

IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Faire avancer la sûreté nucléaire

Mémoire d'habilitation à diriger des recherches

Contribution à l'étude de la dynamique des incendies en milieu confiné et mécaniquement ventilé

Hugues PRÉTREL



Collection HDR

Éditorial

L'[habilitation à diriger les recherches \(HDR\)](#) est un diplôme délivré par un établissement universitaire. Pour un chercheur, elle constitue la consécration d'un cycle - typiquement d'une dizaine d'année - d'activité de recherche remarquable dans son domaine et une double reconnaissance : bien sûr, celle de l'atteinte d'un haut niveau scientifique, mais surtout celle de la capacité à impulser un ensemble cohérent de travaux articulés au service d'un défi scientifique. Cette reconnaissance renforce également l'aptitude à encadrer des étudiants en formation doctorale ou postdoctorale. Elle est précieuse tant pour les chercheurs que pour l'[Institut](#), compte tenu de sa volonté de multiplier les configurations de partenariat où la vision scientifique à moyen terme joue un rôle déterminant.

Le travail présenté dans ce douzième numéro de la collection [HDR](#) a été réalisé par Hugues PRÉTREL. Il concrétise la volonté d'une mise en lumière des travaux de recherche de l'[Institut](#), attendue par différentes parties prenantes de la gestion des risques nucléaires et radiologiques et s'adresse plus largement à la communauté académique.

Illustrations en page de couverture : flamme de diffusion lors de la combustion d'un feu de nappe d'hydrocarbure.

ISBN 978-2-9545237-6-7

@2018, [IRSN](#). Tous droits réservés.

Je remercie les Professeurs Arnaud Trouvé de l'[université du Maryland](#) (USA), Jean-Pierre Garo de l'[université de Poitiers](#) et Bart Merci de l'[université de Ghent](#) (Belgique) d'avoir accepté de rapporter le mémoire et ainsi de participer au jury de soutenance. Je remercie également le Professeur Joël Quinard de l'[université d'Aix-Marseille](#), le Professeur Sylvain Brohez de l'[université de Mons](#) (Belgique) et Richard Gonzalez de l'[IRSN](#) d'avoir accepté d'être membres du jury.

Ce projet d'HDR a été initié et construit avec le Professeur Olivier Vauquelin de l'[Institut universitaire des systèmes thermiques industriels](#) (IUSTI) de l'[université d'Aix-Marseille](#). Je tiens à lui exprimer toute ma gratitude pour son implication dans ce projet. Plus largement, avec Olivier Vauquelin, nous avons initié des échanges scientifiques depuis 2003. Sa disponibilité, son intégrité et sa liberté de jugement ont été une source importante de réflexion permettant de construire une activité de recherche.

Ce projet d'HDR a également été mis en place avec le concours de l'[Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire](#) (IRSN). L'intérêt que porte l'IRSN à la recherche a été une condition nécessaire pour mener ce projet à terme. À ce titre, je souhaite remercier les personnes en charge du pilotage des activités de recherche de l'Institut et plus particulièrement, Jean-Claude Micaelli, Directeur de la recherche en sûreté du pôle de sûreté nucléaire (PSN-RES), Richard Gonzalez, adjoint au Directeur, Jean Battiston, chef du Service des agressions internes et des risques industriels (SA2I) et Madame Laurence Rigollet, adjointe au chef du SA2I.

Le travail de recherche, présenté dans ce manuscrit, a été réalisé au [Laboratoire d'expérimentation des feux](#) (LEF) de l'[IRSN](#) et dans le cadre de collaborations avec l'[IUSTI](#) et d'autres laboratoires de l'IRSN. Je souhaite remercier l'ensemble des personnes travaillant dans ces équipes pour leur contribution à la réalisation de ces travaux de recherche et avec qui j'ai pu échanger.

Je tiens à remercier tout particulièrement les doctorants, Caroline Lucchesi et Kevin Varrall, les post-doctorants Stéphane Moreau et Amine Koched, l'ensemble des étudiants stagiaires, les techniciens du [LEF](#) dont Serge Pons pour l'encadrement technique des doctorants. Je remercie les chercheurs Laurent Audouin, chef du LEF, Sylvain Suard, Pascal Zavaleta, Mickael Coutin, Jean-Marc Such, William Le Saux, Stéphane Mélis, Samuel Vaux, Marc Forestier, Philippe Querre, Marc Piller, François-Xavier Ouf, Jérôme Richard et Laurent Bouilloux de l'[IRSN](#) et enfin Olivier Vauquelin, Philippe Bournot, Fabien Candelier de l'[université Aix-Marseille](#), pour les travaux et publications scientifiques que nous avons pu entreprendre ensemble.

Université d'Aix-Marseille, faculté des sciences
Habilitation à diriger des recherches
(HDR)

Contribution à l'étude de la dynamique des incendies en milieu confiné et mécaniquement ventilé

27 janvier 2016

Hugues PRÉTREL
Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire

Composition du jury :

Rapporteurs :

Arnaud Trouvé
Jean-Pierre Garo
Bart Merci

Université du Maryland, États-Unis
Université de Poitiers
Université de Ghent, Belgique

Examineurs :

Joël Quinard
Sylvain Brohez

Université d'Aix Marseille
Université de Mons, Belgique

Tuteur :

Olivier Vauquelin

Université d'Aix-Marseille

Invité :

Richard Gonzalez

IRSN/PSN/RES

Résumé

Ce mémoire présente une contribution à l'étude de la dynamique des incendies en milieu confiné et mécaniquement ventilé. Il propose une synthèse des travaux de recherche réalisés durant une dizaine d'années sur des mécanismes physiques rencontrés au cours d'un incendie. Ces recherches sont motivées par la nécessité d'améliorer la connaissance et de développer des outils de calculs prédictifs permettant la maîtrise des risques associés aux incendies dans les installations nucléaires. Après une introduction rappelant le cadre des activités de recherche et mon parcours scientifique, le mémoire aborde quatre thèmes spécifiques aux incendies en milieux confinés et ventilés : les régimes de combustion en milieu sous-oxygéné, la dynamique des incendies et les variations de pression associées, la propagation des fumées et la métrologie pour des expériences d'incendie à grande échelle.

Le premier chapitre présente le comportement particulier de la combustion d'un feu de nappe en régime sous-ventilé. À partir d'expérimentations à grande échelle, l'influence de la concentration d'oxygène et de la température des gaz sur la puissance de l'incendie est présentée. L'interprétation des expériences met en avant les rôles prédominants de la ventilation et des propriétés thermiques du compartiment sur le déroulement de l'incendie.

La seconde partie illustre à travers l'analyse d'expérimentations de feux de nappes, le phénomène des variations de pression des gaz induites par la dynamique de l'incendie. Ces variations de pression résultent du changement des conditions thermodynamiques des gaz induit par le feu et le caractère confiné du compartiment. Elles peuvent avoir un impact sur la sûreté d'une installation industrielle.

La troisième partie présente une synthèse de travaux de recherche sur la propagation des fumées dans des enceintes confinées et mécaniquement ventilées. Les thèmes abordés concernent le rôle du confinement et le rôle de la stratification verticale des fumées sur les écoulements de panache, sous-plafond et les écoulements de transfert à travers un passage de porte ou à travers la section horizontale d'une trémie.

Enfin, une dernière partie traite des développements métrologiques pour la réalisation d'expériences d'incendie à grande échelle. Un exemple de développement d'une méthode inverse pour la détermination expérimentale de la puissance d'un feu est proposé. Ce travail met en avant l'intérêt des techniques de mesure « inverses » pour

les expériences d'**incendie** au cours desquelles certaines grandeurs sont difficilement mesurables.

Le mémoire conclut sur un bilan des acquis de cette recherche et une proposition de thématiques futures.

Le détail de mon parcours professionnel et la liste des publications sont présentés dans le dernier chapitre.

Sommaire

Chapitre 1

Introduction	13
1.1 Un cadre pour une activité de recherche sur l'incendie	13
1.2 Les motivations d'une activité recherche	14
1.3 Mon parcours scientifique	15
1.4 Le mémoire	17

Chapitre 2

Combustion en régime sous-ventilé lors d'un incendie de feu de nappe	19
2.1 Introduction	20
2.2 Variation spatiale et temporelle de l'oxygène dans un local	22
2.2.1 Variation temporelle	22
2.2.2 Variation spatiale	27
2.3 Influence de la déplétion en oxygène sur le débit de pyrolyse	28
2.3.1 Observations	28
2.3.2 Débit de perte de masse (MLR) en milieu ouvert	30
2.3.3 Loi de comportement du débit de perte de masse en fonction de la concentration en oxygène	31
2.3.4 Évaluation du débit de pyrolyse en milieu confiné	32
2.4 Influence de la température des gaz sur le débit de pyrolyse	34
2.4.1 Observations sur deux essais conduisant à des conditions de viciation identiques	34
2.4.2 Analyse macroscopique des régimes de sous-ventilations	36
2.4.3 Modèle du réacteur bien mélangé pour un compartiment ventilé mécaniquement	36
2.4.4 Confrontation du modèle du réacteur bien mélangé sur des expériences de feu de nappe	42
2.5 Conclusion	43
Bibliographie	45

Chapitre 3

Dynamique des régimes de combustion en milieu confiné	47
3.1 Introduction	48
3.2 Variation de la pression des gaz dans un local	50
3.3 Conséquences sur les débits de ventilation	53
3.4 Analyse paramétrique	54

3.4.1	Influence de la puissance du feu	54
3.4.2	Influence de la résistance aéroulque sur la pression des gaz dans le local	55
3.4.3	Approche corrélatiue des paramètres influents	57
3.5	Variation de pression lors d'actions de pilotage de la ventilation	58
3.6	Rôle de la pression lors de phénomènes instables	60
3.6.1	Indicateurs du comportement instable de l'incendie	60
3.6.2	Implication de la pression dans les mécanismes instables de combustion	62
3.7	Conclusion	63
	Bibliographie	65

Chapitre 4

	Propagation des fumées d'incendie	67
4.1	Introduction	68
4.2	Panache thermique et écoulement sous plafond en milieu stratifié	70
4.2.1	Effet du confinement sur un écoulement de panache dans une enceinte	71
4.2.2	Écoulement sous-plafond en milieu confiné	75
4.3	Stratification thermique	77
4.3.1	Exemples de stratification thermique	77
4.3.2	Méthode de caractérisation de la stratification verticale des fumées	79
4.3.3	Influence de la ventilation mécanique et des écoulements de transfert sur la stratification thermique	81
4.4	Écoulement de transferts aux niveaux d'ouvertures	82
4.4.1	Écoulement à un passage de porte	83
4.4.2	Écoulement à travers une trémie horizontale	87
4.5	Application de diagnostic laser sur les écoulements de fumées	89
4.6	Conclusion	90
	Bibliographie	92

Chapitre 5

	Méroulogie pour les expériences d'incendies à grande échelle	95
5.1	Introduction	96
5.2	Éléments sur la calorimétrie pour l'incendie	98
5.3	Description de la méthode chimique	100
5.3.1	Formulation générale développée en milieu ouvert	100
5.3.2	Application pour un environnement fermé	102

5.3.3	Évaluation expérimentale des grandeurs recherchées	102
5.4	Application à un feu de gaz dans un local	103
5.4.1	Description de l'expérience	103
5.4.2	Détermination expérimentale de la puissance	105
5.4.3	Analyse de méthodes OC et CDG	106
5.5	Application pour une configuration multi-local	108
5.5.1	Description de l'expérience	108
5.5.2	Détermination expérimentale de la puissance	109
5.5.3	Analyse comparative entre les approches (V) et (D)	110
5.6	Application à des feux d'hydrocarbure	112
5.6.1	Description de la série d'expériences	112
5.6.2	Évaluation des bilans d'espèces	112
5.6.3	Détermination expérimentale de la puissance	113
5.7	Conclusion	115
	Bibliographie	116

Chapitre 6

	Conclusion	119
6.1	Bilans des acquis sur les axes de recherche présentés	120
6.1.1	Le couplage entre la source incendie et le milieu environnant	120
6.1.2	La dynamique des feux et les variations de pression	120
6.1.3	La propagation des fumées dans un environnement confiné et mécaniquement ventilé	121
6.1.4	Les expérimentations à grande échelle	121
6.2	Les applications de cette recherche	121
6.3	Des axes de recherche futures	122
6.3.1	Combustion en régime sous-ventilé	122
6.3.2	Combustion de solides	123
6.3.3	Production de suie	123
6.3.4	Les écoulements de fumées en milieux confinés	123
6.3.5	La métrologie pour les expérimentations incendie	124

Chapitre 7

	Présentation personnelle	125
7.1	<i>Curriculum vitae</i>	125
7.2	Publications	134
7.2.1	Articles dans des revues internationales ou nationales à comité de lecture (ACL)	134

7.2.2	Communications orales avec actes dans un congrès international (ACTI)	136
7.2.3	Communications orales avec actes dans un congrès national (ACTN)	139
7.2.4	Communications par affiche dans un congrès international ou national (AFF)	141
7.2.5	Communications orales sans actes dans un congrès international ou national (COM)	142

Chapitre 1

Introduction

1.1 Un cadre pour une activité de recherche sur l'incendie

L'**incendie** est un risque majeur du fait de son effet destructeur sur l'activité économique et humaine.

Dans les secteurs d'activités tels que l'industrie, les transports ou l'énergie, la probabilité d'occurrence d'un **incendie** est significative en raison principalement de la présence de matières inflammables dans les procédés industriels (plateformes pétrolières, industries chimiques, entrepôts de stockages, avions, véhicule, centrales thermiques...). Dans le secteur de l'énergie nucléaire, le risque incendie présente un caractère majeur étant donné son possible impact sur le risque radiologique ce qui impose des exigences de sûreté élevée.

L'obligation de réduire la probabilité d'occurrence d'un **incendie** et d'en limiter son impact sur l'environnement, conduit au développement d'activités spécifiques. Celles-ci concernent la production de biens pour la surveillance (détecteurs), l'intervention (systèmes d'aspersion, moyens mobiles terrestres et aériens) ainsi que la réalisation d'études pour le dimensionnement d'équipements et l'analyse des risques. Ces domaines d'activités sont alimentés par des programmes de recherche permettant de mieux comprendre le déroulement d'un incendie et de développer des moyens appropriés à la maîtrise et à la réduction des risques tels que des nouvelles techniques de détection et de prévention, des logiciels de simulation des incendies, le développement de textes réglementaires.

1.2 Les motivations d'une activité recherche

La recherche sur les **incendies** se justifie par la complexité du phénomène lié au nombre important des mécanismes physiques et chimiques mis en jeu mais aussi à la diversité des configurations géométriques et des scénarios envisageables. La compréhension d'un incendie et l'évaluation de ses conséquences sur une installation nécessitent donc d'améliorer les connaissances sur la dégradation des matériaux combustibles, les transferts de chaleur, la combustion (figure 1-a), la dynamique des gaz, les échanges à travers les milieux diphasiques. Lors d'un incendie, ces phénomènes interagissent fortement entre eux, ce couplage complexifiant l'étude des feux et leur modélisation. Une seconde particularité des incendies est le large spectre de dimensions caractéristiques, de l'échelle moléculaire associée au processus de combustion par exemple, à l'échelle dite « industrielle » de plusieurs mètres pour le processus de propagation des fumées. La compréhension et la prédiction de cet ensemble de phénomènes couplés, sur un large spectre de dimensions caractéristiques constituent un challenge scientifique.

Les enjeux de la recherche portent principalement sur la production de connaissances permettant la mise au point de logiciels de simulation du déroulement d'un **incendie**. Les applications de ces outils concernent, par exemple, les études de risques, le positionnement des systèmes de détection, le dimensionnement des techniques d'extinction, la définition des protocoles d'évacuation.

Les thèmes de recherche traitent notamment de la source **incendie** (figure 1-b), de la propagation des fumées, du comportement des matériaux au feu, des techniques d'extinction et d'évacuation. Pour les applications dans le secteur nucléaire, les thématiques spécifiques concernent la géométrie des lieux (compartiments fermés et ventilés mécaniquement), la nature des combustibles (hydrocarbures, fûts de

déchets, câbles, équipements électriques, boîtes à gants), l'impact de l'incendie sur les équipements assurant la sûreté de l'installation nucléaire vis-à-vis d'autres risques (radiologiques notamment).

L'enjeu de la recherche sur l'incendie pour des applications nucléaires est de fournir les connaissances nécessaires (en termes de données expérimentales, modèles physiques et logiciels de calcul) permettant de proposer une évaluation réaliste du déroulement d'un incendie et de ses conséquences. L'évaluation de la quantité de fumées produites par un incendie, véhiculant le cas échéant des aérosols radioactifs si le feu a été en contact avec des matières radioactives (figure 1-c), ou de la probabilité de dysfonctionnement électrique d'un équipement de sûreté lors d'un incendie, sont deux exemples de questions auxquelles les actions de recherche doivent permettre de répondre.

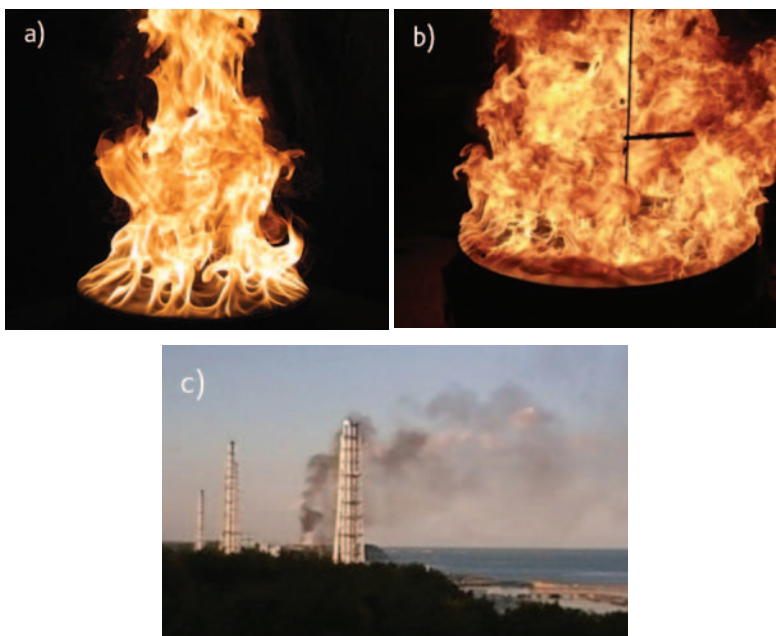


Figure 1. Illustrations : (a) flamme de diffusion (© IRSN), (b) feu de nappe d'hydrocarbure (© IRSN), (c) dégagement de fumée lors de l'accident de la centrale nucléaire Fukushima-Daiichi (© DR).

1.3 Mon parcours scientifique

Après une thèse sur les techniques d'aspersion pour la protection du rayonnement infrarouge issu d'un incendie à l'Institut von Karman de dynamique des fluides

(Belgique) et un post-doctorat sur les instabilités de combustion dans un brûleur de turbine à gaz à l'[université de Cambridge](#) (Royaume-Uni), j'ai intégré le [Laboratoire d'expérimentation des feux \(LEF\)](#) du [CEA/IPSN](#) en 1998, devenu ensuite l'[Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire \(IRSN\)](#) en 2002. Mon activité de recherche s'est progressivement développée au fil des programmes, à vocation plus spécifiquement expérimentale, réalisés au LEF et des collaborations avec des laboratoires universitaires ([IUSTI de l'université d'Aix-Marseille](#)).

