

# Les résultats récents de la recherche expérimentale en matière d'incendie

• J.-M. SUCH (IRSN)  
• C. CASSELMAN (IRSN)

• L. RIGOLLET (IRSN)

• H. PRETREL (IRSN)

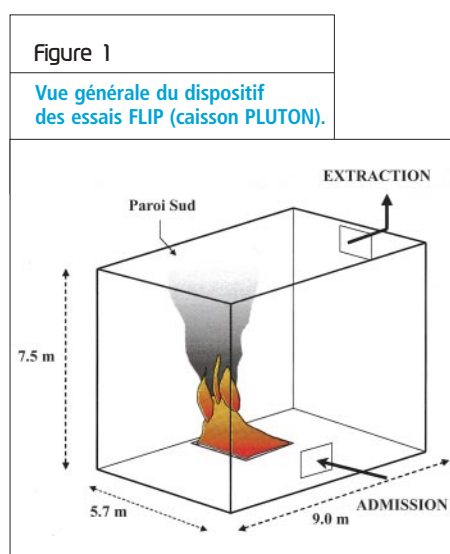
• L. AUDOUIN (IRSN)

Les programmes expérimentaux en cours à l'IRSN sur les feux de composés organiques visent à améliorer les connaissances sur deux thèmes qui constituent des préoccupations majeures de l'évaluation de sûreté des installations nucléaires en regard du risque incendie : les feux de solvants, en particulier lorsqu'ils sont localisés près d'une paroi dans un local fermé et ventilé, et les feux d'armoires électriques.

Ces programmes sont menés dans les installations d'essais de l'IRSN, regroupées sous le nom de "GALAXIE", sur le centre de Cadarache. Cet ensemble d'installations est unique en Europe de par la diversité et la capacité de ses dispositifs de base (caissons, cuves et réseaux de ventilation associés). L'ensemble des résultats expérimentaux sert à la compréhension des phénomènes physiques et au développement et à la qualification des codes de calcul incendie/ventilation de l'IRSN.

## Le programme expérimental FLIP

Le programme d'essais FLIP (feux de liquide en interaction avec une paroi), mené par l'IRSN depuis 1997, s'inscrit dans le cadre d'un PIC (programme d'intérêt commun) regroupant l'IRSN et COGEMA. Il vise à améliorer la connaissance du comportement d'un feu de solvant en nappe dans des configurations représentatives de celles des cellules de stockage de solvant TPH/TBP de l'usine de retraitement de combustible de La Hague. Les résultats expérimentaux sont par ailleurs utilisés pour qualifier le code FLAMME\_S - SIMEVENT de l'IRSN dans des configurations où le foyer est situé près d'une paroi (feux d'angle). Les nappes mises en œuvre dans les essais sont carrées, de surface libre variant de 0,4 à 5 m<sup>2</sup> et d'une épaisseur de 5 cm ; un feu sur une nappe en forme de rigole d'une largeur de 36 cm a également été réalisé pour une surface de 3,2 m<sup>2</sup> afin d'étudier l'effet de la géométrie de la nappe. La **figure 1** représente la configuration étudiée : les bacs contenant le combustible sont situés près d'une des parois du caisson expérimental (enceinte PLUTON de 400 m<sup>3</sup>), ventilé mécaniquement avec un régime de trois renouvellements par heure (1 200 m<sup>3</sup>/h).



## DÉROULEMENT DES ESSAIS ET INSTRUMENTATION

Une fois le caisson fermé et le régime de ventilation établi, la nappe est enflammée à l'aide d'un brûleur à gaz. Après une phase de propagation de la flamme sur la nappe de combustible, la flamme se développe pleinement. Elle peut même atteindre le plafond pour des puissances de feu suffisamment importantes (la puissance de feu est proportionnelle à la surface de la nappe). Le feu se comporte alors comme un élément perturbateur du système enceinte-réseau de ventilation, en termes de producteur de matière et de chaleur.

L'instrumentation permet de suivre en ligne l'évolution temporelle de grandeurs comme la perte de masse de la nappe combustible, la tempéra-

## Le programme FLIP a fourni des éléments permettant de quantifier les principaux phénomènes qui caractérisent un incendie dans un local fermé et ventilé.

ture des gaz et des parois, la pression et la concentration des gaz ( $O_2$ ,  $CO_2$  et  $CO$ ), la vitesse des gaz dans le panache, les flux de chaleur aux parois et les débits de gaz dans les gaines de ventilation. Des prélèvements séquentiels d'aérosols sont également réalisés afin de déterminer leur concentration et leur granulométrie.

Les nombreuses mesures de température réalisées dans le local où se déroule le feu, en particulier dans les zones de la flamme et du panache, permettent de visualiser *a posteriori* les champs de température au cours du temps. Les vidéographies de ces champs thermiques fournissent des indications précieuses sur le comportement des gaz dans le local au cours du feu et sur celui de la flamme. Cette approche par imagerie aide à comprendre qualitativement la phénoménologie complexe des feux en milieu confiné et ventilé.

### OBSERVATIONS SUR L'INCENDIE EN MILIEU CONFINÉ ET VENTILÉ

Le programme FLIP a fourni des éléments permettant de quantifier les principaux phénomènes qui caractérisent un incendie dans un local fermé et ventilé :

- une couche de gaz chauds et de fumées se forme sous le plafond du local. Elle peut envahir tout le local si, pour la puissance de foyer

considérée, la ventilation n'est pas capable d'extraire les fumées produites ;

- l'échauffement des gaz du local où se déroule le feu induit une augmentation rapide de la pression (**figure 2**). L'extinction du foyer, par consommation du combustible ou par manque d'oxygène, s'accompagne d'une brusque dépression consécutive au refroidissement des gaz du local. Ces variations brutales de pression conduisent à étudier le risque d'endommagement éventuel d'équipements comme les clapets ou les filtres du réseau de ventilation ;
- la puissance du foyer, proportionnelle à la surface de combustible en feu, conditionne fortement l'évolution et les conséquences du feu. Plus un feu est puissant, plus les contraintes thermiques et mécaniques qu'il génère sont importantes, mais plus sa durée est courte, car il consomme rapidement l'oxygène disponible. L'ordre de grandeur de la puissance moyenne d'un feu dans les configurations étudiées est d'environ 1 MW pour une nappe de  $1 \text{ m}^2$  ;
- le feu s'éteint lorsque la concentration en oxygène du local atteint une valeur seuil de l'ordre de 12 %. Après cette extinction, alors que le combustible est encore chaud et s'évapore, un apport d'air frais dans le local peut conduire à une réinflammation soudaine.

