

# Expérimentations à petite échelle du phénomène de Boilover.

Delphine LABOUREUR<sup>1\*</sup>, Patrick RAMBAUD<sup>1</sup>, Jean-Marie BUCHLIN<sup>1</sup>, Laurent APRIN<sup>2</sup>, Gilles DUSSERRE<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut von Karman

72, chaussée de Waterloo, B-1640 Rhodes-St-Genèse, Belgique

<sup>2</sup>Ecole des Mines d'Alès, laboratoire génie de l'environnement industriel

6, Avenue de Clavières 30319 Alès Cedex

\*(auteur correspondant : <mailto:laboureu@vki.ac.be>)

**Résumé** - Le Boilover est un phénomène de moussage de grande ampleur résultant de la vaporisation violente d'une nappe d'eau située au fond des réservoirs atmosphériques en feu. Cet article présente les résultats d'une campagne expérimentale visant à mieux comprendre les conditions d'apparition et les conséquences de ce phénomène, montrant l'influence du facteur de forme géométrique du réservoir, et de la composition du combustible. Outre les quantités physiques habituelles telles que la température, la perte de masse et le flux rayonné, l'évolution temporelle de la partie lumineuse de la flamme est investiguée.

## Nomenclature

$A$	rapport de forme		
$D$	diamètre du réservoir, $m$		
$H$	hauteur, $m$		
$x$	fraction volumique de diesel		
$T$	température, $^{\circ}C$		
$t$	temps, $sec$		
$q$	flux de chaleur, $kW/m^2$		
$\dot{m}$	taux de combustion, $mm/min$		
		<i>Indices et exposants</i>	
		$S$	Stationnaire
		$BO$	Boilover
		$Int$	interface fuel-eau
		$f$	flamme
		$c$	Combustible
		$w$	Eau

## 1. Introduction

Le Boilover est un phénomène de moussage de grande ampleur résultant de la vaporisation rapide d'une nappe d'eau située au fond de réservoirs atmosphériques, qui provoque un débordement et une éruption violents du combustible en feu [1]. Malgré l'amélioration des normes de sécurité concernant les unités de stockage industrielles, une initiation accidentelle de la combustion d'un réservoir d'hydrocarbure est toujours possible, et s'il y a présence d'une sous-couche d'eau, un Boilover peut se produire. La nécessité de mieux comprendre les conditions d'apparition et la phénoménologie de ce type d'accident reste un objectif d'importance dans le domaine de la caractérisation des conséquences des risques industriels.

La littérature [2]-[4] distingue deux types de Boilover : le « Boilover classique », caractérisé par l'apparition d'une zone uniforme en température dite « zone chaude » à température plus ou moins constante, qui se développe à une vitesse plus importante que la régression de surface due à la combustion de l'hydrocarbure; le contact de cette zone très chaude avec la couche d'eau provoque une éruption de grande intensité. A l'inverse, le Boilover dit « en couche mince » présente un gradient de température plus modeste dans le combustible et donc une plus grande proportion de combustible consommé avant le déclenchement de la vaporisation de la couche d'eau. Les différentes études publiées à ce jour permettent de définir certains critères d'apparition de la zone chaude et du Boilover qui s'en

suit. Ils sont liés à la viscosité du fuel et à une plage de température d'ébullition [6]. Toutefois les auteurs ne s'accordent pas encore sur les différents mécanismes thermohydrauliques qui s'établissent au sein du fluide ainsi que sur la formation de la zone chaude. Par ailleurs on note une certaine faiblesse sur la caractérisation de l'évolution des dimensions de la partie lumineuse de la flamme lors du Boilover. Par conséquent l'objectif de cet article est de fournir des éléments expérimentaux qui permettent d'améliorer la compréhension du phénomène via des campagnes d'essais conduites sur des dispositifs à petite échelle.

