

Chapitre 7

Recherches sur les incendies

7.1. Les risques liés aux incendies dans les installations nucléaires

L'incendie constitue un risque important à prendre en compte pour la sûreté d'une installation nucléaire. Le 22 mars 1975, un feu de câbles s'est déclaré dans le réacteur n° 1 de la centrale de Browns Ferry aux États-Unis, à la suite d'un test d'étanchéité au droit d'un passage de câbles en mousse de polyuréthane à travers une paroi, réalisé à l'aide d'une bougie. Bien que les intervenants aient immédiatement procédé à l'extinction du feu, celui-ci s'est propagé à leur insu le long des câbles de l'autre côté du passage étanche. Il a entraîné la perte du contrôle de certains équipements importants pour la sûreté, non seulement du réacteur n° 1 mais également du réacteur n° 2 voisin. La réaction des opérateurs devant cette perte de contrôle a permis de juguler l'incident avant qu'il ne dégénère en accident plus grave. Au mois d'octobre 1989, une rupture d'ailettes de la turbine de la centrale de Vandellos en Espagne (réacteur de type UNGG⁵⁵) a eu de multiples conséquences : fuite et explosion d'hydrogène, feu d'huile de graissage de la turbine, perte d'alimentations électriques et de l'air comprimé de régulation de plusieurs matériels participant à l'évacuation de la puissance résiduelle, inondation importante des sous-sols (y compris celui du bâtiment du réacteur), etc. L'incendie, qui a duré plus de quatre heures, a pu être maîtrisé en faisant appel aux unités de pompiers des environs de la centrale, jusque dans un rayon de 100 km. Si le système de refroidissement avait cessé de fonctionner, les 3 000 tonnes de graphite auraient pris feu. Le réacteur n'a pas été

55. Réacteurs dont le combustible est de l'uranium naturel, modérés au graphite et refroidis au gaz carbonique (UNGG : uranium naturel-graphite-gaz).

redémarré, du fait notamment du coût élevé des modifications nécessaires pour en améliorer la sûreté.

Des incendies surviennent dans les réacteurs du parc électronucléaire français, avec des conséquences plus ou moins significatives. On peut évoquer par exemple :

- l'incident survenu en juillet 1999 à la centrale de Bugey, qui a montré qu'une cause commune (un défaut électrique dans un tableau situé à la station de pompage) avait initié, dans le réacteur n° 3, deux défauts électriques et deux départs de feu quasi simultanés qui se sont développés dans des « volumes de feu de sûreté » différents et géographiquement séparés ;
- un feu de câbles électriques survenu en 2004, par surchauffe, au passage d'une trémie séparant la salle des machines et le bâtiment électrique du réacteur n° 2 de la centrale de Cattenom ;
- en 2012, le feu d'huile de groupe motopompe primaire qui s'est déclaré dans le bâtiment du réacteur n° 2 de la centrale de Penly.

Ces exemples montrent toute l'importance qu'il convient d'attacher aux risques liés à l'incendie.

L'incendie est pris en compte pour la conception et le dimensionnement des réacteurs à eau sous pression en tant qu'agression, d'origine interne ou externe. En règle générale, une telle agression ne doit pas conduire à un accident pour le réacteur, ni mettre en cause le bon fonctionnement des systèmes de sûreté conçus pour faire face aux accidents. Dans le cadre de la mise en œuvre du principe de défense en profondeur et de l'approche déterministe de sûreté, la maîtrise du risque lié à l'incendie repose sur des dispositions de prévention – notamment en limitant les charges calorifiques dans les locaux –, de détection d'éventuels feux et sur des dispositions de nature à limiter les conséquences d'éventuels feux, reposant notamment sur une sectorisation⁵⁶ dans les bâtiments et sur des dispositifs d'extinction. Par ailleurs, le risque global de fusion du cœur engendré par des incendies internes comme événements initiateurs est évalué dans des études probabilistes de sûreté de niveau 1 spécifiques (« EPS⁵⁷ Incendie », que développent EDF ainsi que l'IRSN), dans lesquelles sont notamment pris en compte des scénarios avec défaillance d'éléments de sectorisation. Ce type d'étude est d'autant plus pertinent que l'exploitation des centrales peut révéler certaines anomalies ou non-conformités en matière de sectorisation (trémies mal obturées, etc.).

56. Les installations nucléaires sont conçues afin qu'un incendie éventuel puisse être circonscrit à un périmètre déterminé et qu'à l'intérieur de ce périmètre les conséquences de l'incendie puissent être maîtrisées. Ces périmètres sont délimités par des parois physiques, voire séparés par un espace suffisant. Pour la démonstration de sûreté, il est supposé que tous les matériels situés dans un périmètre en feu sont perdus (indisponibles ou défaillants). L'agencement des bâtiments, la délimitation de ces périmètres et l'installation des équipements visent notamment à ce que si les équipements d'une voie ou d'un train d'un système redondant sont affectés par un feu, ceux des autres voies et trains ne peuvent pas l'être.

57. Étude probabiliste de sûreté.

Il est donc nécessaire d'avoir une bonne connaissance de tous les phénomènes qui peuvent être mis en jeu dès lors qu'un feu se déclare dans un local : échauffement dans ce local, augmentation de la pression des gaz dans le local, production de gaz chauds (brûlés ou imbrûlés) et de fumées, transferts vers d'autres locaux (notamment en cas de défaillance de la sectorisation).

L'analyse des données issues de la base OCDE Fire [1] montre qu'une majorité des départs de feu, environ 50 %, est due à des sources électriques. Les armoires électriques et électroniques sont l'un des contributeurs les plus significatifs, avec une occurrence de plus de 10 %, quel que soit le type d'armoires électriques (basse, moyenne et haute tension). Aussi, les armoires électriques et les chemins de câbles (figure 7.1) sont des sujets d'intérêt tout particulier en matière de recherches sur les risques liés à l'incendie, pour plusieurs raisons :

- ils peuvent être à l'origine de départs de feu ;
- ils peuvent favoriser la propagation d'un feu ;
- inversement, ils peuvent constituer des « cibles » en cas de feu, dont la vulnérabilité doit être rendue aussi faible que possible si ces équipements ont une importance pour la sûreté du réacteur.

