

Exposition d'un réservoir à un feu d'hydrocarbure – Essais à échelle réduite.

SAULNIER Frédéric^{*}, LAMY Peggy, BRUNET Luc

Nexter Munitions, Centre de Bourges, 7 route de Guerry, 18023 Bourges Cedex² Centre National des Risques Industriels 88 boulevard Lahitolle, 18000 Bourges

Résumé

Cet article présente les travaux réalisés dans le cadre du projet de recherche appliquée F.R.E.D.R.I.C. (Feux Réels et Effets Dominos sur les Réservoirs Industriels et les Canalisations). Le projet, coordonné par le CNRI (Centre National des Risques Industriels), et mené en collaboration avec l'INERIS, se situe dans le contexte du risque industriel. Les incendies sont des accidents fréquents pouvant conduire à des effets dominos aux conséquences catastrophiques, d'autant plus quand l'incendie se déclenche dans une zone où des matières pyrotechniques sont stockées. Nos travaux consistent en l'étude des effets d'un incendie de type feu de nappe d'hydrocarbure sur un réservoir représentant une munition. Afin de mieux connaître les échanges thermiques se produisant au cours de ce type d'incendie, un dispositif expérimental de plein air a été mis au point dans le but d'évaluer l'impact thermique et les effets consécutifs à l'exposition à un feu de taille réelle. Nous présentons ici le dispositif mis au point, les essais réalisés ainsi que les résultats obtenus. Cette étude expérimentale, toujours en cours, nous permet de mieux connaître les effets d'un feu de nappe sur une structure en acier et ouvre la voie vers une meilleure connaissance des températures critiques au delà desquelles des effets dominos thermiques peuvent survenir.

Mots-clés : risque industriel, effets dominos, feu de nappe, flux thermique, réservoir, impact thermique, température.

1. Introduction

Lorsque des installations industrielles sont soumises à des incendies, il peut s'ensuivre des événements secondaires ou effets dominos tels que le B.L.E.V.E. (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) et le Boil-Over aux conséquences désastreuses et pouvant conduire à des accidents majeurs, à la fois à l'intérieur du site et sur l'environnement. Depuis 1992, le recensement et l'analyse des accidents et incidents technologiques sont organisés par le Bureau d'Analyse des Risques et des Pollutions Industrielles (B.A.R.P.I.) au Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD). Toutes activités confondues, 28505 accidents ont été recensés pour la période antérieure au 1er Janvier 2005, dont 23193 en France. En terme de répartition les incendies constituent une part majeure des accidents. Des dispositions et un cadre légal gèrent le domaine des installations industrielles. Divers textes (décrets, directives, circulaires...) ont conduit à définir des seuils d'effets sur les structures en prenant en compte les effets missiles (ou de projections), les effets de surpression et les effets thermiques. Pour notre étude, nous avons considéré les seuls effets thermiques. La Figure 1 réalise une synthèse actuelle des seuils d'effets thermiques reconnus. Elle fait apparaître, en plus, les seuils d'effets thermiques sur les personnes, à titre de comparaison. Nous pouvons remarquer que ces valeurs seuils sont exprimées en niveau de flux thermique et ne permettent pas de raisonner simplement en terme de température atteinte pour un temps d'exposition donné.

* Auteur à qui la correspondance devrait être adressée : f.saulnier@giat-industries.fr

