



(ID Modèle = 454988)

Ineris - 207210 - 2728524 - v3.0

11/08/2022

**Incendie d'un réservoir survenu le 10  
septembre 2021 chez la société AUBERT et  
DUVAL à Pamiers (09)**

BEA - RI

## **PRÉAMBULE**

Le présent document a été réalisé au titre de la mission d'appui aux pouvoirs publics confiée à l'Ineris, en vertu des dispositions de l'article R131-36 du Code de l'environnement.

La responsabilité de l'Ineris ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations utilisées.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La mission ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser ce document après cette date.

Au vu de ses missions qui lui incombent, l'Ineris, n'est pas décideur. Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre des missions qui lui sont confiées, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur dans sa prise de décision. Par conséquent, la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet de la mission.

Nom de la Direction en charge du rapport : Direction Incendie, Dispersion Explosion

Rédaction : GENTILHOMME OLIVIER

Vérification : CHAUMETTE SYLVAIN – BENJAMIN TRUCHOT

Approbation : Document approuvé le 11/08/2022 par BOUET REMY

## Table des matières

1	Introduction .....	5
1.1	Contexte .....	5
1.2	Déontologie.....	5
1.3	Description du système étudié.....	5
2	Analyse de l'Ineris .....	6
2.1	Evaluation de la puissance rayonnée par le thermoplongeur.....	6
2.2	Evaluation du flux radiatif reçu par la paroi .....	7
2.3	Evaluation de la température de la paroi interne du bac .....	7
2.4	Précision sur la composition de la paroi du bac .....	8
3	Analyses de sensibilité .....	11
3.1	Influence de l'émissivité du thermoplongeur .....	11
3.2	Influence de la forme du thermoplongeur .....	11
4	Synthèse des enseignements .....	13
5	Références .....	14
6	Annexe : courriel de demande du BEA-RI du 15/11/21.....	15

**Pour citer ce document :**

Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, Incendie d'un réservoir survenu le 10 septembre 2021 chez la société AUBERT et DUVAL à Pamiers (09), Verneuil-en-Halatte : Ineris - 207210 - 2728524 - v3.0, 11/08/2022.

# 1 Introduction

## 1.1 Contexte

Le 10 septembre 2021, un incendie est survenu sur l'un des bacs de la société AUBERT et DUVAL située à Pamiers (09). Lors de cet incendie, il s'est avéré que le thermoplongeur n'était pas immergé dans le liquide. Dès lors, des questions se posent si ce thermoplongeur non immergé, mais en fonctionnement, n'a pas été à l'origine de l'inflammation du bac à l'intérieur duquel il était positionné.

Par mail daté du 15/11/21, et repris en annexe du présent document, le BEA-RI a adressé deux questions à l'Ineris. Le verbatim est repris ci-dessous.

Question n°1 – « *La question est en fonction de la géométrie et du flux généré de la canne de calculer la température d'une surface plane soumise au flux radiatif de la canne en fonction de la distance entre la canne et ladite surface qui varie de 0 à 100 mm (paroi de la cuve) ».*

Question n°2 – « *Cette température est-elle suffisante pour conduire à l'auto-inflammation (1) de l'ébonite et (2) du caoutchouc ? »*

Le présent document vise à apporter les éléments techniques permettant de répondre à chacune de ces questions.

## 1.2 Déontologie

L'Ineris n'a pas réalisé d'études pour le site AUBERT et DUVAL de Pamiers.

## 1.3 Description du système étudié

Le thermoplongeur incriminé est de marque ROTKAPPE et de type B-FC. Cet équipement est de conception modulaire puisqu'il se compose d'un câble, d'une boîte à bornes, d'un élément chauffant Longlife et d'un tube plongeur. Ce tube plongeur est lui-même composé d'un fil chauffant à haute tenue à la chaleur, bobiné et disposé de manière à transmettre un maximum de chaleur au liquide à travers la paroi du tube. Le tube est revêtu de PFA (perfluoroalkoxy) ou de PTFE (polytétrafluoroéthylène). Le diamètre du tube est de 44,5 mm et l'épaisseur du revêtement de 1,5 mm. Ce thermoplongeur a une profondeur minimale d'immersion (chauffée) de 1400 mm pour une longueur totale de 2000 mm.

Le bac est conçu en caoutchouc ou en ébonite (obtenu par vulcanisation du caoutchouc). L'épaisseur de paroi du bac est de 6 mm.