Des axes de recherches sont progressivement apparus dans mon travail :

- comprendre et modéliser les feux en régime sous-oxygéné ;
- caractériser en milieu fermé le couplage entre la combustion du foyer et la thermodynamique du milieu environnant (instabilités de combustion) ;
- caractériser les écoulements de fumées dans une installation nucléaire ;
- améliorer la métrologie des essais globaux d'[incendie](#) (fluxmétrie et vélocimétrie laser).

Ces travaux de recherche reposent, d'une part, sur la réalisation d'expérimentations dans les dispositifs de grande dimension de l'[IRSN](#), d'autre part sur des activités de recherche plus académiques sur des dispositifs à échelle réduite en collaboration avec des laboratoires universitaires. Les expérimentations à grande échelle sont en général des essais qui mettent en jeu l'ensemble des phénomènes dans des configurations représentatives de la réalité industrielle (on les appelle des essais globaux) et ils confèrent une originalité à ces travaux de recherche. J'ai pu mettre au point et réaliser environ 75 essais globaux dans les dispositifs [DIVA](#) (dispositif, unique en Europe, comprenant quatre locaux en béton de 120 m³ et un couloir, ventilés mécaniquement), [PLUTON](#) (dispositif en béton de 400 m³, ventilé mécaniquement) et [SATURNE](#) (hotte calorimétrique d'environ 2 MW).

J'ai commencé à aborder dans un premier temps la problématique des panaches en milieu confiné lors du programme FLIP¹ (1999-2002). Ensuite, la campagne d'essais [PRISME²-SOURCE](#) a donné lieu à l'étude des régimes de combustion sous-ventilés et de la stratification thermique des fumées (2003-2006). Les programmes [PRISME-LEAK](#) et [PRISME-INTEGRAL](#) (2008-2011) m'ont permis d'étudier les écoulements

1 Le programme FLIP, mené dans le cadre d'un programme d'intérêt commun entre l'[IRSN](#) et [AREVA](#), visait à étudier le comportement d'un feu de nappe de solvant (TPH/TBP) dans un local confiné et ventilé et de ses conséquences sur l'installation avec et sans conduite de la ventilation.

2 Le programme international PRISME, mené sous l'égide de l'[OCDE](#), visait à étudier, dans des configurations mettant en jeu plusieurs locaux, les mécanismes de propagation des fumées et de la chaleur d'un local siège d'un incendie vers les locaux adjacents.

de transfert de fumées en milieu confiné avec le support d'une thèse (2005-2008). Ensuite, le programme PRISME³-VSP (2012-2013) m'a conduit à étudier les écoulements à travers une trémie et les phénomènes d'instabilités de combustion. L'étude des écoulements à travers une trémie a donné lieu à l'encadrement d'une thèse (2012-2015). Dernièrement, le programme PRISME2-FES (2014-2015) m'a conduit à étudier l'influence des systèmes d'aspersion sur la propagation des fumées d'incendie. En parallèle à ces programmes expérimentaux à grande échelle, j'ai pu conduire des activités de recherche en métrologie avec deux post-doctorants sur les mesures de concentrations de suie par aspiration et les mesures de champs de vitesse par Stéréo PIV.

L'ensemble de ce travail a été réalisé sur une période d'une quinzaine d'années avec le concours de l'équipe technique du LEF, de 22 étudiants stagiaires niveau Master 2, de deux doctorants et deux post-doctorants. Il s'est nourri des échanges avec les ingénieurs-chercheurs de l'IRSN et les chercheurs universitaires de l'IUSTI notamment.

Ce travail a été consolidé par mon implication dans les activités d'un laboratoire de recherche commun (LRC) entre l'IRSN, le CNRS et l'université Aix-Marseille. Ce Laboratoire d'étude de l'incendie en milieu confiné (ETiC), créé en 2010, rassemble environ 10 chercheurs et a pour objectif de structurer des axes de recherche communs entre l'AMU et l'IRSN sur l'incendie, en réunissant les compétences académiques du laboratoire universitaire IUSTI et les préoccupations appliquées ainsi que les installations expérimentales dédiées de l'IRSN. Depuis 2014, je co-dirige ce laboratoire commun de recherche avec le Professeur O. Vauquelin.

1.4 Le mémoire

Ce mémoire développe quatre thèmes choisis pour leurs spécificités vis-à-vis des incendies en milieux confinés et mécaniquement ventilés que j'ai été amené à développer plus particulièrement.

Le premier thème concerne la combustion en régime sous ventilé. C'est un des enjeux de recherche majeurs sur la thématique de l'incendie et une problématique prioritaire lors de l'analyse d'expérimentations à grande échelle pour des scénarios confinés et

3 Le programme international PRISME2, mené également sous l'égide de l'OCDE, visait à étudier expérimentalement dans des configurations mettant en jeu plusieurs locaux, la propagation (verticale et horizontale) des fumées et de la chaleur d'un local siège de l'incendie vers les locaux adjacents ainsi que l'effet sur le développement d'un feu de systèmes par aspersion d'eau.

ventilés. La contribution présentée dans ce mémoire met en avant l'apport des essais globaux sur cette thématique.

Le second thème aborde la dynamique des régimes de combustion et plus particulièrement la variation de la pression des gaz dans le compartiment qui la caractérise. Ce phénomène est une des conséquences de la variation de la puissance d'un incendie dans une enceinte présentant un niveau d'étanchéité important, souvent recherché dans l'industrie nucléaire pour assurer le confinement de matières radioactives. C'est un thème que l'IRSN a porté ces dernières années dans la communauté scientifique en raison de son importance lors d'expérimentations et d'études de sûreté.

Un troisième thème traite des particularités des écoulements de fumées en milieu confiné et ventilé. La propagation des fumées présente une spécificité dans le domaine nucléaire en raison des géométries rencontrées (trémie, porte, clapets, fuite...) et de la présence de ventilations mécaniques des enceintes (écoulements de convection mixte couplant des forces de flottabilité et d'inertie). Ce thème a été central pour deux projets de recherche internationaux (PRISME et PRISME2) et a ainsi fait l'objet d'une recherche approfondie notamment *via* deux thèses et un post-doc que j'ai co-encadrés.

Enfin, un dernier thème traite de la métrologie lors d'expérimentations sur l'incendie. Ce thème est de première importance dans le cadre d'un laboratoire en charge d'expérimentations pour l'étude des incendies. La réalisation d'essais à grande échelle, dans des milieux agressifs (température élevée, toxicité, présence de suie) et la demande de données de plus en plus précises et détaillées pour la validation des logiciels de simulation de type CFD imposent une réflexion permanente sur la métrologie, sa mise en œuvre et le développement du traitement des données. Afin d'illustrer cette thématique, la mise au point d'une méthode d'analyse calorimétrique d'un feu dans un compartiment ventilé mécaniquement est présentée. Cette méthode utilise certaines grandeurs mesurées au cours des essais globaux.

Les thèmes sont déclinés et illustrés à partir des travaux de recherche que j'ai menés au laboratoire. Une conclusion met en perspective différents thèmes de recherche qu'il me semble important d'entreprendre.

Le dernier chapitre présente mon parcours professionnel et la liste de mes publications.

Chapitre 2

Combustion en régime sous-ventilé lors d'un incendie de feu de nappe

Ce chapitre présente le comportement particulier de la combustion d'un feu de nappe en régime sous-ventilé. À partir d'expérimentations à grande échelle, l'influence de la concentration d'oxygène et de la température des gaz sur la puissance de l'incendie est présentée. L'interprétation des expériences met en exergue le rôle prédominant de la ventilation et des propriétés thermiques de l'enceinte sur le déroulement de l'incendie. Ces résultats mettent en perspective les sujets de recherche relatifs à l'influence des conditions environnementales sur la pyrolyse, le processus d'extinction et la dynamique des incendies en milieux confinés.

Nomenclature

A	Surface (m ²)	Z	Altitude (m)
B, C	Constante	Lettre grecque	
D	Diamètre (m)	ρ	Masse volumique (kg/m ³)
\dot{m} ou MLR	Débit de perte de masse (kg/s)	Θ	Température adimensionnée (-)
m	Masse (kg)	ϕ_v	Facteur de ventilation (-)
M	Débit de perte de masse adimensionné (-)	Indice et exposant	
k	Facteur thermique (-)	v	Ventilation
q_v	Débit volumique (m ³ /s)	ext	Extinction
r	Coefficient stœchiométrique	in	Admission
S	Section (m ²)	ex	Extraction
t	Temps (s)	f	Fuel
Tr	Taux de renouvellement (h ⁻¹)	LOI	Limite inférieure d'inflammation
T	Température (°C)	$equi$	Équilibre
V	Volume (m ³)	o	Condition ambiante ou initiale
X, x	Fraction molaire	cri	Critique
Y, y	Fraction massique		

2.1 Introduction

La réaction de combustion est un processus d'oxydation exothermique impliquant un combustible, un comburant (l'oxygène de l'air) et une source d'énergie assurant l'activation de la réaction chimique. Initialement, la combustion est initiée par une source externe de chaleur et s'entretient ensuite par la chaleur de réaction qu'elle génère. La formulation chimique de la réaction de combustion spécifie les proportions entre le comburant et l'oxygène, ou conditions stœchiométriques, traduit par le paramètre r , rapport des masses de comburant (oxygène) et de combustible. Si la quantité d'oxygène disponible dans l'environnement est supérieure à celle nécessaire à la réaction de combustion, le régime de combustion de l'**incendie** est dit « sur-ventilé » ou « bien-ventilé ». Les propriétés du comburant et de l'environnement sont constants (21 % vol) et le déroulement de l'incendie est essentiellement contrôlé par les propriétés du combustible. Si la quantité d'oxygène disponible diminue au cours du temps et devient inférieure à celle nécessaire à la réaction

de combustion, le régime est dit « riche en combustible » (ou « sous-ventilé » ou « sous-oxygéné »). Dans ce cas, les caractéristiques (température ou concentration) de l'environnement extérieur et du comburant vont être modifiées et peuvent influencer en retour la réaction de combustion et le déroulement de l'incendie (figure 2). Celui-ci peut présenter alors des comportements complexes, stables ou chaotiques issus d'un couplage entre l'incendie (zone de combustion) et son environnement.

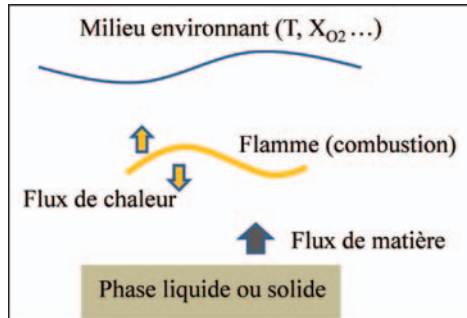


Figure 2. Illustration des mécanismes physiques impliqués lors d'une combustion en régime sous-ventilé.



Figure 3. Photographie de la combustion d'un feu de nappe en régime sous-ventilé. © IRSN.

Pour des régimes de combustion dit « sous-ventilés », les modèles prédictifs classiques sont insuffisants et des modélisations plus avancées doivent être développées. Cette thématique est un enjeu de recherche majeur pour la compréhension des incendies dans les installations industrielles.

Les situations de sous-ventilation correspondent à des scénarios pour lesquels le débit massique de combustible mis en jeu est important vis-à-vis du débit de ventilation de l'enceinte. Ce dernier est généralement dimensionné pour renouveler

l'air du local et assurer son confinement dynamique et est très inférieur aux valeurs permettant d'assurer une combustion en régime « bien ventilé ». Cette situation est très fréquemment rencontrée pour les scénarios d'**incendie** dans les installations industrielles en général et pour les installations nucléaires en particulier. Les enjeux de recherche sont la description des caractéristiques du milieu environnant le foyer et notamment les flux thermiques que ce milieu peut renvoyer vers le feu et l'influence de ces conditions environnantes variables sur la réaction de combustion.

Cette partie présente des travaux de recherche menés sur la combustion en régime sous-ventilé pour des **incendies** dans des enceintes fermées et ventilées mécaniquement. Ces travaux sont issus d'expérimentations à grandes échelles supportées par une analyse théorique basée sur une description macroscopique. Les points abordés sont la variation de comburant dans l'environnement, l'influence de la déplétion en oxygène sur la réaction de combustion, l'influence de la température de l'environnement sur la réaction de combustion et l'utilisation d'une analyse macroscopique des régimes de sous-ventilation.

Les résultats présentés dans ce chapitre sont issus d'expériences réalisées dans le cadre des programmes internationaux **PRISME** et **PRISME2** et avec la collaboration des ingénieurs de l'**IRSN**, W. Le Saux, L. Audouin et S. Suard. Ils ont fait l'objet de publications citées en référence.

2.2 Variation spatiale et temporelle de l'oxygène dans un local

Une caractéristique typique des **incendies** dans une enceinte fermée est la variation temporelle et spatiale de la concentration de comburant (ici d'oxygène) en raison du régime de combustion sous-ventilé.

2.2.1 Variation temporelle

Lors d'un **incendie** dans une enceinte fermée et ventilée mécaniquement, la teneur en oxygène diminue en raison de la consommation de l'oxygène par l'incendie qui n'est pas compensée par l'apport d'oxygène *via* le réseau de ventilation.

Deux exemples sont présentés sur la figure 4 pour un feu de gaz propane à débit constant et un feu d'hydrocarbure (nappe de TPH¹ de 0,4 m²), les deux dans une

1 Tétra propylène hydrogéné, hydrocarbure similaire au dodécane C₁₂H₂₆.

enceinte de 120 m³. La concentration en oxygène diminue de sa valeur initiale, avant le début de la combustion (généralement 21 % en conditions standards) vers une valeur d'équilibre liée aux caractéristiques du scénario d'incendie et plus particulièrement à la puissance du foyer et au débit de ventilation.

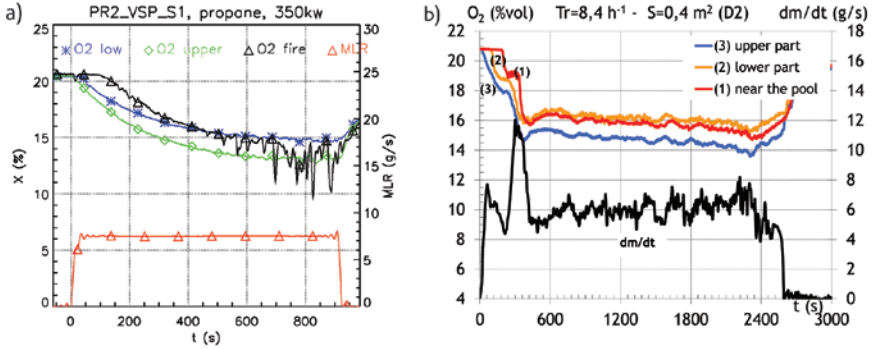


Figure 4. Évolution temporelle de la concentration d'oxygène lors d'un feu de gaz propane de 350 kW à débit constant (a) et d'un feu de nappe de TPH de 0,4 m² (b).

Cette variation temporelle de l'oxygène peut s'expliquer à partir d'un modèle simple basé sur un bilan de masse d'oxygène au sein du local. Cette approche, dite du « réacteur bien mélangé » (ou « *well-stirred reactor* »), considère un volume étanche, sur lequel des branches de ventilation (admission et extraction) sont connectées et dans lequel une réaction de combustion se produit. Les conservations de la masse d'oxygène et de la masse totale sont formulées ci-dessous :

$$\frac{d}{dt}(y_{O_2}m) - y_{O_2}^o \dot{m}_{v,in} + y_{O_2} \dot{m}_{v,ex} = -r\dot{m} \quad (a)$$

$$\frac{d}{dt}m - \dot{m}_{v,in} + \dot{m}_{v,ex} = \dot{m}_f \quad (b)$$

La combinaison des deux expressions précédentes (1-a et 1-b) permet d'exprimer la variation temporelle de la concentration moyenne d'oxygène comme le résultat d'une compétition entre deux contributions :

$$m \frac{d}{dt}y_{O_2} = \dot{m}_{v,in}(y_{O_2}^o - y_{O_2}) - \dot{m}_f(r + y_{O_2}) \quad (2)$$

Ces contributions sont l'apport d'oxygène par la gaine de ventilation et la consommation d'oxygène par la réaction de combustion. Si le débit de ventilation de l'enceinte, $\dot{m}_{v,in}$, est très inférieur au débit d'oxygène consommé par la réaction de combustion, $\dot{m}_f r$, la masse d'oxygène dans le local décroît, ce qui conduit à

une concentration en oxygène inférieures à celles en milieu ouvert (21 % vol) ; les conditions d'incendie sont dites « sous-oxygénées ».

Le second terme de l'équation précédente peut être simplifié de la façon suivante $\dot{m}_f(r + y_{O_2}) \sim \dot{m}_f r$ en considérant que le débit de combustible est négligeable par rapport aux termes de ventilation dans la relation (équ. 1-a). Cette hypothèse, acceptable dans de nombreuses situations réelles, permet d'une part d'obtenir une solution analytique à la diminution d'oxygène et d'autre part d'introduire le facteur de ventilation ϕ_v . L'équation et sa solution sont de la forme :

$$m \frac{d}{dt} y_{O_2} = \dot{m}_{v,in} (y_{O_2}^o - y_{O_2}) - r \dot{m}_f \quad \text{et} \quad y_{O_2}^o - y_{O_2}(t) = y_{O_2}^o \phi_v (1 - e^{-Tr}) \quad (3)$$

$$\text{avec } \phi_v = \frac{\dot{m}_f r}{y_{O_2}^o \dot{m}_{v,in}} \quad \text{et} \quad Tr = \frac{\dot{m}_{v,in}}{V}$$

Cette formulation met en évidence deux paramètres, le facteur de ventilation ϕ_v et le taux de renouvellement Tr . Le facteur de ventilation traduit le rapport entre la masse d'oxygène consommée par la réaction et celle apportée par la ventilation. C'est un indicateur permettant de caractériser la nature du régime de combustion. L'inverse du facteur Tr correspond au temps caractéristique d'évolution de la concentration d'oxygène vers sa valeur d'équilibre qui est $y_{O_2}^o (1 - \phi_v)$.

La solution de la relation (3) est comparée sur la figure 5 à une expérience de feu de gaz à débit constant (7,5 g/s) dans une enceinte de 120 m³, ventilée à un taux de renouvellement de 12 h⁻¹, ce qui conduit à un facteur de ventilation $\phi_v = 0,25$. En prenant en compte la variation des débits de ventilation au cours du temps, un bon accord est observé entre cette approche théorique simple et un feu de gaz à débit constant. Ce résultat confirme l'interprétation de la diminution de la concentration en oxygène et le rôle majeur du facteur de ventilation.

Une analyse paramétrique à partir de ce modèle met en évidence l'influence du facteur de ventilation (figure 6). Plus ce paramètre est grand, et plus basse sera la concentration d'oxygène. Cependant, il existe une concentration d'oxygène limite, y^{OI} , en deçà de laquelle, la combustion ne peut s'auto-entretenir en raison des flux de chaleur trop faibles, renvoyés par la flamme vers la surface combustible ; dans ce cas le foyer s'éteindra. Cette limite basse se situe dans la gamme 10-12 % vol à température ambiante mais diminue avec l'augmentation de la température des gaz et peut se rapprocher de 0 % pour des températures de gaz très élevées (1 300 K).

La concentration en oxygène moyenne dans le compartiment varie ainsi entre deux limites, haute (21 % vol) et basse (y^{LOI}).