## 2. Expérimentations petite échelle

### 2.1. Dispositif expérimental

Deux campagnes expérimentales ont été récemment menées à l'Institut von Karman sur des configurations similaires. Deux paramètres sont retenus pour cette investigation: le diamètre du réservoir et la composition du combustible. Les cuves utilisées pour ces campagnes sont cylindriques avec un diamètre de 0,15m ou 0,3m et une hauteur de 0,09m, comme le schématise la Figure 1. Le combustible est un mélange de diesel et d'huile de moteur Valvata Shell 460. L'ajout d'huile augmente la viscosité cinématique du combustible et renforce ainsi l'effet piston de la vapeur d'eau sur le combustible. En effet, l'essai préliminaire effectué sur un feu de diesel pur n'a conduit qu'à un Boilover de très faible intensité. Ce résultat est en parfait accord avec les travaux d'Hasegawa [6] qui a montré que seuls des mélanges diesel-essence contenant de 50 à 90% de diesel ont engendré un Boilover significatif.

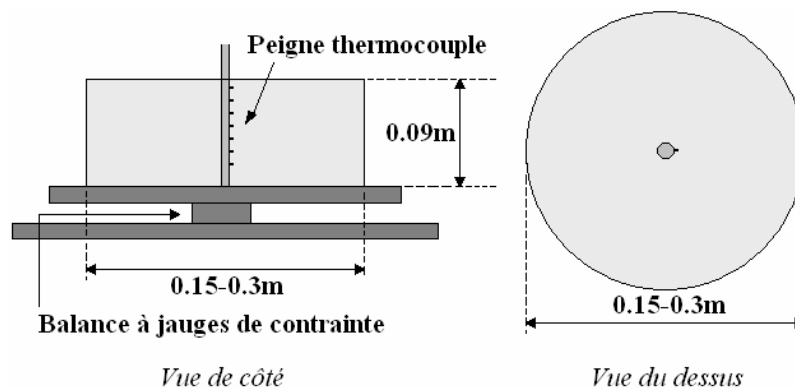


Figure 1 Vue schématique du réservoir

Parmi les différents essais des deux campagnes expérimentales, 4 tests sont retenus pour analyse. Leurs caractéristiques sont listées au Tableau 1. Tous ont conduit à un Boilover et n'ont pas rencontré de dysfonctionnement lors de l'acquisition. Malheureusement ce faible nombre d'essais ne permet pas encore de statuer sur la répétabilité. Pour faciliter la comparaison, tous ces tests ont une même hauteur de combustible ( $H_c$ ). Les deux dernières colonnes du Tableau 1 indiquent l'épaisseur de la sous-couche d'eau ( $H_w$ ) et la proportion de diesel dans le mélange ( $x$ ).

	D [m]	H [m]	$H_c$ [m]	$H_w$ [m]	x [-]
Test 1	0,15	0,09	0,6	0,02	0,7
Test 2	0,15	0,09	0,6	0,02	0,8
Test 3	0,3	0,09	0,6	0,025	0,7
Test 4	0,3	0,09	0,6	0,025	0,8

Tableau 1 Résumé des conditions expérimentales

## 2.2. Instrumentation

L'acquisition des différentes mesures est réalisée au moyen de cartes Keithley-USB3100-102 de 12bit avec une fréquence d'échantillonnage de 10Hz.

Afin de mesurer l'évolution de la température du combustible et de l'eau, un peigne composé d'une série de thermocouples de type K de 220  $\mu\text{m}$  de diamètre, protégés dans une gaine de fibre de verre, insérés dans un tube métallique, est placé au centre du réservoir. La résolution spatiale des thermocouples est égale à 15mm pour les tests n°1 & 2, et à 10mm, avec une résolution améliorée de 5mm dans la partie combustible proche de l'interface avec l'eau pour les tests n°3 & 4. Du fait de la carte d'acquisition utilisée, la résolution en température est égale à 0,24°C.

