

L'incendie est l'une des sources d'accident redoutées dans les installations nucléaires.

L'IRSN et les feux électriques

Des recherches de grande intensité !

CONTEXTE

De l'ordre de 200 départs de feu caractérisés par des flammes ou seulement un dégagement de fumée se sont produits dans les centrales nucléaires françaises entre 2018 et 2020. À l'origine d'environ la moitié d'entre eux, un court-

circuit, une surchauffe de câble ou un arc électrique. Une part significative de ces départs de feu s'est produite dans des armoires et tableaux électriques. Les rares qui se sont développés ont pu être maîtrisés.

Cahier partenaire
réalisé avec

IRSN

www.irsn.fr

L'IRSN mène des essais sur sa plateforme de recherche expérimentale à Cadarache (région Paca) pour caractériser avec précision les feux électriques et leur propagation dans des configurations représentatives des locaux d'installations nucléaires.

Objectif : évaluer les conséquences de ce type d'incendie et valider des outils de simulation pour améliorer les analyses de sûreté des installations nucléaires.

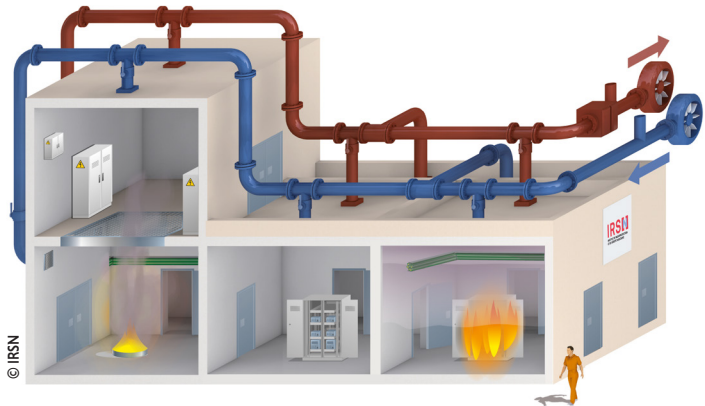
Cadarache, 28 juin 2019, 9 heures, en salle de commande de l'installation Diva. Pascal Zavaleta, ingénieur-chercheur au laboratoire d'expérimentation des feux de l'IRSN donne les dernières consignes aux sept membres de son équipe, tous en tenue anti-feu. Depuis trois mois déjà, ils ont reçu les armoires électriques câblées selon leur cahier des charges. Elles sont en place, tout comme les chemins de câbles qui les surmontent et les équipements de mesure destinés au suivi de l'essai. La veille, une fois encore, ils ont vérifié l'instrumentation, les réglages de la ventilation, l'étanchéité des locaux et testé la rampe à gaz qui servira de système de mise à feu de l'armoire. Plus de 600 capteurs ont été étalonnés un à un : des thermocouples pour mesurer la température, des fluxmètres pour les flux de chaleur, des sondes de vitesse pour les écoulements, des analyseurs pour les concentrations de gaz et de suies, des capteurs de pression, des caméras vidéo...

10 heures. Tout est prêt. L'équipe pilote à distance la ventilation puis déclenche la mise à feu dans l'armoire électrique. Les yeux rivés sur les écrans, elle suit attentivement les premières augmentations de température ou de pression, prête à lancer un prélèvement de suie. Dans l'armoire, les premiers composants s'embrasent. Le feu se développe verticalement. Les câbles situés au-dessus de l'armoire s'enflamment à leur tour et l'incendie se propage, lentement.

Deux à trois heures plus tard, tout a quasiment brûlé dans l'armoire, et le feu sur les chemins de câbles s'est éteint. Le lendemain matin, l'équipe pénètre dans les locaux, observe tout minutieusement, prend des photos. Puis armoires et câbles sont évacués et remplacés pour l'essai suivant, alors que le dispositif instrumental, lui, reste en place. Quatre expérimentations sont prévues lors de cette campagne, l'ensemble des données recueillies nécessitera trois à quatre mois d'analyse par Pascal Zavaleta. ➤

➤ Tous ces essais ont lieu sur la plateforme Galaxie, dédiée à l'étude du risque incendie. On y étudie des foyers en milieu ouvert pour évaluer la puissance maximale du feu mais aussi l'impact de locaux confinés et ventilés, typiques de ceux des installations nucléaires. *«De quoi caractériser un large éventail de conditions, ajoute Pascal Zavaleta. Grâce à ces moyens uniques en leur genre, nous pilotons plusieurs programmes de recherche internationaux comportant de nombreux essais en matière d'incendies, notamment en collaboration avec des entreprises du secteur nucléaire.»* Depuis 2000, l'IRSN a mené une cinquantaine d'essais pour reproduire des feux d'origine électrique, et encore d'avantage pour étudier des feux d'hydrocarbures ou d'autres matériaux combustibles.

