustible et la fraction de mélange permet de déterminer la composition du mélange. La production de suies est prise en compte à l'aide d'une formulation semi-empirique [3] où le terme de production suit une loi d'Arrhenius et le terme d'oxydation est fonction de la turbulence de l'écoulement. Les transferts radiatifs, exprimés pour un milieu gris, sont résolus à l'aide de la méthode des volumes finis. Enfin, l'absorption du milieu prend en compte à la fois les suies et les produits de la combustion. La description détaillée du code ISIS est donnée dans la référence [12].

La détermination du débit masse de combustible se base sur un modèle simple de changement de phase piloté par une température critique. Un bilan d'énergie est réalisé à la surface du combustible. Enfin, une équation de conduction régit les transferts de chaleur au sein du combustible et le rayonnement, à l'intérieur de ce-dernier, est négligé. Le débit masse de combustible ainsi exprimé intervient alors comme une condition à la limite pour la quantité de mouvement et la fraction massique de combustible. En fonction des températures d'interface ( $T_i$ ) et de changement de phase ( $T_c$ ), il vient :

–  $T_i < T_c$  :

$$\begin{aligned} -\lambda_w \nabla T_w \cdot \mathbf{n} &= h_c(T_f - T_i) + q_r + q_{imp} \\ \dot{m}'' &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

–  $T_i = T_c$  :

$$\dot{m}'' = \frac{1}{L_v} \left( h_c(T_f - T_i) + q_r + q_{imp} + \lambda_w \nabla T_w \cdot \mathbf{n} \right) \quad (2)$$

où  $\lambda_w$  et  $T_w$  représentent respectivement la conductivité et la température du matériau,  $h_c$  un coefficient d'échange convectif, soit constant, soit déterminé à l'aide de lois de parois.  $T_f$  est la température du fluide,  $q_r$  représente le flux radiatif issu de la flamme, des parois et des gaz chauds et  $q_{imp}$  représente un flux imposé à la surface du combustible pouvant être utilisé pour initier la combustion.  $\dot{m}''$  et  $L_v$  représentent le débit massique par unité d'air du combustible et la chaleur latente de changement de phase.

Le système d'équations est résolu en utilisant la méthode classique des volumes finis. La discrétisation en temps et en espace a été construite afin d'assurer la positivité des grandeurs scalaires (fractions massiques, enthalpie,...) et de garantir leur stabilité. L'intégration en temps est semi-implicite à pas fractionnaire. Les équations de conservation sont donc résolues séquentiellement et une méthode de projection permet de résoudre les équations de Navier-Stokes.

## 3 Résultats

Cette partie décrit les principaux résultats obtenus en simulant une flamme d'heptane en milieu ouvert ou vicié puis une flamme de TPH (assimilable à du dodécane,  $C_{12}H_{26}$ ) dans un environnement ventilé

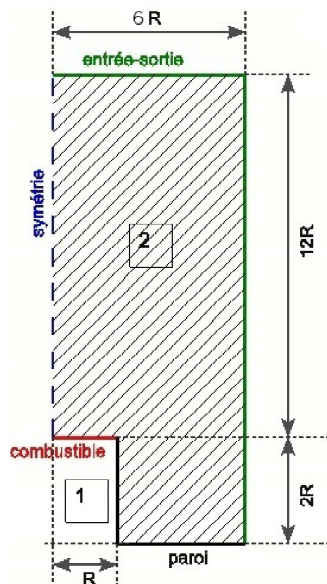


FIGURE 1 – Domaine de calcul.