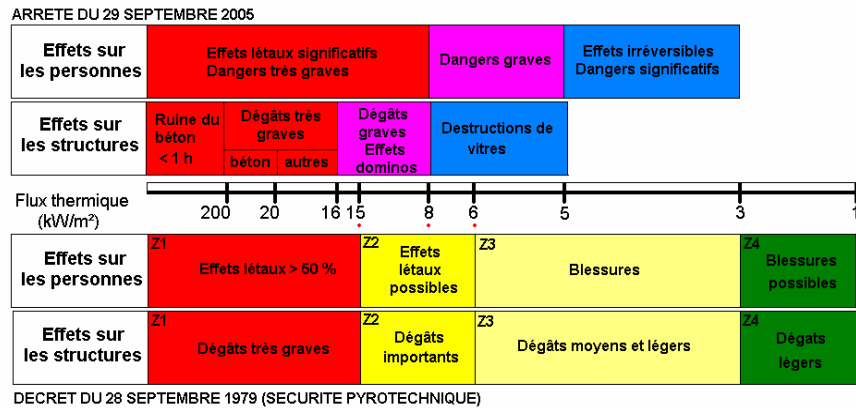


Figure 1. Seuils d'effets thermiques

La réalisation des travaux présentés dans cet article s'inscrit dans le cadre du projet de recherche appliquée dénommé F.R.E.D.R.I.C., abréviation de « Feux Réels et Effets Dominos sur les Réservoirs Industriels et les Canalisations » cofinancé par le Conseil Général du Cher, le F.S.E. (Fonds Social Européen) et les fonds FRED (Fonds de REstructuration de la Défense). L'INERIS (Institut National de l'Environnement Industriel et des RISques) et Nexter Munitions travaillent en partenariat sur ce projet coordonné par le C.N.R.I. (Centre National des Risques Industriels). L'INERIS étudie la partie canalisations. Nexter Munitions se charge de l'étude des réservoirs en y associant la dimension supplémentaire du risque pyrotechnique qui peut significativement aggraver les effets d'un incendie. L'objectif du travail est de concevoir une stratégie expérimentale permettant d'évaluer l'impact thermique sur une cible de type réservoir située dans l'environnement thermique que constitue un feu de nappe d'hydrocarbure. Les travaux ont été réalisés dans le Département Matériaux Energétiques (DME) de Nexter Munitions sur le Centre de Bourges. Ce département est expert dans le domaine de la pyrotechnie (combustion, explosion, procédés industriels...). Ces travaux recoupent les investigations menées dans le domaine de la sécurité des munitions (MUnitions à Risques Atténués (MURAT)).

1. Dispositif expérimental

2.1 Présentation générale

Afin d'étudier l'impact thermique, nous nous sommes inspirés d'un essai normalisé (norme NF T 70-513 d'octobre 2004 : « Matériaux énergétiques de défense – Sécurité, vulnérabilité – Incendie de kérosène » (AFNOR, 2004)) qui vise à soumettre à un feu de nappe de kérosène un réservoir en acier normalisé (maquette GEMO 3 litres à paroi épaisse, Norme AFNOR NF T 70 522 (AFNOR, 1997)) contenant des matériaux énergétiques. La Figure 2 montre l'aspect de la maquette utilisée et donne une idée de ses dimensions.



Figure 2. Photographies d'une maquette GEMO 3L

La maquette GEMO 3L est constituée d'un corps cylindrique muni d'un fond soudé et d'un couvercle à vis. L'essai décrit dans la norme NF T 70-513 est utilisé pour l'homologation des Munitions à Risques Atténués (label MURAT). Lors de l'essai, la maquette, emplie de matériau énergétique (explosif), est placée juste au-dessus d'un feu de nappe réalisé dans un bac; elle est donc plongée dans les flammes. Le temps au bout duquel une réaction survient est mesuré, et la nature de la réaction qui a eu lieu est déterminée par examen des restes de la maquette. Il n'y a aucune mesure de température sur l'objet lui-même. Dans le dispositif que nous avons mis au point, la maquette est exposée progressivement à l'incendie simulé : elle est suspendue à côté du feu, dans le plan horizontal, à distance décroissante. Le dispositif représente donc un essai de feu à taille réelle pour une munition, mais c'est également une reproduction à échelle réduite d'un incendie pouvant avoir lieu dans une raffinerie, ce qui permet des essais au stade laboratoire. L'instrumentation mise en place sur la maquette GEMO 3L pourra, dans son principe, s'adapter à d'autres structures de type réservoir. La source de flux thermique choisie est donc le feu de nappe qui est aussi une agression très fréquente dans les industries autres que celles de défense. Les combustibles utilisés lors des expérimentations sont le kérosène et le gazole (diesel).