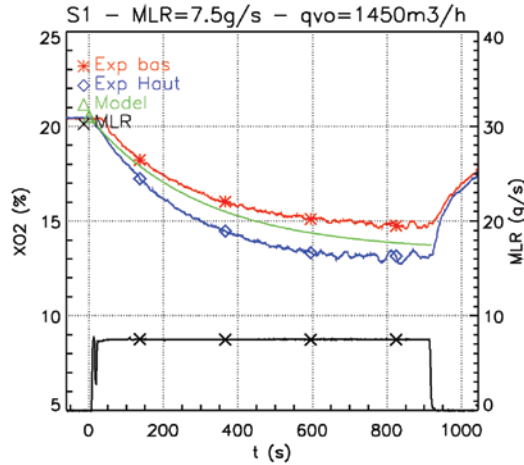


Figure 5. Évolution temporelle théorique de la concentration d'oxygène pour un feu de gaz (comparaison expérience et théorie).

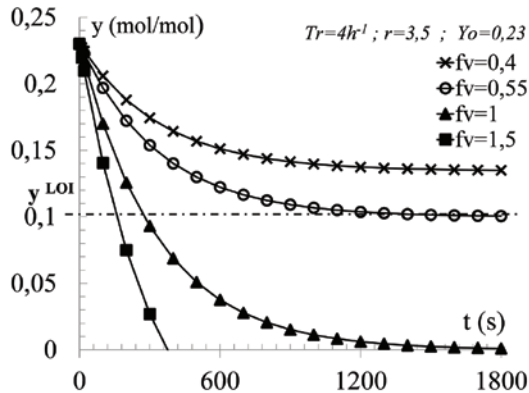


Figure 6. Évolution temporelle théorique de la concentration d'oxygène pour plusieurs valeurs du paramètre ϕ_v .

L'analyse de l'équation 3 montre également que, pour des valeurs spécifiques du paramètre ϕ_v , un régime stationnaire peut être obtenu (si la masse de combustible est suffisante) conduisant à une concentration d'oxygène d'équilibre qui dépend linéairement du facteur de ventilation suivant la relation :

$$y_{O_2}^{equi} = (1 - \phi_v)y_{O_2}^o \tag{4}$$

Cette relation (4) est présentée sur la figure 7. Il existe une valeur critique du facteur de ventilation, ϕ_v^{cri} , pour laquelle le régime stationnaire sera obtenu pour une concentration d'oxygène égale à la limite d'extinction. Cette valeur limite respecte la condition suivante :

$$y_{O_2}^{equi} > y_{O_2}^{LOI} \Rightarrow (1 - \phi_v)y_{O_2}^o > y_{O_2}^{LOI} \text{ ou } \phi_v^{cri} = 1 - \frac{y_{O_2}^{LOI}}{y_{O_2}^o} \quad (5)$$

Au-delà de cette valeur, il n'y a pas de régime stationnaire possible. La figure 7 montre également que pour un facteur de ventilation égal à 1 ($\phi_v = 1$), le régime stationnaire correspond à une concentration d'oxygène nulle mais qui en pratique n'est jamais atteinte.

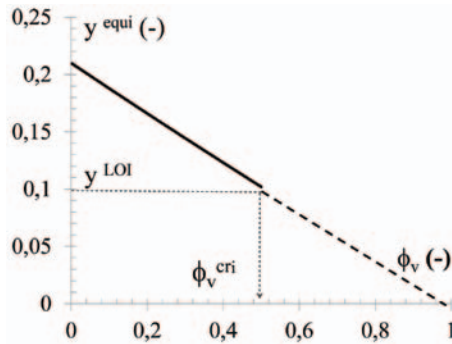


Figure 7. Variation de la concentration en régime stationnaire en fonction du facteur de ventilation.

Cette description théorique illustre l'importance du rapport entre la puissance du foyer et l'apport d'oxygène par la ventilation dans la caractérisation du niveau de sous-ventilation. Un scénario d'incendie « sous-ventilé » peut se décrire comme un régime situé entre des conditions dites bien ventilées (qui seront utilisées comme une situation de référence) et des conditions très fortement sous-ventilées pour lesquelles l'extinction du foyer arrivera très rapidement. Le régime de sous ventilation peut ainsi se situer dans un intervalle spécifique du facteur de ventilation $\phi_v = [0,01 ; \phi_v^{cri}]$.

Lors d'un incendie, la situation peut être plus complexe et certaines hypothèses retenues précédemment ne sont pas satisfaites. Par exemple, le débit de ventilation et le débit de perte de masse du foyer peuvent varier dans le temps en raison de la dynamique de l'incendie et des conditions variables de température, pression et niveau de flux de chaleur dans le local. Des paramètres plus fins que ceux décrits ici devront être considérés.

2.2.2 Variation spatiale

Un **incendie** dans un compartiment en régime sous-ventilé conduit à une distribution spatiale non homogène de la concentration d'oxygène dans l'enceinte. Ce champ de concentration d'oxygène résulte principalement de l'effet dynamique du panache thermique induit par l'incendie, de la consommation d'oxygène par la réaction de combustion, de la géométrie de l'enceinte, de la position du foyer et dans une moindre mesure du flux d'air que peut apporter la ventilation mécanique dans l'enceinte. La dynamique des écoulements dans le local se traduit par un panache thermique, généré par l'incendie, entraînant les produits de combustion en partie haute du compartiment puis impactant le plafond de l'enceinte. Une couche dite « chaude » de gaz vicié va s'accumuler en partie haute du local alors qu'une couche froide se stabilise en partie basse. La proportion relative de ces deux couches de gaz et leurs compositions et températures évoluent au cours du temps et dépendent de la puissance de l'incendie, de la géométrie de l'enceinte et du débit de ventilation mécanique.

Le comportement général, très souvent constaté lors d'un **incendie**, est une stratification verticale avec une teneur en oxygène plus faible en partie haute qu'en partie basse en raison de la viciation de l'air en partie haute par les gaz de combustion convectés par le panache thermique. Des profils verticaux de concentration en oxygène sur la hauteur d'un local illustre ce phénomène pour un feu de nappe de 5 m² dans une enceinte de 400 m³ (figure 8).

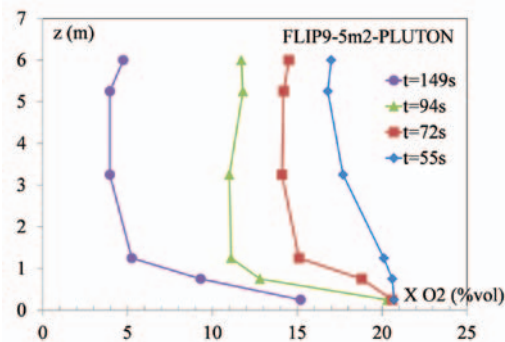


Figure 8. Profils verticaux de concentration en oxygène au cours du temps lors d'un feu de nappe dans un local de 400 m³ ventilé.

Les caractéristiques du flux d'air apporté par la ventilation peuvent également entraîner une variation spatiale de l'oxygène dans l'enceinte. Par exemple, le changement de position de la bouche d'admission d'air (en haut ou en bas du

local) contribue à stratifier ou à homogénéiser la distribution de la concentration en oxygène. La figure 9 présente les résultats de deux essais identiques, où seule la position de la bouche d'admission d'air varie, en partie haute (a) ou en partie basse (b).

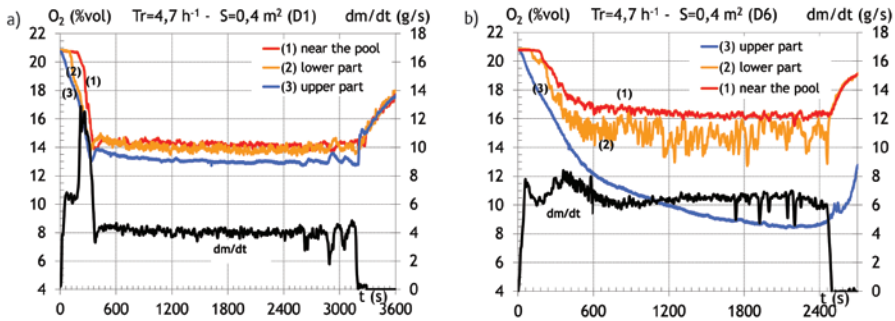


Figure 9. Évolution temporelle de la concentration d'oxygène à trois positions dans l'enceinte pour une admission en partie haute (a) ou en partie basse (b).

2.3 Influence de la déplétion en oxygène sur le débit de pyrolyse

2.3.1 Observations

La variation de la teneur en oxygène à proximité du foyer peut conduire à une modification du débit de pyrolyse du foyer, noté MLR (pour *Mass Loss Rate*), et donc de sa puissance. Ce phénomène est rencontré sur la majorité des scénarios d'incendie dans des enceintes impliquant des combustibles liquides ou solides. Il résulte de la diminution du flux de chaleur renvoyé par la flamme vers la surface du combustible. Sa mise en évidence est obtenue en comparant le niveau de MLR d'une même source incendie, en milieu dit « ouvert » (pour lequel les conditions de comburant sont stables et proches des conditions ambiantes soit 21 % vol en oxygène) et dans une enceinte ventilée.

Des exemples sur des feux de nappe de différentes dimensions (0,2 et 0,4 m²) et pour trois hydrocarbures (heptane, dodécane et TPH) sont présentés sur les graphes de la figure 10. Chaque graphe présente le comportement, d'une même source de combustible, « en atmosphère libre » et dans une enceinte ventilée mécaniquement pour différents taux de renouvellement.

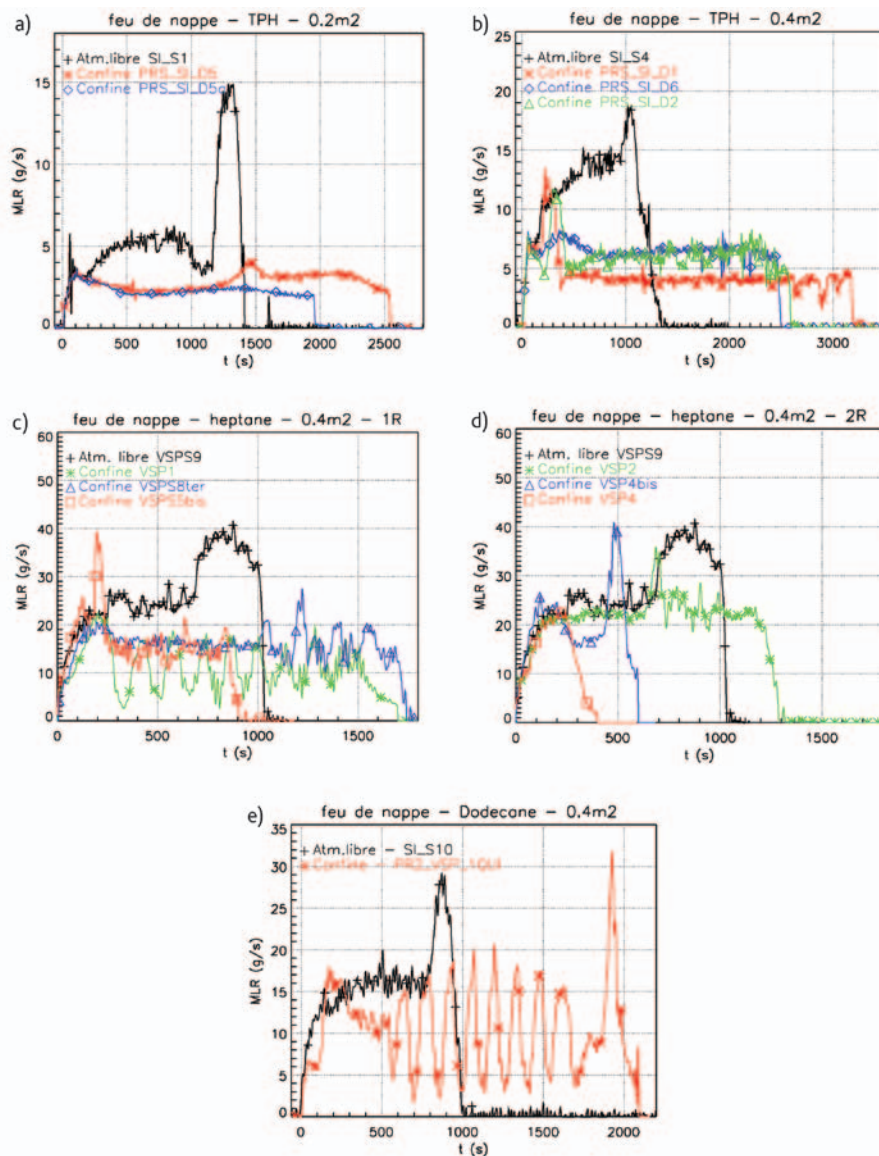


Figure 10. Comparaison du débit de perte de masse (MLR) en milieu ouvert (« Atm. Libre ») et en milieu confiné (« confiné ») pour des feux de nappe de TPH de $0,2 \text{ m}^2$ (a) et $0,4 \text{ m}^2$ (b), d'heptane de $0,4 \text{ m}^2$ pour un scénario dans une pièce (c) ou dans deux pièces (d) et de dodécane de $0,4 \text{ m}^2$ (e).

Lors des premiers instants, les comportements en milieu ouvert et dans une enceinte ventilée sont très proches. Puis, rapidement, l'évolution du débit de pyrolyse en milieu confiné change par rapport à son comportement en milieu ouvert. Temporairement, il peut présenter des valeurs supérieures à celles en atmosphère libre. Ensuite, il

va généralement diminuer et montrer des comportements spécifiques tels qu'une extinction rapide, une stabilisation sur un régime stationnaire ou un régime oscillatoire (stable ou instable voir chaotique). La durée de l'incendie va également changer.

Ces comportements particuliers dépendent, non plus du combustible seul, mais des phénomènes dus au caractère confiné de l'enceinte (présence des parois et d'un volume fini) et à l'existence d'une ventilation mécanique. Ces éléments se traduisent par la variation de la concentration en oxygène, la présence des fumées à proximité du foyer, la variation de la température des gaz et la présence de flux de chaleur issus des parois de l'enceinte et redirigé vers le foyer. Les variations du milieu environnant vont modifier la réaction de combustion ainsi que le flux de chaleur reçu par la surface combustible (et le taux de pyrolyse du combustible).

Un des paramètres du milieu environnant influant sur la variation du débit de pyrolyse est la concentration en oxygène. Cette influence est mise en évidence en comparant le comportement du débit de perte de masse (MLR) d'un même foyer en milieu ouvert et dans une enceinte ventilée.

2.3.2 Débit de perte de masse (MLR) en milieu ouvert

Le débit de perte de masse en milieu ouvert est obtenu par des expérimentations sous hotte calorimétrique. Pour des feux de nappe de combustible liquide, le débit de perte de masse surfacique (ramené à l'unité de surface de la nappe) dépend de la dimension de la nappe pour de faibles dimensions puis tend vers une valeur asymptotique pour des grandes surfaces. Cette dépendance a été largement mise en évidence dans la littérature et est modélisée par une corrélation expérimentale, appelée loi de « Babrauskas », donnant le débit de perte de masse surfacique en régime stationnaire en fonction de la dimension de la nappe :

$$\dot{m}_f''^o = \dot{m}_f''^\infty [1 - e^{-k\beta D}] \quad (6)$$

Avec $k\beta$ une constante fonction du combustible et notamment de sa propension à produire des suies, D le diamètre de la nappe et $\dot{m}_f''^\infty$ le débit surfacique de pyrolyse pour de larges valeurs de D . Un exemple est présenté sur la figure 11 pour les trois combustibles liquides, dodécane ($C_{12}H_{26}$), tétra propylène hydrogéné, TPH, ($C_{12}H_{26}$) et heptane (C_7H_{16}). Les expérimentations en milieux ouverts permettent de déterminer expérimentalement la constante $k\beta$ et le débit de pyrolyse $\dot{m}_f''^\infty$.

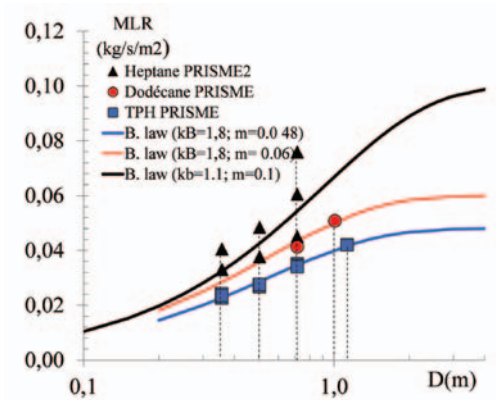


Figure 11. Variation de la perte de masse en fonction de la dimension de la nappe pour trois hydrocarbures et en milieu ouvert.

2.3.3 Loi de comportement du débit de perte de masse en fonction de la concentration en oxygène

Une perte de masse sans dimension, M , est exprimée comme le rapport des débits de perte de masse (en régime stationnaire) en milieu confiné et en milieu ouvert.

Afin de montrer l'influence de l'oxygène, une loi de comportement reliant la perte de masse sans dimension, M , à la teneur en oxygène est recherchée. L'influence de l'oxygène sur le débit de pyrolyse adimensionné est présentée sur la figure 12 pour des expériences ayant conduit à un régime de combustion stationnaire. La diminution de la concentration d'oxygène conduit à une diminution du débit de pyrolyse et ainsi confirme l'influence de la viciation des gaz alimentant la flamme sur le niveau de puissance d'un feu. Ce phénomène est dû à l'influence de la concentration en oxygène sur la température de la flamme et ainsi sur l'énergie redirigée par celle-ci vers le combustible. Pour une série d'essais donnée (feu de TPH de 0,4 m² et 0,2 m² dans un volume de 120 m³, ventilé avec des taux de renouvellement entre 2 et 8 h⁻¹), une dépendance linéaire entre le débit de perte de masse adimensionné et la teneur en oxygène est observée. Ce comportement peut être approché par une relation de la forme suivante :

$$\frac{\dot{m}_f - \dot{m}_f^{ext}}{\dot{m}_f^o - \dot{m}_f^{ext}} = \left[\frac{(y_{O_2} - y_{O_2}^{LOI})}{(y_{O_2}^o - y_{O_2}^{LOI})} \right] \text{ ou } \frac{M - M^{ext}}{1 - M^{ext}} = \left[\frac{(Y - Y^{LOI})}{(1 - Y^{LOI})} \right] \quad (7)$$

avec $M = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_f^o}$, $M^{ext} = \frac{\dot{m}_f^{ext}}{\dot{m}_f^o}$ et $Y^{LOI} = \frac{y_{O_2}^{LOI}}{y_{O_2}^o}$

Les grandeurs y^o et y^{LOI} sont respectivement les concentrations d'oxygène en milieu ouvert et en limite d'extinction. Un débit de pyrolyse critique est défini afin de prendre en compte la possibilité d'un débit de pyrolyse non nul lors de l'extinction. En prenant les valeurs de 11 % vol et 21 % vol pour ces deux concentrations limites et une valeur nulle pour le débit de pyrolyse critique, la corrélation proposée par Peatross & Beyler à partir d'autres essais est retrouvée.

Cependant, pour certains essais (foyer d'heptane sur la figure 12 par exemple), cette relation n'est pas retrouvée. L'influence de la température de gaz environnant le foyer et du flux de chaleur externe redirigé vers le foyer, non prise en compte dans la relation 7, explique ces écarts. La recherche d'une expression plus générale est un axe de recherche important pour la modélisation des régimes sous-ventilés.