Figure 2

Évolution de la pression lors d'un feu dans un local confiné et ventilé.

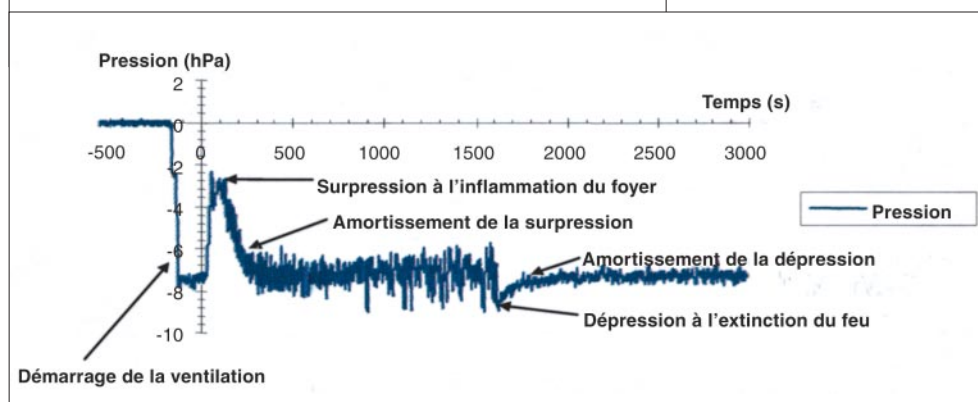


Figure 3

Phases d'inflammation du combustible (a) et de propagation de la flamme (b) sur la nappe lors de l'essai FLIP 6.

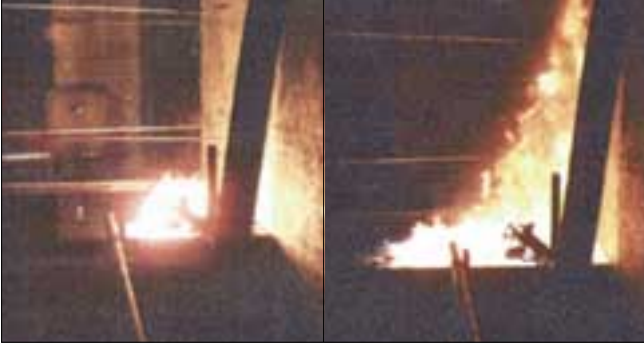


Figure 4

Phase de combustion, durant laquelle la nappe est totalement enflammée, essai FLIP 6.



Figure 5

Obscurcissement de l'atmosphère du caisson au cours de l'essai FLIP 6.



Les phases de propagation de la flamme sur la nappe de combustible et d'obscurcissement progressif de l'atmosphère du caisson par les produits de la combustion, phénomène caractéristique des feux en milieu confiné, sont illustrées de la **figure 3** à la **figure 5** pour l'essai FLIP 6, qui met en jeu une nappe de 3,2 m<sup>2</sup>.

#### QUELQUES ÉLÉMENTS ISSUS DE L'INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

L'interprétation des résultats de cette recherche expérimentale a porté sur le foyer, le panache, les variations de la pression et les transferts de chaleur.

##### • La pression des gaz, une grandeur physique perturbatrice

Parmi les résultats marquants des essais FLIP, on peut citer le phénomène des oscillations de forte amplitude de la pression, qui apparaît pour de grandes nappes (2 m<sup>2</sup> et plus). Il est interprété comme une succession d'extinctions et de ré-inflammations précédant l'extinction définitive du feu par manque d'oxygène. La température élevée des gaz, l'évaporation significative du combustible et une concentration en oxygène voisine du seuil d'extinction du feu, semblent constituer des conditions nécessaires à l'obtention de ces oscillations de la pression.

La **figure 6** illustre l'évolution de la pression lors d'un essai mettant en jeu une nappe combustible de 3,2 m<sup>2</sup> et les conséquences sur les débits d'admission et d'extraction du caisson expérimental. Le pic de pression consécutif à l'inflammation de la nappe induit une inversion du sens de l'écoulement à l'admission et une augmentation significative du débit des gaz dans la gaine d'extraction. Durant la phase d'oscillation de la pression, les écoulements dans le réseau de ventilation sont également fortement perturbés, s'inversant plusieurs fois avec des amplitudes parfois supérieures à celles observées lors de l'inflammation.

L'amplitude maximale des oscillations de pression a été quantifiée en fonction de la puissance du feu (nappes de 2 à 5 m<sup>2</sup>).

**L'amplitude maximale des oscillations de pression a été quantifiée en fonction de la puissance du feu (nappes de 2 à 5 m<sup>2</sup>).**