2.2 Mise en place

2.2.1 Dimensionnement de la source : feu de nappe

Nous cherchons à obtenir un feu d'une durée maximale de 30 min générant un flux significatif, qui puisse être mis en œuvre dans une cour d'essais d'environ 20 m sur 20 m. De nombreux travaux expérimentaux (Bernuchon, 2002) ont permis de construire des modèles empiriques forts utiles pour dimensionner un incendie simulé pour effectuer des essais. Même si le feu de nappe est gouverné par la convection naturelle, c'est le rayonnement qui est utilisé pour déterminer les distances d'effets thermiques, que ce soit pour l'homme ou les structures (voir plus haut les seuils d'effets) car, c'est le mode de transfert privilégié de la chaleur dans le plan horizontal. Le modèle choisi pour dimensionner l'incendie simulé est le modèle de la flamme solide : la flamme est assimilée à un cylindre rayonnant de manière uniforme sur toute la surface. La densité du flux thermique radiatif ϕ reçu par un élément extérieur à la flamme est :

$$\Phi = \Phi_0 \cdot F \cdot \tau \cdot \alpha \quad (1)$$

ϕ_0 étant le pouvoir émissif de la flamme en kW/m², **F**, le facteur de vue (ou facteur de forme) entre l'élément extérieur et la flamme, τ , le coefficient d'atténuation atmosphérique et α le coefficient d'absorption de l'élément extérieur.

En première approximation, on considère α et $\tau = 1$. Il reste donc à déterminer la géométrie de la flamme permettant de calculer le facteur de vue **F** et le pouvoir émissif de la flamme ϕ_0 .

La géométrie de la flamme se résume à la base et la hauteur de la flamme. La question de la surface de la base de flamme fait apparaître la notion de diamètre équivalent qui, pour une cuvette rectangulaire de côtés **L** et **I**, est égal à :

$$D_{eq} = 4 \cdot \frac{S}{P} \quad (\text{formule valable pour } L / I \leq 2) \quad (2)$$

S étant la surface du bac en m² et **P**, le périmètre du bac, en m. Notre bac mesure 1,22 m X 0,83 m. Le diamètre équivalent est donc d'environ 1 m.

La hauteur de la flamme est estimée grâce à des corrélations établies à partir d'essais ou de données disponibles dans la littérature qui font intervenir le débit masse surfacique de combustion, **m''**, qui caractérise la cadence de consommation du combustible par unité de surface et de temps. **m''** dépend des propriétés physico-chimiques du combustible, mais aussi du diamètre de la flaque et de l'alimentation du feu en oxygène. Il a été constaté (Bernuchon, 2002) que **m''** tend vers une valeur constante pour des diamètres de feux importants. **m''** est estimé par l'équation suivante :

$$m'' = m''_{\infty} \cdot \left(1 - \exp(-k\beta \cdot D_{eq})\right) \quad (3)$$

m''_∞ étant le débit masse surfacique pour une nappe de taille infinie en kg/m².s et **kβ** le coefficient d'extinction de la nappe en m⁻¹. Les valeurs de **m''**_∞ et de **kβ** utilisés pour nos estimations proviennent des références (Bernuchon, 2002) et (Muñoz et al, 2004) Les masses volumiques moyennes du kérosène et du gazole pour effectuer les calculs des masses de combustible proviennent de la référence (Guibet). Elles sont respectivement de 808 et 840 kg/m³. La surface **S** du bac est d'environ 1 m².

Parmi toutes les corrélations empiriques existantes pour estimer la hauteur des flammes, la corrélation de Heskestad semble la plus appropriée à notre cas. Elle possède un domaine de validité important (Bernuchon, 2002) que ce soit en terme de produit ou de type de feu. Heskestad a proposé une formule simplifiée pour les combustibles les plus courants dans des conditions atmosphériques classiques.

$$\frac{H}{D_{eq}} = -1,02 + 0,235 \cdot \frac{\dot{Q}^{\frac{2}{5}}}{D_{eq}} \text{ et } \dot{Q} = \eta_{comb} \cdot \dot{m}'' \cdot S \cdot \Delta H_c \quad (4) \text{ et } (5)$$

\dot{Q} étant la puissance dégagée par la combustion en kW, η_{comb} , le rendement de combustion et ΔH_c la chaleur de combustion en kJ/kg. Le rendement de combustion est supposé être de 70%. Les valeurs de chaleur de combustion du kérosène et du gazole utilisées proviennent de la référence (Guibet). Elles sont respectivement de 43500 et 42600 kJ/kg.

