

# Etude expérimentale du rayonnement thermique induit par un feu d'armoire électrique

Mickaël COUTIN\*, Jean-Marc SUCH, Marc PILLER

Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire  
Direction de la Prévention des Accidents Majeurs  
Laboratoire d'Expérimentation des Feux  
Centre de Cadarache, BP 3, 13115 Saint-Paul-Lez-Durance, FRANCE  
\*(auteur correspondant : [mickael.coutin@irsn.fr](mailto:mickael.coutin@irsn.fr))

**Résumé** - L'IRSN conduit des programmes de recherche sur les conséquences que pourrait avoir un feu au sein d'installations nucléaires. L'article présente une étude expérimentale menée en collaboration avec AREVA sur le flux radiatif induit par une armoire électrique en feu, avec portes ouvertes ou fermées. L'étude porte sur la variation temporelle et spatiale des flux radiatifs émis en face avant de l'armoire en feu. A partir des mesures et d'une approche simplifiée sur les transferts de chaleur, une carte d'iso-éclaircissements énergétiques est élaborée pour la phase de feu pleinement développé ce qui permet de déterminer, en première approche, les contraintes thermiques imposées à des équipements situés au voisinage de l'armoire en feu.

## Nomenclature

$F$	facteur de forme	$\phi''$	densité de flux de chaleur radiatif, $W.m^{-2}$
$S$	surface, $m^2$	$\sigma$	constante de Stefan-Boltzman, $W.m^{-2}K^{-4}$
$T$	température, $K$	<i>Indices et exposants</i>	
<i>Symboles grecs</i>		$fl$	flamme
$\alpha$	coefficient d'absorption	$fm$	fluxmètre
$\varepsilon$	émissivité		

## 1. Introduction

L'étude des feux d'armoires électriques est d'un intérêt majeur pour la sécurité incendie dans l'industrie et en particulier pour la sûreté des installations nucléaires. En effet, les départs de feu répertoriés dans ce type d'installation sont principalement d'origine électrique. De plus, des éléments peuvent être endommagés avec des conséquences fonctionnelles sur le contrôle de la ventilation mécanique et du confinement de l'installation.

Seuls deux programmes expérimentaux menés aux Etats-Unis par SANDIA [1] [2] et en Finlande par VTT [3] [4] [5] se sont intéressés à la phénoménologie des feux d'armoires électriques réelles. Une approche analytique a également été réalisée par l'IRSN lors d'un premier programme expérimental sur les feux d'armoires électriques [6]. L'insuffisance des données publiées et la difficulté de transposer ces résultats à des cas concrets ont conduit AREVA et l'IRSN à élaborer un programme d'intérêt sur les feux d'armoires électriques réelles. Il vise à fournir des réponses aux préoccupations de sûreté concernant les conséquences d'un feu d'armoires électriques sur l'installation. Les sujets traités concernent le colmatage des filtres situés sur le réseau de ventilation, la perturbation des niveaux de pression dans les locaux, la perte d'intégrité des cibles impliquant des matériels radioactifs (particulièrement des boîtes à gants).

Concernant ce dernier point, des mesures de flux radiatif ont été réalisées en face avant du foyer « armoire électrique » lors d'une première campagne d'essais, nommée PICSEL\_A, qui consistait à caractériser, en atmosphère libre sous hotte, diverses armoires électriques en feu. Ces mesures ont eu pour objet d'évaluer la quantité de chaleur provenant de l'armoire en feu et susceptible d'agresser des cibles, telles que des boîtes à gants situées au voisinage de l'armoire.

Cet article présente les flux radiatifs mesurés en différents points face à une armoire électrotechnique en feu disposant ou non de portes fermées. A partir de ces mesures et d'une approche simplifiée sur les transferts de chaleur, une carte d'iso-éclaircissements énergétiques est élaborée pour la phase de feu pleinement développé. Elle permet de déterminer, en première approche, les contraintes thermiques imposées à des équipements situés au voisinage de l'armoire en feu.