## 2 Analyse de l'Ineris

Pour répondre aux questions posées par le BEA-RI, l'analyse de l'Ineris s'est faite en plusieurs étapes :

- Etape n°1 – Evaluation de la puissance rayonnée par le thermoplongeur ;
- Etape n°2 – Evaluation du flux radiatif reçu par le bac ;
- Etape n°3 – Evaluation de la température de la paroi interne du bac.

Chacune de ces étapes est détaillée ci-après.

### 2.1 Evaluation de la puissance rayonnée par le thermoplongeur

Pour évaluer cette puissance rayonnée par le thermoplongeur, il a été supposé que :

- Hypothèse n°1 – le revêtement en PFA (ou en PTFE) a fondu et que le tube se retrouve à nu ;
- Hypothèse n°2 – la fonte de ce revêtement n'est pas à l'origine de l'incendie du réservoir.

La première hypothèse est justifiée par le fait que, selon les informations transmises par le BEA-RI, la température maximale de chauffe du tube est de 600°C. Cette température est donc bien au-delà de la température de fusion du PFA (ou du PTFE) estimée à 327°C. En cas de fonte du polymère, il n'est pas complètement exclu que les gouttelettes tombent dans le fond du bac et puissent être responsables de l'incendie de celui-ci. Dans la suite de cette analyse, l'Ineris ne s'est pas contenté de cette piste et s'est intéressé aussi à la possibilité d'un départ de feu au niveau du bac par rayonnement depuis le thermoplongeur, expliquant ainsi la seconde hypothèse.

Lorsqu'un corps d'émissivité  $\varepsilon$  est porté à une température  $T$ , il émet une puissance rayonnée donnée par la loi de Planck :

$$M = \varepsilon \sigma T^4 \quad \text{Équation 1}$$

Dans cette équation :

- $M$  [kW/m<sup>2</sup>] correspond à la puissance rayonnée par unité de surface du corps chauffé ;
- $\varepsilon$  [-] à l'émissivité du corps ;
- $\sigma$  à la constante de Stefan-Boltzmann (= 5,67 × 10<sup>-5</sup> kW/m<sup>2</sup>/K<sup>4</sup>) ;
- $T$  [°K] à la température du corps.

Toujours selon les informations transmises par le BEA, le tube est en acier inoxydable (316L). L'émissivité  $\varepsilon$  d'un tel acier peut prendre toutes les valeurs possibles entre 0,5 et 1 selon son état (galvanisé, meulé, poli, sablé, oxydé...). Par application numérique ( $T = 600 + 273,2 = 873,2^\circ\text{K}$ ) :

- $M = 16,4 \text{ kW/m}^2$  pour  $\varepsilon = 0,5$  ;
- $M = 33,0 \text{ kW/m}^2$  pour  $\varepsilon = 1$ .

Remarque importante : l'Ineris est reparti de la température maximale de chauffe communiquée dès le début de l'analyse. A aucun moment, cette valeur de puissance rayonnée n'a été critiquée au regard des éventuelles caractéristiques techniques du thermoplongeur.

## 2.2 Evaluation du flux radiatif reçu par la paroi

Pour déterminer ce flux radiatif reçu par la paroi du bac, connaissant la puissance rayonnée du thermoplongeur, l'Ineris a utilisé le modèle *FNAP* de sa plateforme numérique EPHEDRA. Le lecteur intéressé pourra trouver plus d'information sur *FNAP* dans le rapport  $\Omega$ -2 de l'Ineris [1]. Ce modèle permet de déterminer la densité de flux thermique radiatif reçue par une cible, exposée au rayonnement d'un feu de nappe. La cible est considérée plane et de surface élémentaire. Le feu de nappe peut avoir une base circulaire ou rectangulaire.

Dans le modèle *FNAP*, l'Ineris a défini une « flamme virtuelle » dont les dimensions correspondent peu ou prou à celles de l'élément chauffant du thermoplongeur (diamètre de 50 mm et longueur de 1,4 m), et avec une puissance rayonnée par unité de surface correspondante à celle calculée dans le §2.1.