Le réservoir repose sur une balance à jauges de contrainte (voir Figure 1) permettant de mesurer l'évolution de perte de masse. La principale incertitude qui vient de la résolution de la carte d'acquisition, équivaut à 10,6g pour les tests n°1 et 2 et à 6,6g pour les tests n°3 et 4. Un fluxmètre Medtherm 64 mesure l'intensité du rayonnement thermique émis par les flammes. Sa réponse en fréquence est de l'ordre 4 Hz et le capteur ne possède pas de fenêtre réductrice d'angle de vue. Le fluxmètre est placé à une distance  $L/D=7,25$  pour les tests n°1 et 2, et à  $L/D=6$  pour les tests n°3 et 4. Celui-ci fait face au feu pour recevoir un maximum de flux thermique. L'incertitude donnée par les courbes de calibration du constructeur équivaut à 3%. Enfin, un suivi vidéo du phénomène a aussi été réalisé, permettant d'observer l'évolution de la partie lumineuse de la flamme au moment du Boilover.

## 3. Résultats

La Figure 2 montre quelques profils verticaux de température mesurés à différents temps pour la configuration à petit facteur de forme  $A=H_c/D=0,2$ . En accord avec la littérature [3] [4], la Figure 2 indique que le phénomène de Boilover se déroule en deux étapes. Tout d'abord, une combustion monotone à la surface du fuel entraîne une augmentation progressive de la température d'interface combustible-eau. Dans cette phase, que Fan [5] appelle quasi-stationnaire, le rayonnement thermique et le taux de perte de masse restent constants. On détecte aussi la formation d'un plateau de température au sein du combustible, appelée zone chaude (voir [2] [3] [7]). Elle est nettement marquée et profonde dans le cas du réservoir de petit facteur de forme ( $A=0,2$ ). Par contre elle n'a pas été mise en évidence pour le réservoir à grand facteur de forme ( $A=0,4$ ). Il n'y a pas de théorie complètement validée qui explique la formation d'une telle zone. Hall [2] et Hasegawa [7] la relie à un processus de distillation. Ils supposent que les composants les plus volatiles du mélange se transforment en de petites bulles gazeuses qui dans leur remontée vers la surface engendreraient un mouvement de liquide et donc un brassage convectif responsable de l'uniformisation du champ thermique. Un montage transparent est en cours de réalisation pour permettre la visualisation de ces mouvements convectifs éventuels.

La deuxième phase commence lorsque la couche d'eau atteint la température d'ébullition, la vaporisation se développe rapidement et le phénomène de Boilover se déclenche en propulsant vers le haut le combustible restant. Ceci se traduit à la Figure 3 par l'apparition d'un important pic de rayonnement thermique (facteur d'augmentation  $>15$ ) et d'une brusque chute de masse.

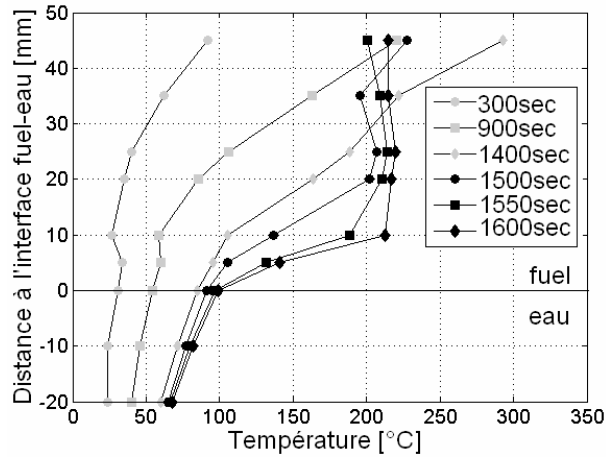


Figure 2 Distribution verticale de température  
( $A=H_c/D=0.2$ )