Le pouvoir émissif de la flamme Φ_0 en kW/m² correspond à la quantité de chaleur rayonnée, par unité de surface de flamme et de temps.

$$\Phi_0 = \frac{\eta_r \cdot \dot{Q}}{S_f} = \frac{\eta_r \cdot \eta_{comb} \cdot \dot{m}'' \cdot S \cdot \Delta H_c}{S_f} \quad (6)$$

η_r est la fraction radiative qui traduit la perte de chaleur de la flamme par convection et par effet d'écran. Sa valeur est issue de la littérature (Bernuchon, 2002) et vaut, dans notre cas, 0,5. S_f est la surface de la flamme en m². Elle peut être évaluée à partir des hauteurs de flamme calculées en considérant la surface d'un demi-cylindre de diamètre égal au diamètre équivalent calculé.

$$S_f = \pi \cdot \frac{D_{eq}}{2} \cdot H_f \quad (7)$$

La durée du feu peut être estimée par :

$$t = \frac{M}{\dot{m}'' \cdot S} \quad (8)$$

où t est le temps estimé du feu, en s, M la masse totale de combustible, en kg, \dot{m}'' le débit masse surfacique précédemment estimé, en kg/m².s et S la surface au sol de combustible, en m².

Nos différents choix amènent aux résultats suivants regroupés dans la TTable :

Table 1. Dimensionnement du feu de nappe

	Kérosène	Gazole
\dot{m}''_{∞} (kg/m ² .s)	0,039	0,062
$k\beta$ (m ⁻¹)	3,5	0,63
\dot{m}'' (kg/m ² .s)	0,038	0,029
Hauteur de flamme H_f (m)	2,5	2,5
Surface de flamme S_f (m ²)	3,9	3,9
Puissance dégagée Q (kW)	863	876
Pouvoir émissif Φ_0 (kW/m ²)	111	113
Pouvoir émissif Φ_0 (kW/m ²)*	32	33
Durée estimée du feu pour 20l (min)	7	10
Durée estimée du feu pour 40l (min)	14	19
Durée estimée du feu pour 60l (min)	21	29

* : prise en compte du facteur de forme calculé à $1 \text{ m} = 0,291$ (Bernuchon, 2002)

2.2.2 Instrumentation de la source

2.2.2.1 Flux thermique radiatif

Nous avons voulu mesurer le flux thermique radiatif aux alentours du feu mais aussi à proximité de la maquette de manière à se situer par rapport aux seuils présentés dans l'introduction. Notre choix s'est porté sur des fluxmètres à gradient qui sont cités comme étant les mieux adaptés à la mesure des flux thermiques radiatifs.

Nous avons utilisé des fluxmètres de la marque Medtherm. La série de traducteurs de flux thermique que nous avons utilisés proviennent de la série 64 qui comporte aussi bien des fluxmètres de type Gardon (à un seul thermocouple) que des fluxmètres de type Schmidt-Boelter (à thermopile). Les références des fluxmètres que nous avons utilisés pour les essais présentés dans cet article sont :

- 64-10-16,
- 64-2-20,
- 64-5SB-19/SW-2C-150,
- 64-1SB-19/SW-2C-150.

Les fluxmètres sont fixés sur des trépieds à distance connue de l'incendie simulé, en général à proximité de la cible, mais aussi autour de la source. Le flux thermique est mesuré de manière continue pendant toute la durée d'un feu.

2.2.2.2 Hauteur de flamme

Des prises de vue par caméra lors des essais puis un traitement des films par le logiciel Aviméca (pointeur vidéo) a permis d'évaluer la hauteur des flammes.