## **2. Description du dispositif expérimental et de l'instrumentation**

### **2.1. La tour SATURNE et sa hotte d'extraction instrumentée**

Les essais sont réalisés dans la tour SATURNE, enceinte d'un volume intérieur de 2000 m<sup>3</sup> (10 m de long, 10 m de large et 20 m de haut). Des aérations réparties sur les quatre murs en haut de la tour permettent à la combustion de s'effectuer dans un environnement stable à concentration d'oxygène constante et égale à 21 %.

Les gaz de combustion sont captés par un système où sont effectuées différentes mesures (concentrations des gaz et aérosols, températures, vitesses, débits, pressions). Ce système de captation des fumées est composé d'une hotte, dont le diamètre de la cape est de 3 m (cf. Figure 1), et d'un conduit d'extraction connecté à un réseau de ventilation. La hauteur au sol de la partie basse de la cape de la hotte est de 4.2 m.

### **2.2. Le foyer armoire électrotechnique et les configurations d'étude**

Du fait du grand nombre d'armoires électriques dans les installations AREVA et de leur charge combustible importante, l'armoire retenue comme foyer est une armoire électrotechnique à double module. Ses dimensions sont 1.2 m en largeur, 2 m en hauteur et 0.6 m en profondeur. Les éléments électriques la composant sont principalement des transformateurs, des disjoncteurs, des goulottes, de la filerie, des relais, des borniers et des contacteurs. La masse totale de combustible, composée principalement de PVC, de PMMA et de PE, est de l'ordre de 44 kg.

Deux configurations sont étudiées selon que les portes de l'armoire sont fermées (essai PXA.2.1, cf. Figure 1) ou entièrement ouvertes (essai PXA.3.1, cf. Figure 2). Pour l'armoire disposant de portes fermées, l'aération de l'armoire est assurée par quatre ouvertures carrées percées sur les portes, une en partie basse et une en partie haute sur chacune des portes. Chaque orifice, d'une section unitaire de 0.04 m<sup>2</sup>, est recouvert d'ouies métalliques, et est muni d'une grille anti-moustique.

L'armoire électrotechnique n'est pas alimentée électriquement. Elle repose sur une balance disposée au sol sous la hotte. La mise à feu est effectuée sur toute la largeur de l'armoire par l'intermédiaire d'une rampe à gaz alimentée en propane et positionnée de manière à enflammer les borniers situés à la base de l'armoire. L'alimentation en propane est arrêtée dès le contrôle visuel de l'inflammation des composants électriques.

## 2.3. Les fluxmètres

L'éclairement thermique est mesuré face à l'armoire et sur son axe de symétrie au moyen de cinq fluxmètres radiatifs (cf. Figure 5). Trois fluxmètres sont disposés à 0.5 m de l'armoire et à une hauteur respective de 0.3 m, 1 m et 1.7 m du bas de l'armoire. Les deux autres fluxmètres sont à une distance de 3 m de l'armoire et à une hauteur de 0.65 m et 1.35 m. Les fluxmètres utilisés sont les fluxmètres ellipsoïdaux de la société Medtherm. Ils sont refroidis par une circulation permanente d'eau, et une circulation d'azote balaie en continu la cavité afin d'éviter toute éventuelle pollution externe par les aérosols de combustion.

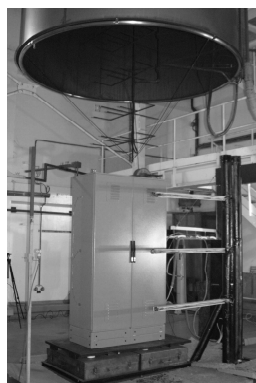


Figure 1 : *Dispositif expérimental et instrumentation associée*



Figure 2 : *Phases d'inflammation et de feu pleinement développé lors de l'essai PXA.3.1*

## 3. Résultats

### 3.1. Constats expérimentaux

Pour l'essai PXA.3.1 mettant en œuvre l'armoire électrique avec portes ouvertes, une importante quantité de fumée apparaît dès l'inflammation des composants électriques (cf. Figure 2), et le feu se propage lentement. Cette phase d'incubation est suivie par une phase d'accélération de la combustion conduisant à l'embrasement généralisé du combustible. A ce stade, le feu atteint une puissance maximale de l'ordre de 1.6 MW (puissance estimée à partir de la quantité d'oxygène consommée durant la réaction de combustion) puis décline. Le feu s'arrête par manque de combustible, la charge combustible étant entièrement consommée.