Les sujets de recherche dans le domaine de l'incendie concernent principalement l'évaluation des caractéristiques du feu proprement dit, en particulier l'estimation de sa puissance thermique, et des conséquences dans une installation. Les conséquences ayant particulièrement un intérêt sont les effets de pression des gaz et de température dans les locaux, les transferts de gaz (produits de la combustion ou imbrûlés) et de suies entre locaux, par des portes ou des trémies, ou *via* les réseaux de ventilation, les effets de ces transferts sur les dispositifs de confinement ou sur des matériels électriques.

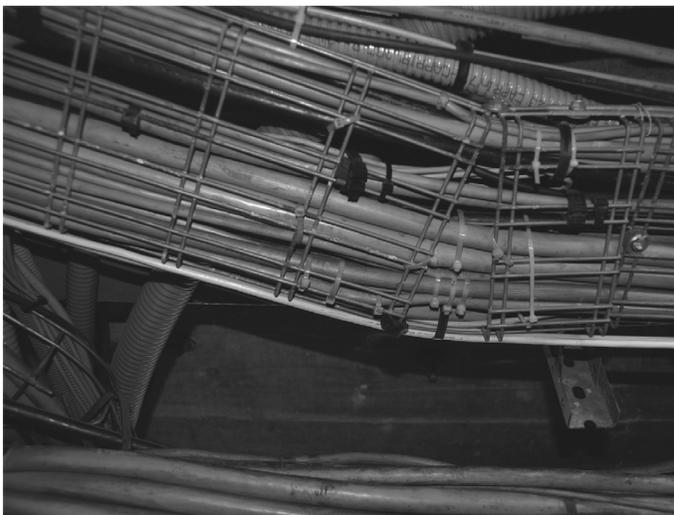


Figure 7.1. Exemple de chemin de câbles dans une installation. © Georges Goué/IRSN.

L'étude du développement d'un feu à l'intérieur d'une installation nucléaire et de ses conséquences sur les équipements importants pour la sûreté est rendue particulièrement complexe du fait du confinement des locaux et de l'existence de ventilations mécaniques. En effet, la concentration en oxygène d'un local en feu décroît puis se stabilise en général à une valeur correspondant à l'équilibre entre le flux d'oxygène consommé par le feu et celui amené par la ventilation. Le degré de confinement des installations, les caractéristiques du réseau de ventilation (taux de renouvellement d'air des locaux, résistance aéraulique) et sa conduite en cas d'incendie (arrêt, fermeture de clapets coupe-feu) jouent donc un rôle déterminant sur la puissance thermique du foyer, la durée du feu et sa propagation à d'autres foyers, voire d'autres locaux.

Les documents [2, 3, 4] de l'OCDE/AEN/CSNI rendent compte depuis le début des années 1980 et au plan international des préoccupations de sûreté pour les réacteurs de puissance et de l'évolution des connaissances en matière de risques liés à l'incendie (y compris dans le cadre du développement d'études probabilistes). Depuis 2006, l'IRSN mène des programmes, notamment les projets internationaux PRISME⁵⁸ sous l'égide de l'OCDE/AEN, afin d'améliorer les connaissances sur les incendies en milieu confiné et ventilé, représentatif des installations nucléaires.

7.2. *Acteurs impliqués dans la recherche sur les incendies*

La recherche dans le domaine de l'incendie n'est pas propre au nucléaire. En France, de nombreux acteurs effectuent des travaux de recherche et développement sur les feux. Nous citerons notamment les quatre laboratoires universitaires suivants qui contribuent au pilotage du Groupe de recherche feux du CNRS :

- l'IUSTI⁵⁹ (UMR⁶⁰ 6595) de Marseille (feux compartimentés et feux de forêts),
- le P' (UMR 9028) de Poitiers (combustion des solides, feux et fumées en espace libre et espace confiné),
- le CORIA⁶¹ (UMR 6617) de Rouen (métrologie des suies),
- le LEMTA (UMR 7563) de Nancy (rayonnement thermique, mesures d'émissivité des combustibles).

L'IRSN, EDF et la Direction générale de l'armement (DGA) (des feux dans les navires et les sous-marins présentent des similitudes avec ceux du nucléaire) effectuent également des recherches dans ce domaine, ainsi que les centres techniques français,

58. Propagation d'un incendie pour des scénarios multi locaux élémentaires.

59. Institut universitaire des systèmes thermiques industriels.

60. Unité mixte de recherche.

61. Complexe de recherche interprofessionnel en aérothermochimie.

tels que le CNPP⁶², le CTICM⁶³, l'INERIS⁶⁴, le CERIB⁶⁵ et le CSTB⁶⁶, qui réalisent des essais technologiques parfois à grande échelle, en particulier pour EDF.

Les travaux de recherche engagés – depuis plus de 20 ans – par l'IPSN puis par l'IRSN concernent les incendies d'origine interne, pour les locaux confinés et ventilés tels que rencontrés dans les laboratoires et usines du cycle du combustible (boîtes à gants, etc.) ou dans les réacteurs nucléaires. Nous limiterons toutefois ce qui suit aux travaux de recherche visant plus spécifiquement les réacteurs nucléaires.

Les moyens expérimentaux disponibles à l'IRSN lui permettent de réaliser une étude complète d'un foyer en deux étapes : dans un premier temps, ses principales caractéristiques (puissance du feu, chaleur de combustion, débit de pyrolyse, produits de la combustion, etc.) sont déterminées en atmosphère libre dans un dispositif appelé cône calorimètre. Puis, dans un second temps, des essais sont réalisés dans des locaux ventilés, représentatifs de ceux existant dans les installations nucléaires. Ces essais permettent d'évaluer l'effet du confinement et de la ventilation mécanique sur le développement du feu.