LA DIVA DES FEUX



L'installation Diva.

Dans la plateforme d'essais Galaxie, Diva est l'installation réservée à la caractérisation de la propagation des feux et de leurs conséquences dans des locaux industriels confinés et ventilés mécaniquement. Elle possède quatre pièces et un couloir de 15 mètres de long qui permet d'étudier la propagation du feu sur de longues distances. Diva comporte environ 800 capteurs répartis dans un volume total de 650 m³. Ses murs en béton armé supportent les surpressions liées à l'incendie et à d'éventuelles inflammations brutales de mélanges de gaz imbrûlés et d'air (voir l'encadré ci-contre).

Pourquoi de tels moyens expérimentaux ? Parce que les installations nucléaires, comme la plupart des sites industriels, possèdent de nombreux équipements électriques comme des armoires de contrôle-commande pour piloter, via des centaines de kilomètres de câbles, le fonctionnement de pompes, de ventilateurs, de moteurs, etc. Et nul n'est à l'abri d'un court-circuit en cas de défaut d'isolation, d'échauffement d'un conducteur électrique à cause d'une mauvaise connexion ou d'amorçage d'un arc électrique. Parfois, il se produit un départ de feu caractérisé seulement par un dégagement de fumée, ou aussi par des flammes; et celles-ci risquent de se propager car il y a beaucoup de combustible dans les gaines de câbles et les composants en plastique présents dans les armoires et tableaux électriques.

D'IMPORTANTES TRAVAUX DE RECHERCHE

Les locaux des installations nucléaires présentant un risque significatif de départ de feu font l'objet de dispositions particulières notamment en matière d'intervention (détecteurs d'incendie et systèmes d'extinction) et de limitation de la propagation (sectorisation des locaux, protections coupe-feu). Ainsi, peu d'incendies s'y déclenchent et se propagent. Leurs impacts sur la sûreté

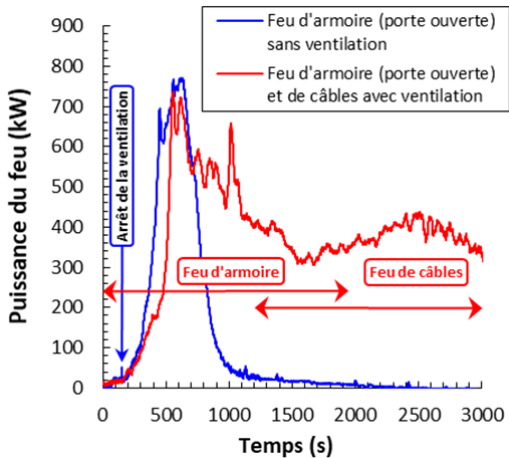
des installations nucléaires sont néanmoins redoutés. C'est pour quoi d'importants travaux de recherche sont réalisés pour mieux comprendre le développement de tels incendies et leurs conséquences. L'accident qui fait date en la matière est celui de Browns Ferry, aux États-Unis, en 1975, où plus de 1 600 câbles électriques avaient été endommagés du fait d'une erreur humaine lors de travaux de maintenance. Le feu s'était propagé par ces câbles jusqu'au bâtiment du réacteur, provoquant la perte du contrôle de certains équipements importants pour la sûreté.

Des incendies ont eu lieu dans le parc nucléaire français, avec des conséquences plus ou moins significatives. En voici quelques exemples : en 1999, à la centrale du Bugey, dans l'Ain, un incendie s'est déclaré à cause d'un défaut électrique dans un tableau de la station de pompage; en 2012, à la centrale de Penly en Seine-Maritime, c'est une fuite d'huile dans un groupe motopompe primaire qui était en cause; en 2021 à la centrale de Paluel (Seine-Maritime), un transformateur s'est enflammé en raison d'un défaut électrique. Parmi ces trois incendies significatifs, tous maîtrisés, deux sont d'origine électrique.