Le scénario observé lors de l'essai PXA.2.1, pour lequel les portes de l'armoire sont fermées, diffère de celui de l'essai PXA.3.1. Après l'inflammation, des fumées sortent par les orifices de ventilation situés en haut des portes de l'armoire. La puissance du feu n'excède pas 50 kW. Dès lors, l'embrasement généralisé du combustible (estimé à 100 kW lors de l'essai PXA.3.1) n'est jamais atteint. Le feu s'arrête par manque de comburant, seulement 11 % de la charge combustible est finalement consommée. L'étouffement du feu est attribué à la réduction du débit de ventilation de l'armoire, sous l'effet du colmatage par les aérosols de combustion des grilles anti-moustiques des orifices en partie haute de l'armoire.

Les trois flux radiatifs mesurés à 0.5 m de l'armoire et pour différentes hauteurs présentent des évolutions différentes lors de l'essai PXA.3.1 (cf. Figure 3) alors que ceux mesurés lors de l'essai PXA.2.1 sont quasi-similaires (cf. Figure 4). Le fait que les portes soient fermées a pour effet d'homogénéiser les flux et de limiter leur magnitude, ceux-ci n'excèdent pas  $0.7 \text{ kW.m}^{-2}$ . Pour l'essai PXA.3.1, le flux radiatif est d'un autre ordre de grandeur puisque sa valeur maximale, mesurée par le fluxmètre le plus haut, vaut  $43.5 \text{ kW.m}^{-2}$ . Cette valeur maximale est obtenue 12 minutes après la mise à feu lors de l'embrasement généralisé des

composants électriques matérialisé par une flamme de grande dimension sortant de l'armoire (cf. Figure 2). Le pic d'éclairement énergétique observé par le fluxmètre le plus haut est également observé par le fluxmètre le plus bas dans une moindre proportion (le flux maximal est de  $18.6 \text{ kW.m}^{-2}$ ) et est décalé de deux minutes. En fin de feu, les composants électriques tombés en cours du feu et accumulés en bas de l'armoire continuent à brûler, ce qui explique le flux encore important de  $10 \text{ kW.m}^{-2}$  mesuré 40 minutes après la mise à feu par le fluxmètre situé à 0.3 m du bas de l'armoire.

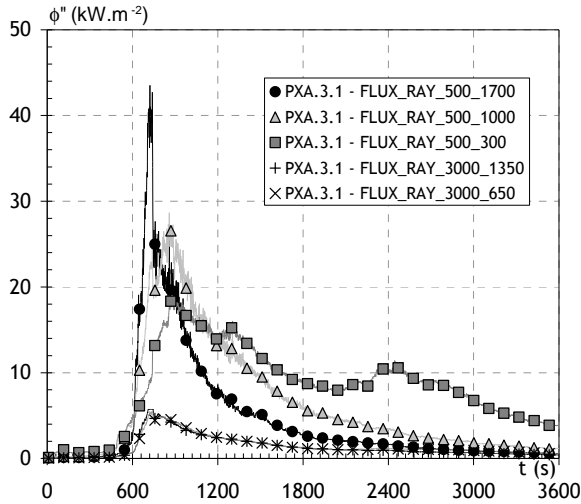


Figure 3 : Eclairements mesurés face à l'armoire lors de l'essai PXA.3.1 (portes ouvertes)