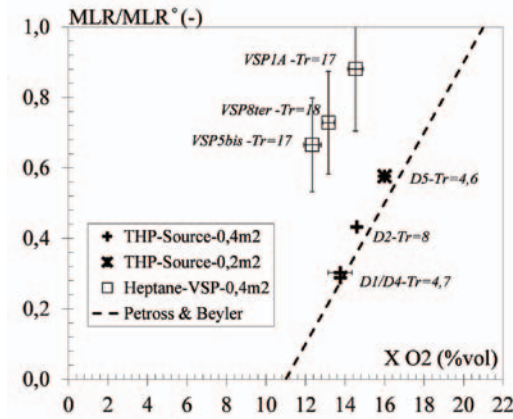


Figure 12. Variation du débit de pyrolyse adimensionné en fonction de la teneur en oxygène dans le local.

2.3.4 Évaluation du débit de pyrolyse en milieu confiné

La loi de dépendance du débit de perte de masse en fonction de la concentration en oxygène (équ. 7) et le bilan de conservation de masse en régime stationnaire (équ. 3) permettent de proposer une relation donnant le débit de perte de masse attendu pour un scénario défini par un facteur de ventilation. Le débit de perte de masse et la concentration d'oxygène sont les solutions des deux expressions rappelées ci-dessous :

$$M = f(M^{ext}, Y, Y^{LOI}) \quad (7)$$

$$\text{et } Y = 1 - \phi_v M \quad (3)$$

$$\text{avec } \phi_v^o = \frac{\dot{m}_f^o r}{y_{O_2}^o \dot{m}_{v,in}}$$

Le facteur de ventilation de référence (indice *o*) est ici défini par rapport au débit de perte de masse du combustible en milieu ouvert. Il caractérise les conditions de sous-ventilation du scénario d'incendie à partir du débit de ventilation avant allumage et du comportement du foyer en milieu ouvert. La conservation de la masse (équ. 3) indique que la concentration d'oxygène diminue avec l'augmentation du débit de pyrolyse et la loi de comportement (équ. 7) indique que la diminution de la concentration d'oxygène fait décroître également le débit de pyrolyse. Il existe ainsi un couple unique du débit de pyrolyse et de la concentration d'oxygène, qui sont les solutions de ces deux relations et qui dépend uniquement des paramètres ϕ_v^o , M^{ext} et Y^{LOI} . Les relations sont les suivantes :

$$M = \frac{1 + M^{ext} / (1 - M^{ext})}{1 / (1 - M^{ext}) + \phi_v^o / (1 - Y^{LOI})} \quad \text{et} \quad Y = \frac{1 - Y^{LOI} + \phi_v^o (Y^{LOI} - M^{ext})}{1 - Y^{LOI} + \phi_v^o (1 - M^{ext})} \quad (8)$$

Ces formulations donnent ainsi la valeur du débit de perte de masse M et de la concentration en oxygène Y en fonction du facteur de ventilation de référence ϕ_v^o et des paramètres M^{ext} et Y^{LOI} . Les prédictions de ce modèle, sont en bon accord avec certaines données expérimentales pour lesquelles un régime stationnaire est obtenu (figure 13). Les résultats montrent que plus le niveau de sous ventilation est important et plus le débit de perte de masse va diminuer par rapport à sa valeur en milieu ouvert.

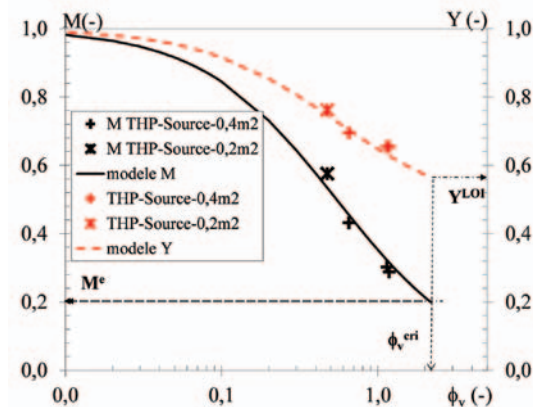


Figure 13. Variation du débit de pyrolyse adimensionné en fonction du facteur de ventilation.

Une valeur critique du facteur de ventilation est identifiée. Elle correspond aux conditions pour lesquelles le débit de perte de masse atteint sa valeur minimale M^{ext} et l'extinction se produit. Au-delà de cette valeur du facteur de ventilation, aucun régime stationnaire ne peut être atteint, l'extinction se produisant avant l'obtention du régime stationnaire. L'expression de cette limite est la suivante :

$$\phi_v^{cri} = \frac{1 - Y^{LOI}}{M^{ext}} \quad (9)$$

Cette valeur est à comparer à la première limite identifiée précédemment sans prendre en compte la variation de la perte de masse avec la diminution de la concentration d'oxygène. La prise en compte de la variation du débit de perte de masse permet d'élargir la plage du facteur de ventilation sur lequel le foyer sous-ventilé peut se maintenir. Pour une limite inférieure de $Y^{LOI} = 0,13/0,23 = 0,565$ et un débit de pyrolyse minimale de $M^{ext} = 0,2$, la valeur critique du facteur de ventilation est $(1 - 0,565)/0,2 = 2,17$ en prenant en compte la diminution de débit de pyrolyse. Cette valeur est à comparer à la valeur de 0,55 (équ. 5) obtenue pour un débit de pyrolyse indépendant de la teneur en oxygène. On note que si le débit de pyrolyse minimale est nul ($M^{ext} = 0$), la limite inférieure Y^{LOI} n'est jamais atteinte ; le débit de pyrolyse tendant vers zéro quand Y s'approche de Y^{LOI} .

2.4 Influence de la température des gaz sur le débit de pyrolyse

2.4.1 Observations sur deux essais conduisant à des conditions de viciation identiques

La dépendance du débit de perte de masse avec la concentration en oxygène n'est pas toujours suffisante pour expliquer le niveau de perte de masse en milieu confiné. Pour un même niveau de concentration en oxygène dans l'enceinte, des débits de pyrolyse différents peuvent être mesurés comme le montre une comparaison entre deux expériences impliquant un feu de nappe de 0,4 m², d'heptane et de TPH pour deux taux de renouvellement différents (figure 14 et figure 15).

La concentration d'oxygène à l'état stationnaire est d'environ 14 % pour les deux essais bien que les débits de pyrolyse soient significativement différents, 4 g/s et 14 g/s. Les conditions du milieu environnant, autre que la concentration d'oxygène, sont différentes entre les deux essais et influent sur le débit de pyrolyse. Dans cet

exemple, le niveau de température des gaz est plus élevé pour l'essai conduisant à un débit de perte de masse plus important.

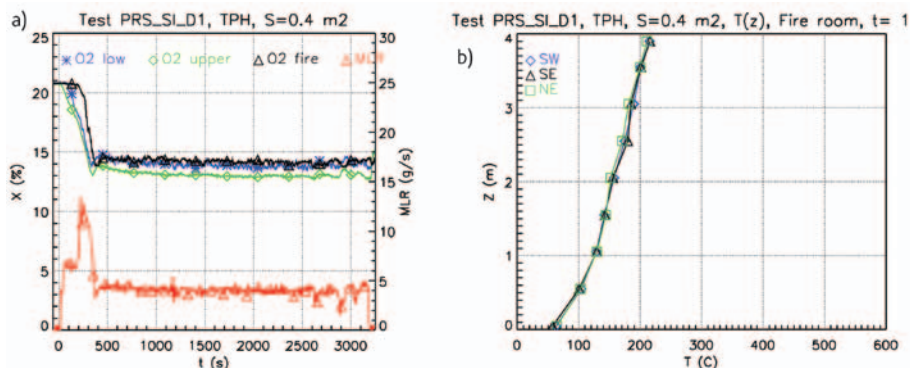


Figure 14. Évolution temporelle des concentrations en oxygène et du débit de perte de masse (a), profils verticaux de température à un instant donné (b) pour un feu de TPH de $0,4 \text{ m}^2$ pour un taux de renouvellement de $4,7 \text{ h}^{-1}$.

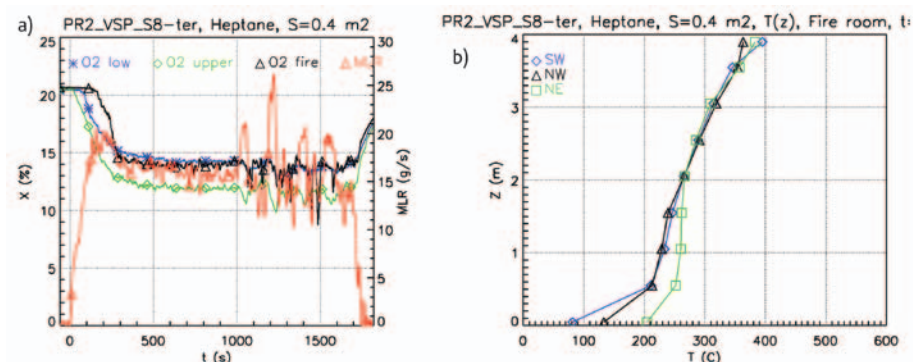


Figure 15. Évolution temporelle des concentrations en oxygène et du débit de perte de masse (a), profils verticaux de température à un instant donné (b) pour un feu de d'heptane de $0,4 \text{ m}^2$ pour un taux de renouvellement de 17 h^{-1} .

Ainsi, la concentration d'oxygène n'est pas le seul paramètre influant sur le débit de pyrolyse, la température du milieu environnant doit être considérée. Ces deux variables agissent cependant de façon opposée sur le débit de pyrolyse. Le processus de combustion contribue d'une part à réduire la concentration en oxygène et d'autre part à augmenter la température des gaz. L'influence nette sur le débit de pyrolyse doit être évaluée.

L'influence combinée de la température des gaz et la concentration d'oxygène peut s'exprimer en ajoutant un terme supplémentaire à la loi de comportement présentée précédemment (équ. 7) :

$$M = \left[\left(\frac{Y - Y^{LOI}(T)}{I - Y^{LOI}(T)} \right) (I - M^{ext}) + M^{ext} \right] + f(T) \quad (10)$$

En plus d'un premier terme qui prend en compte l'influence de la concentration en oxygène, un second terme est introduit pour prendre en compte l'influence de la température des gaz. La température des gaz peut également être introduite dans le premier terme au travers de la concentration limite d'oxygène (LOI). Le second terme s'exprime sous forme d'un flux de chaleur radiatif reçu par la surface du combustible $F_{\sigma}(T^4 - T_{ref}^4) / (L_v \dot{m}_f^o)$ (sous forme adimensionnée).

Cette loi de comportement du débit de pyrolyse, bien que communément acceptée, est insuffisamment validée et les recherches sur les formulations notamment du second terme et de la concentration limite d'oxygène doivent être poursuivies.

2.4.2 Analyse macroscopique des régimes de sous-ventilations

Afin d'analyser les différents régimes de sous ventilation et les influences opposées de la viciation et de la température des gaz, une analyse macroscopique reposant sur le modèle du « réacteur bien mélangé » est proposée. Cette approche permet de mettre en évidence les paramètres influents sur l'**incendie** ainsi que les différents régimes de combustion attendus.

2.4.3 Modèle du réacteur bien mélangé pour un compartiment ventilé mécaniquement

Le modèle a pour objectif de prédire les conditions moyennes (débit de perte de masse, température et concentration en oxygène) d'un **incendie**. Il s'appuie ainsi sur les formulations, en régime stationnaire, des bilans de masse et d'énergie.

Le bilan de masse (équ. 2), sans l'hypothèse $\dot{m}_f(r + y_{O_2}) \sim \dot{m}_f r$, s'exprime de la forme :

$$y = \frac{r(I - \phi_v^o M)}{(r + \phi_v^o y_{O_2}^o M)} \quad (11)$$

ou
$$M = \frac{I - Y}{\phi_v^o \left(I + \frac{y_{O_2}^o}{r} Y \right)}$$

Il traduit la diminution de la concentration d'oxygène avec l'augmentation du débit de pyrolyse en raison du processus de combustion.

La figure 16-a présente un exemple d'évolution pour trois valeurs du facteur de ventilation ϕ_v° .

Le bilan d'énergie en régime stationnaire exprime l'équilibre entre l'énergie produite par la réaction de combustion, celle dissipée par les parois et celle mise en jeu par la ventilation :

$$m_f \Delta H = hA(T - T_\infty) + m_{v,in} C_p (T - T_\infty) \quad (12)$$

$$\text{avec } \Theta = \frac{I}{\frac{I}{k} + \frac{C}{\phi_v}} M, \quad \Theta = \frac{(T - T_i)}{T_\infty}, \quad k = \frac{\dot{m}_f \Delta H}{hAT_\infty} \text{ et } \frac{I}{C} = \frac{y_{O_2}^\circ \Delta H}{r C_p T_\infty}$$

Cette relation peut être remplacée par une corrélation issue d'études expérimentales, qui présente un meilleur caractère prédictif [14]. Cette corrélation est la suivante :

$$\Theta = Bk^{0,36} M^{0,72} \phi_v^{0,36} \quad (13)$$

$$\text{avec } B = 0,63 \left(\frac{y_{O_2}^\circ \Delta H}{r C_p T_\infty} \right)^{0,36}$$

Le paramètre k traduit les propriétés thermiques de l'enceinte. Il est analogue au facteur ϕ_v pour la ventilation.

La figure 16-b présente l'évolution de cette corrélation pour trois valeurs du facteur de ventilation ϕ_v° . L'augmentation du débit de pyrolyse contribue à augmenter la température des gaz. D'autre part, plus le facteur de ventilation est élevé et plus cette augmentation du débit de pyrolyse est importante.

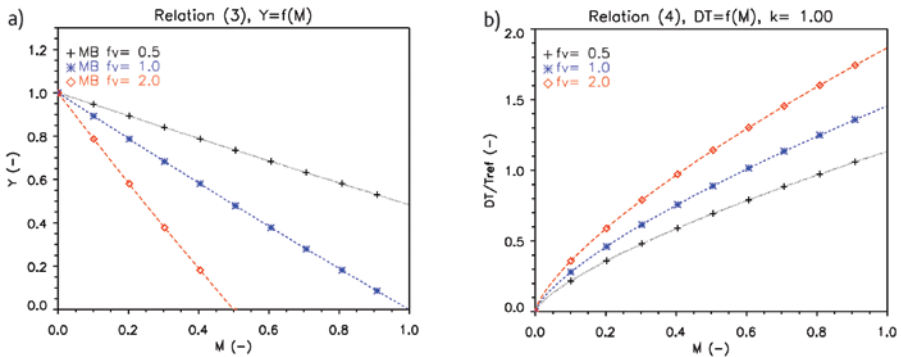


Figure 16. Évolution de la concentration d'oxygène (a) et de la température de gaz (b) en fonction du débit de pyrolyse d'après les relations issues des bilans de masse (équ. 11) et d'énergie (équ. 13 avec $k = 1$).

En complément de ces deux relations issues des bilans de masse et d'énergie, la loi de comportement exprimant la dépendance du débit de pyrolyse avec les conditions environnementales, caractérisées dans ce cas par la concentration d'oxygène et la température des gaz, est utilisée équ. 10.

$$M = \left[\left(\frac{Y - Y^{LOI}(T)}{I - Y^{LOI}(T)} \right) (I - M^{ext}) + M^{ext} \right] + C\theta \quad (14)$$

$$\text{avec } Y^{LOI}(T) = \frac{y_{O_2}^{LOI}(T_\infty)}{y_{O_2}^o} \left(\frac{\theta_f - \theta}{\theta_f} \right) \text{ ou } \theta_f = \frac{T_f - T_\infty}{T_\infty}$$

L'évolution de cette loi est présentée sur la figure 17-a pour plusieurs valeurs de k et de ϕ_v^o en exprimant la relation de la forme $Y = f(M, \Theta)$ ou $Y = f(M, k, \phi_v^o)$. Pour une valeur de $k = 0$, la loi de comportement prenant en compte uniquement la concentration en oxygène et discutée précédemment (équ. 7 et figure 12) est retrouvée. La prise en compte de la température montre que pour une même concentration en oxygène, le débit de pyrolyse augmente avec le paramètre k .

Les trois relations issues du bilan de masse, $Y = f(M, \phi_v^o)$ (équ. 11), du bilan d'énergie, $\theta = f(M, \phi_v^o, k)$, (équ. 13) et de la loi de comportement $M = f(Y, \theta)$, (équ. 14) sont résolues et donnent les solutions M , Y et θ , en fonction uniquement des paramètres k et ϕ_v^o . La figure 17-b présente une illustration graphique de la résolution de ce système pour un couple de paramètres (k, ϕ_v^o) en présentant l'intersection entre le bilan de masse $Y = f(M, \phi_v^o)$ et la loi de comportement couplée au bilan d'énergie exprimée sous la forme $Y = f(M, k, \phi_v^o)$.

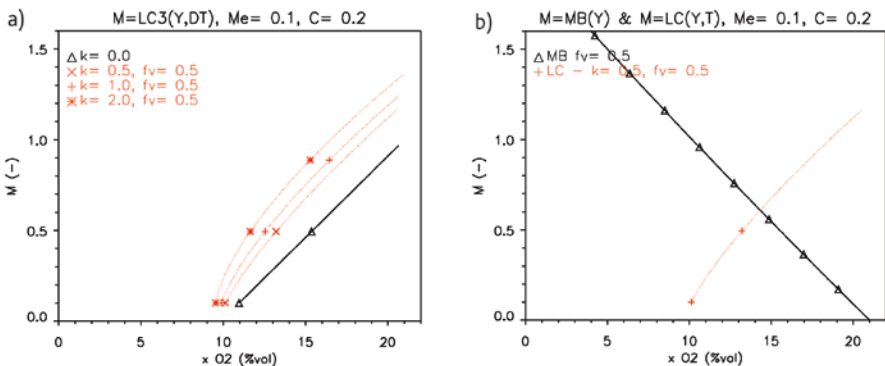


Figure 17. (a) Loi de comportement pour différentes valeurs de k et de ϕ_v^o , (b) loi de comportement et bilan de conservation de masse pour un couple (k, ϕ_v^o).

Les solutions Y , θ et M en fonction des paramètres k et ϕ_v° sont présentées sur la figure 18.