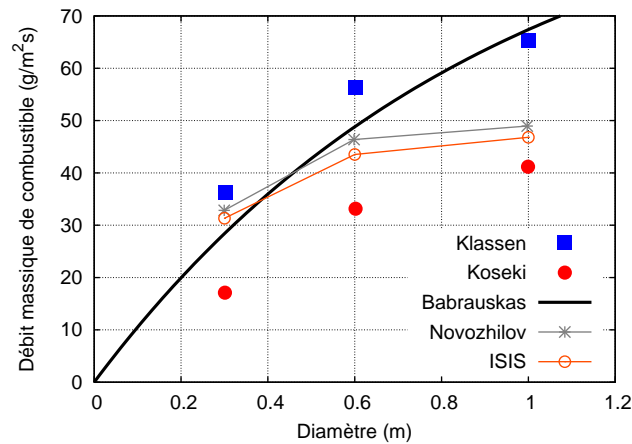


FIGURE 2 – Débit masse de combustible en fonction du diamètre : Comparaison entre la corrélation de Babrauskas [1], les données expérimentales de Koseki [5] et Klassen [4] et les résultats numériques donnés par Novozhilov [8] et ISIS.

mécaniquement. Les simulations numériques réalisées dans [8] sont reprises dans un premier temps. Cette phase de validation a permis d'étudier le comportement général du modèle composé du système classique d'équations de conservation pour le milieu fluide et du système décrivant le changement de phase du matériau. La seconde partie met en évidence l'influence de la viciation de l'air sur le processus de combustion. Les résultats numériques sont comparés à la corrélation de Peatross et Beyler [9], largement utilisée dans le domaine de l'incendie. La dernière partie décrit une simulation prédictive d'un essai PRISME Source [10] réalisé par l'IRSN et représentant la combustion d'un bac de TPH dans un local ventilé mécaniquement. L'évolution au cours du temps du débit masse de combustible en fonction de la concentration en oxygène est étudiée.

### 3.1 Flamme de bac en milieu ouvert

La figure (1) présente le domaine de calcul utilisé pour la simulation numérique d'une flamme d'heptane en atmosphère normalement oxygénée. La géométrie est axisymétrique et les diamètres des bacs de combustible liquide sont de 30, 60 et 100 cm. En préalable à cette étude, les modèles de turbulence et de production de suies ont été calibrés en réalisant des simulations numériques non-prédictives pour un même type de flamme. Le domaine de calcul a été fixé de manière à ce que les conditions aux limites n'influent pas sur le résultat de la simulation et l'influence de la densité du maillage sur la qualité de la solution a été étudiée. La dimension des mailles retenue pour les simulations est de l'ordre de  $R/20$  suivant l'axe  $\vec{r}$  et  $R/50$  suivant l'axe  $\vec{z}$ ,  $R$  étant le rayon du bac de combustible.

La figure (2) compare les résultats obtenus à l'état stationnaire avec ISIS à des résultats expérimentaux, numériques et empiriques issus de la littérature. Les résultats déterminés par ISIS se situent dans la plage de valeurs obtenues expérimentalement. Ils sont également très proches des résultats numériques de Novozhilov [8] et de la corrélation de Babrauskas [1] pour des diamètres inférieurs à 60 cm. Pour ces derniers, l'augmentation du débit masse en fonction du diamètre est bien reproduite. En revanche, pour des diamètres plus importants, le débit masse calculé par ISIS semble peu dépendant du diamètre du bac de combustible. Le fait que des résultats similaires aient été retrouvés par Novozhilov [8] montre les limites de cette modélisation pour des foyers de grandes tailles.

### 3.2 Influence de la viciation de l'air

La configuration précédente est utilisée pour étudier l'influence de la viciation de l'air sur le débit masse de combustible. La composition de l'air ambiant a simplement été modifiée de manière à reproduire un milieu sous-oxygéné et homogène autour de la flamme. La figure (3) présente la variation

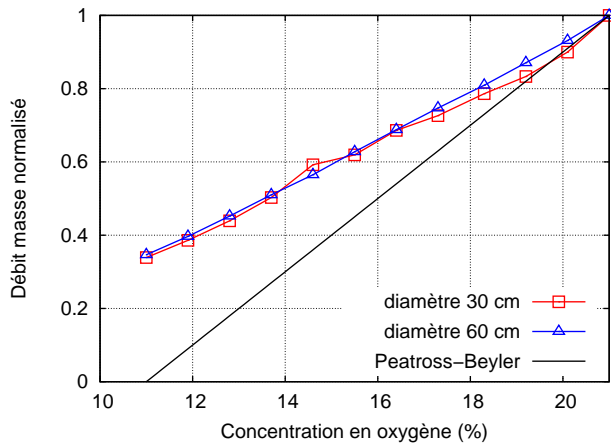


FIGURE 3 – Débit masse de combustible normalisé en fonction de la concentration en oxygène du milieu ambiant. Comparaison avec la corrélation de Peatross et Beyler [9].