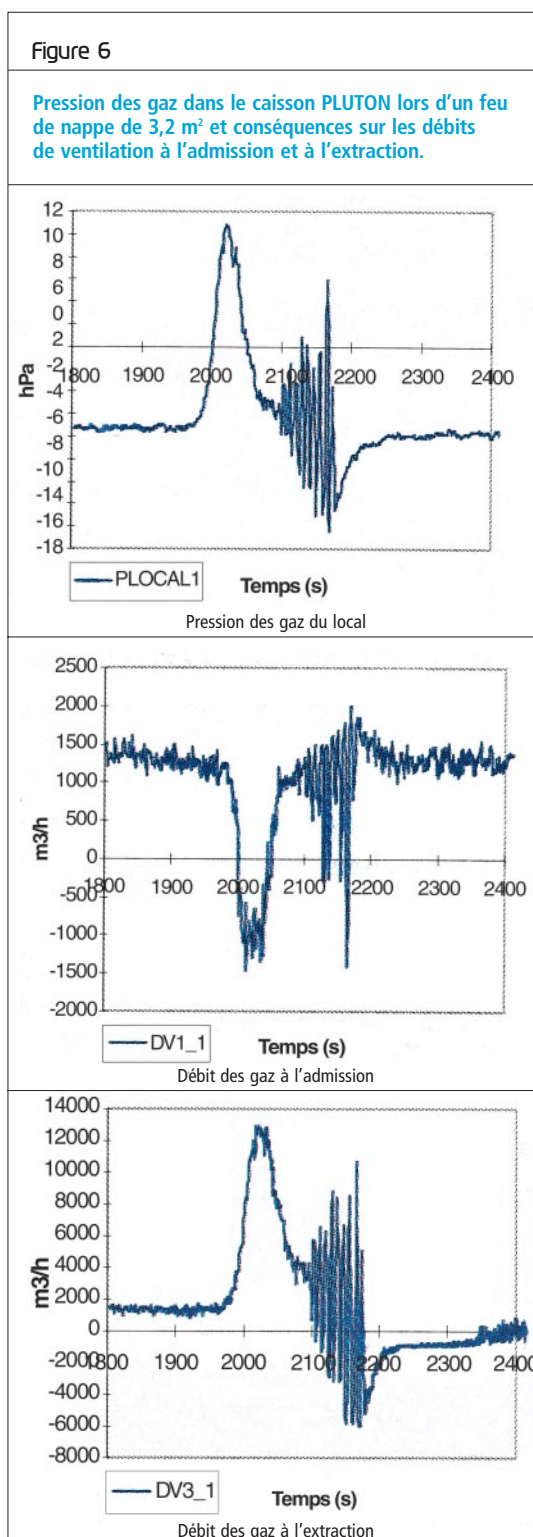
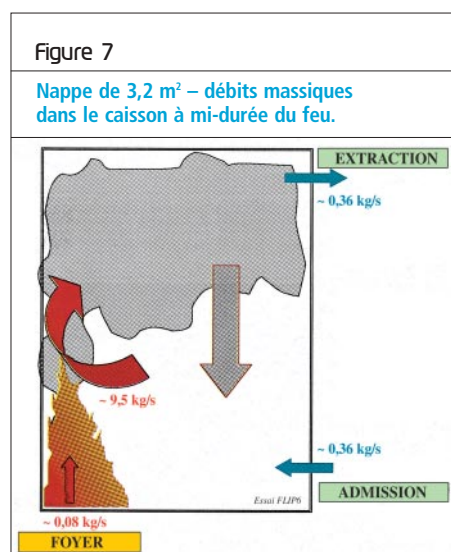
## L'étude du panache dans les essais réalisés par l'IRSN vise à évaluer dans quelle mesure les corrélations de la littérature sont applicables aux feux dans un local confiné et ventilé.

### • Le panache des fumées, moteur des mouvements de convection dans le local

Le débit de gaz dans le panache des fumées augmente avec la puissance du foyer et peut atteindre des valeurs très supérieures au débit nominal de ventilation du local, comme le montre la **figure 7**, qui correspond à l'essai mettant en jeu une nappe de 3,2 m<sup>2</sup>. Les valeurs de débit de gaz obtenues indiquent que l'écoulement du panache joue un rôle prédominant sur les mouvements convectifs à l'intérieur de l'enceinte.

L'étude du panache dans les essais réalisés par l'IRSN vise à évaluer dans quelle mesure les corrélations de la littérature, qui décrivent le panache de feux en atmosphère libre à petite ou à moyenne échelle, sont applicables aux feux dans un local confiné et ventilé. En effet, les feux sont caractérisés dans ce cas par des conditions environnantes de la flamme et du panache variables dans le temps, alors qu'elles sont constantes en atmosphère libre<sup>1,2,3,4</sup>.

L'interprétation des résultats des essais FLIP montre<sup>5,6</sup> que le modèle de McCaffrey<sup>4</sup> peut être généralisé au feu en angle en utilisant la température réelle (et variable au cours du temps) des gaz environnant la flamme et le panache plutôt qu'une température de référence constante. La décroissance, suivant la hauteur, de la température maximale des gaz du panache est ainsi



### Références

- 1 - G. Heskestad, "Fire Plume", SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, NFPA Publication, 1995.
- 2 - E.E. Zukoski, "Properties of Fire Plumes", Combustion Fundamentals of Fire, Academic Press Ltd, 1995.
- 3 - M.A. Delichatsios, "Air Entrainment into Buoyant Jet Flames and pool fires", SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, NFPA Publication, 1995.
- 4 - B. McCaffrey, "Purely Buoyant Diffusion Flames : Some Experimental Results", Report NBSIR 79-1910, National Bureau of Standards, 1979.
- 5 - "Thermal Plume of Large Pool Fires in Confined and Forced Ventilation Enclosures", Proceeding of the Third International Seminar on Fire and Explosion Hazards (10-14 avril 2000, Lancashire, UK).
- 6 - "Fire Plume from Large Pool Fires in Forced-Ventilated Enclosures", Proceeding of the International Conference on Engineered Fire Protection Design (11-15 juin 2001, San Francisco, USA).



relativement bien prédite par ce modèle généralisé pour les foyers de puissance modérée, c'est-à-dire pour des nappes dont la surface est inférieure à 2 m<sup>2</sup> dans les conditions expérimentales des essais FLIP (figure 8). L'analyse montre cependant la limite du modèle généralisé pour les feux de forte puissance (surface de la nappe supérieure à 2 m<sup>2</sup>), pour lesquels l'interaction du panache avec le plafond influe significativement sur le comportement du panache (figure 9). D'autres corrélations de la littérature sont à analyser, et une réflexion doit être menée pour adapter à l'approche simplifiée des codes de calcul à zones, une corrélation généralisée de ce type, voire pour développer une corrélation spécifique au panache en milieu confiné et ventilé.

#### • Champs de température dans le local

Le champ thermique instantané des gaz dans le local, illustré par la figure 10, permet de localiser l'enveloppe de la flamme à un instant où l'atmosphère du local est complètement obscurcie par les suies. La figure 11 (page 77) permet de visualiser une succession d'extinctions et de réinflammations de la nappe.

