

ETUDE EXPERIMENTALE DE LA COMBUSTION D'UN FEU DE NAPPE D'HYDROCARBURE EN ATMOSPHERE LIBRE POUR UN LARGE SPECTRE DE DIAMETRE DE NAPPE

C. Lucchesi ⁽¹⁾, H. Pretrel ⁽¹⁾, S. Moreau ⁽¹⁾, O. Vauquelin ⁽²⁾, Ph. Bournot ⁽²⁾

⁽¹⁾ *Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), Laboratoire d'Expérimentation des Feux, Centre de Cadarache, Bât 346, 13115 St Paul Les Durance*

⁽²⁾ *Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels (IUSTI/UMR CNRS 6595/Equipe « Risque et Transfert »), Université de la Méditerranée, UNIMECA, Technopôle de Château-Gombert, 60 rue Joliot Curie, 13453 Marseille*

RESUME

Cette étude expérimentale porte sur la combustion des feux de nappe d'hydrocarbure en atmosphère libre et concerne plus particulièrement l'influence de la dimension du bac de combustible sur le débit de pyrolyse. Cette analyse est basée sur un large spectre de diamètres de nappe de 40 à 714mm soit des puissances allant de 350W à 535kW. Le combustible étudié est le Tétra Propylène Hydrogéné (TPH), proche du dodécane, utilisé dans les procédés de retraitement du combustible nucléaire. L'objectif de l'étude, menée conjointement par l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) et à l'Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels (IUSTI) est d'interpréter le comportement spécifique du débit de pyrolyse suivant le diamètre des nappes et de discuter l'application des lois de similitude pour entreprendre des expérimentations à échelle réduite sur maquette.

1. INTRODUCTION

Dans le cadre des études sur les risques incendie dans les milieux industriels, les feux de nappe sont des sources incendies fréquemment rencontrés et ont ainsi fait l'objet de nombreux travaux de recherche. Ces foyers, mettant en jeu des combustibles liquides et généralement des hydrocarbures, ont été fortement utilisés pour l'étude des panaches thermiques, des hauteurs de flammes, du processus de pyrolyse ou de l'effet d'échelle (Burgess [2], Chatris [3]). Plus particulièrement, ils sont identifiés dans les scénarios d'incendies de l'industrie nucléaire et sont ainsi utilisés par l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) pour des expérimentations à grande échelle (Pretrel [5]). Les phénomènes physiques gouvernant la pyrolyse au niveau d'une nappe de combustible ont été largement étudiés. Différents facteurs influant sur le débit de perte de masse sont mis en évidence, telles que les propriétés physiques du combustible, les dimensions et la nature du bac, l'épaisseur de la nappe liquide. L'étude expérimentale de Blinov et Khudiakov [1] montre que le mode de brûlage du combustible dépend fortement du diamètre de bac utilisé. Deux principaux modes sont mis en évidence : pour des petits diamètres ($D < 0,2$ m) le régime convectif prédomine alors que pour des bacs de plus grande taille le régime radiatif est le plus important. Cette étude a été enrichie par les travaux de Babrauskas [4] proposant une modélisation du débit de perte de masse surface en fonction du diamètre en régime radiatif. Cette présente étude

rapporte plusieurs expérimentations menées sur un large spectre de diamètre de bac pour un combustible spécifique, le TPH, utilisé dans l'industrie nucléaire. L'objectif de l'étude, menée conjointement par l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN) et à l'Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels (IUSTI) est d'interpréter le comportement spécifique du débit de pyrolyse suivant le diamètre des nappes et de discuter l'application des lois de similitude pour entreprendre des expérimentations à échelle réduite sur maquette.

2. LES EXPERIMENTATIONS

Trois campagnes d'essais sont considérées : une réalisée sur des petits bacs de dimension inférieurs à 10cm au laboratoire IUSTI et deux autres réalisées sur des dispositifs moyenne et grande échelle de l'IRSN à Cadarache (cf. Figure 1 et Figure 2).