L'IRSN mène ou a mené ses recherches avec différents partenaires : industriels (AREVA, EDF, ENGIE-Tractebel Engineering, Vattenfall, etc.), universités (Aix-Marseille, Rouen, Édimbourg, Gent, Maryland, Lund, Aalto) et organismes de recherche (CNRS, INERIS, DGA, LNE⁶⁷, etc.), organismes internationaux (BelV⁶⁸, GRS, HSE⁶⁹, NRA⁷⁰, VTT⁷¹, CNSC⁷², CSN⁷³, etc.).

En outre, en 2010 a été créé un laboratoire « sans mur » dénommé ETIC (Étude des incendies en milieux confinés), associant l'IRSN et l'IUSTI (unité mixte de recherche CNRS/Universités de Provence et de la Méditerranée).

7.3. Installations de recherche, outils de simulation

L'IRSN dispose à Cadarache de la plateforme expérimentale GALAXIE qui regroupe des installations expérimentales de diverses capacités. La plateforme a été initialement construite pour mener des recherches dans les années 1970 à 1990 sur les feux de sodium, caloporteur utilisé pour les réacteurs à neutrons rapides PHENIX et SUPERPHENIX.

62. Centre national de prévention et de protection.

63. Centre technique industriel de la construction métallique.

64. Institut national de l'environnement industriel et des risques.

65. Centre d'études et de recherches de l'industrie du béton.

66. Centre scientifique et technique du bâtiment.

67. Laboratoire national de métrologie et d'essais.

68. Organisme belge menant les contrôles dans les centrales et autres installations nucléaires et radiologiques en Belgique (hôpitaux, universités, installations radiologiques, etc.).

69. Health and Safety Executive (Grande-Bretagne).

70. Nuclear regulation Authority (Japon).

71. Technical Research Centre (Finlande).

72. Canadian Nuclear Safety Commission (Canada).

73. Consejo de seguridad nuclear (Espagne).

Les installations d'essais de GALAXIE ont été modifiées à la fin des années 1990 et la plateforme s'est enrichie de nouveaux dispositifs expérimentaux depuis 2000 pour s'adapter à l'étude des incendies conventionnels dans les installations du cycle du combustible et dans les réacteurs du parc électronucléaire français.

La plateforme GALAXIE comporte :

- une installation permettant d'effectuer des essais à caractère analytique, DANAIDES⁷⁴, concernant les effets séparés et conjugués de la chaleur et des suies sur le fonctionnement de différents équipements électriques (relais, disjoncteurs, etc.) ;
- un cône calorimètre de 0,3 MW, permettant de mesurer la chaleur de combustion de différents matériaux à l'air libre, et un panneau radiant permettant de soumettre des équipements à un flux de chaleur fixé en vue d'étudier leur dégradation, les deux dispositifs constituant l'installation CARINEA ;
- un cône calorimètre à plus grande échelle de 3 MW, disposé dans la tour SATURNE (2 000 m³), permettant d'étudier la combustion à l'air libre d'équipements de centrales nucléaires, comme des armoires électriques et des chemins de câbles électriques ;
- un calorimètre à atmosphère contrôlée, CADUCEE, permettant d'étudier l'effet d'un appauvrissement en oxygène sur la combustion de combustibles de différentes natures, les flux de chaleur rayonnés et la production de suies ;
- le caisson PLUTON de 400 m³, relié à un réseau de ventilation, permettant de réaliser des feux de puissance importante (jusqu'à 5 MW) avec différentes configurations de la ventilation. Actuellement, le dispositif HYDRA (de 2,4 m de hauteur, 3,6 m de longueur et 2,4 m de largeur), est installé dans ce caisson et permet d'étudier les mouvements des suies par vélocimétrie laser à travers l'ouverture d'une porte pour différentes configurations de la ventilation. Des dispositifs à petite échelle, tels que NYX et STYX, peuvent également être installés dans ce caisson ; ils sont dédiés à l'étude des écoulements de fumées au travers de trémies ou de portes ;
- le dispositif DIVA (Dispositif incendie ventilation et aérocontamination), constitué de trois locaux de 120 m³, d'un couloir de 150 m³ et d'un local à l'étage de 170 m³, reliés à des réseaux de la ventilation à configurations variables ; le dispositif peut résister à des dépressions et surpressions dans une gamme de - 100 hPa à + 520 hPa.

Les figures 7.2-a et 7.2-b montrent le positionnement des moyens d'essais dans les différents sujets d'étude ; la figure 7.2-c montre l'installation DIVA.

Tous ces dispositifs sont munis d'une instrumentation importante (jusqu'à 800 voies de mesure pour l'installation DIVA) permettant de mesurer les principales

74. Dispositif analytique pour l'étude lors d'un incendie du dysfonctionnement électrique par les suies.

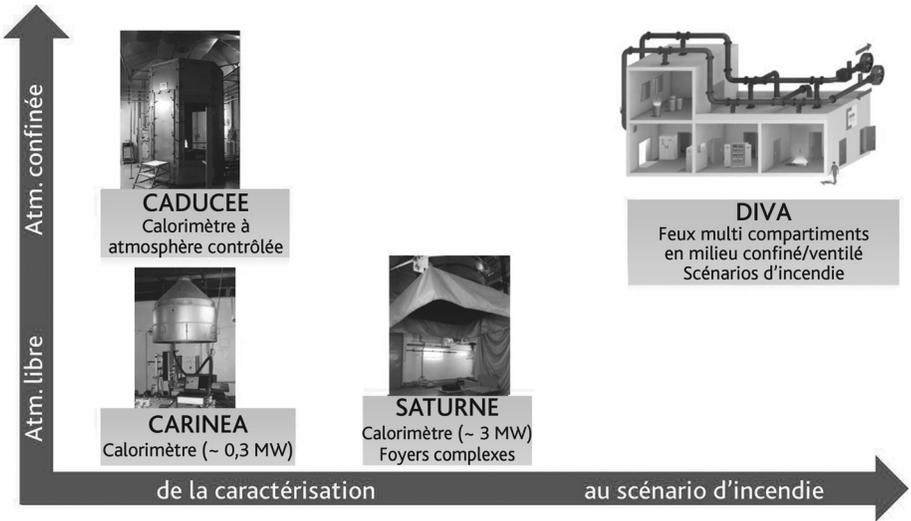


Figure 7.2-a. Positionnement des différents types et installations d'essais de caractérisation des foyers. @ Laurence Rigollet/IRSN.