#### LA QUALIFICATION DU CODE FLAMME\_S - SIMEVENT

Le code de calcul simplifié, dit à zones, FLAMME\_S permet de simuler un feu dans une installation industrielle pour en déterminer les conséquences thermodynamiques (températures et pression) et chimiques (concentration des espèces). Il peut fonctionner en mode couplé au code de calcul SIMEVENT, qui simule le comportement aérodynamique d'un réseau de ventilation (transport des gaz et des suies, colmatage des filtres THE, etc.). Les essais FLIP permettent d'étendre le domaine de qualification de FLAMME\_S aux feux situés près d'une paroi. Le code a été appliqué aux conditions des essais FLIP, en mode non couplé (FLAMME\_S seul avec une représentation simple du réseau de ventilation par pertes de charge et conditions aux limites fixes) et en mode couplé (modélisation complète et détaillée du réseau de ventilation expérimental par SIMEVENT). L'accord entre les résultats du calcul et l'expérience est nettement amélioré, pour les foyers de très faible puissance, lorsque le réseau de ventilation est modélisé en détail

Figure 8

Température dans le panache thermique pour les essais FLIP 1, 2, 7 et 5.

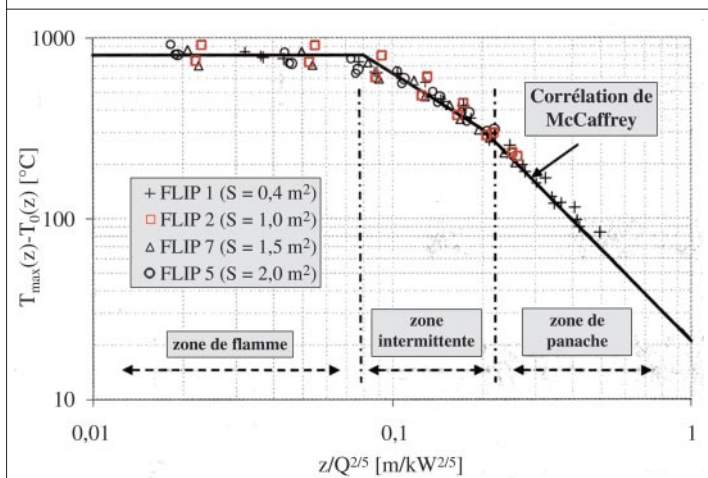


Figure 9

Température dans le panache thermique pour les essais FLIP 6 et 8.

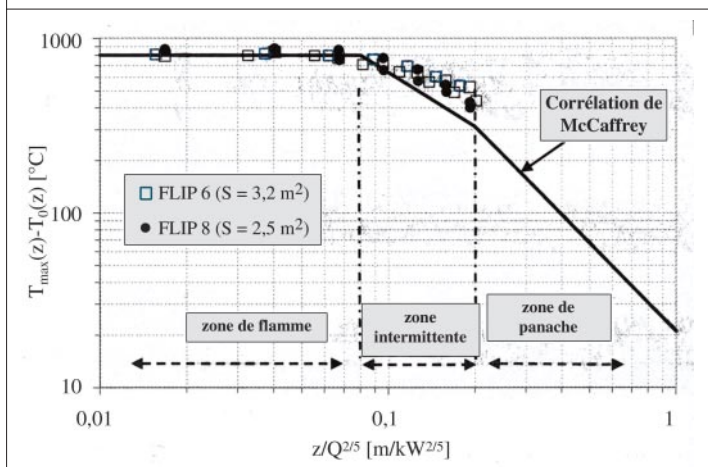
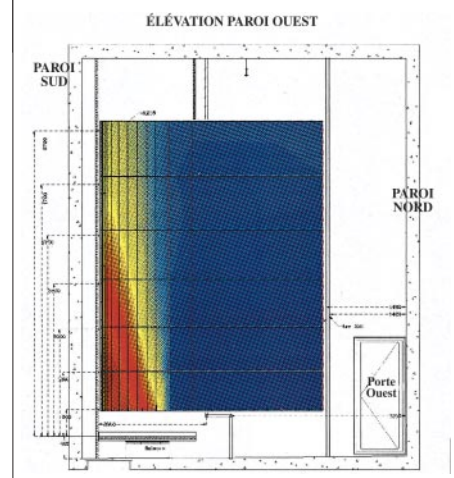


Figure 10

Champ thermique dans le caisson PLUTON lors de l'essai FLIP 6 (nappe de 3,2 m<sup>2</sup>).



## Un incendie non maîtrisé dans une installation nucléaire pourrait conduire à une dégradation du niveau de sûreté et menacer le confinement des matières radioactives.

(calcul en mode couplé). En revanche, que le calcul soit effectué en mode couplé ou non, la pression et la température des gaz du local sont surestimées pour les grands foyers (puissance supérieure à 500 kW), ce qui s'explique par une mauvaise estimation des échanges de chaleur entre les gaz et les parois du local (figure 12 et figure 13, page 78). En effet, la stratification thermique des gaz, particulièrement marquée dans le cas des foyers de forte puissance, ne peut pas être décrite par un modèle simplifié à deux zones (zone supérieure des gaz chauds et des fumées, zone inférieure des gaz frais), qui suppose que chaque zone est à une température homogène. Ainsi, la non-prise en compte de grandeurs locales (coefficient de transfert convectif variable, distribution de température sous le plafond) peut conduire à une mauvaise estimation des grandeurs globales (température moyenne des gaz du local et de leur pression).

Ce constat met en évidence les limites des codes à zones tels que FLAMME\_S pour la simulation d'un incendie et montre l'intérêt de codes multidimensionnels (codes à champs) qui calculent les grandeurs locales.