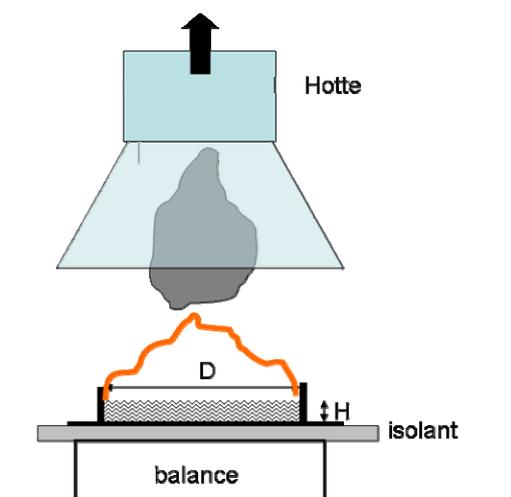


Figure 1 : Schéma descriptif du bac de combustible

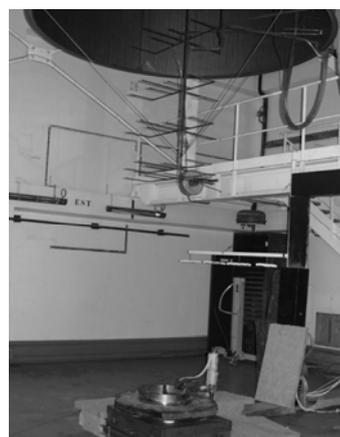


Figure 2 : Photographie du dispositif expérimental à grande échelle

Les expériences à petite échelle concernent cinq diamètres de bac ($D = 40, 60, 80, 100, 120$ mm) en acier constitués d'une collerette circulaire ($e = 2$ mm) soudée sur un disque ($e = 2$ mm). La hauteur du bac est de 20mm. Le bac est placé sur une balance électronique (de type Ohaus, modèle Balexus Explorer Pro) dont la précision est de 0,1 g. Les expériences à moyenne échelle concernent un diamètre de bac ($D=300$ mm) et ceux à grande échelle trois diamètres de bac ($D=357, 505$ et 714mm). Les bacs sont également circulaires, en acier, et présentent une profondeur de 100mm. Les essais ont été réalisés en atmosphère libre sous deux hottes expérimentales appelées CARINEA pour le bac de diamètre 300mm et SATURNE pour les diamètres plus grands. Ces hottes sont reliées à des conduits d'extraction équipées d'appareils de mesure permettant la détermination de la puissance totale du foyer par les méthodes de production de CO_2 . Le bac est placé sur une balance de type SARTORIUS de gamme [0 ;300] kg avec 2 g de précision. Le combustible liquide utilisé est le Tétrahydrogène (TPH), de formule chimique $\text{C}_{12}\text{H}_{26}$ et de masse volumique $\rho = 870 \text{ kg.m}^{-3}$. Il présente la même formule chimique que le Dodécane, hydrocarbure plus fréquemment rencontré. Le protocole expérimental est le suivant. Une hauteur H de combustible est déversée dans le bac. La nappe est ensuite enflammée avec un brûleur portatif. La phase de combustion est ensuite suivie jusqu'à l'extinction provoquée par l'absence de combustible. La hauteur du niveau de combustible décroît au cours de la phase de combustion. La perte de masse du combustible est suivie en temps réel.