caractéristiques des feux (températures, pressions, concentrations des gaz (produits de combustion et de pyrolyse), concentrations des suies, flux totaux et radiatifs aux parois) et d'effectuer des prélèvements analysés après essai (composition et granulométrie des suies). Des enregistrements vidéo sont également réalisés au cours des essais.

Comme dans les autres domaines de la sûreté, l'évaluation des conséquences d'un éventuel incendie dans un réacteur nucléaire nécessite de mettre en œuvre des logiciels de simulation comportant des modèles développés et validés sur la base d'essais. Leur

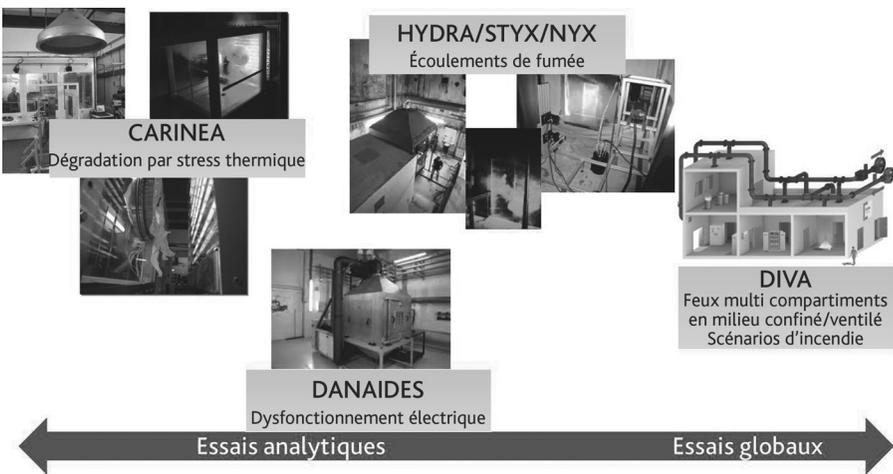


Figure 7.2-b. Positionnement des différents types et installations d'essais dédiés au comportement des « cibles ». @ Laurence Rigollet/IRSN.

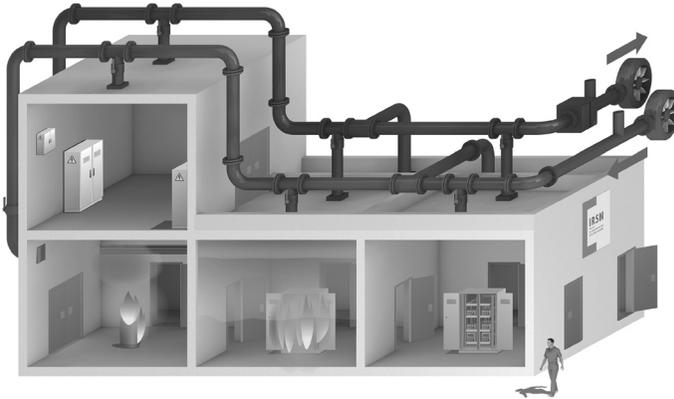


Figure 7.2-c. L'installation DIVA. © IRSN.

capacité à simuler des incendies réels dans les configurations rencontrées dans les installations nucléaires sont vérifiées lors de la confrontation avec des essais à grande échelle, réalisés dans des installations reproduisant au mieux ces configurations (confinement, ventilation). Ces outils sont évidemment essentiels pour les analyses des risques liés à l'incendie et pour les études de scénarios d'incendie en support au développement, par l'IRSN, de ses propres « EPS incendie » pour les réacteurs du parc électronucléaire.

L'IRSN développe et valide deux types d'outils de simulation :

- le logiciel SYLVIA⁷⁵, qui modélise le local en feu par deux zones homogènes dont la frontière (une surface plane horizontale) se déplace au cours du temps. Les locaux sont connectés entre eux par des portes (éventuellement coupe-feu) ouvertes ou fermées (les fuites sont modélisées) et par le réseau de ventilation. Ce dernier peut être modélisé dans son intégralité, avec les clapets, les filtres THE⁷⁶, les registres de réglage, les ventilateurs, etc. Des corrélations d'échange de masse et de chaleur entre zones, flammes et parois complètent les équations de bilan de masse et d'énergie de chacune des zones. Du fait de son faible temps de calcul, ce logiciel est utilisé par l'IRSN pour les études en support à l'expertise de sûreté et pour ses études probabilistes de sûreté relatives à l'incendie ;
- le logiciel ISIS (de type CFD), qui modélise des champs d'écoulements tridimensionnels, non stationnaires, faiblement compressibles, turbulents, réactifs ou chimiquement inertes ; il permet de calculer la combustion, les transferts thermiques et le transport des suies dans des locaux de grande taille, soit ventilés naturellement, soit confinés et ventilés mécaniquement. Du réseau de ventilation, seules les branches d'admission et d'extraction sont modélisées (voir une illustration de résultats obtenus avec ISIS en figure 7.3).