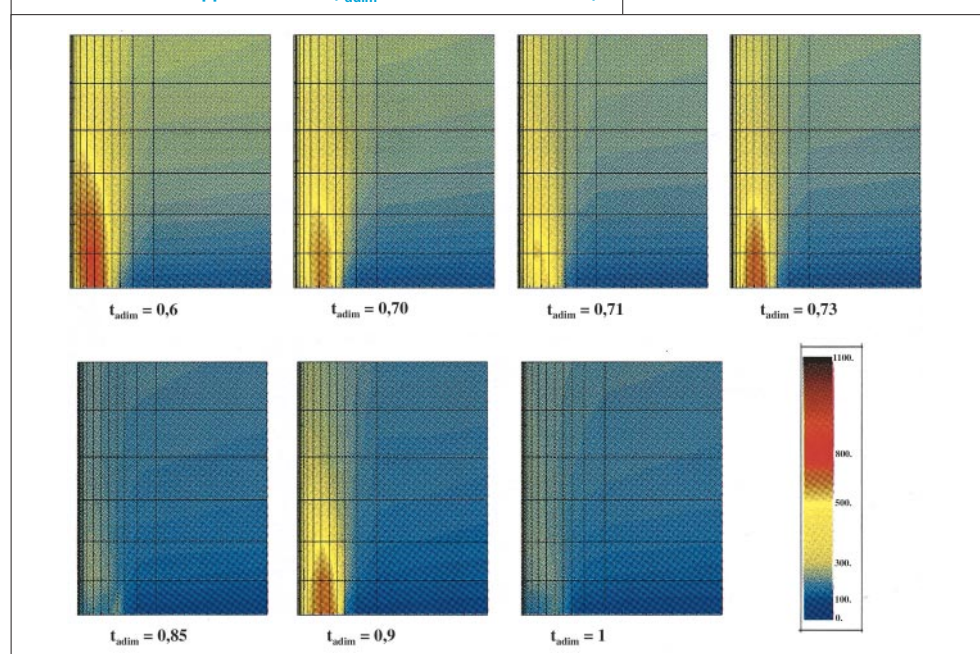
### Le programme de recherche sur les feux dans une armoire électrique

#### LE CONTEXTE DES RECHERCHES

Une installation nucléaire peut comprendre un grand nombre d'armoires et de coffrets électriques (environ deux mille dans un réacteur à eau sous pression). Ce type d'équipement est à l'origine d'un quart des départs de feux dus à des défaillances de matériels. Un incendie non maîtrisé dans une installation nucléaire pourrait conduire à une dégradation du niveau de sûreté et menacer le confinement des matières

Figure 11

Visualisation du phénomène d'extinction et réinflammation lors d'un feu de nappe de 1,5 m<sup>2</sup> ( $t_{\text{adim}}$  = instant / durée du feu).



radioactives. À titre d'illustration, les études préliminaires menées dans le cadre de l'étude probabiliste de sûreté relative aux REP 900 MWe, liée à l'incendie, en particulier l'étude d'un incendie se produisant dans la salle de commande, ont mis en évidence que la dégradation par combustion d'armoires électriques ou de pupitres pourrait apporter une contribution relativement élevée à la probabilité d'endommagement du cœur du réacteur.

Les informations nécessaires pour l'étude des conséquences des scénarios d'incendie induits concernent :

- la puissance dégagée par une armoire électrique en feu en fonction du temps ;
- le comportement d'une armoire électrique en présence d'un incendie dans le local (température et flux de chaleur conduisant à son dysfonctionnement, risque éventuel de dysfon-

tionnement du fait de l'agression par les produits de combustion) ;

- les modes de dégradation des armoires électriques adjacentes à l'armoire incendiée ;
- l'évolution de la température à l'intérieur de l'armoire électrique en fonction de la température externe ;
- l'identification des types d'ordres intempestifs pouvant être générés par une armoire électrique ou un châssis du contrôle commande lors de son endommagement résultant de l'incendie.

Compte tenu de l'insuffisance des données disponibles sur la combustion des armoires électriques et de la complexité des phénomènes, il s'est révélé nécessaire de compléter les connaissances sur ce type de foyer par un programme de recherches en vue de développer puis de qualifier un modèle empirique dans le code de calcul FLAMME\_S.

Figure 12

Pression des gaz du local calculée par le logiciel FLAMME\_S - SIMEVENT (calcul couplé et calcul non couplé), comparée aux valeurs expérimentales à gauche pour un feu de forte puissance et à droite pour un feu de faible puissance.

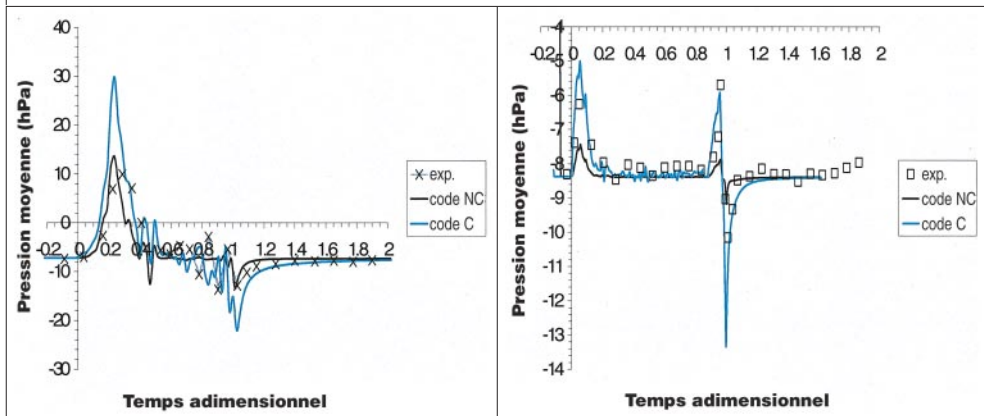
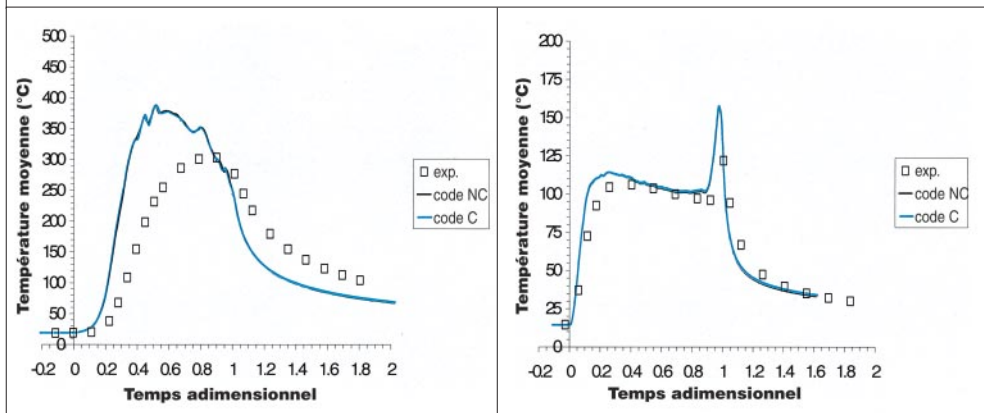