2.2.3 Instrumentation de la cible : maquettes

2.2.3.1 Mesures de température

Plusieurs maquettes GEMO 3L sont instrumentées avec des thermocouples de manière à effectuer des mesures aussi bien en surface qu'à cœur. Les maquettes sont vides et nous avons souhaité tester différents types d'implantations des thermocouples :

1. en surface interne du corps (Figure 3 à gauche) à l'aide de thermocouples constitués d'un petit disque de cuivre de diamètre 5 mm et d'épaisseur 1 mm sur lequel est réalisée la soudure chaude,
2. à cœur à différentes profondeurs (Figure 3 droite) (thermocouples chemisés de diamètre 0,5 mm et de longueur 50 mm), dans le corps ou le couvercle pour tenter à posteriori d'extrapoler la température de surface externe.

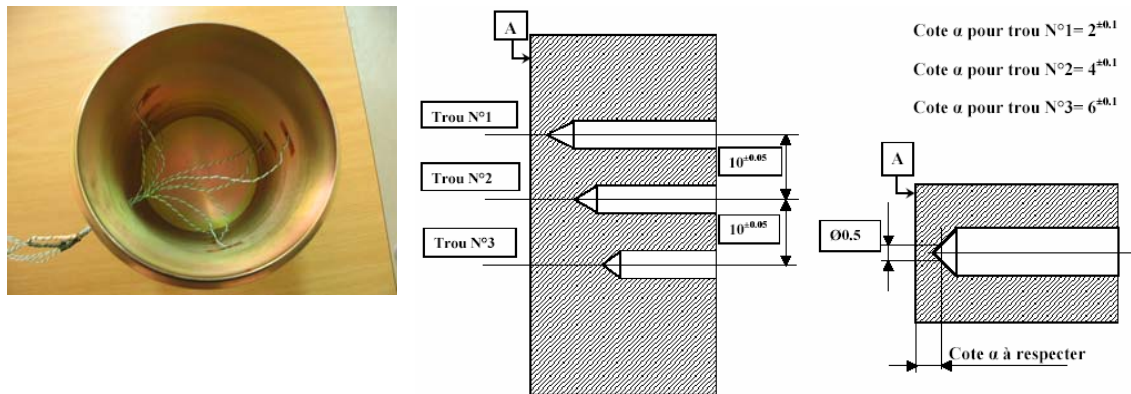


Figure 3. Implantation des thermocouples sur la maquette

Pour des raisons d'encombrement, nous n'avons pas pu tester tous les types d'implantations sur un même objet.

2.3 Réalisation des essais – Expositions au feu

Les maquettes instrumentées sont exposées à des incendies simulés. Une vingtaine d'essais ont été réalisés sur plusieurs campagnes, dont la plupart (15) avec des mesures en surface interne. Dans le souci d'acquérir un maximum d'informations tout en détruisant inutilement le moins possible de matériel, nous avons fait croître progressivement le niveau de l'impact thermique. C'est-à-dire que, contrairement à l'essai d'incendie de kérosène de la norme AFNOR NF T 70-513 où la maquette est directement plongée dans les flammes et donc soumise rapidement à de fortes températures, nous avons exposé la maquette à distance décroissante du feu pour finir par la plonger dans les flammes, cette méthode permettant d'obtenir plusieurs points de vue au niveau du couple source/cible vraisemblablement plus représentatifs de cas susceptibles de se produire dans la réalité industrielle. Les photographies de la Figure 4 illustrent deux types d'exposition : A gauche, exposition

dans le plan horizontal (nous avons commencé à 3 m pour nous approcher à 1 m du front de flamme) et à droite, exposition au dessus du foyer (nous avons commencé à 3 m pour finir au cœur du foyer).