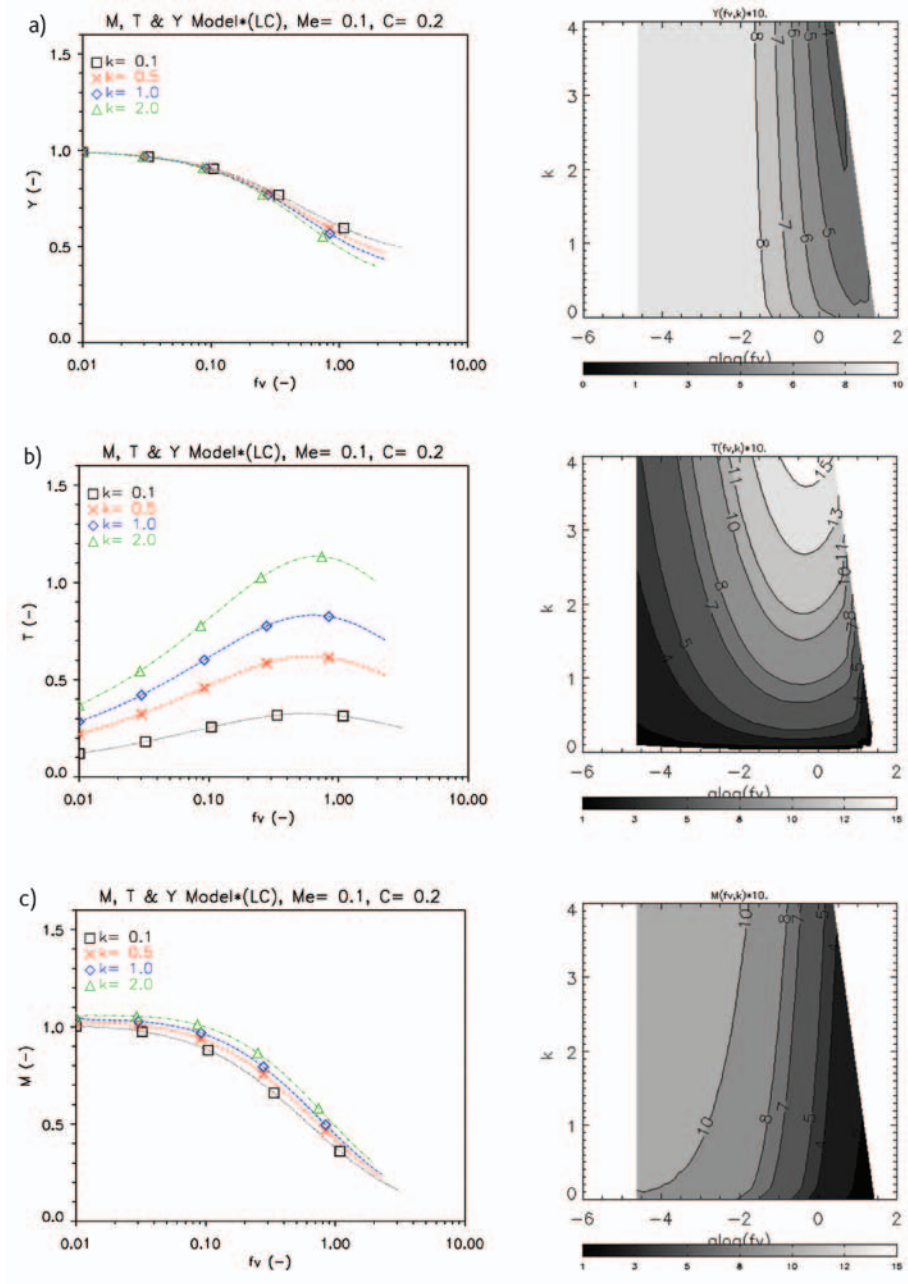


Figure 18. Évolution des grandeurs Y , θ et M en fonction des paramètres k et ϕ_v° .

La concentration en oxygène diminue avec le facteur de ventilation (figure 18-a). Le comportement observé sur le modèle simplifié (figure 13) sans prendre en compte l'effet de la température est retrouvé. Il existe un facteur de ventilation critique pour lequel le régime stationnaire ne peut être atteint. Dans cette approche, la valeur du facteur de ventilation critique varie avec le paramètre k et ainsi avec la température des gaz.

La variation de la température des gaz en fonction du facteur de ventilation présente un comportement particulier avec un maximum correspondant à un optimum entre deux situations extrêmes (figure 18-b) : (a) pour les faibles valeurs du facteur de ventilation, le débit de pyrolyse est important mais le débit de ventilation également ce qui conduit à refroidir la température des gaz, (b) pour des grandes valeurs du facteur de ventilation, le débit de pyrolyse est faible conduisant à une faible élévation de la température des gaz. Entre ces deux situations, un maximum de température est obtenu correspondant à un débit de pyrolyse assez important pour échauffer les gaz et un débit de ventilation suffisamment faible conduisant à limiter le refroidissement des gaz.

L'évolution de la concentration d'oxygène et de la température des gaz conduit à un comportement particulier du débit de pyrolyse (figure 18-c). Celui-ci diminue, comme attendu, avec la concentration en oxygène mais s'accroît avec l'augmentation de la température, notamment sur la gamme de facteurs de ventilation correspondant à des valeurs élevées de la température. Dans cet intervalle de facteurs de ventilation, le maximum de température conduit à augmenter le débit de pyrolyse qui dans certain cas peut être supérieur à sa valeur en milieu ouvert.

L'augmentation du paramètre k contribue à augmenter la température, le débit de pyrolyse et de fait, à réduire la concentration en oxygène. Le facteur de ventilation critique diminue avec l'augmentation de k . Ce comportement est dû à la diminution de la concentration d'oxygène. La limite inférieure d'inflammabilité, bien que diminuant avec l'augmentation de k , sera atteinte pour des valeurs du facteur de ventilation plus faibles lorsque k augmente en raison de la diminution de la concentration d'oxygène.

La figure 19 présente les points des couples (M, θ) et (θ, Y) pour des valeurs de k données. La figure 19-a montre que la température maximale des gaz correspond à des valeurs de M inférieures à 1, caractéristiques de régimes de sous-ventilé. La figure 19-b présente les points de fonctionnement vis-à-vis de la loi extinction $Y^{LO} = f(T)$. Les conditions de température maximale sont trouvées proches de la limite d'extinction.

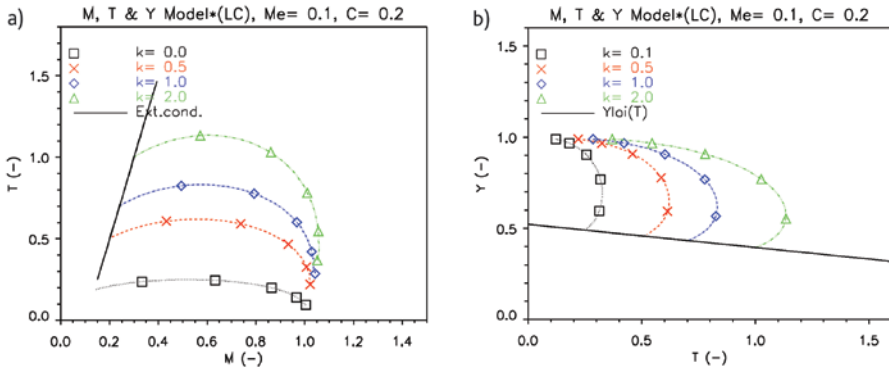


Figure 19. Représentation des couples (M, θ) et (θ, Y) pour des valeurs de k données et de la limite d'extinction.

Cette modélisation macroscopique permet d'identifier deux paramètres majeurs caractéristiques du scénario de sous-ventilation : k et ϕ_v° . Le premier représente le rapport entre la puissance du feu en milieu ouvert et celle dissipée par les parois. Le second représente le rapport entre la quantité d'oxygène consommée par le foyer en milieu ouvert et celle apportée par la ventilation.

Cette représentation permet également de localiser des régimes spécifiques et des conditions critiques (figure 20). Trois régions sont identifiées : (1) débit de pyrolyse supérieure à celui en atmosphère libre, (2) débit de pyrolyse inférieure à celui en atmosphère libre, (3) rapide extinction (pas de régime stationnaire) du foyer. En outre, les conditions de température maximale sont situées dans la région (2) pour un facteur de ventilation proche de 0,6. Plus le coefficient k augmente et plus l'intervalle du facteur de ventilation pour la région (2) se réduit.

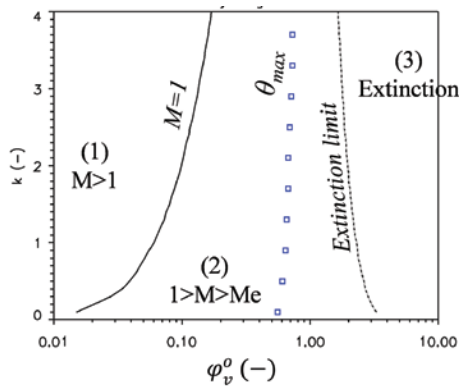


Figure 20. Identification des régions caractéristiques dans un diagramme (k, ϕ_v°) .

2.4.4 Confrontation du modèle du réacteur bien mélangé sur des expériences de feu de nappe

Le modèle est confronté aux résultats d'expériences de feux de nappe. Pour chaque expérience, le facteur de ventilation, le coefficient k et les variables, M , γ et θ sont déterminés à partir de données expérimentales. Un bon accord est trouvé avec le modèle (figure 21). Les niveaux de température des gaz, de débit de pyrolyse et de fraction d'oxygène sont globalement retrouvés.

Ce modèle permet de mettre en évidence que le facteur de ventilation n'est pas le seul paramètre d'importance. Pour un même facteur de ventilation, des niveaux de débit de pyrolyse différents peuvent être obtenus suivant les conditions thermiques de l'enceinte (coefficient k). En outre, le positionnement des expériences dans un diagramme (k, ϕ_v) permet de mieux les définir et d'identifier les conditions pour de nouveaux essais.

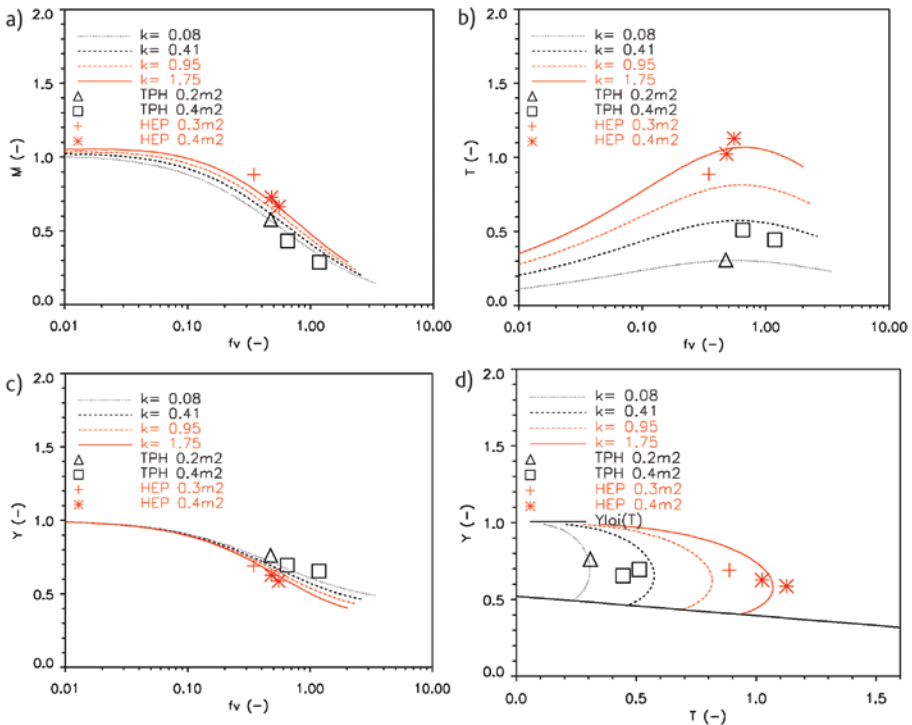


Figure 21. Comparaison entre le modèle et des expériences de feux de nappe d'hydrocarbure.

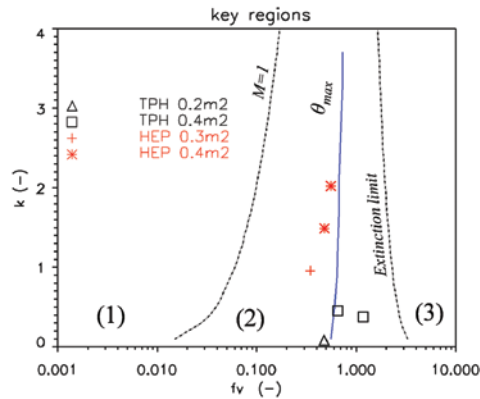


Figure 22. Identification des régions caractéristiques dans un diagramme (k, ϕ_v) .

2.5 Conclusion

Cette synthèse de plusieurs interprétations d'expériences de feux de nappe en régime sous-ventilé permet d'illustrer des caractéristiques générales des incendies dans des enceintes ventilées mécaniquement.

Le régime de sous-ventilation est une situation très couramment rencontrée pour les foyers en milieu confiné et ventilé mécaniquement. La puissance d'un feu en régime sous ventilé est généralement plus faible que ce même feu en atmosphère libre. La ventilation mécanique joue un rôle important en modifiant la concentration d'oxygène et la température des gaz. Le régime de sous-ventilation se traduit par un champ de concentration en oxygène variable dans le local dont les valeurs sont inférieures au niveau de 21 %. Le débit pyrolyse, et par conséquent la puissance du feu, indépendamment des conditions extérieures en milieu ouvert, dépend, dans cette situation confinée, de la concentration d'oxygène et de la température des gaz. Cette dépendance est complexe et sa modélisation demeure une thématique de recherche.

Deux paramètres caractérisent un scénario d'incendie sous ventilé, le facteur de ventilation ϕ_v et le paramètre thermique k . Le facteur de ventilation traduit le rapport entre la puissance du foyer (via la consommation en oxygène) et l'apport d'oxygène par la ventilation. Il est semblable au *global equivalent ratio* ou GER utilisé dans d'autres approches. Un facteur de ventilation de référence est défini permettant d'identifier le caractère sous ventilé d'un scénario d'incendie uniquement à partir des conditions initiales régnant dans le local au démarrage du feu. Le paramètre thermique k traduit le rapport entre la puissance du foyer en milieu ouvert et les dissipations thermiques dans le local. Il conditionne le niveau de température des gaz

pouvant être atteint au cours du scénario d'**incendie**. L'approche du « réacteur bien mélangé » montre que ces deux paramètres permettent de caractériser la nature du scénario d'incendie en identifiant des régimes de combustion et des conditions critiques.

Les perspectives de recherche sur cette thématique peuvent être identifiées.

- l'influence des conditions environnementales (température des gaz, concentration en oxygène, flux de chaleur externe, milieu dispersé de gouttelettes...) sur le mécanisme de pyrolyse. Ce champ d'étude assez large concerne tous les types de combustible, liquide et solide, pour lesquels les mécanismes de pyrolyse peuvent être différents ;
- les mécanismes de pyrolyse en limite d'extinction. Ce sujet est un point particulier du thème précédent. Sa modélisation conditionne notamment la prédiction de l'extinction de l'**incendie** ;
- la dynamique du feu en régime sous-ventilé. Cette thématique aborde la dynamique de la flamme ou de la zone de combustion, sa forme et son déplacement éventuel dans l'enceinte. Pour des conditions particulières, des situations chaotiques, instables, parfois oscillatoires sont rencontrées. Cette thématique résulte du couplage entre la pyrolyse (phase dite condensée) et la dynamique des écoulements dans l'enceinte (la phase gazeuse).

Bibliographie

1. H. Prétrel, W. Le Saux, Experimental study of the burning rate behaviour of a pool fire in confined and ventilated compartment, Post-SMIRT 18, Vienna, Autriche, 2005.
2. C. Lucchesi, O. Vauquelin, H. Prétrel, Ph. Bournot, Étude expérimentale de la combustion de petits feux de bacs de Tetra-Propylène Hydrogéné (TPH), Congrès de la SFT 2007, 25 mai-1^{er} juin, Iles des Embiez, France, 2007.
3. W. Le Saux, H. Prétrel, C. Lucchesi, P. Guillou, Experimental study of the fire mass loss rate in confined and mechanically ventilated multi-room scenarios, 9th International Symposium on Fire Safety Science (IAFSS), 21-26 septembre, Karlsruhe, Germany, 2008.
4. C. Lucchesi, H. Prétrel, Étude expérimentale de la combustion d'un feu de nappe d'hydrocarbure en atmosphère libre pour un large spectre de diamètre de nappe, Journée internationale de thermique (JITH), 27-29 mars, Djerba, Tunisie, 2009.
5. W. Le Saux, H. Prétrel, S. Moreau, L. Audouin, The OECD PRISME research project: experimental results about mass loss rate and soot concentration in confined and mechanically ventilated compartments, 11th International Seminar on Fire Safety in Nuclear Power Plants and Installations (Post-SMIRT), 17-19 August, Helsinki, Finland, 2009.
6. L. Audouin, H. Prétrel, W. Le Saux, Overview of the OECD PRISME project - Main experimental results, 12th International Post Conference Seminar on fire safety in nuclear power plants and installations (Post-SMIRT), 13-15 September, Munchen, Germany, 2011.
7. H. Prétrel, L. Audouin, Periodic puffing instabilities of buoyant large-scale pool fires in a confined compartment, *Journal of Fire Sciences*, 31, 3, 197-210, 2013.
8. L. Audouin, L. Rigollet, H. Prétrel, W. Le Saux, M. Röwekamp, OECD PRISME project: Fires in confined and ventilated nuclear-type multi-compartments - Overview and Main Experimental Results, *Fire Safety Journal*, Vol. 62, Part B, 80-101, November 2013.
9. H. Prétrel, S. Suard, L. Audouin, Application de l'approche du réacteur homogène pour interpréter l'influence de la sous-oxygénation sur le taux de combustion

d'un feu de nappe dans un compartiment mécaniquement ventilé, 17^e Journée internationale de thermique (JITH), 28-30 octobre, Marseille, France, 2015.

10. H. Prétrel, S. Suard, L. Audouin, Experimental and numerical study of low frequency oscillatory behaviour of a large-scale hydrocarbon pool fire in a mechanically ventilated compartment, *Fire safety journal*, 83, 38-53, 2016.
11. M.J. Peatross, C.L. Beyler, Ventilation effects on compartment fire characterization, *Fire Safety Science, Proceeding of the Fifth International Symposium*, 403-414, 1997.
12. Y. Utiskul, J.G. Quintiere, A.S. Rangwala, B.A. Ringwelski, K. Wakatsuki and T. Naruse, Compartment Fire Phenomena under Limited Ventilation, *Fire Safety Journal*, 40, 367-390, 2005.
13. J. G. Quintiere, A. S. Rangwala, A theory for flame extinction based on flame temperature, *Fire and Materials*, 28, 387-402, 2004.
14. K. L. Foote, P. J. Pagni, N. J. Alvares, Temperature correlations for forced-ventilated compartment fires, *International Symposium of Fire Safety Science*, 1985.

Chapitre 3

Dynamique des régimes de combustion en milieu confiné

Ce chapitre traite de la dynamique des régimes de combustion en milieu confiné et plus particulièrement des variations de pression, typiques des scénarios d'incendie dans des enceintes ventilées. Ces fluctuations de pression résultent du changement des conditions thermodynamiques des gaz induites par la dynamique du feu et le caractère confiné de l'enceinte. Les paramètres influents sont les caractéristiques du foyer, le niveau d'étanchéité de l'enceinte, les caractéristiques du réseau de ventilation et la nature de l'enceinte. Ces variations de pression peuvent avoir un impact sur la sûreté des installations en influant sur le confinement de l'enceinte.

Nomenclature

\dot{m} ou MLR	Débit de perte de masse (kg/s)	Lettre grecque	
H	Enthalpie (J/kg)	ρ	Masse volumique (kg/m ³)
\dot{Q}, HRR	Puissance (W)	γ	Coefficient isentropique
P	Pression (Pa)	Indice et exposant	
Q, \dot{v} ou q_v	Débit volumique (m ³ /s)	v	Ventilation
R	Constante des gaz parfait (J/mol/K)	w	Paroi (<i>wall</i>)
S	Section (m ²)	<i>adm</i>	Admission
t	Temps (s)	<i>Ext, e</i>	Extraction
Tr	Taux de renouvellement (h ⁻¹)	<i>i</i>	<i>Inlet</i>
T	Température (°C)	<i>f</i>	<i>Fuel</i>
r	Résistance aéraulique (m ⁻⁴)	<i>init</i>	Condition initiale
V	Volume (m ³)	<i>o</i>	Condition ambiante

3.1 Introduction

Lors d'un **incendie** dans une enceinte confinée, les variations de la température des gaz s'accompagnent de variations de leur pressions atténuées par les transferts de masse aux ouvertures du local et modulées par les transferts d'énergie des gaz avec leur environnement et associés aux transferts de masse aux ouvertures. Les paramètres d'un scénario d'incendie pouvant conduire à des variations rapides de la température sont par exemple la vitesse de dégagement de chaleur de l'incendie, l'efficacité de dissipation de la chaleur par les parois ou par un système d'aspersion ou les degrés d'étanchéité de l'enceinte. Les variations de pression jouent un rôle très important lors des régimes de combustion instables au cours desquels la pression est une des variables de couplage entre le processus de combustion (qui induit des fluctuations de pression) et l'apport d'air par le réseau de ventilation (dépendant également de la pression dans le local).