Tableau 1 : Récapitulatif des essais réalisés

D (mm)	S (m ²)	H (mm)	M (g)	MLR (g/s)	MLRS (g/s/m ²)	HRR (kW)	DH (MJ/kg)
40	0,001	5,0	5,50	0,005	3,9	0,20	0
60	0,003	2,0	5,10	0,015	5,1	0,58	0
60	0,003	4,0	10,20	0,014	5,1	0,57	0
60	0,003	5,0	12,30	0,016	5,5	0,62	0
60	0,003	6,0	15,40	0,017	5,9	0,67	0
60	0,003	8,0	20,50	0,017	5,8	0,66	0
60	0,003	10,0	25,60	0,019	6,6	0,75	0
80	0,005	2,0	10,00	0,034	6,7	1,34	0
80	0,005	5,0	21,90	0,033	6,6	1,32	0
80	0,005	7,0	30,10	0,031	6,1	1,23	0
80	0,005	9,0	40,20	0,032	6,3	1,27	0
80	0,005	11,0	50,20	0,041	8,2	1,64	0
100	0,008	5,0	34,20	0,055	7,1	2,22	0
120	0,011	5,0	49,2	0,093	8,2	3,70	0
300	0,071	7,0	428	0,920	13,0	38	41
357	0,1	50,0	3756	2,4	24,0	115	48
357	0,1	80,0	6080	2,4	24,0	108	45
505	0,2	50,0	7752	5,4	27,0	235	44
714	0,4	50,0	14902	14,1	35,3	535	38

3. EVOLUTION TEMPORELLE DU DEBIT DE PERTE DE MASSE

Le débit de perte de masse (noté MLR pour Mass loss rate) exprime le débit de combustible quittant la surface de la nappe. Il est obtenu en calculant la dérivée de l'évolution de la masse au cours du temps. Pour l'ensemble des essais, trois phases sont identifiées visuellement et quantitativement et sont indiquées sur trois essais à titre d'exemple (cf. Figure 3). La première phase est une phase in stationnaire durant laquelle le débit de perte de masse augmente rapidement dans un premier temps puis plus progressivement ensuite. Cette phase traduit la mise à l'équilibre thermique entre d'une part l'énergie apportée par la flamme vers la surface combustible, d'autre part l'énergie accumulée par le combustible et le bac ainsi que celle utilisée pour la vaporisation. Cette phase dure quelques secondes à petite échelle jusqu'à plusieurs minutes à grande échelle. Ensuite une seconde phase apparaît correspondant à un niveau quasi stationnaire du débit de perte de masse. Un équilibre énergétique est obtenu sur l'ensemble du système. Ensuite une dernière phase est identifiée correspondant à une augmentation rapide de la perte de masse suivie de sa diminution jusqu'à l'extinction. Cette troisième phase résulte de la diminution progressive de la hauteur de combustible et parallèlement de l'augmentation de l'énergie accumulée par le bac en acier qui va contribuer à vaporiser rapidement les derniers millimètres de combustible notamment en chauffant celui-ci par le fond du bac.

4. INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DU COMBUSTIBLE

Une étude spécifique sur l'influence de l'épaisseur de combustible dans le bac est menée afin d'étudier son impact sur l'évolution temporelle du débit de perte de masse. Les figures (Figure 4 et Figure 5) présentent les résultats pour deux diamètres de bac (petite et grande échelle). L'augmentation de l'épaisseur de combustible permet d'allonger la durée de la phase quasi-stationnaire et contribue également à augmenter l'amplitude du débit de combustible lors de la phase in stationnaire précédant l'extinction. En augmentant la durée de la phase de combustion, la chaleur emmagasinée par le bac en acier est plus importante (la température du

bac est plus élevée) et son impact sur la vaporisation des derniers millimètres de combustible sera d'autant plus fort.