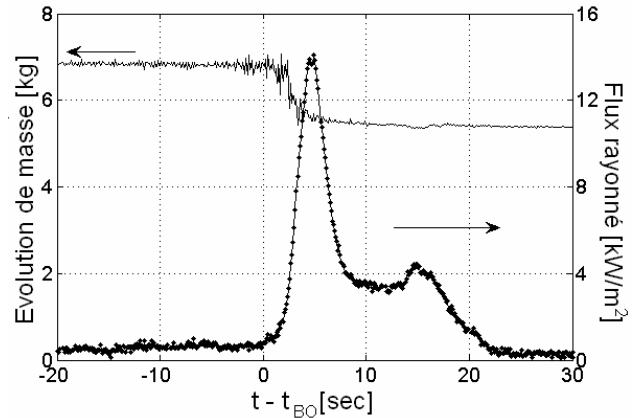


Figure 3 Évolution du flux rayonné et de la perte de masse

Sur base des expériences effectuées, il semble intéressant de vérifier que les différentes quantités physiques mesurées s'accordent sur la détermination du temps d'apparition du Boilover compté à partir de la mise à feu du combustible. Le Tableau 2 confirme l'adéquation des critères appliqués. Ils fournissent des temps d'apparition très proches : l'écart observé entre les différentes déterminations du temps d'arrivée du Boilover est inférieur à 0,22%.

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
Perte de masse	3956,7	4083,2	1640,5	1725,6
Radiation	3957,8	4083,2	1640,7	1725,1
$T_{int}=110^{\circ}\text{C}$	3953,1	4083,0	1639,7	1723,6
Visualisation	3957,3	4083,1	1639,6	1727,4
<b>Moyenne</b>	<b>3956,2 (0,12%)</b>	<b>4083,1 (0,005%)</b>	<b>1640,1 (0,07%)</b>	<b>1725,4 (0,22%)</b>

Tableau 2 Détermination du temps d'apparition du Boilover

Le Tableau 2 montre que le temps d'apparition du phénomène aggravant se réduit d'un facteur de 2,4 lorsque le diamètre du réservoir double. Cette accélération est liée au taux ou flux de combustion. En effet la littérature [8] souligne que ce dernier augmente jusqu'à une valeur plateau lorsque le diamètre de cuve croît de 0,1m à 1m. Cette tendance est assez bien vérifiée expérimentalement puisque le taux de combustion passe de 0,59mm/min à 1,15mm/min pour les cas à  $x=70\%$  et de 0,62 à 1,05mm/min pour les cas à  $x=80\%$ <sup>1</sup>.

Toutefois, le taux de combustion n'est pas le seul paramètre qui conduit à une réduction du temps d'apparition de Boilover avec l'augmentation du diamètre du réservoir. Le second mécanisme physique à prendre en considération est la formation de la zone chaude, observée pour le plus petit facteur de forme. La croissance de son épaisseur étant plus rapide que la régression de la surface du combustible par combustion, la présence d'une zone chaude favorise l'apport de chaleur vers l'interface fuel-eau et accélère l'apparition du Boilover.

Si l'on s'intéresse aux conséquences du phénomène de Boilover, la Figure 4 présente une visualisation de flamme lors du déclenchement du Boilover pour les tests n° 2 et 4. La flamme

<sup>1</sup> La perte de masse étant linéaire pendant la période stationnaire du Boilover, le taux ou flux de combustion est calculé sur base de la perte de masse par unité de temps, ramenée à l'unité de mm/min (couramment utilisée pour la combustion de feu de flaque [3][7][8]) en divisant la valeur trouvée par le produit de la densité du mélange et de la surface de combustion.

part du réservoir en colonne, puis par appel d'air, forme une boule de feu à son extrémité. On note que le débordement est plus important pour la cuve de grand diamètre alors que la hauteur de flamme reste à peu près la même dans les deux cas.