La variation de la pression des gaz peut avoir un impact sur la tenue mécanique de l'enceinte ou d'équipements importants pour la sécurité comme des clapets et des portes coupe-feu. Une autre conséquence peut être la dégradation des fonctions de sûreté de confinement dynamique assurées par un système de ventilation (maintien d'une dépression dans les locaux à risque afin d'éviter les fuites vers l'extérieur et

canaliser les écoulements et les rejets éventuels de contaminants vers les filtres THE avant rejet dans l'environnement). Les variations de pression induites par un incendie peuvent altérer significativement les conditions nominales de fonctionnement de la ventilation.

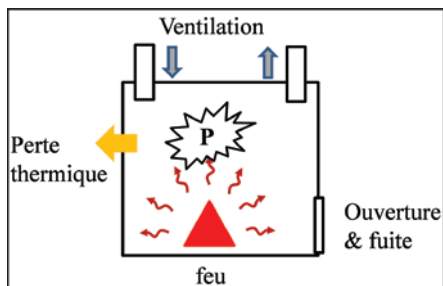


Figure 23. Illustration des mécanismes physiques conduisant à des variations de pression.



Figure 24. Photographie d'un clapet coupe-feu pouvant être altéré lors de pics de pression.

Pour les scénarios d'incendie impliquant des enceintes confinées partiellement étanches et/ou connectées vers l'extérieur par un réseau de ventilation, la compréhension des variations de pression et la maîtrise des outils de simulation vis-à-vis de cette variable sont nécessaires. Ces travaux de recherche ont permis de détailler les mécanismes physiques du phénomène et ainsi de proposer des simulations satisfaisantes pour quelques scénarios.

Cette partie présente les travaux de recherche menée sur la dynamique des régimes de combustion et des variations de pression des gaz sur la base d'expérimentations à grande échelle dans les dispositifs PLUTON et DIVA de l'IRSN. Les thèmes traités sont :

- le comportement typique de la variation de pression des gaz lors d'un scénario d'incendie ;
- les conséquences sur les débits de ventilation ;
- une analyse paramétrique des variations de pression ;

- les variations de pression lors des actions de pilotage de la ventilation ;
- le rôle de la pression des gaz lors des régimes de combustion instables.

Les résultats présentés dans ce chapitre sont issus d'expériences réalisées dans le cadre de programmes nationaux, FLIP avec [AREVA](#) et internationaux [PRISME](#) et [PRISME2](#) et avec la collaboration des ingénieurs de l'[IRSN](#), J.M. Such, S. Melis, Ph. Querre, M. Forestier, L. Bouilloux, J. Richard, W. Le Saux et L. Audouin. Les résultats sont issus de publications citées en référence.

3.2 Variation de la pression des gaz dans un local

Lors d'un [incendie](#) de feu de nappe dans une enceinte confinée et ventilée mécaniquement, la pression des gaz évolue de manière caractéristique. La [figure 25](#) présente l'évolution des pressions, dans l'enceinte et dans les branches de ventilation (en amont et en aval de l'enceinte) ainsi que le débit de perte de masse du combustible proportionnel à la puissance du foyer. La [figure 26](#) présente un schéma de l'installation expérimentale et la localisation des points de mesure de pression.

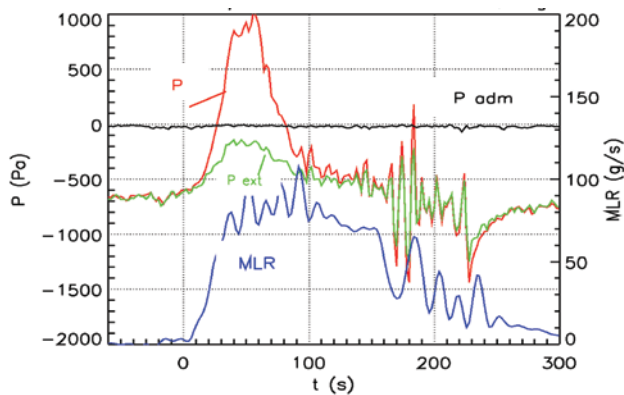


Figure 25. Évolution temporelle typique de la pression des gaz dans une enceinte lors de feux de nappe.

Avant l'inflammation, la pression des gaz dans l'enceinte est constante et correspond aux conditions nominales de fonctionnement assurant un confinement dynamique (pour cet exemple -600 Pa). Dès l'allumage et durant la phase de propagation de la flamme sur la nappe, la pression des gaz dans l'enceinte va croître progressivement jusqu'à atteindre une valeur maximale appelée « pic de suppression à l'allumage ».

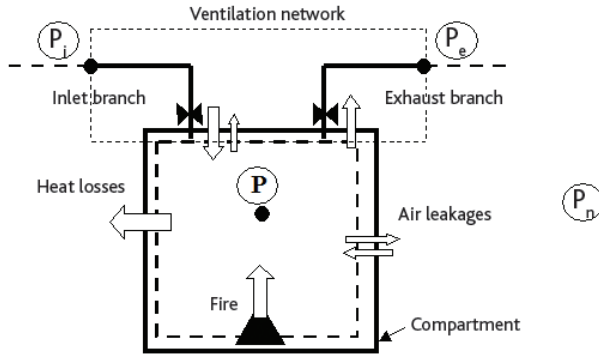


Figure 26. Schéma de l'installation expérimentale.

Ensuite la pression des gaz va diminuer pour retrouver un niveau stable proche de son niveau avant l'allumage. Dès que le feu s'éteint, une chute rapide de la pression des gaz, jusqu'à un minimum, suivi d'une augmentation progressive, est observée. Au cours de la phase de combustion, des fluctuations importantes de la pression des gaz peuvent être observées avec un caractère oscillatoire ou chaotique. Les *extrema* de cette pression coïncident avec des variations des débits de perte de masse, c'est-à-dire de la puissance de l'*incendie* (vitesse de croissance ou de décroissance). Cette évolution de la pression des gaz constitue un comportement générique pouvant être rencontré sur un grand nombre de scénarios d'incendie.

Un bilan de conservation d'énergie, considérant l'enceinte comme un réacteur homogène, permet d'interpréter ces variations de la pression des gaz. Il est formulé de la façon suivante :

$$\frac{V}{\gamma - 1} \frac{d}{dt} P + \frac{\gamma}{\gamma - 1} P_o [\dot{v}_e - \dot{v}_i] = \dot{Q}_f - \dot{Q}_w \quad (15)$$

$$\text{avec } \dot{v}_i = \sqrt{\frac{|\Delta P_i|}{r_i \rho_i}} ; \dot{v}_e = \sqrt{\frac{|\Delta P_e|}{r_e \rho_e}}$$

Le bilan d'énergie des gaz dans l'enceinte comprend un terme instationnaire (exprimé en fonction du taux de variation de la pression des gaz), un terme traduisant le flux enthalpique aux frontières du volume de contrôle (due à la ventilation pour cet exemple), un terme de production d'énergie (le feu) et un terme de dissipation d'énergie (les pertes thermiques aux parois par exemple). Le paramètre γ est le facteur isentropique donné par $\gamma = C_p/C_v$ (ou $\gamma/(\gamma - 1) = C_p M/R$). Les débits volumiques sont exprimés à l'aide de la relation de Bernoulli avec $\Delta P_i = P_i - P$, $\Delta P_e = P - P_e$ et

$\Delta P_o = P - P_o$. Les variables r_e et r_i sont les résistances aérauliques des branches de ventilation définies comme $r = \Delta P / (\rho v^2)$.

Lors de l'allumage, il existe un décalage temporel entre la libération de l'énergie par l'**incendie** et sa dissipation, par le réseau de ventilation et par les pertes thermiques aux parois, conduisant ainsi à une valeur positive du taux de variation de la pression des gaz dP/dt . L'augmentation de pression entraîne une variation des flux de matière aux frontières (augmentation du débit d'extraction et réduction du débit d'admission). Parallèlement, en raison de l'augmentation de la température des gaz, la dissipation thermique aux parois augmente. La variation de pression des gaz (dP/dt) diminue alors progressivement jusqu'à s'annuler (maximum de pression) puis devient négative (diminution de la pression) jusqu'à ce que la pression des gaz atteigne une nouvelle valeur d'équilibre pendant l'incendie.

Lors de l'extinction du feu, un mécanisme similaire est observé avec un arrêt de la puissance délivrée par le feu (le terme source dans l'équation d'énergie s'annule). L'inertie thermique des parois induit à nouveau un retard entraînant une diminution de la pression des gaz jusqu'à une valeur minimum puis une ré-augmentation de cette pression jusqu'à un équilibre final.

Ces deux processus d'augmentation et de diminution de la pression des gaz sont typiques pour des **incendies** dans des enceintes présentant un certain niveau d'étanchéité. Pour cet exemple, l'étanchéité est assurée par la résistance aéraulique des gaines de ventilation.

L'amplitude des pics de surpression et de dépression peut atteindre des niveaux de plusieurs dizaines de millibars (ou d'hecto Pascal [hPa]) pouvant se situer au-delà des niveaux de tenue mécanique des équipements de sectorisation (portes coupe-feu, clapets coupe-feu, ouvrants, trémie...).

Les *maxima* de pression des gaz coïncident avec les périodes de fortes variations de puissance du foyer (allumage, extinction ou variation au cours du déroulement de l'**incendie**). Des variations de pression peuvent ainsi se produire au cours du feu. Suivant la dynamique et le comportement de l'incendie, plusieurs pics de suppression et/ou de dépression peuvent être observés.

Pour les foyers en milieu confiné, la pression des gaz est ainsi un bon indicateur de l'évolution de l'**incendie**. Les caractéristiques importantes de ces variations de

pression sont leur amplitude mais également leur durée. En effet, lors des pics de surpression (à l'allumage notamment), le confinement dynamique de l'enceinte ne sera pas assuré pendant la période où la pression des gaz est supérieure à la pression extérieure conduisant ainsi à des fuites vers l'extérieur du local.

3.3 Conséquences sur les débits de ventilation

Une conséquence des variations de pression des gaz dans le local est la modification des débits d'admission et d'extraction d'air par la ventilation. La figure 27 présente des variations de débits corrélés aux variations de pression. Le pic de surpression à l'allumage induit une diminution du débit d'admission et une augmentation de celui d'extraction. Ce comportement s'inverse lors du pic de dépression à l'extinction du feu. Pour des amplitudes de surpression suffisamment grandes, des inversions d'écoulements peuvent se produire dans le conduit d'admission, lors du pic de surpression, avec évacuation des fumées et dans le conduit d'extraction, lors du pic de dépression, avec une entrée d'air. Ces inversions d'écoulements peuvent avoir un impact sur la combustion par une réduction de l'apport d'oxygène par l'admission lors de la phase d'allumage ou un apport important d'oxygène après l'extinction pouvant entraîner un ré-allumage du feu. Ces inversions peuvent également conduire à des rejets de matière *via* la conduite d'admission.

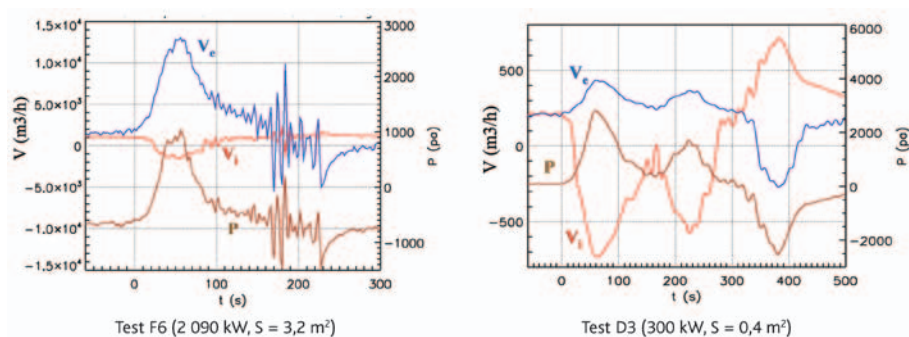


Figure 27. Évolution temporelle des débits d'air dans les branches d'admission et d'extraction et de la pression des gaz dans le local.

Lors des fluctuations de la pression des gaz au cours de la phase de combustion, ces variations de débits peuvent être à l'origine de processus d'instabilités de combustion en provoquant des variations du débit d'oxygène entrant dans l'enceinte.

3.4 Analyse paramétrique

L'analyse de l'équation d'énergie montre que les paramètres influant sur les variations de la pression des gaz du local sont : la source d'énergie qu'est l'incendie (plus précisément l'accélération ou décroissance de la puissance dégagée), les résistances aérauliques du réseau de ventilation et les caractéristiques thermiques des parois de l'enceinte. Des expériences réalisées à grande échelle permettent d'illustrer l'influence de la puissance de l'incendie et des résistances aérauliques.

3.4.1 Influence de la puissance du feu

L'influence de la puissance du feu est analysée à partir d'expérimentations de feu de nappe d'hydrocarbure de dimensions variables. La figure 28 présente l'évolution de la pression des gaz au cours du temps lors des phases d'allumage et d'extinction, pour plusieurs surfaces de nappe.

Les pics de pression résultent ainsi d'un décalage temporel entre la variation de la puissance de l'incendie (augmentation ou diminution) et l'atténuation de ses effets par les parois de l'enceinte et par l'accommodation des débits de la ventilation. L'augmentation de la surface de la nappe augmente le taux de croissance du feu et ainsi l'amplitude des pics de pression. Lors de l'extinction, le taux de décroissance de la pression des gaz va augmenter avec la surface de la nappe et augmenter le pic de dépression. La puissance du feu et son taux de croissance sont des paramètres prépondérants sur les pics de surpression lors d'un incendie.

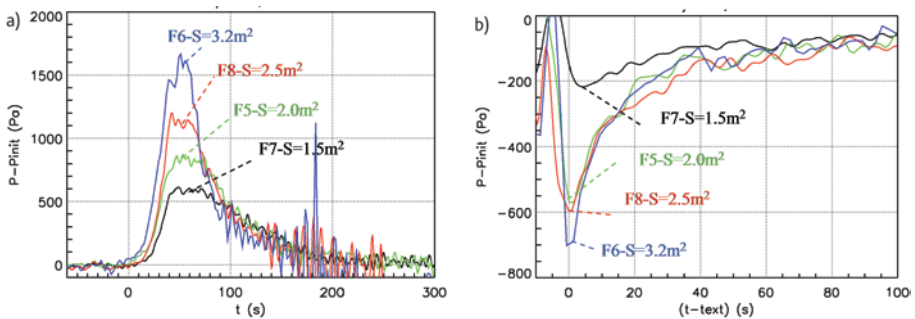


Figure 28. Variation de la pression des gaz lors de l'allumage (a) et de l'extinction (b) pour des feux de nappe de différentes surfaces.

La figure 29 présente la variation de l'amplitude des pressions des gaz dans le local et des débits de ventilation au moment des pics de pression en fonction de la surface de la nappe. L'amplitude des variations de débits augmente également avec la puissance du feu ce qui peut conduire à des inversions de débit dès que la puissance est suffisamment élevée. Par exemple, pour un feu de 5 m², le débit de ventilation ajusté initialement à 1 200 m³/h peut s'inverser à l'extraction lors de l'extinction pour atteindre une valeur de - 7 000 m³/h.

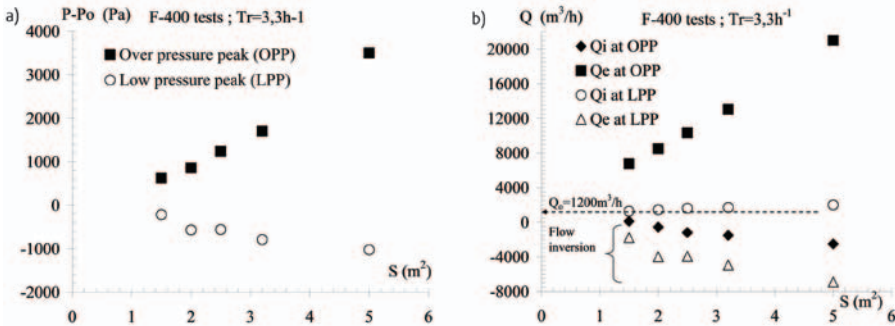


Figure 29. Influence de la surface de nappe sur l'amplitude des pics de pression des gaz (a) et des débits de ventilation (b).

Ces essais illustrent également une différence de comportement entre les pics de pression à l'allumage et à l'extinction. Ce résultat est lié à une évolution de la puissance du feu différente entre la phase d'allumage (croissance progressive) et la phase d'extinction (arrêt net). D'autre part, une différence d'amplitude est observée entre les deux pics. L'amplitude du pic de suppression est généralement plus grande que celle du pic de dépression. Ce phénomène est lié à la température des gaz plus faible lors du pic à l'allumage que lors du pic à l'extinction entraînant une différence de dissipation thermique aux parois. De plus, pour une même variation de la puissance du feu, plus la température des gaz est élevée et plus faible sera la variation de pression (la masse du gaz dans le volume diminuant avec la température à pression donnée).

3.4.2 Influence de la résistance aéraulique sur la pression des gaz dans le local

Un autre paramètre influant sur la variation de pression des gaz dans le local est la résistance aéraulique des gaines de ventilation. Plus ces résistances sont élevées et plus les variations de pression de gaz seront importantes pour des variations de puissance données. En effet, le transfert de matière par les ouvertures du local

permet d'atténuer la variation de la pression des gaz induite par le refroidissement ou le réchauffement des gaz du local. La vitesse de transfert de gaz par les ouvertures est directement dépendante de la perte de charge aux ouvertures. Ce comportement est illustré sur la figure 30 pour trois expériences impliquant un même feu de nappe d'hydrocarbure de $0,4\text{ m}^2$ dans un compartiment ventilé avec trois débits de ventilation (ou taux de renouvellement \bar{Tr}). Le changement de débit de ventilation est réalisé en modifiant l'ouverture des vannes sur les conduits d'admission et d'extraction et ainsi les résistances aérauliques de ces conduits. L'augmentation des résistances aérauliques par fermeture des vannes conduit à une augmentation des amplitudes de pression. La figure 31 illustre ce comportement en exprimant l'amplitude des pics de pression (lors des phases d'allumage et d'extinction) en fonction d'une résistance équivalente, reliant les résistances aérauliques des conduits d'admission et d'extraction ($1/re^* = 1/re_{adm} + 1/re_{ext}$). Le réglage des organes de ventilation est une action importante pouvant influencer sur les variations de pression lors d'un incendie dans une enceinte.

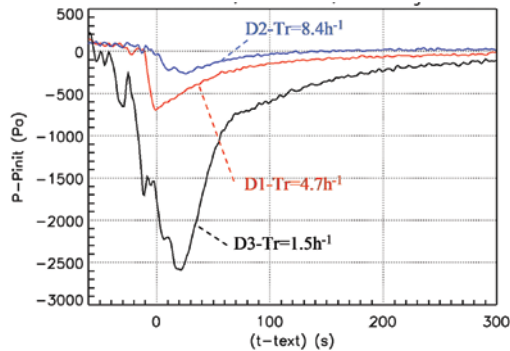


Figure 30. Variation de la pression pour plusieurs configurations de ventilation.