A titre d'exemple, la Figure 1 montre la cartographie des flux radiatifs obtenus dans le plan perpendiculaire au thermoplongeur lorsqu'il est supposé que l'émissivité  $\varepsilon$  de l'acier est prise égale à 0,5 (soit  $M = 16,4 \text{ kW/m}^2$ ). Grâce à cette cartographie, il est possible de déterminer le flux radiatif reçu lorsque la cible (ici la paroi du bac) est située à différentes distances du thermoplongeur. Ainsi, le flux radiatif serait de  $11,5 \text{ kW/m}^2$  pour une distance de 0,010 m, de  $5,5 \text{ kW/m}^2$  pour 0,050 m et de  $3,3 \text{ kW/m}^2$  pour 0,100 m.

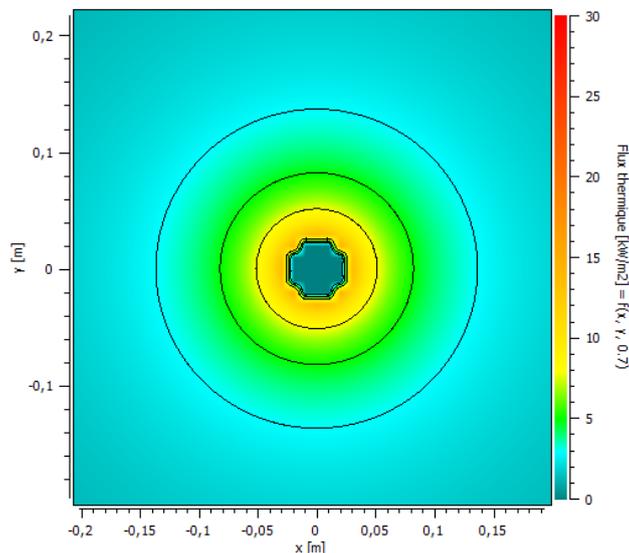


Figure 1. Cartographie des flux radiatifs dans un plan perpendiculaire au thermoplongeur si l'émissivité est égale à 0,5

## 2.3 Evaluation de la température de la paroi interne du bac

Pour déterminer si l'incendie du réservoir est possible, l'Ineris a comparé la température de la paroi interne du réservoir au point de feu du matériau constituant cette paroi. Pour rappel, ce point de feu correspond à la température pour laquelle la quantité de vapeurs est suffisante pour que la combustion continue même si l'on retire la source de chaleur à l'origine de l'inflammation. En ce qui concerne le caoutchouc, de nombreuses références font état d'un point d'inflammation se situant entre 260 et 316°C (cf. [2] par exemple). En revanche, une telle information est plus difficile à obtenir pour l'ébonite. Toutefois, du point de vue de l'Ineris, le point d'inflammation de ce matériau sera relativement proche de celui du caoutchouc. En conséquence, pour statuer sur la possibilité ou non d'incendie du bac, l'Ineris s'appuiera sur le même critère pour le caoutchouc et l'ébonite.

Pour déterminer la température de paroi interne du bac, l'Ineris a utilisé un modèle dérivé de l'équation de la chaleur 1D<sup>1</sup>. Ce modèle permet de prédire le gradient de température dans l'épaisseur d'un matériau connaissant son épaisseur, ses propriétés (conductivité thermique  $\lambda$ , capacité thermique  $C_p$ , masse volumique  $\rho$  et émissivité  $\varepsilon$ ) et ses conditions limites.

<sup>1</sup> Modèle « Transfert thermique 1D » de la plateforme numérique EPHEDRA de l'Ineris.

Dans ce modèle, l'Ineris a imposé les données d'entrée suivantes :

- Epaisseur de paroi = 6 mm ;
- Propriétés du matériau :
  - Pour le caoutchouc (naturel) :  $\lambda = 0,14$  W/m/K,  $C_p = 2092$  J/kg/K,  $\rho = 983$  kg/m<sup>3</sup> et  $\varepsilon = 0,95^2$  ;
  - Pour l'ébonite :  $\lambda = 0,17$  W/m/K,  $C_p = 1400$  J/kg/K,  $\rho = 1200$  kg/m<sup>3</sup> et  $\varepsilon = 0,89$ .
- Conditions limites :
  - Sur la paroi interne du bac : seul le flux radiatif déterminé au §2.2 a été imposé. Il n'a pas été tenu compte de phénomène convectif sur cette paroi ;
  - Sur la paroi externe du bac : une condition de convection naturelle ( $h = 10$  W/m<sup>2</sup>/K) avec l'air ambiant ( $T = 293,15^\circ\text{C}$ ) a été imposée.