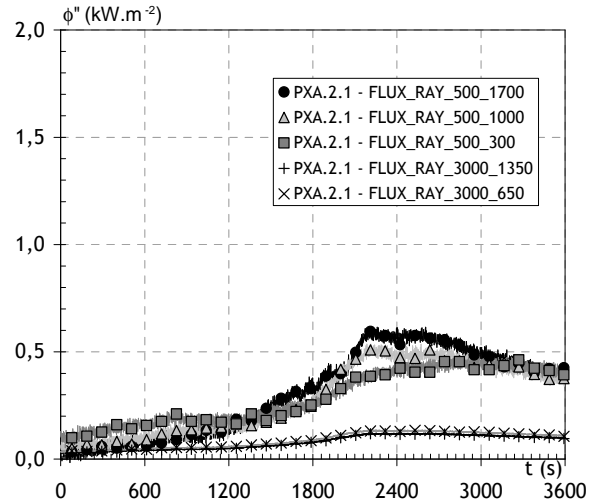


Figure 4 : Eclairements mesurés face à l'armoire lors de l'essai PXA.2.1 (portes fermées)

### 3.2. Analyse et carte des iso-éclairements énergétiques d'un feu d'armoire électrique « portes ouvertes »

Une relation reliant le flux radiatif des feux d'armoires électriques à la distance armoire-cible est recherchée à partir de l'évolution de la forme de flamme lors du feu et des mesures réalisées par les cinq fluxmètres radiatifs. La relation recherchée étant une relation « enveloppe » en termes de flux de chaleur, le feu de faible flux obtenu pour l'armoire avec portes fermées n'est pas considéré. Pour les mêmes raisons, la relation est établie uniquement pour le plan de symétrie de l'armoire sur lequel les flux radiatifs sont maximaux.

Le flux radiatif en divers points du plan de symétrie de l'armoire peut être calculé à partir des équations de transfert de la chaleur par rayonnement. Le flux de chaleur radiatif issu de la flamme et vu par le fluxmètre,  $\phi''_{fm}$  ( $\text{W.m}^{-2}$ ), est donné par la relation suivante :

$$S_{fm} \phi''_{fm} = \alpha_{fm} F_{fl-fm} S_{fl} \phi''_{fl} = \alpha_{fm} F_{fl-fm} S_{fl} \epsilon_{fl} \sigma T_{fl}^4 \quad (1)$$

Le facteur de forme entre la flamme et le fluxmètre,  $F_{fl-fm}$ , est lié au facteur de forme entre le fluxmètre et la flamme,  $F_{fm-fl}$ , par la relation suivante :

$$S_{fl} F_{fl-fm} = S_{fm} F_{fm-fl} \quad (2)$$

Dès lors l'équation (1) prend la forme simplifiée suivante :

$$\phi''_{fm} = \alpha_{fm} F_{fm-fl} \epsilon_{fl} \sigma T_{fl}^4 \quad (3)$$

Le coefficient d'absorption du fluxmètre fourni par le constructeur est de 0.97. L'émissivité de la flamme est supposée constante et égale à 1. La température de flamme est

supposée uniforme et indépendante du temps ; elle est fixée à 700°C. Le facteur de forme entre le fluxmètre et la flamme est calculé à partir des données d'une forme simplifiée de la flamme et de la position du fluxmètre considéré. La flamme est considérée comme une succession de trois plaques planes d'inclinaisons diverses (cf. Figure 5) et de dimensions  $l \times H_{fl}$ , où  $l$  est la largeur de l'armoire (1.2 m) et  $H_{fl}$  est la hauteur de flamme déduite de la position moyenne du bord de flamme visible relevée sur une image instantanée issue des films vidéos réalisés lors de l'essai. La position, la dimension et l'inclinaison de 55° pour le second tronçon de la flamme sont issues des relevés des vidéos lorsque le feu a atteint sa plus forte intensité. La distance entre la flamme et le fluxmètre est supposée constante sur toute la durée du feu et égale à la distance armoire/fluxmètre majorée de la distance entre le bord de l'armoire et les composants électriques.