Figure 13

Températures moyennes du local calculées par le logiciel FLAMME\_S - SIMEVENT (calcul couplé et calcul non couplé), comparées aux températures expérimentales à gauche pour un feu de forte puissance et à droite pour un feu de faible puissance.



## Dans ce programme de recherche, une attention particulière est portée à la détermination de la puissance du foyer.

### L'ÉLABORATION DU PROGRAMME DE RECHERCHE

Ce programme a démarré, en 1998, par une étude bibliographique dans laquelle les essais réalisés par le VTT (Finlande) ont fait l'objet d'une attention particulière car ils mettent en œuvre des armoires électriques réelles.

Les simulations réalisées avec le logiciel FLAMME\_S pour recalculer les essais VTT ont mis en évidence la difficulté de définir le foyer dans l'armoire électrique (la puissance dégagée au cours du temps, les caractéristiques du panache...). En effet, lors d'un feu dans une armoire électrique, les phénomènes sont nombreux et complexes ; on notera en particulier :

- le confinement important de la flamme ;
- la raréfaction de l'oxygène nécessaire à la combustion ;
- la pyrolyse de composants sous l'effet des flux de chaleur intense à l'intérieur de l'armoire électrique ;
- les écoulements des gaz (entrée d'air et sortie des gaz) *via* les ouvertures de ventilation de l'armoire électrique et dans l'armoire électrique elle-même.

L'étude bibliographique a permis d'identifier les cinq paramètres essentiels suivants :

- la surface des ouvertures de ventilation de l'armoire électrique, tant à l'admission, située en partie basse, qu'à l'extraction, en partie haute ;
- le remplissage de l'armoire électrique ;
- la perte de charge interne de l'armoire électrique ;
- la position du point d'allumage ;
- la quantité de matière combustible mise en jeu.

La complexité et la diversité des types d'armoires électriques recensés sur une installation réelle ont conduit à adopter une démarche de recherche comprenant un important volet préliminaire d'essais analytiques.

Ces essais analytiques, baptisés CARMELA<sup>1</sup>, ont pour objectif de quantifier l'influence des para-

mètres jugés prédominants sur l'évolution de la puissance du foyer et de la combustion dans les armoires électriques.

Dans cette approche analytique, il s'agit essentiellement de quantifier expérimentalement comment, pour une densité de charge calorifique donnée, les caractéristiques de l'armoire électrique (son remplissage, les surfaces des ouvertures de ventilation, etc.) modifient l'évolution de la puissance dégagée par le feu. Les trois premiers paramètres, à savoir la surface des ouvertures de ventilation, le remplissage de l'armoire et la disposition des éléments, modifient l'écoulement de l'air dans l'armoire et donc l'apport d'oxygène pour la combustion. La position du point d'allumage influe sur la propagation de la flamme.

- Dans ce programme de recherche, une attention particulière est portée à la détermination de la puissance du foyer, grandeur physique fondamentale pour caractériser le feu et évaluer ses conséquences sur son environnement dans une installation réelle (autres armoires électriques, chemins de câbles, locaux voisins, réseau de ventilation associé...).

Le panache de gaz chauds issu de l'armoire électrique est également un point important de l'étude car, sur une installation réelle, cet écoulement peut induire des contraintes thermiques sur des équipements (comme des chemins de câbles) et conduire à leur endommagement, voire à leur dysfonctionnement.

Ce n'est que dans un deuxième temps que des essais dits globaux (baptisés CARMELO) mettant en jeu des armoires électriques réelles seront réalisés, à l'horizon 2003.

La caractérisation des matériaux constitutifs d'une armoire électrique réelle (composants électriques, cartes électroniques, goulotte, câble et filerie...) est prévue en parallèle à petite échelle, sur la base de tests normalisés (cône calorimètre, appareil de TEWARSON).

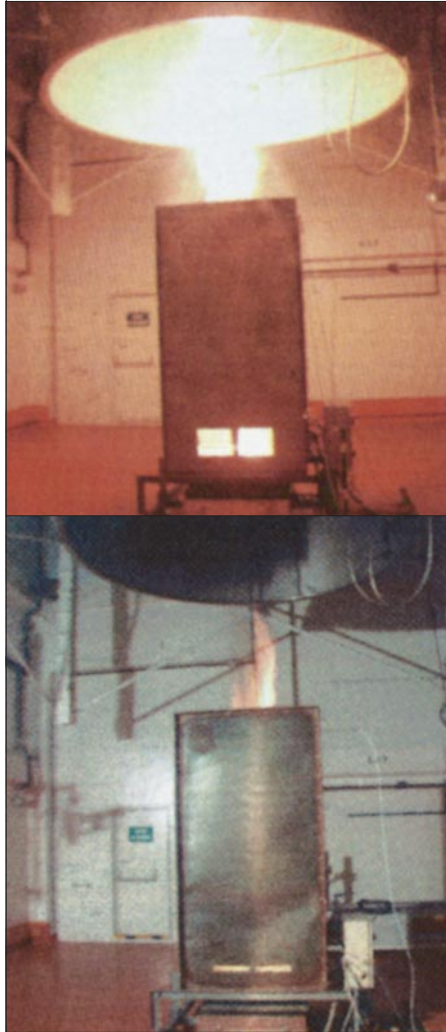
1 - CARMELA : acronyme pour Combustion d'une armoire électrique analytique.