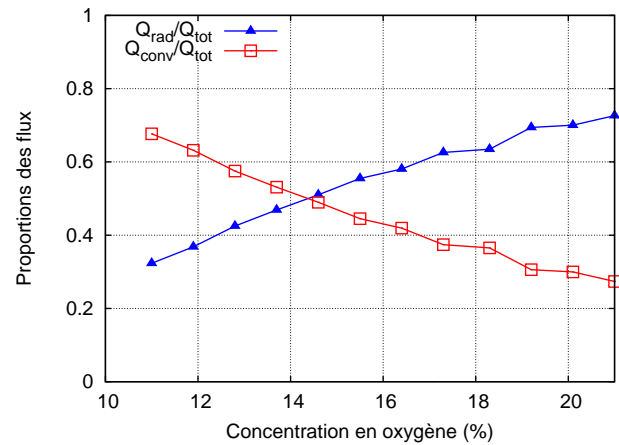


FIGURE 4 – Part des flux radiatifs et convectifs en fonction de la concentration en oxygène du milieu ambiant pour un feu de nappe d’heptane de 30 cm de diamètre.

du débit masse d’une nappe d’heptane en fonction de la concentration en oxygène du milieu ambiant. Deux diamètres de bac sont considérés, 30 et 60 cm, et le débit masse est normalisé par sa valeur déterminée en atmosphère normalement oxygénée. Les résultats donnés par ISIS pour les deux diamètres considérés montrent, en accord avec la corrélation de Peatross et Beyler [9], des variations quasi-linéaires et pratiquement identiques du débit masse de combustible avec l’oxygène. Ce résultat montre que pour les diamètres considérés, les phénomènes mis en jeu lors de la viciation de l’air jouent un rôle similaire vis à vis du processus de changement de phase. Les résultats déterminés par ISIS pour un diamètre de 30 cm sont identiques aux valeurs données par la corrélation de Peatross et Beyler lorsque la concentration en oxygène est supérieure à 19 %. En-deçà de cette valeur, la décroissance du débit masse donnée par ISIS est nettement moins importante. Vers 13 % d’oxygène le débit masse calculé par le code est le double de celui donné par la corrélation. Actuellement, les quelques études expérimentales sur le processus de combustion et de changement de phase en milieu vicié ne permettent pas de valider ces résultats. Pour pallier ce manque de données, une expérimentation utilisant un cône calorimètre à atmosphère contrôlée est en cours de développement à l’IRSN.

La figure (4) présente les proportions radiative et convective du flux total reçu par le combustible, issus d’un feu de nappe d’heptane de 30 cm, en fonction de la concentration en oxygène du milieu ambiant. En atmosphère normalement oxygénée, le modèle prédit qu’environ 75 % de l’énergie reçue par le foyer est d’origine radiative. Lorsque la concentration en oxygène diminue, la proportion radiative diminue également ce qui a pour conséquence d’augmenter la part convective. Le régime de combustion de la flamme varie donc d’un régime radiatif dominant à un régime convectif dominant. Cette phénoménologie est en accord avec les résultats obtenus à l’aide de la formulation analytique développée dans [7, 13]. Ces résultats indiquent clairement que la concentration en oxygène joue le rôle d’effet d’échelle vis-à-vis du régime de combustion de la flamme.

### 3.3 Évolution du débit masse en milieu ventilé mécaniquement

Les essais PRISME Source [10], réalisés par l’IRSN, ont permis d’identifier des régimes de combustion quasi-stationnaires où le débit masse de combustible se stabilise en fonction de l’oxygène disponible dans le local. Le test considéré pour cette étude décrit la combustion d’une nappe de TPH de 0.4 m<sup>2</sup> dans un local de 120 m<sup>3</sup> avec un taux de renouvellement de 4.7 h<sup>-1</sup>. La ventilation du local s’effectue en partie haute. La figure (5) représente une vue de dessus et de face du local considéré.