RETARDER L'INFLAMMATION DES CÂBLES ÉLECTRIQUES

Du fait de l'accident de Browns Ferry, les fabricants de câbles et les industriels, notamment du secteur nucléaire, ont réalisé d'importants efforts pour réduire les risques d'incendies liés aux câbles électriques. Ils ont développé des câbles avec des gaines incorporant des retardateurs de flamme, par exemple à base d'hydroxyde d'aluminium. *«La décomposition thermique de ce matériau retarde l'inflammation pour plusieurs raisons, détaille Pascal Zavaleta : étant endothermique, elle refroidit les matériaux combustibles des gaines des câbles; elle produit également de la vapeur d'eau, ce qui dilue les gaz de pyrolyse (voir encadré). De plus, l'oxyde d'aluminium résultant de cette décomposition, forme une croûte protectrice sur la surface de la gaine, ce qui limite sa combustion.»*

IMPACT DU PILOTAGE DE LA VENTILATION DES LOCAUX SUR LA PUISSANCE DU FEU



Si l'arrêt de la ventilation (courbe bleue), 2 min 30 s après le début du feu, n'a pas permis d'éviter l'embrasement total de l'armoire porte ouverte (l'oxygène étant alors disponible en quantité), il a réduit la durée de sa combustion et empêché la propagation du feu vers les chemins de câbles situés au-dessus, contrairement à ce qui s'est produit lors de l'essai pour lequel la ventilation a été maintenue (courbe rouge).

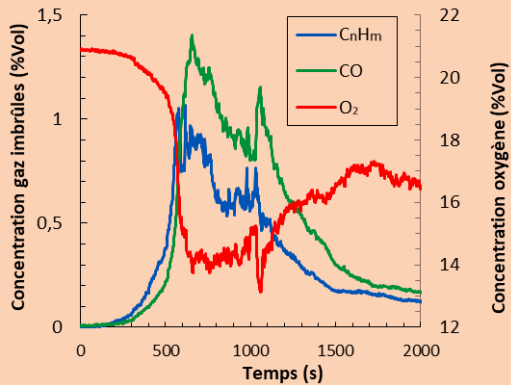
Plus tard, dans les années 2000, les armoires électriques ont été identifiées comme cause importante des départs de feu. L'IRSN a alors focalisé ses recherches en matière d'incendie sur le sujet, en collaboration avec Orano (ex-Areva). *« Nous avons notamment étudié l'effet du confinement et de la ventilation sur le développement du feu et la durée de l'incendie, ainsi que l'impact de l'ouverture des portes des armoires électriques, explique Pascal Zavaleta. C'est loin d'être anecdotique: la puissance du feu est plus de vingt fois supérieure portes ouvertes que fermées.»*

MESURER PUISSANCE ET IMPACT

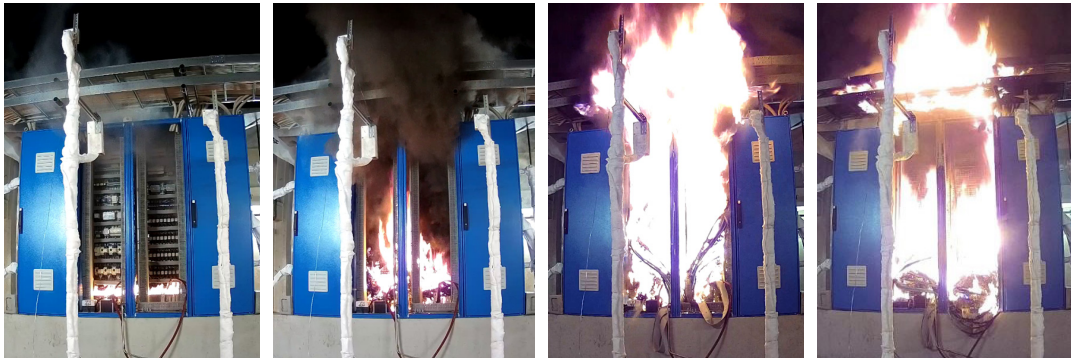
Premier objectif des essais incendie: calculer la puissance du feu, paramètre capital pour décrire le scénario de l'incendie et évaluer ses conséquences. *« Pour cela, nous avons développé des méthodes*

QUELS GAZ DE COMBUSTION EN MILIEU CONFINÉ ?

La pyrolyse, décomposition chimique d'un matériau organique sous l'effet de la chaleur, produit des gaz combustibles, ou « gaz de pyrolyse », comme le méthane ou l'éthylène. En présence d'une source de chaleur, leur mélange avec l'oxygène de l'air (O₂) risque de s'enflammer si leurs concentrations sont suffisantes. Lorsque l'oxygène ne manque pas, la combustion est complète et produit de la vapeur d'eau (H₂O) et du dioxyde de carbone (CO₂). En cas de déficit d'oxygène, la combustion est incomplète, comme le montre la figure ci-dessous, dans le cas d'un essai de combustion d'une armoire électrique dans un local confiné: en plus du CO₂ et de l'H₂O, de nombreux autres produits se forment, dont le monoxyde de carbone (CO), des hydrocarbures gazeux imbrûlés (C_nH_m) et des particules solides de carbone, appelées « suies ». Le CO et les C_nH_m constituent une part importante de gaz imbrûlés, qui peuvent s'accumuler dans certaines zones des locaux, par exemple sous le plafond. En cas de nouvel apport d'oxygène lors de la reprise de la ventilation ou lors de l'ouverture d'une porte à la suite d'une intervention humaine dans le local, un mélange inflammable est susceptible de se former et de s'embraser violemment au contact d'une petite flamme ou étincelle (ou spontanément si la température des gaz est suffisamment importante). C'est le phénomène de backdraft.