## La première phase du programme CARMELA comprend 15 essais réalisés en 2000 et 2001.

Figure 14

Vue du dispositif CARMELA au cours d'un essai.



### LES ESSAIS CARMELA

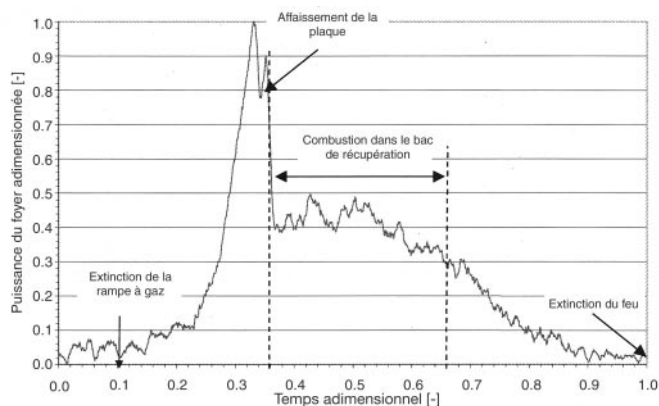
#### Le dispositif expérimental

L'armoire électrique est "simulée" par une boîte en acier de dimensions comparables à celles d'une armoire électrique réelle, à l'intérieur de laquelle est placé un combustible. Ce dernier, une plaque de Plexiglas en position verticale, représente une charge calorifique plutôt que des composants électriques et électroniques équipant une armoire électrique réelle. L'armoire est dotée d'ouvertures de ventilation, situées en partie basse de la porte et sur le dessus de l'armoire. Le remplissage de l'armoire est simulé par des blocs d'acier inertes et des plaques métalliques situées à diverses hauteurs à l'intérieur de l'armoire. Ces structures permettent de faire varier la perte de charge interne de l'armoire électrique. Le point d'allumage est situé en bas ou à mi-hauteur de la plaque combustible. Le dispositif est placé sous une grande hotte de captation des produits de combustion dont les analyses en ligne avant filtration permettent de déterminer la puissance du feu. Des mesures de perte de masse du combustible, de température, de pression et de concentration des gaz sont effectuées dans l'armoire, ainsi que des mesures de température et de vitesse du panache au-dessus d'elle.

La première phase du programme CARMELA comprend quinze essais réalisés en 2000 et 2001. La **figure 14** donne une vue d'ensemble du dispositif au cours d'un essai. On aperçoit la flamme qui sort par l'orifice supérieur de la ventilation, situé sur le dessus du modèle d'armoire électrique, et le panache des fumées qui s'écoule dans la hotte de captation.

Figure 15

Évolution typique de la puissance du feu en fonction du temps.



#### Interprétation

L'interprétation des résultats est en cours. À titre d'illustration, la **figure 15** montre l'évolution typique de la puissance du feu en fonction du temps, en grandeurs adimensionnées: la puissance augmente lors de la phase de propagation de la flamme sur la plaque combustible, atteint un maximum puis chute brutalement lorsque la plaque s'affaisse dans le fond de l'armoire sous l'effet de son ramollissement avec la température.

Le modèle empirique, en cours d'élaboration, a pour objectif d'estimer l'évolution de la puissance du foyer en fonction des caractéristiques de l'armoire électrique. Il doit donc décrire la phase de montée en puissance du feu, caractéristique de la propagation de la flamme dans l'armoire électrique. Un modèle simple habituellement utilisé pour des feux de matériaux complexes (chaises, voitures...) a été appliqué aux résultats expérimentaux des essais CARMELA. Ce modèle exprime la puissance du foyer  $\dot{Q}$  (en kW) en fonction du temps au carré :

$$\dot{Q} = a \cdot t^2$$

où  $a$  est le facteur d'accroissement (en  $\text{kW}\cdot\text{s}^{-2}$ ) et  $t$ , le temps (en s).

L'examen de la puissance obtenue expérimentalement entre le démarrage du feu (allumage de la rampe à gaz) et l'instant correspondant à la valeur maximale de la puissance ( $t = t_2$ ) met en évidence deux phases : une phase de propagation très lente du feu sur la plaque de combustible ( $t \leq t_1$ ) suivie d'une phase de propagation du feu plus rapide ( $t_1 \leq t \leq t_2$ ). L'instant  $t_1$  de transition entre les deux phases correspond à un changement brusque de la vitesse d'accroissement de la puissance du feu. La puissance évaluée par le modèle est ajustée au mieux avec le résultat expérimental pour chacune de ces deux phases en jouant sur le paramètre d'accroissement  $a$  :

$$\dot{Q} = a_1 \cdot t^2 \quad \text{pour } t \leq t_1$$

$$\dot{Q} = a_2 \cdot (t - t_1)^2 + a_1 \cdot t_1^2 \quad \text{pour } t_1 \leq t \leq t_2$$

L'application de ce modèle est illustrée par la **figure 16**.

L'analyse en cours des essais CARMELA vise à corréler les facteurs d'accroissement  $a$  aux caractéristiques de l'armoire électrique. À titre d'exemple, la variation du facteur d'accroissement  $a_2$  (deuxième phase de la propagation du feu sur la plaque) en fonction de la surface des ouvertures de la ventilation dans la porte est présentée sur la **figure 17**. Ce facteur évolue linéairement en fonction de cette surface.

La **figure 18** illustre l'influence de la section des ouvertures dans la porte sur le pic de puissance du feu pour une section d'ouverture donnée dans le plafond de l'armoire électrique.

Les champs de température des gaz à l'intérieur de l'armoire (**figure 19**, page 82) ont notamment montré que la température devient apparemment homogène et égale à 600 °C dès le début de la phase de propagation (**figure 16**).

Figure 16

Représentation d'une montée en puissance d'un feu dans une armoire électrique.