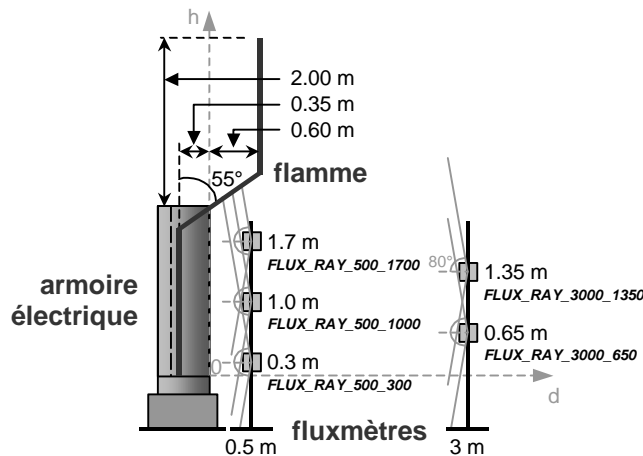


Figure 5 : Forme simplifiée de la flamme pendant la phase de feu pleinement développé et position des fluxmètres

Compte-tenu de ces hypothèses, les flux en chaque position des fluxmètres sont calculés à partir de la relation (3) et comparés sur la Figure 6 aux mesures.

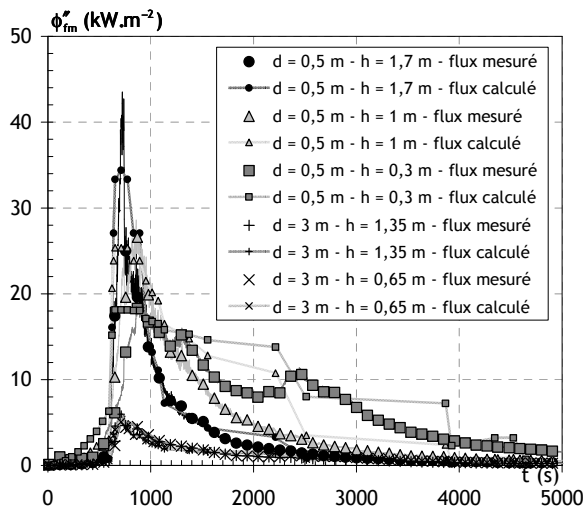


Figure 6 : Comparaison des flux radiatifs mesurés et calculés pour l'essai PXA.3.1

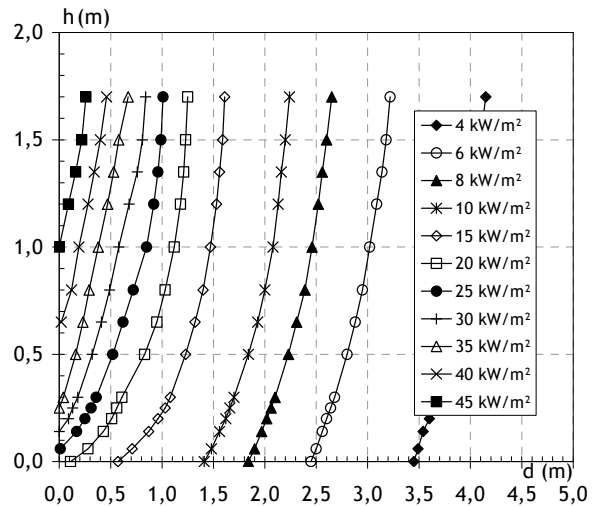


Figure 7 : Carte des iso-éclairagements énergétiques du calcul « enveloppe »