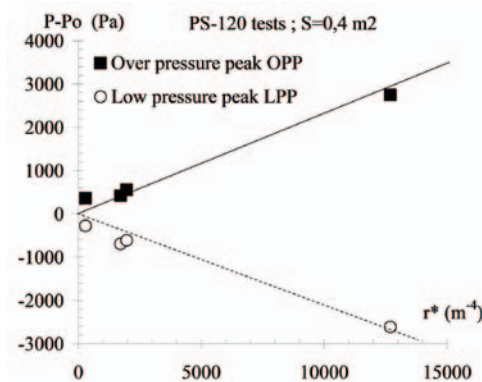


Figure 31. Évolution de l'amplitude des pics de pression en fonction de la résistance aéraulique équivalente.

3.4.3 Approche corrélatrice des paramètres influents

La mise en évidence des paramètres influents a été traitée en proposant une approche corrélatrice de l'amplitude de surpression en fonction des caractéristiques de l'incendie. La formulation suivante est proposée [22] :

$$\Delta P_o = K \left(\frac{\dot{Q}_f \sqrt{r^*}}{\sqrt{\rho_o} C_P T_o} \right) \quad (16)$$

$$\text{avec } K = \frac{1}{f^2} \frac{\rho(t_p)}{\rho_o} \left(1 - \frac{\dot{Q}_w(t_p)}{\dot{Q}_f(t_p)} \right)^2$$

Elle est obtenue à partir de l'équation d'énergie appliquée aux gaz du local. L'amplitude de surpression dépend essentiellement de la puissance du feu et de la résistance aéraulique équivalente pondérée par des coefficients introduisant les pertes thermiques aux parois, la température des gaz et la durée de la phase de croissance. La confrontation avec des données expérimentales fournit des résultats satisfaisants.

Cette analyse corrélatrice montre qu'il est possible de retrouver les niveaux de surpression d'un scénario d'incendie moyennant la connaissance de quelques paramètres qui le caractérisent. Les logiciels de simulation reproduisent également de façon satisfaisante les variations de pression en utilisant l'évolution de la puissance comme une donnée d'entrée et connaissant les propriétés thermophysiques de l'enceinte et les caractéristiques de la ventilation.

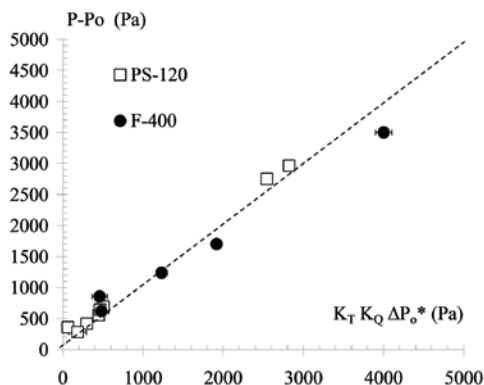


Figure 32. Confrontation d'une approche corrélatrice avec des résultats expérimentaux.

La prédiction des variations de pression devient moins satisfaisante quand l'évolution de la puissance doit être prédite (ce qui demeure un enjeu pour un certain nombre de scénarios) et que la connaissance des propriétés de l'enceinte (nature de parois par exemple) et des caractéristiques du réseau de ventilation (réglage des vannes par exemple) est incertaine. Pour des situations pratiques, une prédiction réaliste des variations de pression pour un scénario d'incendie dans une installation réelle reste difficile.

3.5 Variation de pression lors d'actions de pilotage de la ventilation

Des variations de la pression des gaz sont également observées lors des actions de pilotage de la ventilation sur le déroulement d'un incendie. Pour des scénarios d'incendie dans des installations équipés d'un réseau de ventilation mécanique, celui-ci peut être utilisé comme moyen d'intervention sur le déroulement de l'incendie afin de réduire son impact sur l'installation.

Dans ce cadre, des expérimentations d'incendie mettant en œuvre des protocoles de pilotage de la ventilation spécifiques ont été réalisées sur des feux de nappe dans un local de 400 m³ ventilé mécaniquement (figure 33-a). En l'absence d'action sur la ventilation, l'évolution de la pression des gaz lors de l'incendie présente un comportement typique, précédemment exposé, avec deux pics de surpression et dépression lors de l'allumage et l'extinction du feu (figure 33-b).

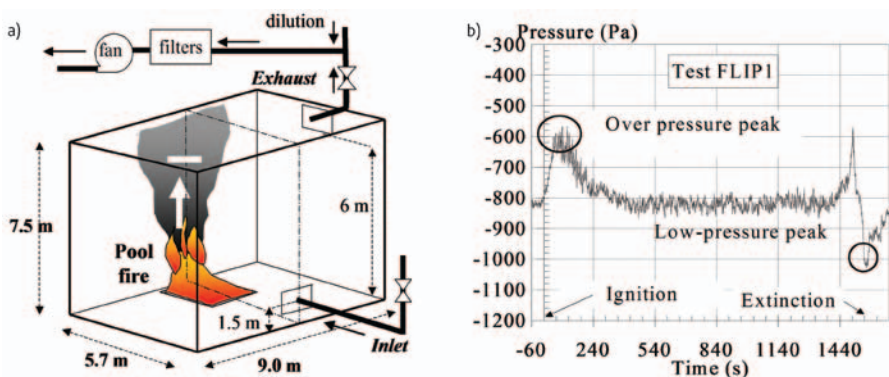


Figure 33. Essai avec pilotage de la ventilation : schéma de l'installation (a) et évolution de la pression des gaz sans pilotage (b) [20].

Deux protocoles de pilotage de ventilation ont été mis en œuvre au cours de deux essais de feu de nappe. Le premier consiste à fermer le conduit d'admission, 210 secondes après l'allumage (figure 34-a). Le second consiste à fermer le conduit d'admission puis celui d'extraction (figure 34-b).

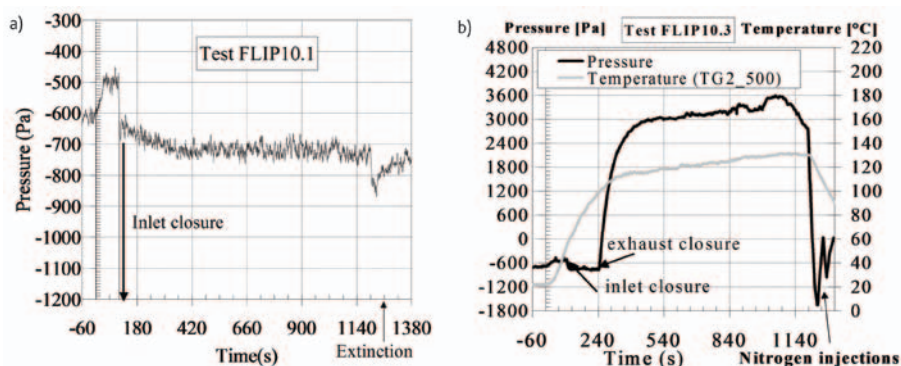


Figure 34. Essai avec pilotage de la ventilation : évolution de la pression des gaz avec fermeture du conduit d'admission (a) et avec fermeture du conduit d'admission puis d'extraction (b) [20].

Pour le premier protocole, la fermeture de l'admission entraîne une diminution de la pression des gaz en raison de l'arrêt d'apport de matière par l'admission alors que l'extraction de gaz par la ventilation n'est pas strictement annulée. La pression des gaz diminue rapidement puis se stabilise à une valeur plus faible que la valeur initiale jusqu'à la fin du feu. Cette action a un effet très favorable sur le déroulement de l'incendie en arrêtant l'apport d'oxygène et en réduisant ainsi la durée du feu mais a peu d'impact sur la pression des gaz.

Le second protocole conduit à un comportement très différent de la pression des gaz dans le local. Après la fermeture de l'admission puis de l'extraction, le local est étanche à tout transfert de matière. La pression des gaz dans le local augmente très rapidement, en proportion de l'augmentation de la température des gaz, jusqu'à un niveau stationnaire correspondant à un équilibre entre l'énergie libérée par le feu et celle dissipée par les parois. Pour cette expérimentation, une suppression supérieure à 30 hPa est mesurée. Pour cette configuration, le pic de dépression lors de l'extinction va également être plus important que celui obtenu en l'absence de pilotage en raison de la fermeture des conduits de ventilation empêchant l'entrée d'air.

Ces études sur le pilotage de la ventilation illustrent le rôle de la ventilation sur les variations de pression lors d'un incendie dans un local confiné et ventilé.

3.6 Rôle de la pression lors de phénomènes instables

Les variations de la pression des gaz sont ainsi un phénomène typique rencontré lors d'un scénario d'incendie dans une installation confinée et ventilée mécaniquement. En plus de leur impact sur la sûreté de l'installation (action mécanique et perte de confinement dynamique), ces variations de pression des gaz peuvent avoir un rôle d'indicateur du comportement particulier de l'incendie ou être à la fois cause et conséquence de régimes instables de combustion qui peuvent apparaître au cours de l'incendie.

3.6.1 Indicateurs du comportement instable de l'incendie

À partir des expérimentations de scénarios d'incendie en milieu confiné, différentes situations ont été rencontrées pour lesquelles, l'évolution temporelle de la pression des gaz du local présente un comportement instable.

Un premier exemple concerne des situations de combustion instables en présence d'un niveau faible d'oxygène dans le local (combustion dite sous-ventilée). Ces situations sont rencontrées au cours d'incendies faiblement ventilés (l'apport d'oxygène est très en deçà des quantités requises pour la combustion). La pression des gaz présente ainsi des oscillations caractéristiques qui s'amplifient progressivement puis s'interrompent avec l'extinction du feu (figure 35). Les fluctuations présentent des amplitudes significatives (de l'ordre de 20 hPa) pour de basses fréquences (période de quelques dizaines de secondes).

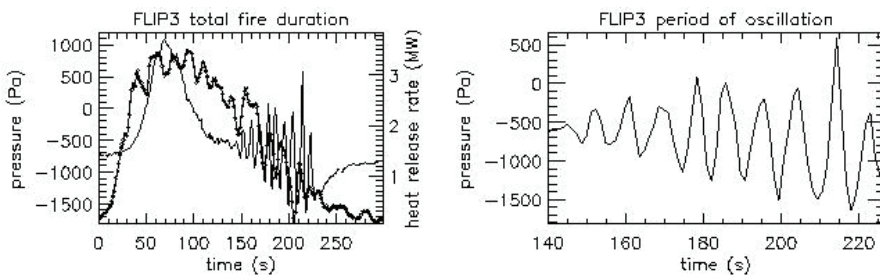


Figure 35. Exemple d'oscillation de pression des gaz au cours d'un feu de nappe de 3 MW dans une enceinte ventilée : toute la durée du feu (a) sur la période d'oscillation (b) [15].

Un second exemple montre un comportement différent où les fluctuations de pression des gaz apparaissent beaucoup plus tôt au cours de la phase de combustion et changent de comportement (amplitude et fréquence) au cours de l'essai. Pour l'exemple présenté sur la figure 36, trois périodes sont identifiées avec trois valeurs de fréquence 0,215 Hz, 0,233 Hz et 0,05 Hz.

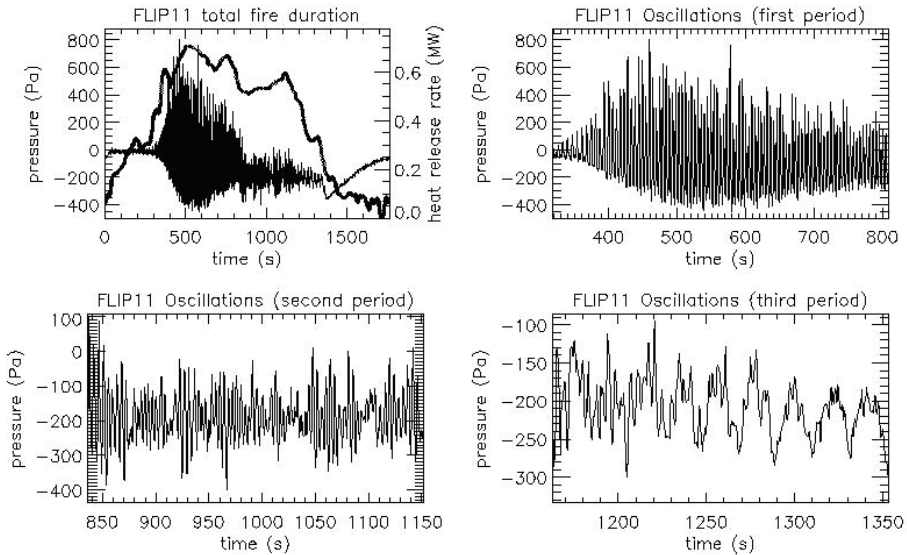


Figure 36. Exemple d'oscillation de pression des gaz au cours d'un feu de nappe de 0,6 MW dans une enceinte ventilée : sur toute la durée du feu (a) et sur trois périodes (b-c-d) [15].

Ces variations de pressions sont généralement corrélées à des fluctuations du taux de combustion. Dans le cas d'expériences où la flamme à l'intérieur du local peut être visualisée (production limitée de suies), le comportement de la flamme au cours des cycles de fluctuations est observé et présente également un caractère instable. Un exemple est illustré par la figure 37 pour un feu de nappe dans un local confiné et fermé. Les fluctuations du foyer sont typiques des mécanismes de bouffées (*puffing*) associés à l'entraînement d'air rencontré pour des foyers à l'air libre. Dans le cas d'un foyer dans un local confiné, ce mécanisme persiste mais est modifié par le confinement et la présence d'une couche de fumées. Les fréquences sont alors plus basses (de l'ordre du Hz) que celles rencontrées en milieu libre.

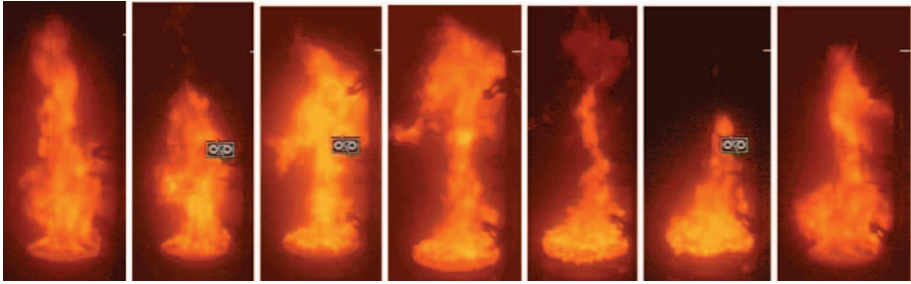


Figure 37. Phénomène de bouffées au cours d'un feu de nappe dans une enceinte confinée [18].

3.6.2 Implication de la pression dans les mécanismes instables de combustion

Dans certaines situations, les variations de pression des gaz provoquées par l'incendie vont modifier les débits de ventilation et affecter le processus de combustion via l'impact sur l'apport d'oxygène dans le local. Un mécanisme de couplage entre l'incendie et les débits de ventilation se met en place où la pression des gaz du local est un paramètre majeur de couplage. Ce type de phénomène oscillatoire entretenu est parfois observé sur des dispositifs à échelle réduite avec une ventilation naturelle. Récemment des expérimentations de feux de nappe d'heptane à grande échelle dans une enceinte ventilée mécaniquement ont également mis en évidence ce phénomène.

Au cours de la phase de combustion, quelques minutes après l'allumage, un régime oscillatoire de la puissance du foyer (illustré sur la figure 38-a par le débit de perte de masse de combustible) se met en place. Des variations de la pression des gaz dans l'enceinte sont observées, corrélées avec les variations du débit de perte de masse du foyer. Ces fluctuations de pression présentent des amplitudes importantes (du même ordre que la valeur moyenne) et sont caractérisées par des basses fréquences (période d'une centaine de secondes). Parallèlement, les débits dans les conduits de ventilation suivent le même comportement oscillatoire (figure 38-b). Un mécanisme oscillant et entretenu se met en place couplant la combustion, la pression des gaz et le débit admission d'oxygène. Les variations de la puissance de l'incendie se traduisent par un déplacement de la zone de combustion dans le local entre le centre du local, où se situe la nappe de combustible, et la position de la bouche d'admission (figure 39). Ce phénomène peut impacter la sûreté de l'installation en raison des variations importantes de la pression des gaz et des débits dans le réseau de ventilation qui peuvent endommager les équipements de sectorisation. Par ailleurs, l'apparition de ces instabilités de combustion accompagnées de fortes oscillations

de la pression des gaz est actuellement difficilement prédictible. Ces phénomènes sont actuellement en cours d'étude au sein du laboratoire.

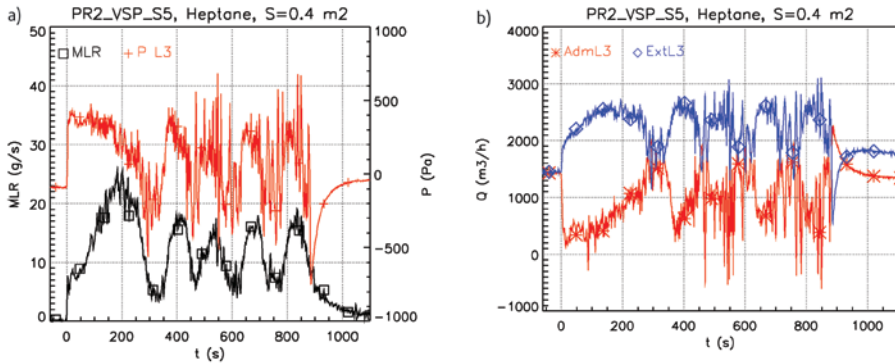


Figure 38. Évolution temporelle du débit de perte de masse et de la pression (a) et des débits dans les conduits de ventilation (b).



Figure 39. Séquence d'images au cours d'un cycle.

3.7 Conclusion

L'analyse d'expérimentations de feux de nappes dans des enceintes ventilées a mis en évidence le comportement caractéristique de la pression des gaz au cours des phases d'allumage du foyer et de son extinction au cours d'un incendie dans un local confiné et ventilé mécaniquement.

Dans certaines conditions, une phase stationnaire peut s'établir, caractérisée par des oscillations de très faible amplitude de la pression des gaz autour d'une valeur relativement constante. Dans d'autres cas, pour des feux sous oxygénés, des instabilités de combustion apparaissent conduisant à des oscillations de faible

fréquence et d'amplitude significative de la pression des gaz qui s'entretiennent sur de longues périodes de temps. La pression des gaz est dans ce cas un des facteurs qui entretient les instabilités de combustion en faisant osciller l'apport en oxygène dans le local par le réseau de ventilation.

Les paramètres influant la stabilité ou les instabilités de combustion et l'évolution couplée de la pression des gaz sont la puissance du feu, le niveau de confinement de l'enceinte, les caractéristiques du réseau de ventilation et la nature de l'enceinte. Les variations de la pression des gaz peuvent avoir un impact sur la sûreté des installations, en particulier parce qu'elles peuvent endommager le confinement, et ainsi doivent être prises en compte lors de l'évaluation des risques.

Plusieurs perspectives de recherche sont identifiées :

- la première vise à approfondir la compréhension du rôle spécifique que joue la pression des gaz dans l'apparition puis l'entretien des instabilités de combustion qui s'accompagnent de l'oscillation de nombreuses grandeurs physiques, dont la pression de gaz. Elle rejoint l'étude de la dynamique des régimes de combustion sous-ventilée mentionnée dans le chapitre précédent ;
- une seconde perspective de recherche concerne l'utilisation de la pression pour caractériser des scénarios d'**incendie**. Au même titre que la température et la concentration en produits de combustion, la pression peut être un indicateur de la nature de l'incendie et de son évolution ;
- enfin, une troisième perspective concerne l'étude des scénarios d'**incendie** impliquant un large spectre de variations de pression (faible variations, déflagrations puis explosions) induites par des phénomènes locaux de combustion pré-mélangée. Ces scénarios sont généralement sous-ventilés et le processus de combustion est issu de flammes de diffusion ou de larges zones pré-mélangées.