Les variations temporelles du débit masse, calculés par ISIS et mesurés expérimentalement, sont reportées sur la figure (6). Afin de visualiser l’influence de la sous-oxygénation de l’air ambiant sur le développement du feu, le débit masse mesuré en milieu ouvert est également reporté sur la figure. En

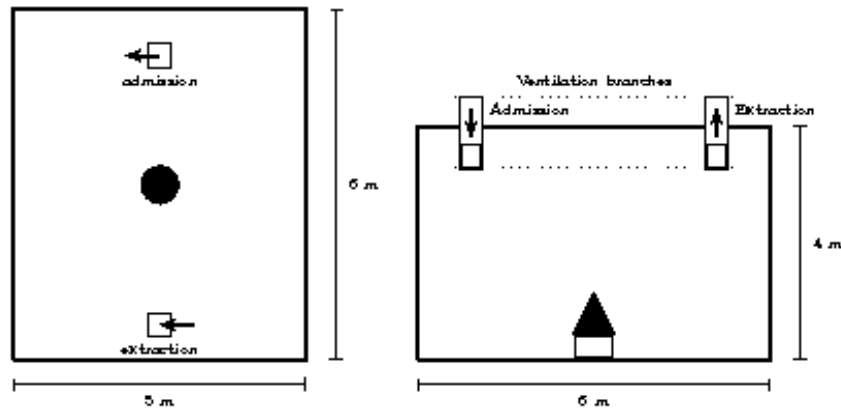


FIGURE 5 – Schéma du local feu, vue de dessus (gauche) et vue de face (droite).

milieu sous-oxygéné, si le débit masse est significativement plus faible, on observe une augmentation accrue de la durée du feu et un comportement fluctuant plus marqué. Durant les premiers instants, lors de l'inflammation de la nappe, le débit masse calculé par le code n'est pas représentatif de la réalité, et ce, malgré l'ajout d'un flux externe représentant le brûleur propane de 10 kW utilisé lors des essais. Cela est principalement dû au fait que le modèle ne prend pas en compte l'augmentation progressive de vapeur saturante au niveau du foyer. Lorsque les produits de la combustion envahissent le local, la concentration en oxygène décroît ce qui a pour conséquence de diminuer fortement le débit masse de combustible. Un équilibre s'établit ensuite entre le débit masse et la concentration d'oxygène disponible dans le local. La décroissance du débit ainsi que sa stabilisation au cours du temps sont globalement bien reproduites par le code.

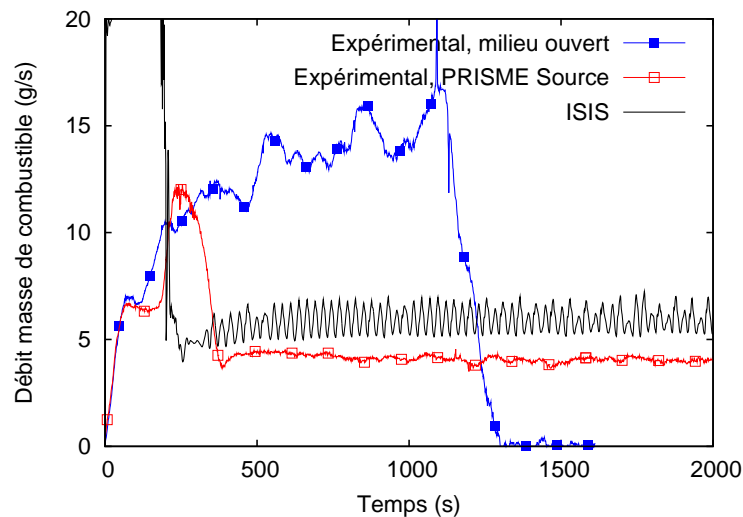


FIGURE 6 – Évolution temporelle du débit masse de combustible provenant de la nappe de TPH.