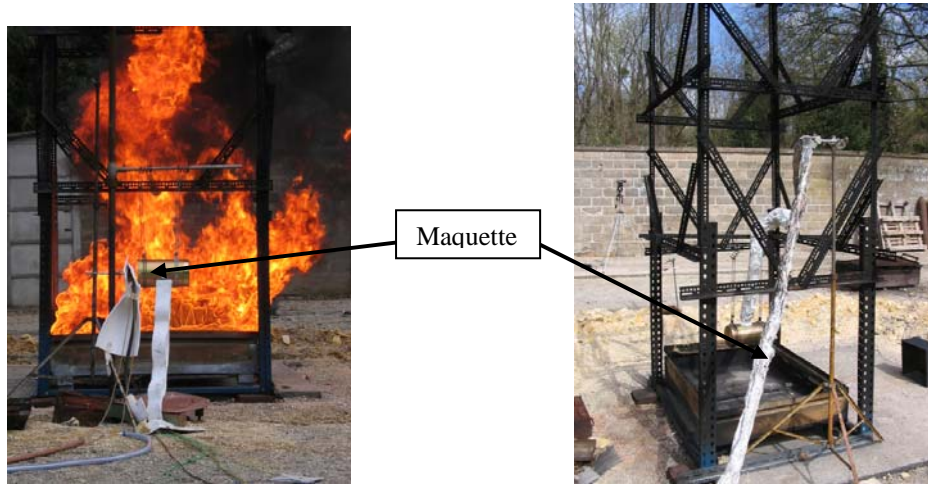


Figure 4. Expositions à l'incendie simulé

2. Résultats - Discussion

3.1. Flux thermique

Comme le flux thermique est mesuré de manière continue pendant tout l'essai, les courbes obtenues comportent un palier de flux qui fournit une bonne idée de la durée des feux en fonction des volumes de combustibles utilisés. Nous pouvons ainsi vérifier la validité des modèles de dimensionnement du 2.2.1. Le résultat final correspond à une moyenne sur le palier. Les niveaux de flux obtenus sont plus faibles que ceux attendus, mais sont néanmoins suffisants pour se situer dans des gammes d'impact thermique significatif (voir seuils d'effets en Figure 1). La Figure résume les mesures de flux thermique réalisées à différentes distances du foyer. La ligne marquée à 8 kW/m^2 indique le niveau de flux des effets dominos selon l'arrêté du 29 septembre 2005. Il faut noter que le kérosène et le gazole sont peu différenciables quant au flux émis. C'est ce que prédisaient déjà les modèles utilisés. Les écarts types moyens à 2 m sont de 2 kW/m^2 et de 5 kW/m^2 à 1 m (distances auxquelles nous avons des résultats pour les deux combustibles).

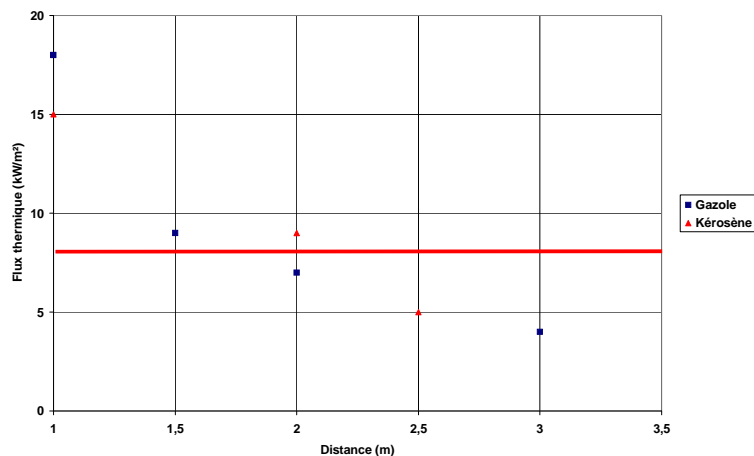


Figure 5. Mesures de flux thermique

3.3 Hauteur de flamme

La

Table 1 fait la synthèse des mesures de hauteur de flamme par pointage vidéo. Le modèle d'Heskestad (Bernuchon, 2002) choisi s'avère valide.