Le Tableau 1 présente l'ensemble des résultats obtenus lorsqu'il est considéré une émissivité  $\varepsilon = 0,5$  pour le tube du thermoplongeur (cf. discussions du §2.1). Selon les modélisations, les résultats diffèrent très peu selon que le bac ne soit en caoutchouc ou en ébonite. Sur ces graphiques apparaissent 2 lignes : l'une en violet correspondant à la valeur basse du point d'inflammation (soit  $260^\circ\text{C}$ ) et l'autre en rouge correspondant à la valeur haute de ce même point (soit  $316^\circ\text{C}$ ). Sans surprise, le risque d'avoir un incendie au niveau du bac (supposé correspondre au moment où la paroi interne du bac atteint le point d'inflammation) devient réel dès lors que le thermoplongeur non immergé est situé à moins de 100 mm de la paroi du bac.

## 2.4 Précision sur la composition de la paroi du bac

Le 14/02/22, l'Ineris a été informé que la paroi du bac était composée – non pas d'un caoutchouc ou ébonite mais – d'un isolant de type HT/Armaflex Industriel d'une épaisseur de 6 mm.

De nouveau, l'Ineris a utilisé le modèle dérivé de l'équation de la chaleur 1D avec les données d'entrée suivantes représentatives de la mousse élastomère flexible :  $\lambda = 0,063^3$  W/m/K,  $C_p = 1500^4$  J/kg/K,  $\rho = 85^5$  kg/m<sup>3</sup> et  $\varepsilon = 0,93^6$ . Il est intéressant de noter que la diffusivité thermique de ce matériau [ $= \lambda / (\rho \times C_p)$ ] est 7 fois plus grande que le caoutchouc considéré jusqu'à maintenant. Les résultats prédits pour l'évolution de la température sur la paroi interne du bac sont donnés dans le Tableau 3. En comparant les résultats directement avec ceux du caoutchouc, on note que la température de l'Armaflex évolue plus rapidement vers le régime permanent mais que la température atteinte dans ce régime est du même niveau.

Malgré ses recherches, l'Ineris n'a pas réussi à obtenir la température d'inflammation de l'Armatex. Même si la température maximale atteinte semble diminuée par rapport à celle d'une paroi réalisée en caoutchouc, il est donc difficile de se prononcer sur l'inflammation du bac. Pour remédier à ce manque, il pourrait être intéressant de procéder à des tests de réaction au feu de l'Armaflex à l'aide d'un calorimètre FPA (Fire Propagation Apparatus), tel que décrit dans la norme ISO 12136 par exemple.

---

<sup>2</sup> <https://www.sodielec-berger.fr/files/39/emissivite-materiaux.pdf>

<sup>3</sup> Valeur maximale connue pour une température de  $125^\circ\text{C}$  selon le document Armacell « Insulation for the oil and gas industry – HT/ArmaFlex® Industrial » transmis par le BEA-RI en date du 08/02/22.

<sup>4</sup> <http://fee.ales.free.fr/telechargement/rt2000/regthermiqueRT2000/Th-U-2.pdf> (pour une mousse élastomère flexible)

<sup>5</sup> <https://local.armacell.com/fileadmin/cms/uk/products/en/HTArmaFlexIndustrialRangeUKROI.pdf>

<sup>6</sup> <https://www.armacell.us/blog/post/a-study-in-surface-emissivity/>

Matériau du bac	Eloignement entre le thermoplongeur et le bac		
	d = 0,010 m (soit un flux reçu de 11,5 kW/m <sup>2</sup> )	d = 0,050 m (soit un flux reçu de 5,5 kW/m <sup>2</sup> )	d = 0,100 m (soit un flux reçu de 3,3 kW/m <sup>2</sup> )
Caoutchouc			
Ebonite			

Tableau 1. Evolution de la température de la paroi interne du bac en fonction du matériau et de l'éloignement du thermoplongeur (en supposant  $\varepsilon = 0,5$  pour le thermoplongeur)

Matériau du bac	Eloignement entre le thermoplongeur et le bac		
	d = 0,010 m (soit un flux reçu de 11,5 kW/m <sup>2</sup> )	d = 0,050 m (soit un flux reçu de 5,5 kW/m <sup>2</sup> )	d = 0,100 m (soit un flux reçu de 3,3 kW/m <sup>2</sup> )
Armaflex			

Tableau 2. Evolution de la température de la paroi interne du bac en Armaflex (en supposant  $\varepsilon = 0,5$  pour le thermoplongeur)