75. Système de logiciels pour l'étude de la ventilation de l'incendie et de l'aérocontamination.

76. Très haute efficacité.

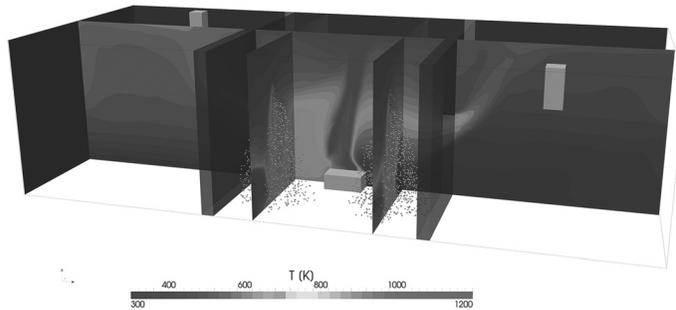


Figure 7.3. Carte tridimensionnelle de température résultant de la simulation d'un essai réalisé dans l'installation DIVA. © IRSN.

L'IRSN a effectué et dispose du couplage des logiciels SYLVIA et ISIS, ce qui permet de bénéficier dans le même outil à la fois de la précision d'ISIS qui simule en 3D le développement de l'incendie dans les locaux et la capacité de SYLVIA à décrire l'intégralité d'une installation avec un réseau complet de ventilation qui relie l'ensemble des locaux. Un tel couplage n'existe pas par ailleurs au plan international.

7.4. Les principaux programmes de recherche et leurs apports

Des progrès importants dans la connaissance des foyers confinés et ventilés, ainsi que dans leur modélisation, ont été réalisés depuis 1990 grâce notamment à des programmes de recherche effectués en collaboration avec AREVA pour la sûreté des usines de retraitement des combustibles (programmes FLIP⁷⁷ sur les feux de solvant et PICSEL⁷⁸ sur les feux d'armoires électriques). D'autres encore ont été réalisés ensuite grâce à des programmes internationaux PRISME et PRISME 2 (Propagation d'un incendie pour des scénarios multi-locaux élémentaires, 2006–2011 puis 2011–2016), menés par l'IRSN sous l'égide de l'OCDE/AEN, ciblés sur la sûreté des réacteurs nucléaires.

Ces programmes ont permis de valider les logiciels ISIS et SYLVIA, qui sont capables de simuler avec suffisamment de précision des scénarios d'incendie en milieu confiné avec conduite de la ventilation (arrêt du soufflage puis de l'extraction au bout d'un certain délai).

Lors des essais à grande échelle, des variations significatives de la pression des gaz dans les locaux (surpression à l'allumage, dépression à l'extinction et, dans certaines configurations, oscillations de grande amplitude) ont été observées. Ces variations de pression des gaz sont susceptibles de solliciter les dispositifs de sectorisation (portes et clapets coupe-feu) au-delà de leur dimensionnement et de favoriser la propagation de l'incendie dans une installation. Ce phénomène de variation de pression des gaz est lié au confinement du foyer et à la résistivité du réseau de ventilation. Le phénomène

77. Feux de liquide en interaction avec une paroi.

78. Propagation de l'incendie de combustibles solides dans un environnement laboratoires et usines.

d'oscillations ou d'instabilités de combustion est dû à la sous-oxygénation du foyer, conduisant à la succession de combustions de gaz de pyrolyse. Ces phénomènes pourraient également se produire dans une centrale nucléaire. Ces essais ont permis également de mettre en évidence l'effet des suies sur le fonctionnement d'équipements électriques ou électroniques.

Le programme PICSEL, mené en collaboration avec AREVA entre 2004 et 2011, a permis d'étudier les feux d'armoires électriques et leurs conséquences, expérimentalement dans les installations SATURNE (feu en atmosphère libre) et DIVA (feu dans des locaux confinés et ventilés), et de les modéliser. Ces résultats, obtenus lors d'un programme orienté plus particulièrement sur les configurations des installations du cycle du combustible, sont transposables aux réacteurs nucléaires.

L'un des enseignements de ce programme sur les feux d'armoires électriques (figure 7.4) est la puissance dégagée par ce foyer complexe (multi-constituants et mettant en jeu plusieurs types de matériaux). Les essais ont en particulier mis en évidence que la puissance d'un feu d'une armoire électrique avec les portes ouvertes était dix fois supérieure à celle d'une armoire électrique avec les portes fermées. Cet écart est dû au colmatage par les suies des ouïes des portes, limitant ainsi l'arrivée d'oxygène et donc la combustion dans l'armoire électrique avec les portes fermées. Ce sont les premiers essais de feux d'armoires électriques réalisés en atmosphère confinée et ventilée ; quelques essais avaient été



Figure 7.4. Feu d'une armoire électrique utilisée dans des installations du cycle du combustible réalisé dans l'installation SATURNE, dans le cadre du programme PICSEL. © Florent-Frédéric Vigroux/IRSN.

réalisés auparavant, aux Sandia National Laboratories (SNL) en 1987 et par VTT en 1994, mais n'avaient permis d'évaluer la puissance de ce type de foyer qu'en atmosphère libre.

Le programme PRISME a comporté 24 essais réalisés dans le dispositif DIVA, complétés par 13 essais à caractère plus analytique réalisés sous la hotte SATURNE. Il a permis d'acquérir des résultats sur la propagation des fumées et de gaz chauds dans les locaux voisins d'un local en feu, les délais avant dysfonctionnement de câbles situés dans le local en feu, le fonctionnement des clapets coupe-feu dans les réseaux de ventilation et la conduite de la ventilation pour éviter des effets de pression néfastes à la tenue des dispositifs de sectorisation. Le programme PRISME a permis de mieux comprendre l'effet de la ventilation (donc de la sous oxygénation du foyer) sur l'intensité de la puissance d'un feu qui se déclare dans un local confiné et ventilé, et notamment sur la durée de l'incendie. Selon le taux de renouvellement de la ventilation, le feu peut s'éteindre rapidement en raison de la décroissance de la concentration en oxygène dans le local en feu. Mais les essais du programme PRISME ont montré qu'un équilibre peut s'établir entre l'air provenant de la bouche de soufflage de la ventilation et la puissance du foyer : le combustible se consume alors plus lentement qu'à l'air libre (puissance plus faible) et en totalité. Par exemple, le même foyer peut durer 2,5 fois plus longtemps qu'en atmosphère libre dans un local ventilé avec un taux de renouvellement horaire de 4,7. Des corrélations et des modèles analytiques de pyrolyse en milieu confiné et ventilé (foyers sous oxygénés) ont été développés et validés. Ces modèles corrigent la puissance du foyer obtenue en atmosphère libre (mesurée sous la hotte SATURNE) par un facteur prenant en compte le taux de sous oxygénation du foyer dans le local confiné.