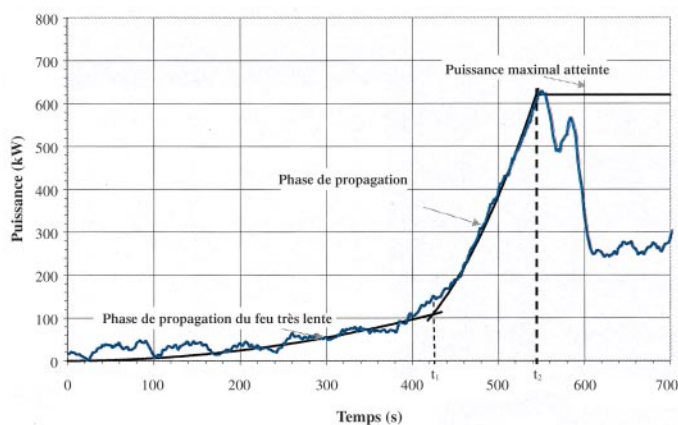


Figure 17

Évolution du facteur d'accroissement  $a_2$  en fonction de la section des ouvertures de ventilation dans la porte.

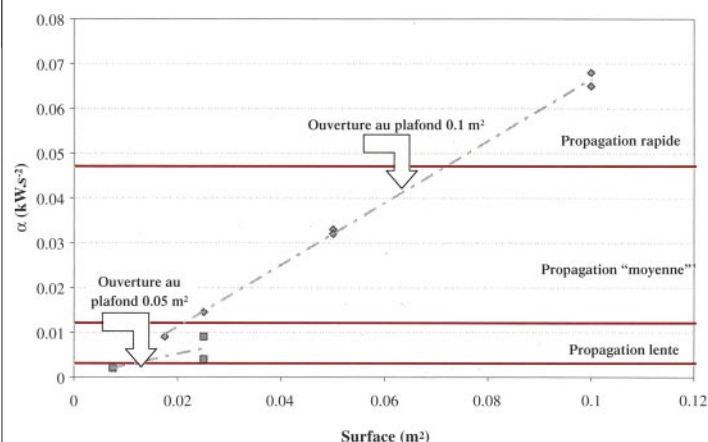


Figure 18

Influence des sections des ouvertures de ventilation dans la porte de l'armoire électrique sur la puissance maximale du feu (en valeur adimensionnée) pour deux valeurs de la section d'ouverture au plafond.

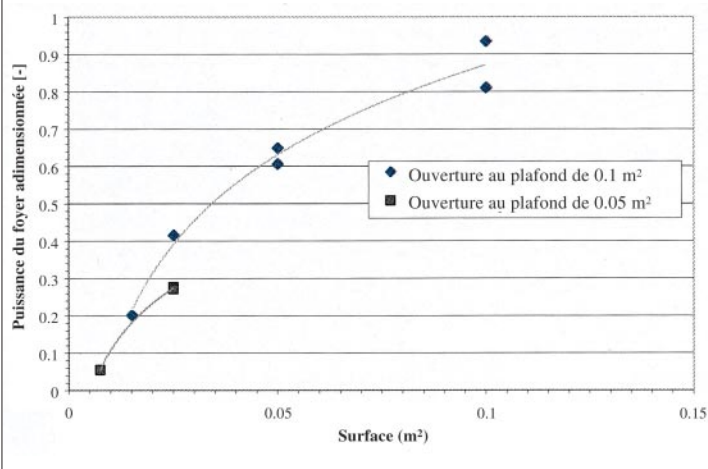
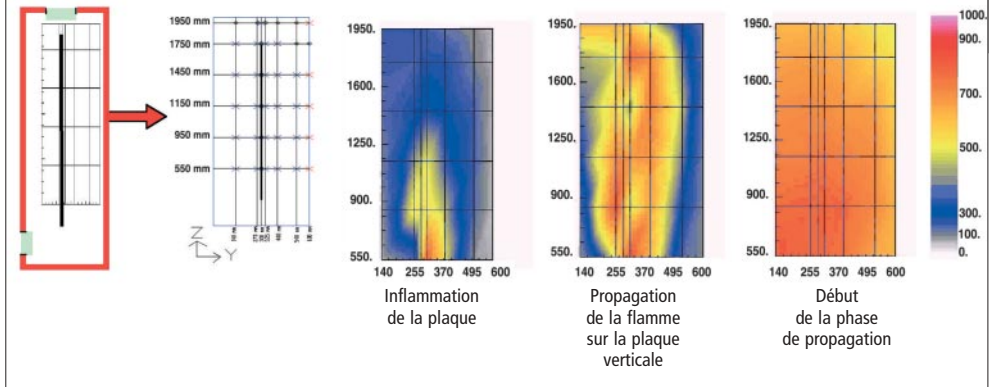


Figure 19

Évolution de la température des gaz dans l'armoire électrique.



Une deuxième campagne d'essais analytiques CARMELA sera réalisée en 2002. Son contenu est défini sur la base de l'interprétation de cette première série d'essais et du modèle empirique de feu d'armoire en cours de développement. À terme, ce modèle sera qualifié et si nécessaire ajusté à partir des essais CARMELO, qui mettent en jeu des armoires électriques réelles.

### Conclusion

Les travaux de recherche menés à l'IRSN dans le domaine des feux se sont d'ores et déjà traduits par des améliorations substantielles de la compréhension du développement d'un feu et de ses conséquences sur le maintien du confinement des substances radioactives présentes dans les installations nucléaires. Les acquis sont nombreux tant

sur le plan de l'expérimentation que sur celui du développement et de la qualification des codes de calcul utilisés pour les évaluations de sûreté. Des études expérimentales et théoriques restent néanmoins nécessaires pour améliorer la connaissance de certains phénomènes et leur modélisation, ainsi que pour élargir le domaine d'application des codes de calcul. Ainsi, le programme sur les feux d'armoires électriques se poursuivra en 2002 et 2003 afin d'apporter des réponses aux préoccupations de sûreté sur ce thème à l'horizon 2003. Le programme FLIP se terminera en 2002, année au cours de laquelle l'IRSN démarrera un programme de recherche expérimentale sur les feux en configuration à plusieurs locaux dans un dispositif expérimental spécifique à échelle réelle baptisé DIVA (Dispositif incendie, ventilation et aérocontamination).