## 4 Conclusions

Un modèle simple de changement de phase, permettant de déterminer le débit masse de combustible, a été implémenté dans le code ISIS de l'IRSN. Celui-ci a, dans un premier temps, été validé sur des feux de nappe d'heptane de 30, 60 et 100 cm de diamètre. Le débit masse de combustible est correctement déterminé vis-à-vis des résultats de la littérature disponibles. Lorsque la flamme brûle en

atmosphère sous-oxygénée, le modèle prédit une décroissance quasi-linéaire du débit masse de combustible, conformément à la corrélation de Peatross et Beyler. La proportion des flux radiatif et convectif reçus par le foyer montre que le régime de combustion est dominé par le rayonnement en milieu ouvert et par la convection en milieu fortement sous-oxygéné. Enfin, lorsque le milieu considéré est un compartiment ventilé mécaniquement, le modèle décrit la décroissance du débit masse lorsque les produits de la combustion envahissent le local. Le régime de combustion sous-ventilée, observé expérimentalement, est également retrouvé par le modèle. Compte tenu de ces résultats, cette première étude consacrée à la prédiction du débit masse de combustible en milieu sous-oxygéné est encourageante. Des travaux, améliorant notamment le modèle de pyrolyse, sont actuellement en cours.

## Références

- [1] Babrauskas, V. 1983 Estimating large pool fire burning rates *Fire Technology* **19** 251-261
- [2] Hamins, A., Yang, J. C., Kashiwagi, T. 1999 A global model for predicting the burning rates of liquid pool fires *National Institute of Standards and Technology*
- [3] Khan, I.M., Greeves, G 1974 A Method for Calculating the Formation and Combustion of Soot in Diesel Engines *Heat Transfer in Flames* Scripta Book Co., N. H. Afgan and J. M. Beer **25**
- [4] Klassen, M. 1992 The Structure and Radiation of Liquid Pool Flames Ph.D. Thesis, University of Maryland, Washington, D.C.
- [5] Koseki, H. 1996 Research on Oil Tank Fire. D. Engr. Thesis, University of Tokyo, Tokyo.
- [6] Lapuerta, C., Suard, S., Babik, F., Rigollet, L. 2012 Validation process of ISIS CFD software for fire simulation *Nuclear Engineering and Design*, **253** 367-373
- [7] Nasr, A., Suard, S., El-Rabii, H., Gay, L., Garo, J. P., 2011 Fuel Mass-Loss Rate Determination in a Confined and Mechanically Ventilated Compartment Fire Using a Global Approach *Combustion Science and Technology* **183** 12 1342–1359
- [8] Novozhilov, V. and Koseki, H. 2004 CFD prediction of pool fire burning rates and flame feedback *Combustion Science and Technology* **176** 1283-1307
- [9] Peatross, M. J. and Beyler, C. L. 1997 Ventilation effects on compartment fire characterization *International Symposium of Fire Safety Science* **5** 403-414
- [10] Pretrel, H., Querre, P., Forestier, M., Experimental Study of Burning Rate Behaviour in Confined and Ventilated Fire Compartments 2005 *International Symposium of Fire Safety Science* **8** 1217-1229
- [11] Snegirev, A.Y. 2004 Statistical modeling of thermal radiation transfer in buoyant turbulent diffusion flames *Combustion and Flame*, **136** 51-71
- [12] Suard, S., Lapuerta, C., Babik, F., Rigollet, L. 2011 Verification and validation of a CFD model for simulations of large-scale compartment fires *Nuclear Engineering and Design*, **241** 9 3645-3657
- [13] Suard, S., Nasr, A., Melis, S., Garo, J. P., El-Rabii, H., Gay, L., Rigollet, L., Audouin, L. 2011 Analytical Approach for Predicting Effects of Vitiated Air on the Mass Loss Rate of Large Pool Fire in Confined Compartments *International Symposium of Fire Safety Science*, **10**, 1513-1524 227.