Le programme PRISME a aussi permis de quantifier l'effet, sur la propagation des fumées, de la convection « mixte » qui combine la convection forcée créée par la ventilation et la convection naturelle induite par le fort gradient vertical de température de l'atmosphère gazeuse dans un local (air « frais » au sol et fumées chaudes au plafond). La ventilation mécanique de la pièce incendiée peut significativement modifier les écoulements de gaz qui s'établissent naturellement au niveau d'une porte ouverte entre deux locaux. Selon le réglage du réseau de ventilation, la ventilation mécanique contribue à déséquilibrer les flux entrant et sortant du local en feu, et à changer la position du plan neutre (hauteur à laquelle les vitesses d'écoulement sont nulles en raison de l'inversion des débits) au niveau de la porte.

L'ensemble des données collectées pendant ce programme a permis d'évaluer la capacité des logiciels de calcul à simuler différents scénarios d'incendie. Les nouveaux modèles, notamment de pyrolyse, ont été implantés dans les logiciels des différents partenaires et validés grâce aux données expérimentales obtenues au cours de ce programme.

Le programme PRISME 2 (2011–2016) a été engagé pour étudier des thématiques liées à l'incendie complétant celles du premier programme (PRISME), comme la propagation de fumées entre locaux superposés, la propagation d'un incendie entre chemins de câbles ou encore les performances de systèmes d'aspersion. Ce programme comporte 22 essais dans le dispositif DIVA et une vingtaine d'essais sous le calorimètre SATURNE.

Les essais mettant en jeu un foyer simple (nappe liquide) dans un local ventilé, soit fermé soit connecté à un local supérieur par une trémie, ont mis en évidence un

phénomène d'oscillations, de forte amplitude et de très basse fréquence, des variables thermodynamiques dans l'installation traduisant une instabilité de la combustion fortement corrélée à la ventilation du local et au transfert de l'oxygène depuis le soufflage vers la zone de combustion. La compréhension de ces oscillations a nécessité des études expérimentales complémentaires pour identifier les paramètres de configuration et de scénario les provoquant. Des résultats ont été obtenus sur les transferts de fumées dans ces configurations dans des régimes de combustion relativement stables (*i.e.* non fortement oscillants) apportant des données nouvelles pour la validation des corrélations de transfert de fumées par une ouverture horizontale entre locaux fermés et ventilés et la validation des logiciels détaillés de type CFD.

Plusieurs types de câbles ont été testés au cours des essais réalisés dans DIVA (après leur caractérisation en atmosphère libre sous la hotte SATURNE) : câbles avec retardateur halogéné et non halogéné de flamme (composants réduisant la propagation d'un feu affectant un câble électrique). Les essais globaux dans DIVA ont mis en évidence que la propagation du feu sur cinq chemins de câbles horizontaux ou bien d'une armoire électrique vers les chemins de câbles au-dessus d'elle dépendait fortement de la nature des câbles et du taux de renouvellement d'air dans le local en feu. L'intensité et la durée du feu en milieu confiné et ventilé ne pouvait pas être corrélée avec le degré de résistance au feu des câbles. Ainsi, dans certaines conditions, les câbles réputés non propagateurs de flamme ont complètement brûlé pendant un feu qui a duré longtemps alors que les câbles réputés propagateurs de flamme ont conduit à un arrêt prématuré du feu par manque d'oxygène (dans ce cas, la masse de câble brûlée est faible suite à la consommation simultanée d'oxygène par le foyer constitué de l'armoire et des câbles électriques). Ce comportement, qui peut sembler paradoxal, s'explique simplement par le fait que l'emballement trop brutal de la combustion d'un foyer en milieu confiné peut induire une baisse de la concentration en oxygène, non compensée par l'apport d'oxygène par le soufflage de la ventilation, qui conduit aux conditions d'arrêt de la combustion au niveau du front de flamme. Par ailleurs, ces essais ont mis en évidence des réinflammations brutales (déflagrations de faible vitesse mais avec un pic de pression des gaz significatif) de gaz imbrûlés accumulés dans le local. Les résultats sont nouveaux et originaux et soulignent l'importance et l'intérêt de poursuivre l'étude de la combustion de chemins de câbles dans les installations confinées et ventilées pour élaborer des modèles de combustion (simplifiés de type corrélations et plus détaillés de type milieu poreux pour les logiciels CFD) prenant en compte les spécificités des chemins de câbles (type de câble, encombrement, espacement entre chemins de câbles, etc.).

Le programme PRISME 2 a également permis de collecter des données sur l'utilisation de systèmes d'extinction. Au cours de ces essais d'aspersion, le contact des gouttes avec la zone de flamme au-dessus du bac d'huile en feu et avec les murs a été évité de sorte que l'on a étudié l'effet de l'aspersion sur le contrôle du feu sans l'éteindre directement et en évitant les effets de bord liés aux parois. Ces données permettent de valider les logiciels de simulation et d'évaluer leur capacité à simuler les phénomènes mis en évidence au cours de ces essais : le refroidissement des gaz du local par le contact avec les gouttes d'eau et leur vaporisation, le fort brassage des gaz du local ayant entraîné une homogénéisation de ce volume gazeux et donc de la température et de la concentration

en oxygène et l'accroissement significatif de la combustion du foyer liquide (mesuré par la perte de masse au cours du temps de la nappe liquide).