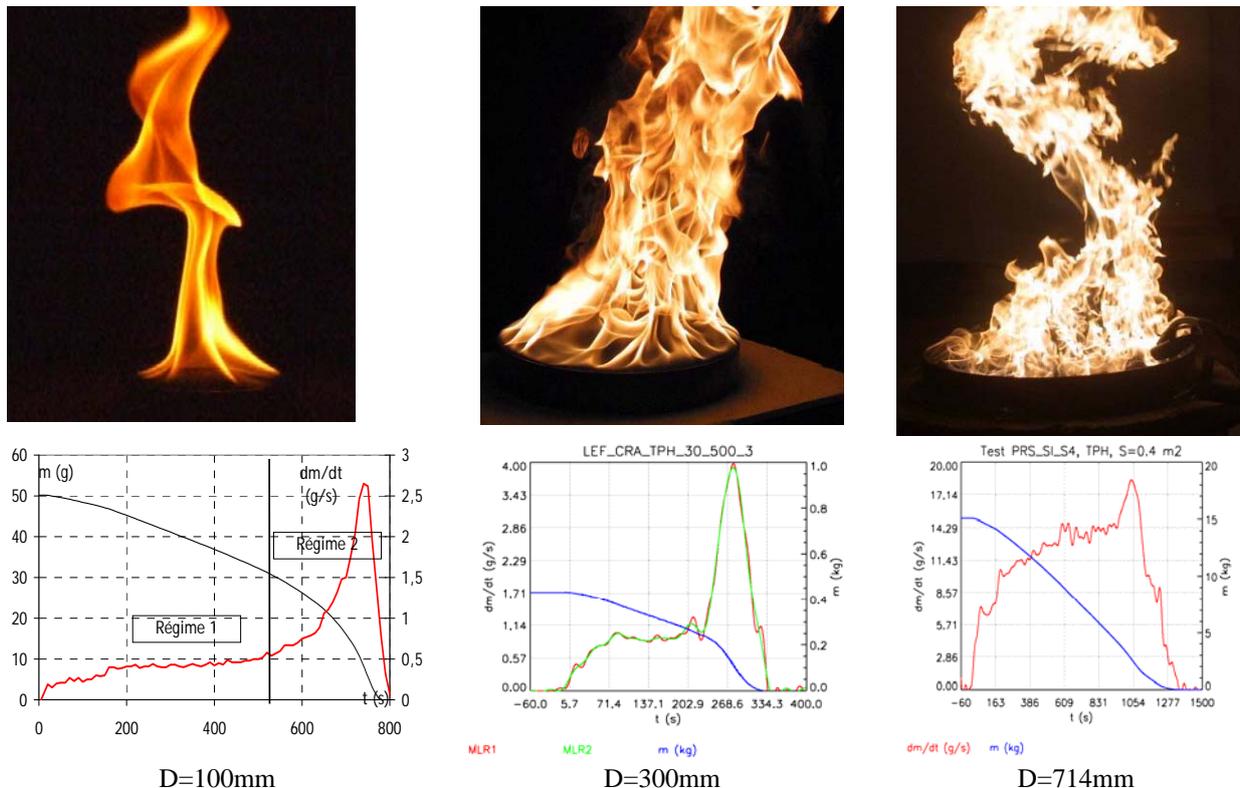


Figure 3 : Photographies et débit de perte de masse d'un feu de nappe de trois diamètres différents

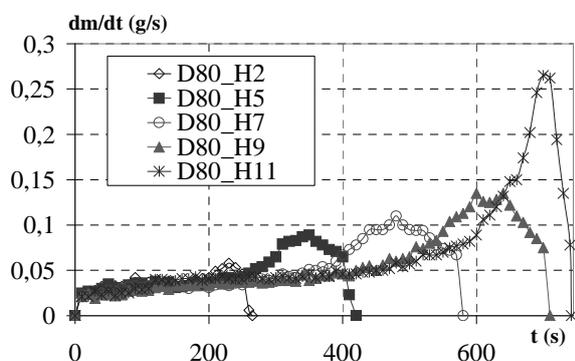


Figure 4 : Evolutions temporelles des débits de perte de masse du combustible pour plusieurs épaisseurs (D=80mm)

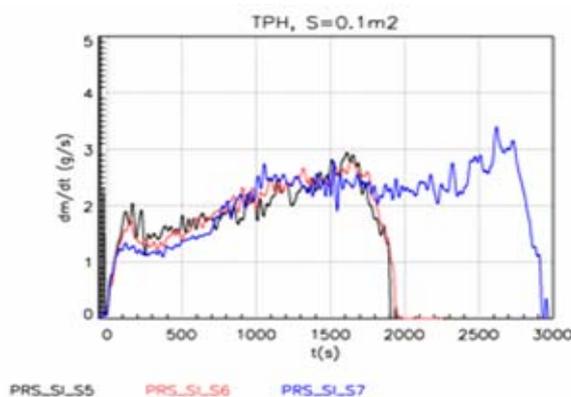


Figure 5 : Evolutions temporelles des débits de perte de masse du combustible pour plusieurs épaisseurs (D=357mm)