Afin de comparer plus facilement l'évolution temporelle des deux expériences, un traitement des visualisations a été réalisé. Après soustraction de l'arrière-plan, la partie lumineuse de la flamme a été détectée sur base d'un seuil d'intensité de gris. Le graphique de la Figure 5 trace la variation de la surface de la flamme en fonction d'un temps référencé par rapport à l'apparition du Boilover. Comme pressentie, la surface de flamme détectée est plus importante dans le cas du plus grand diamètre de cuve et la durée de Boilover est plus longue, ce qui s'explique par la plus grande quantité de combustible rejetée.

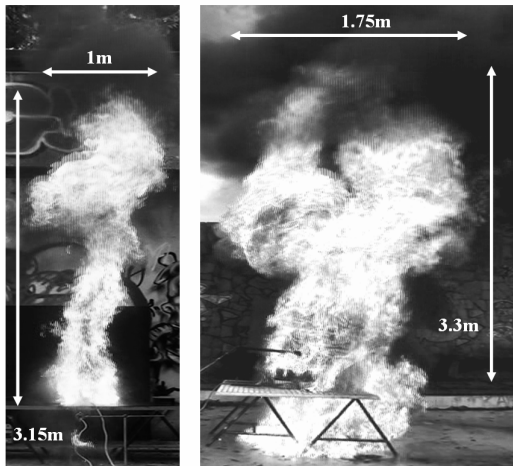


Figure 4 Flamme maximale lors du Boilover de tests n° 2 (à gauche) & 4 (à droite)

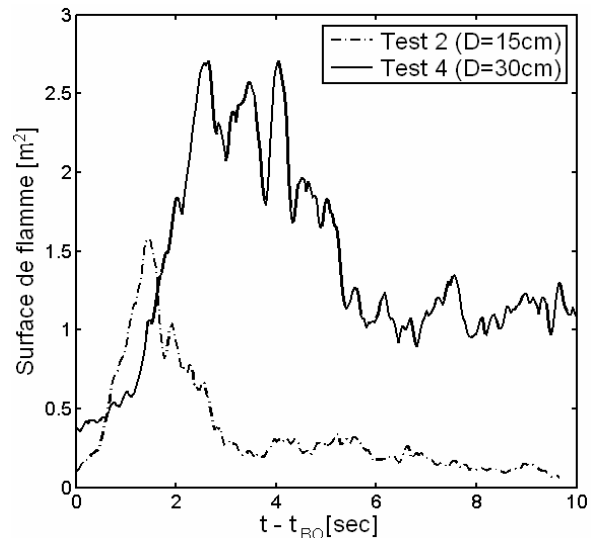


Figure 5 Evolution temporelle de surface de flamme pour les tests n°2 & 4

Cependant, la littérature reste très pauvre sur les aspects d'évolution de flamme. La plupart des auteurs évaluent les conséquences du phénomène au moyen de la notion d'intensité, dont la définition diffère selon les études. Deux intensités proposées dans la littérature sont reprises: il s'agit du taux relatif de perte de masse et de la densité du flux de chaleur rayonnée normée. Elles sont comparées au Tableau 3 à deux nouvelles intensités que nous basons sur la hauteur de flamme, soit ramenée à sa valeur en régime précurseur soit normée par le diamètre de la cuve. Ces nouvelles définitions ont été choisies car elles reposent uniquement sur les visualisations du phénomène, et pourraient donc être comparées à des valeurs tirées d'accidents réels de grandes dimensions, ce qui permettraient d'analyser par la suite l'effet du facteur d'échelle ; ce qui n'a pas encore été étudié.