### 3 Analyses de sensibilité

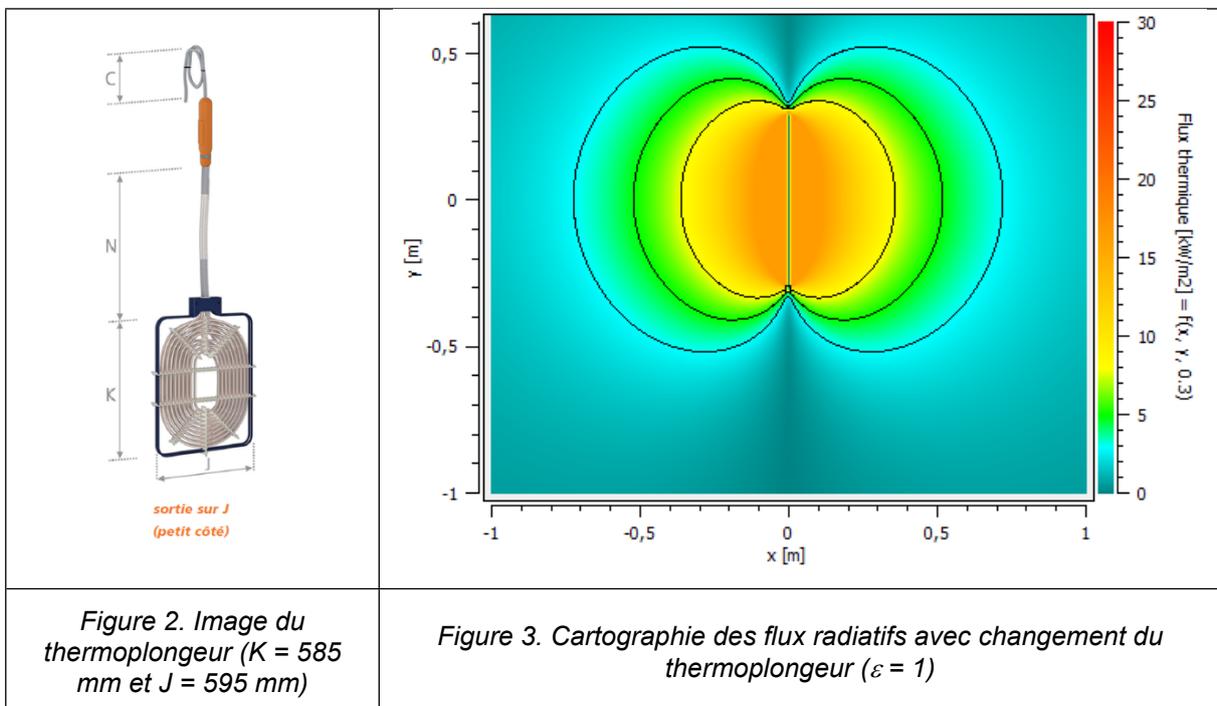
#### 3.1 Influence de l'émissivité du thermoplongeur

On a vu précédemment que l'état de surface du tube central du thermoplongeur pouvait varier de façon significative selon son état de surface. Jusqu'à maintenant, tous les résultats présentés supposaient que  $\varepsilon = 0,5$ . Dans le cas où  $\varepsilon = 1$ , la puissance rayonnée par unité de surface du thermoplongeur est de  $M = 33,0 \text{ kW/m}^2$  et le flux radiatif reçu par le bac est de :  $25,5 \text{ kW/m}^2$  lorsque le thermoplongeur est éloigné de  $0,010 \text{ m}$ , de  $11,5 \text{ kW/m}^2$  pour un éloignement de  $0,050 \text{ m}$  et de  $6,5 \text{ kW/m}^2$  pour un éloignement de  $0,100 \text{ m}$ . Dans ces conditions, le Tableau 3 présente les résultats prédits pour l'évolution de la température sur la paroi interne du bac, supposée être en Armaflex. Les résultats de la Figure 2 sont aussi repris pour comparaison.