Une protection industrielle visant à stopper la propagation d'un feu sur un chemin de câble a été mise en œuvre et testé sous la hotte SATURNE pour un ensemble de trois chemins de câbles superposés (figure 7.5). Le feu n'a pas franchi la barrière constituée par ces protections mais la démonstration à ce stade n'est pas totalement établie car les câbles ont un peu pyrolysé en aval des protections et les flammes auraient pu franchir les barrières si le nombre de chemins de câbles avait été plus grand ou bien si le feu s'était déroulé en milieu confiné favorisant ainsi le préchauffage des câbles en aval des protections.

La vitesse de propagation sur des chemins de câbles inclinés a été mesurée et comparée à celle sur des chemins de câbles horizontaux.

Un essai de propagation d'un feu d'armoire électrique, portes ouvertes, vers des armoires adjacentes et des chemins de câbles passant au-dessus des armoires électriques a été réalisé dans l'installation DIVA. Cet essai a mis en évidence une propagation du feu vers l'une des armoires contiguës de l'armoire en feu et une propagation moins intense qu'au cours du même essai d'une précédente campagne sans armoires adjacentes à l'armoire électrique en feu.



Figure 7.5. Une expérience de feu de chemins de câbles superposés. © Florent-Frédéric Vigroux/IRSN.

Les résultats des essais sont analysés dans le cadre des structures internationales des programmes PRISME et PRISME 2 (Allemagne, Belgique, Canada, Espagne, Finlande, France [IRSN, EDF, DGA, Université de Marseille], Japon, Suède, Royaume-Uni, Corée du Sud, États-Unis, et Pays-Bas, ces trois derniers uniquement pour PRISME). Des inter-comparaisons de logiciels ont été organisées par l'IRSN dans le cadre d'un groupe de travail adossé aux programmes PRISME et PRISME 2 : les différents partenaires ont confronté les résultats de simulations d'incendie aux données expérimentales. Une étude

de sensibilité réalisée avec six logiciels de simulation différents, portant sur six paramètres d'entrée (puissance du feu, fraction radiative de la flamme, propriétés thermiques des parois, etc.) a mis en évidence le fait que la puissance du feu est toujours le paramètre prépondérant, ce qui montre la nécessité de poursuivre les efforts pour en améliorer sa modélisation.

Comme autre exemple d'évaluation de la pertinence des logiciels de simulation, il convient de noter que le Groupe de recherche feux du CNRS a organisé un exercice d'intercomparaison des logiciels de calcul multidimensionnel à champs (logiciel ISIS précité, logiciel SATURNE développé par EDF et logiciel FDS⁷⁹ développé par le NIST⁸⁰ aux États-Unis), sur la base d'un essai de feu dans une chambre d'hôtel. L'exercice a montré une très grande dispersion des résultats des calculs par rapport aux grandeurs mesurées au cours de l'essai. Cette dispersion des résultats a notamment été attribuée par les experts à la difficulté de choisir le modèle de combustion approprié pour calculer la puissance instantanée du feu.

Ces résultats montrent la nécessité de poursuivre les travaux de recherche afin de mieux modéliser les caractéristiques des feux en développant des modèles de pyrolyse et de combustion de foyers de plus en plus complexes en milieu sous oxygéné. Il est également nécessaire d'approfondir les connaissances, notamment sur les instabilités de la combustion consécutives à la production et à l'inflammation de gaz imbrûlés, comme cela a été observé lors de l'étude des feux de câbles en atmosphère sous-oxygénée⁸¹ du programme PRISME 2, et sur les variations brutales de pression en découlant, afin d'améliorer les capacités prédictives des outils de simulation. La disposition des chemins de câbles (horizontale, verticale, mixte, près d'un mur, etc.) et leurs chargements en câbles (lâche, serré, etc.), ainsi que la nature de ces câbles, constituent un ensemble de paramètres dont les effets sur l'inflammabilité et la propagation du feu sont complexes à modéliser et requièrent de nouvelles données expérimentales. L'efficacité des dispositions de protection des câbles contre leur inflammation (enrubannage coupe-feu, capotage, etc.) mérite également d'être étudiée expérimentalement. Des premiers essais ont eu lieu au cours du programme PRISME 2 sur des enrubannages coupe-feu et ont permis d'acquérir des données sur leur tenue au feu dans des conditions réalistes.

En complément de ces programmes de recherche mettant en œuvre des essais globaux, des recherches à caractère académique sont menées sur la modélisation de la pyrolyse, phénomène fortement couplé aux conditions environnant le foyer, à la production de suies et au rayonnement des flammes. Les modèles, élaborés notamment dans le cadre du laboratoire de recherche commun ETIC, sont validés sur des essais à moyenne échelle, en particulier dans le calorimètre à atmosphère contrôlée CADUCEE. Pour cette validation, une métrologie adaptée est développée selon différents axes, en particulier la fluxmétrie et

79. *Fire Dynamics Simulator*.

80. National Institute of Standard and Technology.

81. Situation résultant d'une atmosphère confinée et ventilée ; le phénomène peut également se produire à la suite d'un échauffement accidentel des câbles, par effet Joule par exemple, provoquant un dégagement de gaz de pyrolyse.

des méthodes non intrusives mettant en jeu un laser (LII⁸², PIV⁸³, etc.). Les techniques de vélocimétrie laser, PIV (visualisation du mouvement des particules ensemencant le fluide en mouvement) permettent d'accéder aux champs de vitesse des écoulements et de mesurer l'intensité locale de la turbulence. Ces mesures sont indispensables pour valider les calculs d'aérodynamique et donc de transport des fumées et de la chaleur dans les locaux. La technique PIV a été mise en œuvre pour mesurer les champs de vitesse des écoulements par une porte, dans le dispositif HYDRA, et au niveau d'une trémie dans le dispositif STYX.