Table 1. Hauteurs de flammes

	Kérosène	Gazole
Nombre d'images traitées	25640	9490
Hauteur moyenne (m)	2,1	2,5
Ecart type (m)	0,4	0,4
Hauteur estimée (Heskestad) (m)	2,5	2,5

3.2. Température

3.2.1 En surface

Les mesures réalisées en surface interne de la maquette et dans le plan horizontal (à gauche Figure 4) ont fourni des courbes de température en fonction du temps du type de la Figure (t est exprimé en 10³s). La partie gauche de la figure schématise, en vue de côté l'exposition du corps de la maquette au flux thermique provenant du foyer et les positions des divers thermocouples de surface qui sont répartis sur trois génératrices (T4, T5 et T6 : génératrice perpendiculaire au flux, T1, T2 et T3 : génératrice à 90° vers le bas et T7, T8 et T9 : génératrice à 90° vers le haut). T4, T5 et T6 sont regroupées et montrent une croissance plus importante que les autres thermocouples. T1, T2, T3, T7, T8 et T9 sont regroupés également et montrent une croissance moins importante puisque l'exposition au flux est moins directe. Les décroissances observées correspondent simplement à l'arrêt de la combustion et donc de l'exposition au flux thermique.

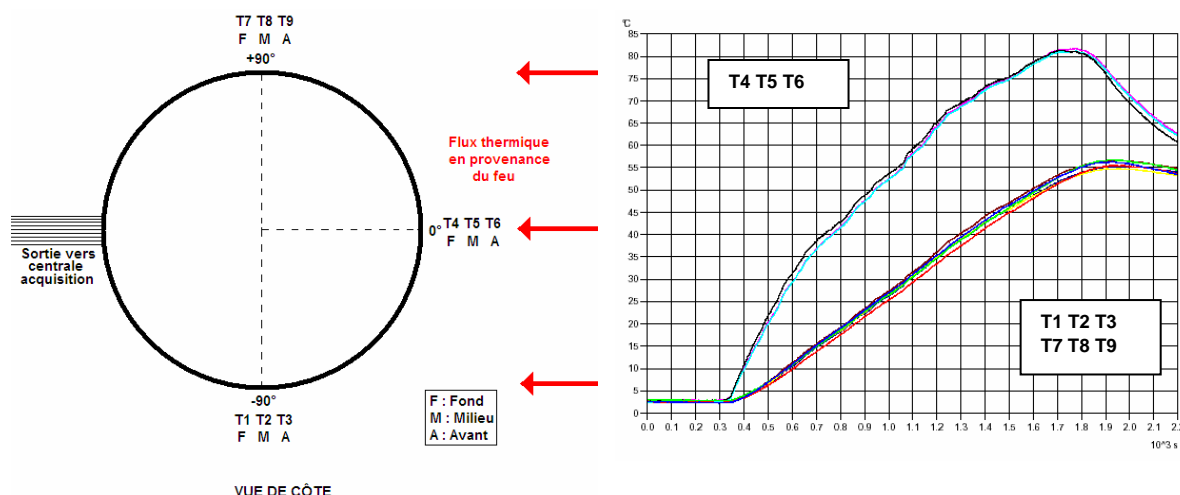


Figure 6. Températures en surface

Bien entendu, la vitesse de montée en température augmente alors que la distance diminue et les essais à 1 m se sont révélés être les plus intéressants. La maquette exposée à un feu de kérosène, se trouvant à 1 m pendant 22 min, sous un flux thermique de 18 kW/m², voit sa température de paroi interne s'élever d'environ 80 ° à une vitesse de 3 à 4 °/min. Par contre, lorsque la maquette est baignée dans l'incendie car le vent incline les flammes vers elle, nous atteignons des vitesses de l'ordre de 10 à 16 °/min pour monter à environ 300 °C au cœur de la paroi de la maquette en moins de 20 min. Ce résultat est intéressant et reflète ce qui peut réellement se passer lors d'un incendie. Pour l'instant, un seul essai a été réalisé en plongeant la maquette dans le feu (Figure 4 droite). Celui-ci a conduit à la destruction de l'instrumentation sur la maquette. La vitesse de montée en température a atteint 100 °/min et la température est montée à plus de 200 °C en 2 à 3 min.