On constate que ces intensités géométriques s'alignent bien avec celle relative à la perte de masse: toutes les trois indiquent une diminution d'intensité quand le diamètre de la cuve augmente. Cette évolution est en accord avec les résultats expérimentaux de Koseki [3] et Garo [9]. Par contre on note que ce comportement va à l'inverse de celui suivi par l'intensité de rayonnement. Le Tableau 3 montre aussi que pour la cuve de petit diamètre (0,15m), l'ajout d'huile dans le mélange (Test2 → Test 1), qui entraîne une augmentation de la viscosité et donc de l'effet piston, aura tendance à élever l'intensité de masse et /ou de géométrie de flamme. Cette augmentation d'intensité est aussi confirmée par un plus grand pourcentage de combustible restant avant le Boilover, lorsque le pourcentage d'huile est plus important (35% pour  $x=70\%$  contre 30% pour  $x=80\%$ ). Cette situation aurait dû se répéter dans le cas des réservoirs de 0.3m, mais la tendance inverse observée s'explique par la

présence d'une rafale de vent juste au déclenchement du Boilover, qui a perturbé son déroulement normal.

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
$\dot{m}_{BO} / \dot{m}_S [3][8]$	769.28	697.42	215.62	286.66
$q_{BO} / q_S [3]$	5.56	4.17	16.58	29.48
$H_{fBO}/H_{fS}$	12.13	12.61	4.78	7.61
$H_{fBO}/D$	25.14	22.7	7.23	10.9

Tableau 3 Intensité du Boilover selon différentes définitions

## 4. Conclusion

Afin de mieux comprendre les conditions d'apparition et les conséquences d'un Boilover, des expériences à petite échelle sont menées avec un mélange diesel-huile. Les résultats montrent que l'apparition de la zone chaude n'est pas seulement liée à la composition du fluide, mais dépend aussi de la géométrie du réservoir caractérisée par le facteur de forme. En accord avec les recherches précédentes, les observations effectuées confirment que le temps d'apparition du Boilover sera d'autant plus court que le diamètre du réservoir sera grand (mais diamètre plus faible que 1m). Pour la première fois une quantification de l'évolution temporelle de la flamme a été réalisée, sur laquelle une nouvelle définition d'intensité de Boilover a été proposée. Pour progresser dans la compréhension du phénomène, une étude laboratoire (pour éviter les aléas liés au vent) sur modèles transparents est planifiée courant 2010 à l'Institut von Karman.

## Références

- [1] S. Patej, "Ω-13 Boilover", *INERIS-DRA-2003-46055* (2003)
- [2] H.H. Hall, "Oil tank fire Boilovers", *Mechanical Engineering* 47(7), 540-544 (1925)
- [3] H. Koseki, "Boilover and crude oil fire", *J. Applied Fire Science* 3(3) 243-272 (1993)
- [4] T. Inamura, K. Saito et al., "A study of boilover in liquid pool fires. Part II: Effects of in-depth radiation absorption", *Combustion Science and Technology* 86, 105-119 (1992)
- [5] P. Michaëlis, G. Mavrothalassitis, A. Hodin, Boilover, "Propension de certains hydrocarbures à développer ce phénomène. Quantification déterministe des effets conséquences", *Rapport ENV-MHS-95-04-18* (1995)
- [6] W.C. Fan, J.S. Hua, G.X. Liao, "Experimental study on the premonitory phenomena of Boilover in liquid pool fires supported on water", *J. Loss Prev. in Process Ind.* 8(4) 221-227, 1995
- [7] K. Hasegawa, "Experimental study on the mechanism of hot-zone formation in open tank fires", *Proc. Fire Safety Science, 2<sup>nd</sup> Int. Symp.*, 221-230 (1987)
- [8] H.C. Hottel, "Review: Certain laws governing the diffusive burning of liquids", by Blinov and Khudiakov, *Fire Research Abstracts and Reviews*, 1-41 (1959)
- [9] J.P. Garo, H. Koseki, J.P. Vantelon, C. Fernandez-Pello, "Combustion of liquid fuels floating on water", *Thermal Science* 11(2), 119-140 (2007)

## Remerciements

Les auteurs remercient le Centre d'Études de Gramat qui est à la base de ce projet et avec qui l'Institut von Karman et l'École des Mines d'Alès collaborent sur un programme de recherche plus général touchant à la caractérisation du terme source lors de phénomènes aggravants.