Les recherches menées dans le domaine de l'incendie s'intéressent aux effets d'un feu sur des équipements important pour la sûreté : à ce titre, notamment, les éléments de sectorisation, comme les portes et les clapets coupe-feu, ainsi que des matériels électroniques et électriques.

Pour les éléments de sectorisation, des essais d'aérodynamique sont réalisés dans l'installation STARMANIA de l'IRSN située sur le centre d'études de Saclay. Elle permet notamment de mesurer les effets de pression sur des composants coupe-feu (porte, clapet).

Les dysfonctionnements d'équipements électriques sous les effets de la chaleur et des suies ont été étudiés au cours des programmes d'essais à caractère analytique CATHODE (2007–2009), menés dans un four dénommé SIROCCO, puis DELTA (2014–2015) utilisant le dispositif DANAIDES (figure 7.6) ; les critères qui en ont été déduits peuvent être utilisés pour prévoir les limites de fonctionnement des équipements testés⁸⁴ lorsqu'un incendie s'est déclaré dans le local où ils se situent. De façon générale, les essais ont permis de caractériser trois zones (en termes de température et de concentration en suies) : une zone dans laquelle l'équipement reste fonctionnel, une zone dans laquelle des dysfonctionnements apparaissent tout en étant réversibles, et une zone de dysfonctionnements irréversibles. Au cours des essais mettant en jeu des cartes électroniques, l'effet néfaste des suies apparaît significativement dès que la concentration en suies atteint 1,5 g/m³ en réduisant la zone de bon fonctionnement des équipements.

EDF procède de son côté également à des essais à caractère analytique sur la plateforme expérimentale MILONGA, située au centre de Chatou. Ces essais consistent notamment à mesurer à l'aide d'un cône calorimètre de petite taille, couplé à un spectromètre infrarouge à transformée de Fourier et à un impacteur électrostatique à faible pression, les gaz et les suies dégagés par la combustion de différents matériaux, notamment ceux constitutifs des câbles. Les dysfonctionnements d'équipements électriques et électroniques exposés à la chaleur et aux fumées sont également étudiés dans le four MAFFÉ. Les résultats de ces essais sont utilisés par EDF dans ses démonstrations de sûreté, soumises à l'expertise de l'IRSN.

82. *Laser Induced Incandescence*. La LII permet de mesurer la concentration de suie et de valider les modèles de production de suie en milieu sous-oxygéné. Cette technique de mesure n'est actuellement pas mise en œuvre dans le cadre d'essais de feu car elle fait l'objet de recherches universitaires.

83. *Particle Image Velocimetry*.

84. Équipements testés : disjoncteurs D125, relais électroniques MICOM P921 et VIGIRACK A326E, convertisseurs de mesures analogiques LOREME.

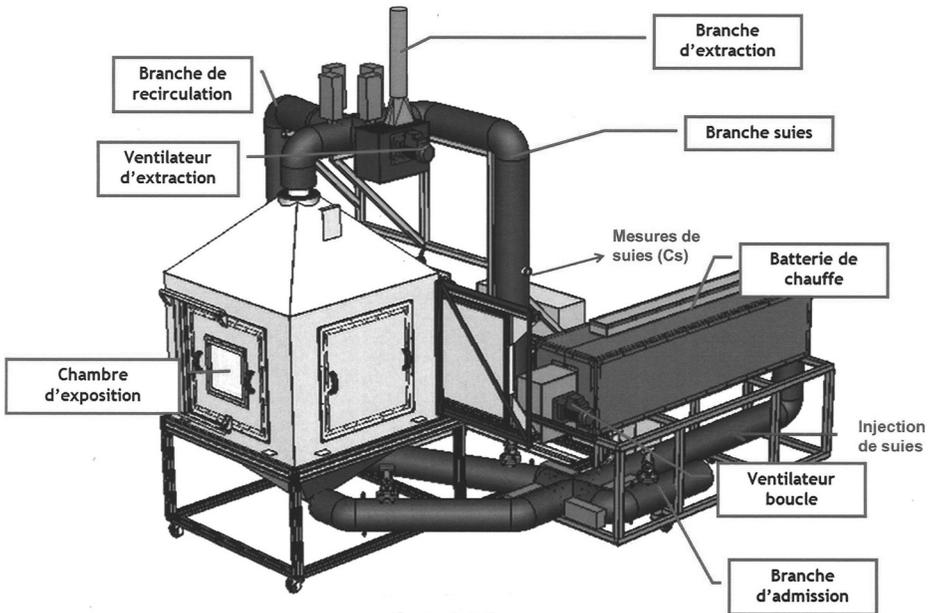


Figure 7.6. Le dispositif DANAIDES utilisé pour le programme DELTA. @ Marc Piller/IRSN.

Références

- [1] W. Werner, A. Angner, M. Röwekamp, J. Gauvain, The OECD fire database – conclusions from phase 2 and outlook. In: 20th International Conference on SMIRT, 11th International Post Conference Seminar on Fire Safety in Nuclear Power Plants and Installations, Helsinki (Finland), 2009.
- [2] Fire Risk Analysis, Fire Simulation, Fire Spreading and Impact of Smoke and Heat on Instrumentation Electronics – State-Of-the-Art Report (SOAR), NEA/CSNI/R(1999)27.
- [3] Specialist meeting on fire protection systems in nuclear power plants – GRS, Cologne, Germany, NEA/CSNI/R(1994)9, December 1993.
- [4] Proceedings of the CSNI specialist meeting on interaction of fire and explosion with ventilation systems in nuclear facilities – Los Alamos National Laboratories, New Mexico, USA, NEA/CSNI-83, April 1983.