3.2.2 A cœur

Les mesures faites à cœur, et à différentes profondeurs, montrent des différences suffisantes pour pouvoir appliquer une méthode d'extrapolation de la température de surface, que nous ne pourrions pas développer ici, mais qui s'inspire de la référence (Raynaud) La

Figure 5 en est un exemple. L'écart de température constaté entre le trou n°1 et le trou n°2 (Figure 3) est d'environ 8°C. Ces résultats sont encourageants, mais demandent à être approfondis en effectuant des essais complémentaires.

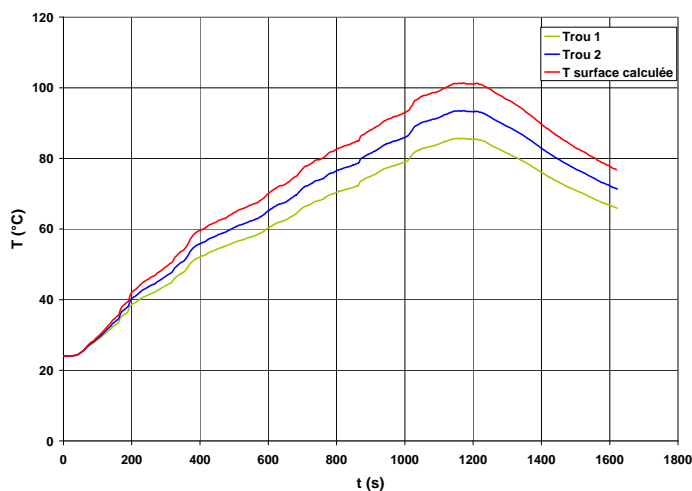


Figure 5. Températures à cœur

3. Synthèse – Conclusions - Perspectives

Tout d'abord, il faut noter que les modèles utilisés pour dimensionner le feu se sont révélés pertinents au niveau des durées et des hauteurs de flammes. Par contre, les flux thermiques se sont révélés plus faibles que les prédictions. Cependant, les niveaux atteints étaient suffisants pour nos essais, et nous avons négligé certains aspects des phénomènes (transmission atmosphérique, par exemple) lors des calculs.

Ensuite, le dispositif d'essais mis en place pour évaluer les impacts thermiques occasionnés par un incendie simulé, sur une structure de type réservoir, a permis d'obtenir les données temps/température recherchées. Dans la plupart des cas, le niveau de flux thermique auquel est soumise notre maquette a été mesuré en simultané. Nous voyons, par exemple, qu'au bout d'environ 20 min d'exposition à un flux de 18 kW/m² (bien supérieur au seuil de 8 kW/m² pour les effets dominos), notre maquette est bien loin d'avoir atteint une température critique telle que la valeur de 427 °C souvent retenue comme température à laquelle la limite d'élasticité de l'acier est presque divisée par deux et où apparaissent donc des risques de rupture des enveloppes. Nous apportons donc quelques éléments complétant les seuils de flux thermique définis par la législation. Il faut cependant éviter de conclure trop vite et étudier les effets d'échelle.

Ces mesures vont maintenant être confrontées à une modélisation puis à des simulations numériques dans l'optique de caractériser différents types de protection thermiques. Une approche thermomécanique pourrait permettre de mieux connaître la venue de phénomène tel que le B.L.E.V.E.

Nos essais doivent se poursuivre et conduire également à des remplissages de la maquette par divers matériaux liquides et/ou solides.

Références

- AFNOR, 2004. Norme NF T 70-513 "Matériaux énergétiques de défense – Sécurité, vulnérabilité – Incendie de kérosène".
- AFNOR, 1997. Norme NF T 70 522 "Matériaux énergétiques de défense Sécurité, vulnérabilité Dossier de définition de la maquette explosif 3L à paroi métallique épaisse".
- Bernuchon, E. 2002. Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels (DRA-006), Ω-2 Feux de nappe, INERIS.
- Muñoz, M., J. Arnaldos, J. Casal, E. Planas, 2004. Analysis of the geometric and radiative characteristics of hydrocarbon pool fires. *Combustion and Flame* 139, 263–277.
- Guibet, J.C., Carburants liquides. *Techniques de l'Ingénieur* [BE 8545].
- Raynaud, M., Le problème inverse de conduction de la chaleur. *Techniques de l'Ingénieur* [BE 8265].