5. INFLUENCE DU DIAMETRE DE BAC

Pour chaque essai, le débit de perte de masse surfacique moyen sur la phase quasi-stationnaire est présenté en fonction du diamètre du bac sur la Figure 6 en y superposant les données de Blinov et Khudiakov [1]. Cette représentation permet d'identifier les différents régimes de combustion. Les essais à petite échelle correspondent à la transition entre le régime convectif turbulent et le régime radiatif, les essais à moyenne et grande échelles au régime radiatif. Le

régime convectif laminaire ne semble pas avoir été rencontré lors des tests à petite échelle, le diamètre du bac n'étant pas assez faible. Les données sont comparées au modèle de Babrauskas exprimant l'influence du diamètre du bac en régime radiatif:

$$\dot{m}''(D) = \dot{m}''_{\max} [1 - \exp(-k\beta D)] \quad [1]$$

Où D est le diamètre du bac, $k\beta$ un coefficient d'extinction et \dot{m}''_{\max} le débit de perte de masse surfacique maximum. Le comportement prédit par le modèle est retrouvé de façon satisfaisante. L'extrapolation du modèle pour les grands diamètres de bac indique que le diamètre au-delà duquel le débit de perte de masse surfacique ne varie plus avec le diamètre se situe vers 3 à 4m. La comparaison avec les essais de Blinov et Khudiakov montre que le comportement du TPH est similaire à ceux de fuel de type Kérosène ou essence diesel.

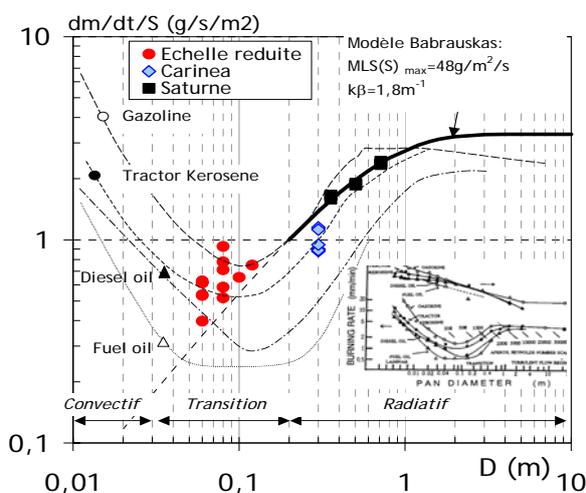


Figure 6 : Evolution du débit de perte de masse surfacique moyen en fonction du diamètre du bac (inclues les données de Blinov et Khudiakov [1])

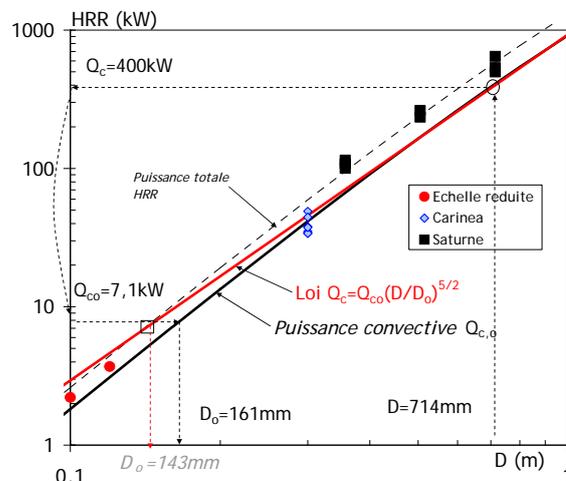


Figure 7 : Evolution de la puissance en fonction du diamètre du bac

L'évolution de la puissance totale du foyer en fonction du diamètre du bac est également discutée et présentée sur la Figure 7. Pour les essais réalisés sous hotte, la puissance totale est directement mesurée, pour les autres essais, la puissance est évaluée en multipliant le débit de perte de masse par l'enthalpie de combustion efficace évaluée à partir des essais sous hottes (cf. Tableau 1). La puissance totale augmente avec le diamètre de nappe. Les données sont comparées avec une puissance théorique déduite de la loi de Babrauskas et formulée ci dessous :

$$P = \Delta H_{\text{eff}} \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \dot{m}''_{\max} [1 - \exp(-k\beta D)] \quad [2]$$