Quand le feu se développe dans l'armoire, le local s'appauvrit en O₂ (courbe rouge). En conséquence, les concentrations en C_nH_m et CO augmentent (respectivement courbes bleue et verte). Ensuite, la concentration en O₂ est quasi stable quand l'armoire brûle, sa consommation par le feu d'armoire étant compensée par l'apport de la ventilation du local, puis elle augmente à nouveau avec le déclin de la combustion de l'armoire et le maintien de la ventilation du local, celles des gaz imbrûlés diminuant parallèlement.



Essai de feu d'armoire électrique

inédites adaptées à un environnement confiné et ventilé, précise-t-il. Elles s'appuient en particulier sur les nombreuses mesures de température, de flux de chaleur, de concentrations des gaz de combustion et d'oxygène, de débit des gaz dans les gaines de ventilation.»

Ensuite, après 2010, dans le cadre des programmes de recherche internationaux baptisés Prisme, conduits par l'IRSN avec des partenaires français, dont EDF, et une dizaine de partenaires étrangers, des essais ont permis de poursuivre l'étude de l'impact de la ventilation sur la puissance du feu (voir figure ci-contre) et d'évaluer le risque de propagation du feu d'une armoire vers des chemins de câbles et vers d'autres armoires électriques.

Conclusions: *« Concernant les chemins de câbles placés au-dessus des armoires électriques, les essais ont montré que les câbles sans retardateur de flamme se sont embrasés moins de cinq minutes après que l'armoire a totalement pris feu, alors que les câbles avec retardateur de flamme ont résisté pendant plus de dix minutes, un temps précieux pour les services d'intervention »,* explique le chercheur. Pendant un tel essai, dans le local, les températures fluctuent entre 50 °C à 100 °C au sol et 400 °C voire 500 °C au plafond.

Concernant les armoires, lorsque celle (porte ouverte) qui est en feu est entourée de deux autres, sans lame d'air entre elles, les essais ont révélé que le feu se propage dans les armoires adjacentes par des composants internes en plastique qui s'enflamment en raison du rayonnement thermique des parois. Récemment, des essais sur des maquettes d'armoire à échelle ¼ ont montré que le feu peut également se propager lorsqu'elles sont espacées de quelques centimètres, pour les mêmes raisons.

L'ensemble de ces données permet de valider les logiciels Sylvia et Calif3S-Isis que développe l'IRSN. Le premier, basé sur une approche à deux zones, simule globalement l'incendie dans une installation couplée à un réseau de ventilation modélisé par des conduites, filtres, ventilateurs... Le second reproduit en détail le développement d'un incendie dans des locaux confinés et ventilés grâce à une approche CFD (computational fluid dynamics) tri-dimensionnelle, qui simule des écoulements faiblement compressibles, turbulents et réactifs.

« Nos résultats alimentent nos analyses de sûreté incendie ainsi que celles de nos partenaires nationaux et internationaux, conclut Pascal Zavaleta. Ils permettent également de sensibiliser un large spectre d'acteurs industriels concernés par le risque incendie, des bureaux d'études des grands exploitants du nucléaire aux fabricants d'armoires électriques.» ■

RÉFÉRENCES

➤ Coutin, M., Plumecocq, W., Zavaleta, P., Audouin, L., 2015, Characterization of open-doors electrical cabinet fires in compartments, *Nuclear Engineering and Design*, 286, p104-115. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2015.01.017>

➤ Zavaleta, P., Suard, S., Audouin, L., Fire spread from an open-doors electrical cabinet to neighboring targets in a confined and mechanically ventilated facility, *Fire and Materials*, 2019, 43:466-485. <https://doi.org/10.1002/fam.2685>

➤ Zavaleta, P., Bouygues, O., Lapuerta, C., Electrical component ignition in a closed enclosure adjacent to a controlled fire, *Fire and Materials*, 2021, 45:331-344. <https://doi.org/10.1002/fam.2792>

➤ Zavaleta, P., Experimental study at reduced-scale of fire spread between electrical cabinets located opposite each other, *Fire Safety Journal*, 2021 (122). <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103319>