#### 3.2 Influence de la forme du thermoplongeur

Le 09/02/22, l'Ineris a été sollicité pour évaluer l'impact de la forme du thermoplongeur sur les résultats obtenus précédemment. Celui-ci est représenté sur la Figure 2. L'élément chauffant est constitué d'un fil en nichrome ou en acier inoxydable, revêtu d'une gaine en téflon qui fond dès que le seuil de température de  $400^\circ\text{C}$  est atteint<sup>7</sup>. En partant du postulat que la température maximale de chauffe du fil reste égale à  $600^\circ\text{C}$  et que l'émissivité du fil est fixée de façon prudente à 1, la puissance rayonnée par unité de surface du thermoplongeur est  $M = 33,0 \text{ kW/m}^2$ .

Pour évaluer le flux reçu à différentes distances du thermoplongeur, le modèle FNAP de l'Ineris a été de nouveau utilisé en définissant une « flamme virtuelle » de forme parallélépipédique ( $L = 0,60 \text{ m} \times l = 0,01 \text{ m} \times H = 0,60 \text{ m}$ ). Il faut noter qu'une telle approche est majorante dans la mesure où la surface du fil correspond à la surface de la plaque de dimension  $L \times H$ . La Figure 2 montre la cartographie des flux radiatifs obtenus à mi-hauteur de ce thermoplongeur. Grâce à cette cartographie, on en déduit que le flux rayonné est de  $20 \text{ kW/m}^2$  à une distance de  $0,010 \text{ m}$ , de  $18,5 \text{ kW/m}^2$  à  $0,050 \text{ m}$  et de  $17 \text{ kW/m}^2$  à  $0,100 \text{ m}$ . En comparant ces résultats avec ceux du §3.1, on conclut que la tendance est plutôt d'aggraver le risque d'inflammation du bac.



<sup>7</sup> Cf. mail du BEA-RI du 09/02/22.