Les valeurs calculées et mesurées pour les deux fluxmètres placés à 3 m de l'armoire sont assez proches. Dans le cas des fluxmètres placés à 0.5 m de l'armoire, les évolutions et les valeurs sont également comparables, mais les écarts sont plus marqués. Le début de la phase de croissance rapide des flux se produit beaucoup plus tôt dans le cas théorique que dans le

cas réel, notamment dans le cas du fluxmètre à 0.3 m de hauteur. Ceci est dû aux incertitudes de mesure de la hauteur de la flamme pendant la phase d'incubation. Pendant cette phase, l'hypothèse d'une largeur de flamme égale à celle de l'armoire n'est pas vérifiée. Ce phénomène est moins visible pour les deux autres fluxmètres (à 1 et 1.7 m de hauteur) car ils sont moins sensibles à la géométrie de la flamme du fait de leur éloignement. Les écarts observés dans la phase de régression, pour les fluxmètres situés à 1 m et à 0.3 m de haut, sont dus à la fois aux incertitudes de mesure de la hauteur de la flamme qui a un profil relativement complexe dans cette phase, et aux imprécisions du calcul par l'hypothèse d'une flamme plane rectangulaire. Néanmoins, les phases jugées les plus importantes en termes de sûreté étant celles de la croissance de la flamme et de sa hauteur maximale, il ne paraît pas nécessaire ici d'affiner le modèle pour la phase de décroissance du feu. Enfin, la sous-évaluation de la valeur maximale atteinte par le flux au niveau du fluxmètre à 1.7 m de hauteur est attribuée à la sous-estimation de la hauteur de flamme tronquée sur le film vidéo.

Afin de pouvoir estimer l'ordre de grandeur des contraintes thermiques « enveloppe » imposées à des équipements situés au voisinage d'une armoire en feu, une carte d'iso-éclaircissements énergétiques a été élaborée (cf. Figure 7) à partir de la relation théorique (3) pour la phase de feu pleinement développé. Par exemple, l'élément le plus sensible d'une cible de hauteur  $h = 1$  m située à une distance  $d = 2.5$  m de l'armoire doit résister à un flux radiatif de  $8 \text{ kW.m}^{-2}$  sous peine de pouvoir être dégradé selon la durée d'exposition, lorsqu'un feu d'armoire électrique avec portes ouvertes est pleinement développé. En toute rigueur, l'estimation n'est valable qu'en milieu transparent, l'obscurcissement du milieu par les fumées en environnement confiné n'étant pas pris en compte dans le calcul, de même que les échanges convectifs induits par les gaz chauds dans ce cas.

#### 4. Conclusion

Cette première série d'essais réalisés en atmosphère libre sous hotte a permis de montrer que le flux radiatif maximal émis par une armoire électrique en feu est soixante fois plus élevé lorsque les portes sont ouvertes. Les mesures de flux rayonné, réalisées face à l'armoire en feu, donnent une estimation de la quantité de chaleur susceptible d'agresser des cibles situées dans l'environnement proche de l'armoire. Pour la configuration « portes ouvertes », le dépouillement des vidéos a permis d'estimer la forme et la surface de la flamme, et d'en déduire une carte d'iso-éclaircissements énergétiques par l'utilisation d'une formule analytique qui donne un bon accord avec l'expérience.

#### Références

- [1] J. M. Chavez, An experimental investigation of internally ignited fires in nuclear power plant control cabinets, Part I: Cabinet effects tests, NUREG/CR-4527, SAND86-0336, Vol. 1, Sandia National Laboratories (1987).
- [2] J. M. Chavez, S. P. Nowlen, An experimental investigation of internally ignited fires in nuclear power plant control cabinets, Part II: Room effects tests, NUREG/CR-4527, SAND86-0336, Vol. 2, Sandia National Laboratories (1988).
- [3] J. Mangs, O. Keski-Rahkonen, Full scale fire experiments on electric cabinets, VTT 186 (1994).
- [4] J. Mangs, O. Keski-Rahkonen, Full scale fire experiments on electric cabinets II, VTT 269 (1996).
- [5] J. Mangs, J. Paananen, O. Keski-Rahkonen, Calorimetric fire experiments on electronic cabinets, *Fire Safety Journal*, 38 (2003), 165-186.
- [6] L. Rigollet, S. Melis, HRR of vertical combustibles inside a confinement: an analytical approach to the fire of electrical cabinets, Interflam 2004, 10<sup>th</sup> Int. Fire Science & Engineering Conference (Edinburgh, Scotland, 5-7 July 2004), 949-959.