Ces données permettent également de discuter la pertinence de la similitude de Froude utilisées pour les approches à échelle réduite. La similitude de Froude indique que le rapport des puissances convectives entre deux échelles doit évoluer suivant la loi:

$$Q = Q_o \left(\frac{D}{D_o} \right)^{5/2} \quad [3]$$

Ou Q et D sont la puissance et la longueur caractéristique des deux échelles. Cette loi d'évolution (relation [3]) et la puissance convective expérimentale sont comparées sur la Figure 7. Pour cette comparaison, la puissance convective expérimentale est obtenue en multipliant la puissance totale par $(1-\chi_r)$ où χ_r est la fraction radiative prise égale à 0.3. Pour la plage de diamètres considérée, la puissance réelle d'un feu de nappe diminue plus rapidement que ne le prédit la loi [3]. Pour reproduire à échelle réduite un feu de nappe respectant la similitude de Froude, une distorsion sur le diamètre caractéristique du foyer doit être appliquée. Un exemple est indiqué sur la Figure 7. Soit un feu de nappe à échelle 1 d'une puissance convective de 400kW. Pour reproduire ce foyer à une échelle réduite (rapport d'échelle 1/5) en respectant la similitude de Froude, une puissance convective de $400 \times (1/5)^{5/2} = 7.1$ kW doit être reproduite. Pour ce faire, le diamètre de bac correspondant (lu sur la Figure 7) est de 161cm. Il présente une distorsion par rapport au diamètre donné par le rapport d'échelle $714/5 = 142$ mm. Cette analyse demeure cependant indicative car elle est basée sur une estimation de la puissance convective en appliquant un coefficient 0.7 sur la puissance totale mesurée. Il est probable qu'en raison de l'évolution du régime convectif vers le régime radiatif, ce coefficient varie avec le diamètre de bac ; pour les petits diamètres de bac, la proportion d'énergie convective est plus importante. Si cela était le cas, la distorsion appliquée sur cet exemple serait moindre.

6. CONCLUSION

Cette étude présente le comportement de feux de nappe de Tetra Propylène Hydrogéné (TPH) pour un large spectre de diamètre de bac allant de 40mm à 714mm. L'évolution du débit de perte de masse en fonction du temps présente un comportement générique constitué de plusieurs phases et régimes de combustions caractéristiques. La variation de la hauteur de combustible dans le bac ne modifie pas ce comportement générique. Le débit de perte de masse surfacique moyen augmente avec le diamètre du bac et les comportements déjà présentés dans la littérature pour d'autres combustibles sont retrouvés. Ce comportement est comparé avec celui prédit par la similitude de Froude pour les applications à échelle réduite. Les résultats montrent qu'une distorsion de diamètre de bac doit être appliquée pour satisfaire à cette loi de similitude.

7. REFERENCES

1. Hottel H.C. Review- Certain laws governing diffusive burning of liquids by Blinov V.I., Khudiakov G.N., Fire Research Abstract and reviews, vol 1, p41-44, 1958
2. Burgess D.S., Strasser A., Grumer J., Diffusive burning of liquid fuels in open trays, J fire Res Abstr. Rev. 3, pp177-192, 1961
3. Chatris J.M., Quintela J., Folch J., Planas E., Arnaldos J. Casal J., Experimental study of burning rate in hydrocarbon pool fires, Combustion and flame, 126, pp1373-1383, 2001.
4. Babrauskas V., Estimating large pool fire burning rate, Fire Technology, 19, pp251-261, 1983.
5. Pretrel, H., Querre P.; Forestier M., Experimental Study of Burning rate Behaviour in Confined and Ventilated Fire Compartments, IAFSS 2005 Conference, Pekin, 2005.