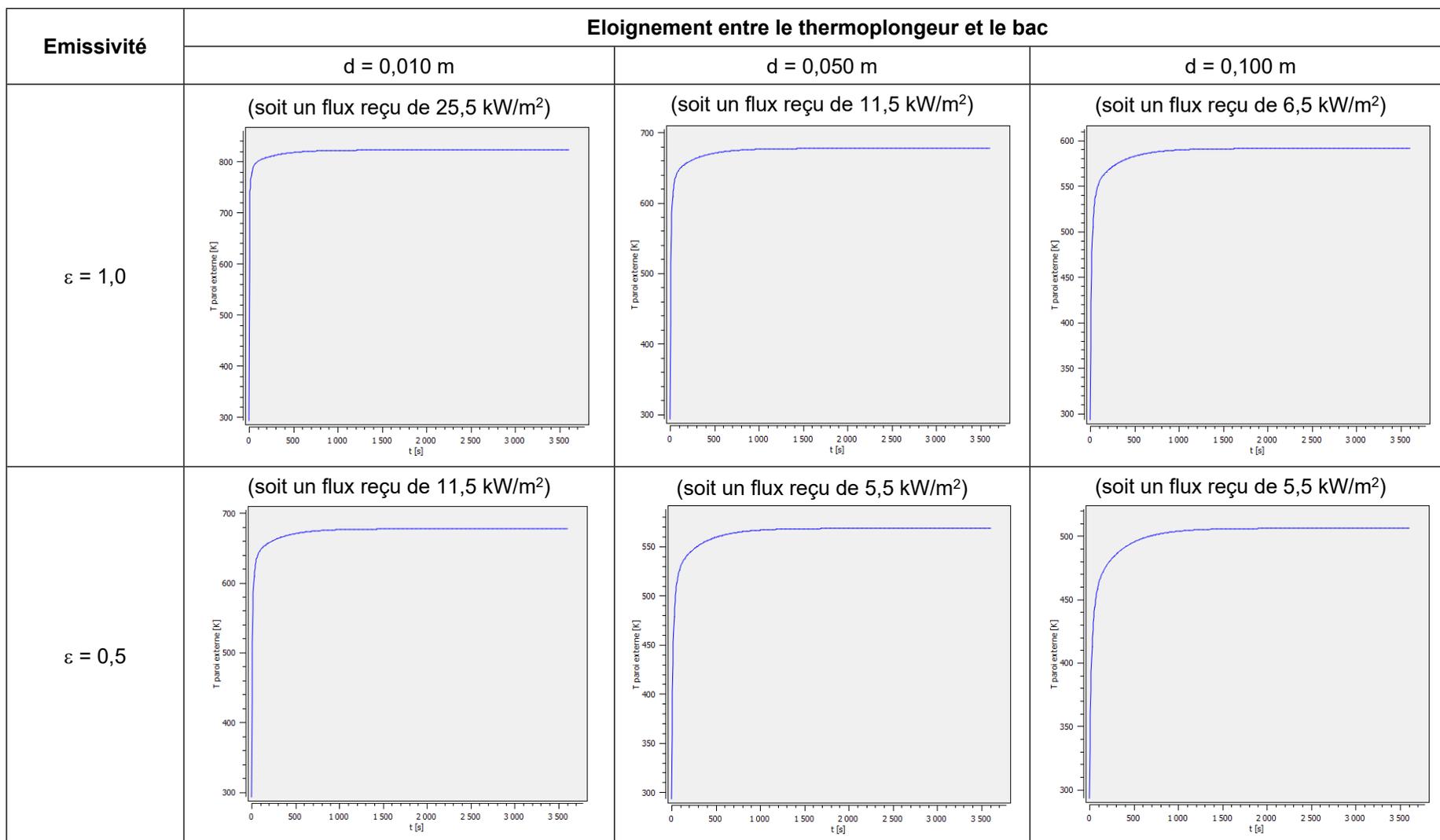


Tableau 3. Evolution de la température de la paroi interne du bac en fonction du matériau et de l'éloignement du thermoplongeur (en supposant  $\varepsilon = 1,0$  pour le thermoplongeur)

## 4 Synthèse des enseignements

L'analyse du problème a montré :

- Quel que soit le matériau utilisé (caoutchouc ou ébonite), on ne s'attend pas à avoir des différences significatives dans l'évolution de la température de la paroi interne du bac lorsque le thermoplongeur continue de fonctionner alors qu'il n'est pas immergé ;
- Pour une température maximale de chauffe de 600°C, et dès lors que le thermoplongeur est situé à moins de 100 mm de la paroi du bac, l'inflammation de la paroi en caoutchouc est à envisager. Si le tube central du thermoplongeur a une forte émissivité, cette distance de 100 mm peut être insuffisante pour éviter toute inflammation de la paroi ;
- Malgré ses recherches, l'Ineris n'a pas réussi à obtenir le point d'inflammation pour l'ébonite. Toutefois, on s'attend à ce que celui-ci soit relativement proche du caoutchouc. Dès lors, les conclusions obtenues précédemment pour le caoutchouc peuvent s'appliquer à l'ébonite.

Après avoir appris que la paroi du bac était finalement en Armaflex, l'Ineris a procédé à la même analyse et a pu constater que, du point de vue de l'évolution de la température de la paroi interne du bac, le régime permanent était atteint plus rapidement mais que le niveau de température finale était du même niveau que pour le caoutchouc ou l'ébonite étudié précédemment. En revanche, malgré ses recherches, l'Ineris n'a pu obtenir la température d'inflammation de l'Armaflex et, par voie de conséquence, n'a pas pu évaluer le risque d'inflammation du bac. Pour aller plus loin, il conviendrait de tester un échantillon de ce matériau dans un calorimètre FPA.

L'autre forme étudiée du thermoplongeur (cf. Figure 2) a plutôt tendance à augmenter le flux rayonné reçu par la paroi du bac et donc à accroître le risque d'inflammation.

Remarque importante : l'Ineris est reparti de la température maximale de chauffe communiquée dès le début de l'analyse. A aucun moment, cette valeur de puissance rayonnée n'a été critiquée au regard des éventuelles caractéristiques techniques du thermoplongeur.

## 5 Références

[1] Ineris, « Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs (DRA-76) -  $\Omega$ -2 – Modélisation de feux industriels », DRA-14-141478-03176A, 2014.

[2] <https://www.tforensic.com.au/docs/article10.html>

## 6 Annexe : courriel de demande du BEA-RI du 15/11/21

----- Message transféré -----  
Sujet :Tr: Re: demande de renseignements suite accident Aubert et duval  
Date :Mon, 15 Nov 2021 11:52:56 +0100  
De [redacted]  
Organisation [redacted]  
Pour [redacted]  
Copie à [redacted]

Bonjour [redacted]  
La question est en fonction de la géométrie et du flux généré de la canne de calculer la température d'une surface plane soumis au flux radiatif de la canne en fonction de la distance entre la canne et la dite surface qui varie de 0 à 100 mm ( paroi de la cuve).  
Question subsidiaire cette température est elle suffisante pour conduire à l'auto-inflammation 1) de l'ébonite 2) du caoutchouc  
Bien à toi  
[redacted]