Bibliographie

15. H. Prétrel, S. Mélis, S. Minétian, P. Querre, Experimental observations of pressure instabilities during a pool fire in a confined and ventilated enclosure, 4th International Seminar on Fires and Explosions Hazard (ISFEH), LondonDerry, September 2003.
16. H. Prétrel, W. Le Saux, Y. Pizzo, J.M. Such, Over-pressure peaks and low-pressure peaks during compartment fire tests in forced ventilated configuration, 10th International Fire Science and Engineering Conference, July 5-7, Edinburgh, RU, 2004.
17. H. Prétrel, W. Le Saux, Experimental study of the burning rate behaviour of a pool fire in confined and ventilated compartment, Post-SMIRT 18, Vienna, Austria, 2005.
18. H. Prétrel, P. Querre, M. Forestier, Experimental Study of Burning rate Behaviour in Confined and Ventiladed Fire Compartments, 8th International Symposium on Fire Safety Science, September 18-23, Pekin, Chine, 2005.
19. L. Bouilloux, H. Prétrel, W. Le Saux, J. Richard, Studies about pressure variations and their effects during a fire in a confined and forced ventilated room, Eurosafe Forum, November 7-8, Brussel, Belgium, 2005.
20. [H. Prétrel](#), J.M. Such, Effect of ventilation procedures on the behaviour of a fire compartment. scenario, *Nuclear Engineering and Design*, 235, 20, 2155-2169, 2005.
21. H. Prétrel, J.M. Such, Study based on large scale experiments on periodic instabilities of pressure and burning rate during pool fire in confined and mechanically ventilated compartment, 3rd European Combustion Meeting, ECM, April 11-13, Crete, Greece, 2007.
22. [H. Prétrel](#), W. Le Saux, L. Audouin, Pressure variations induced by a pool fire in a well-confined and force-ventilated compartment, *Fire Safety Journal*, 52, 11-24, 2012.

Chapitre 4

Propagation des fumées d'incendie

Ce chapitre présente une synthèse de travaux de recherche sur la propagation des fumées dans des enceintes confinées et ventilées mécaniquement. La propagation des fumées est un enjeu important notamment pour l'identification des conditions de dysfonctionnement d'équipements de sûreté. Les thèmes abordés concernent le rôle du confinement et de la stratification verticale des fumées sur les écoulements de panache, sous-plafond et les écoulements de transferts à travers un passage de porte ou de trémie. Le développement de techniques avancées de mesure des fumées pour la constitution de base de données est également présenté.

Nomenclature

H	Hauteur (m)	Lettre grecque	
HRR ou Q	Puissance (W)	ρ	Masse volumique (kg/m ³)
ΔP	Différence de pression (Pa)	Indice et exposant	
q_v ou \dot{v}	Débit volumique (m ³ /s)	S	Statique
R	Rayon (m)	<i>ext</i>	Extérieur
t	Temps (s)	<i>max</i>	Maximum
Tr	Taux de renouvellement (h ⁻¹)	<i>sup</i>	Couche supérieure
T	Température (°C)	<i>inf</i>	Couche inférieure
U	Vitesse (m/s)	<i>o</i>	Condition ambiante
z	Altitude (m)	ρ	Panache
		<i>i</i>	Indice
		*	Sans dimension

4.1 Introduction

Les mouvements de fumées lors d'un **incendie** se caractérisent par le déplacement de gaz à masses volumiques variables dans un ensemble géométrique spécifique. Le fluide est un mélange d'air et de produits de combustion (gazeux et solides telles que les particules de suies). La mise en mouvement des gaz est induite par le dégagement de chaleur du foyer (engendrant des forces de flottabilité) et la ventilation mécanique apportant une quantité de mouvement à l'air entrant dans le local (figure 40). Des écoulements particuliers sont alors identifiés tels que le panache thermique induit par la source incendie, les écoulements horizontaux dits « sous plafond » issus de l'impact du panache avec le plafond. Les mécanismes de remplissage de la partie haute du local par des gaz chauds entraînant la formation d'une couche chaude (figure 41), les écoulements au voisinage du foyer alimentant celui-ci en comburant et les écoulements de transfert entre les locaux (passage de porte, orifice, caillebotis, fuite...) sont également des écoulements d'intérêts.

Les enjeux de sûreté associés à la propagation des fumées d'**incendie** concernent la propagation de matières radioactives transportées par les fumées, la possible perturbation des actions des équipes d'intervention et enfin le dysfonctionnement d'équipements importants pour la sûreté provoqué par une exposition aux fumées (agression thermique et chimique). Il s'agit, par exemple, d'évaluer la durée pour qu'un équipement de sûreté se trouve en contact avec des fumées dont les caractéristiques

(température, concentrations) peuvent conduire à son dysfonctionnement. La connaissance de ces écoulements et le développement de modèles prédictifs sont des enjeux de recherche pour la sûreté des installations nucléaires.

Les verrous scientifiques associés à la prédiction de ces écoulements reposent sur la complexité du couplage entre (i) le mouvement de fluides à masses volumiques variables (due aux variations de température dans l'espace et dans le temps), (ii) une géométrie complexe (plusieurs enceintes avec des orifices de transfert) et (iii) la ventilation mécanique qui induit des forces d'inertie. Les écoulements sont ici pilotés par la combinaison des forces de flottabilité liées aux écarts de masses volumiques et des forces d'inertie liées à la ventilation mécanique.

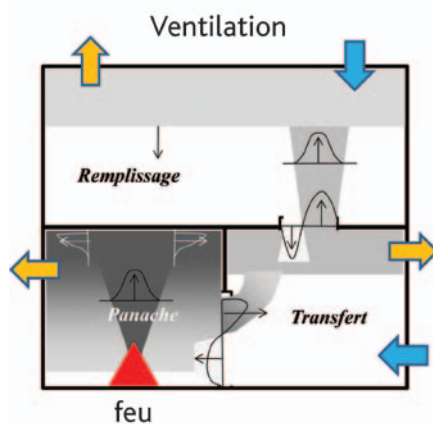


Figure 40. Illustration d'écoulements observés lors d'un incendie en milieu confiné et ventilé.



Figure 41. Photographie illustrant la stratification des fumées dans une enceinte.

Ces travaux de recherche menés à l'IRSN sur la propagation des fumées ont pour objectif de prédire et quantifier les écoulements à l'aide des outils de simulation

afin d'évaluer les conséquences en terme de sûreté (élévation de température, concentration en espèces chimique et en suie).

Cette section se propose d'illustrer cette thématique en présentant les recherches menées sur les écoulements de panache en milieu stratifié, la stratification thermique des fumées et les écoulements de transfert entre les locaux par des passages de porte et de trémie. Ces recherches sont issues d'expérimentations à grande échelle menées dans le cadre des programme de recherche PRISME et PRISME 2 avec le support de stagiaires ainsi que des travaux de thésards dans le cadre d'expérimentation à échelle réduite. Les résultats présentés ici sont tirés de publications citées en référence.

4.2 Panache thermique et écoulement sous plafond en milieu stratifié

Le panache thermique est l'écoulement induit par la source **incendie** initiant la mise en mouvement des fumées dans une enceinte. Il constitue une colonne convective de gaz ascensionnel, pilotée par des forces de flottabilité, fonction de la différence de température entre le panache et l'environnement extérieur. La dynamique du panache est caractérisée par des profils horizontaux de vitesse et de température de forme gaussienne (figure 42). Son mouvement vertical dans un milieu statique induit un processus d'entraînement de l'air contribuant à alimenter le panache en air. Suivant l'axe vertical, la section et le débit du panache augmentent en raison de l'apport de masse dû à l'air entraîné, la température et la concentration en espèces chimiques diminuent en raison du processus de dilution et de refroidissement par l'air entraîné. Dès que la température dans le panache atteint la température extérieure, les forces de flottabilité s'annulent et le mouvement ascensionnel est stoppé.

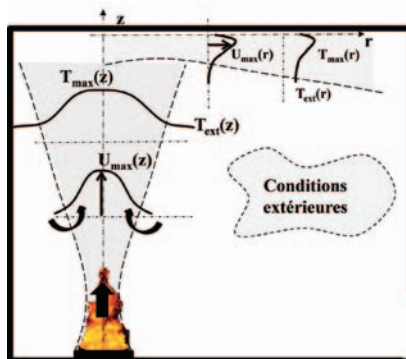


Figure 42. Représentation schématique d'un panache thermique et d'un écoulement sous plafond lors d'un incendie.

Dans le cas d'un scénario d'**incendie** dans une enceinte, le panache peut impacter le plafond et induire un écoulement dit « sous-plafond » ou « *ceiling jet* » propageant les fumées radialement. Les fumées envahissent progressivement l'enceinte conduisant à une stratification verticale des fumées (figure 43). L'influence de la stratification thermique dans l'enceinte sur les écoulements de panache et « sous-plafond » est une spécificité des scénarios d'incendie dans des enceintes confinées et mécaniquement ventilées.



Figure 43. Illustration du remplissage d'un local par un panache (expérimentation à échelle réduite avec une similitude air/hélium) [27].

4.2.1 Effet du confinement sur un écoulement de panache dans une enceinte

L'effet du confinement est observé sur des expérimentations d'un feu de nappe, accolé à une paroi, dans un local ventilé mécaniquement (figure 43). La décroissance axiale de la température maximale dans le panache et de la température à l'extérieur est présentée sur la figure 44. La température diminue suivant l'altitude z en raison de l'entraînement d'air. Parallèlement, en raison du remplissage des fumées, la température extérieure présente une augmentation progressive du sol vers le plafond. Une comparaison avec le comportement de ce même panache en milieu ouvert (prédiction à partir d'approches corrélatives) montre que la stratification du milieu extérieur entraîne des températures de panache très largement supérieures à celles de ce même panache en milieu libre (à température ambiante). Le confinement conduit à échauffer le milieu extérieur par le remplissage des fumées et ainsi limite le refroidissement du panache. Ces expériences démontrent l'influence significative du milieu environnement sur les caractéristiques thermiques du panache.

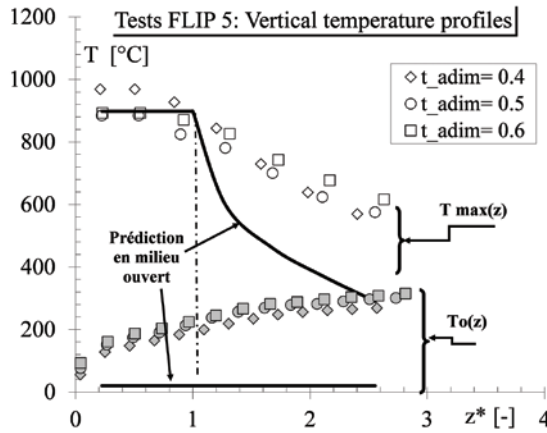


Figure 44. Profils verticaux de température sur l'axe du panache et dans le milieu environnant [24].

Une comparaison de ces résultats d'essais avec des modèles corrélatifs prédictifs montre un bon accord de la différence de température, $(T_{max}(z) - T_{ext}(z))$ (figure 45). La connaissance des conditions environnementales permet de retrouver le comportement du panache en utilisant les modèles développés en milieu ouvert. Ces travaux mettent en évidence l'applicabilité des approches classiques en milieu ambiant libre pour les applications en milieu confiné.

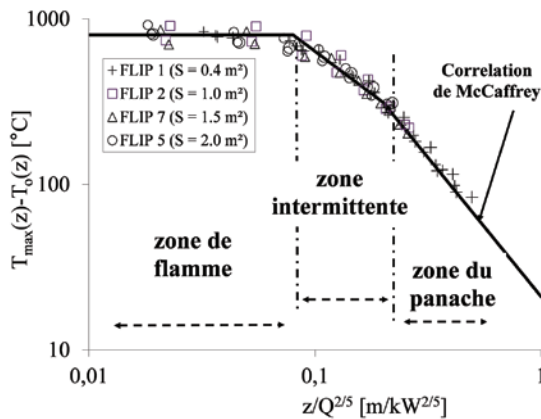


Figure 45. Évolution de l'excès de température dans un panache en milieu stratifié (confrontation expérience et modèle) [24].

L'influence de la stratification dans une enceinte sur le développement d'un panache a également été mise en évidence à partir d'une approche analytique. Une étude a

été menée à partir d'un modèle 1D en discrétisant les fumées du local en plusieurs couches d'épaisseur unitaire, dz (figure 46). Ce modèle repose sur un système d'équations différentielles, obtenues à partir des bilans de conservation de masse et d'énergie pour chaque couche. L'évolution temporelle de la masse volumique et de la vitesse dans chaque couche est alors obtenue. Un modèle de panache, de type Morton [34], est couplé à ce système donnant, d'une part le débit de fumées alimentant la dernière couche sous le plafond, d'autre part, la différence de masse volumique, $\rho_p(z) - \rho_{ext}(z)$, à chaque altitude. Cette modélisation théorique simple permet de calculer l'évolution temporelle de la stratification extérieure au panache ainsi que de prendre en compte cette stratification dans l'évolution du panache.

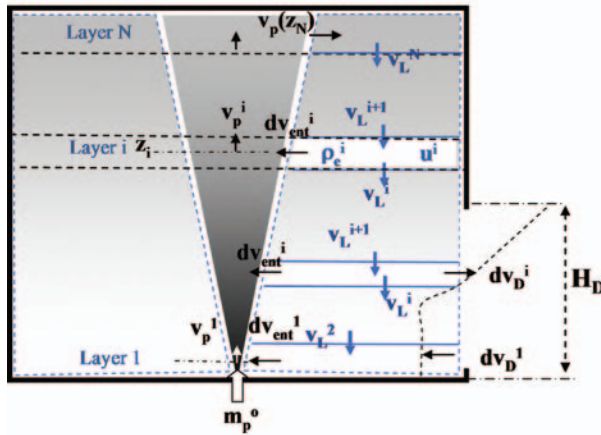


Figure 46. Illustration d'une modélisation 1D du panache et du milieu environnant [34].

Un exemple de résultat est présenté sur les figures 47 et 48 montrant les profils verticaux de masse volumique dans l'environnement à différents instants (figure 47) et de vitesse et masse volumique dans le panache (figure 48). Les profils verticaux de masse volumique à l'extérieur du panache montrent le remplissage progressif de la couche de fumée en fonction du temps. La diminution de la masse volumique avec l'altitude correspond à une augmentation de la température de la couche de fumée. Après le remplissage de l'enceinte, les fumées sont évacuées par l'ouverture en bas de l'enceinte et la couche de fumée se stabilise à une hauteur donnée (figure 46 et figure 47).

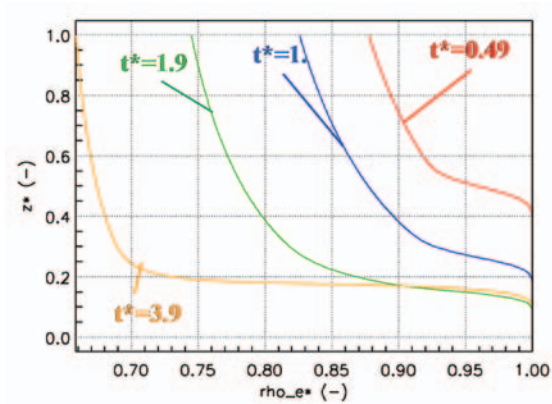


Figure 47. Profils verticaux de masse volumique dans le milieu extérieur à plusieurs instants [34].

Le profil vertical de vitesse dans le panache retrouve le comportement typique attendu avec une diminution suivant l'altitude z . Le processus de remplissage autour du panache, observé précédemment, modifie l'environnement extérieur au panache et se traduit par un point d'inflexion sur les profils de vitesse. Dans la partie du local occupée par la couche de fumée, le panache s'élargit et la vitesse moyenne diminue. Le remplissage des fumées dans le local contribue à élargir le panache et à réduire sa vitesse ascensionnelle en limitant le processus d'entraînement d'air. Dans ce modèle, la diminution de la vitesse et de la masse volumique (ou augmentation de la température) conduit à limiter l'augmentation de la masse volumique dans le panache (ou la diminution de la température) (figure 48-a).

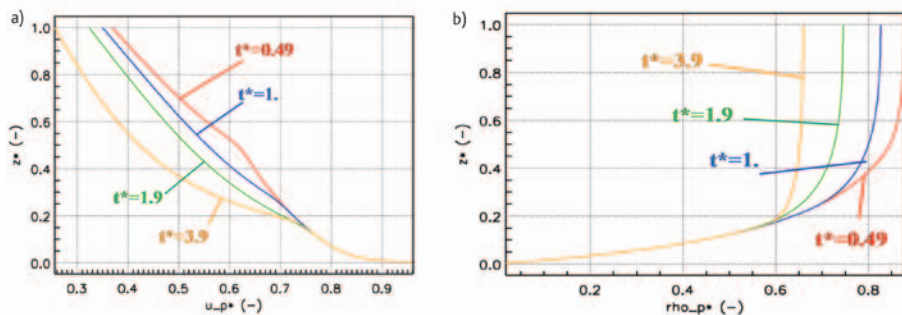


Figure 48. Profils verticaux de vitesse (a) et de masse volumique (b) dans le panache à plusieurs instants (variables sans dimension) [34].

Cette approche analytique avec un modèle densimétrique montre que l'influence de la présence d'une couche de fumée dans le local contribue à réduire le processus d'entraînement d'air dans le panache, à affaiblir sa dynamique et ainsi à en augmenter la température des gaz au sein du panache en comparaison à une situation en atmosphère libre. Ce comportement illustre les particularités des écoulements de panache dans un environnement confiné et la nécessité de maîtriser ces comportements pour une prédiction conservative de la température sous-plafond par exemple.

4.2.2 Écoulement sous-plafond en milieu confiné

Une seconde illustration du rôle du confinement sur la propagation des fumées concerne l'écoulement sous-plafond. Cet écoulement résulte de l'impact du panache thermique sur le plafond entraînant un écoulement radial horizontal (figure 42). Les expériences de feu de nappe présentées ci-dessus ont également permis l'étude de cet écoulement. La mesure de profils verticaux (figure 49) et radiaux (figure 50) a été réalisé dans l'écoulement sous-plafond. Les profils verticaux présentent un écoulement de type couche limite à proximité de la paroi, un maximum suivi d'une décroissance progressive. Les profils radiaux montrent une décroissance continue de la température en raison des pertes aux parois et du processus d'entraînement d'air.

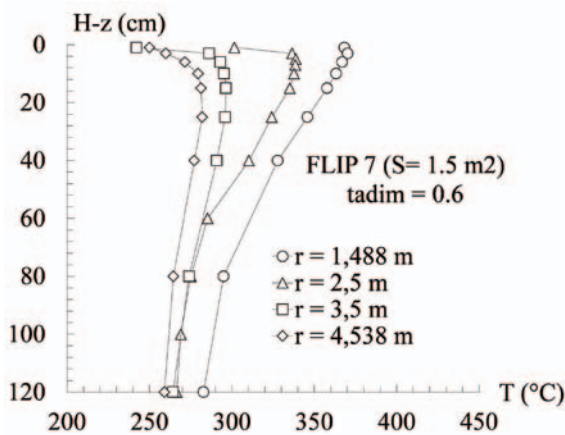


Figure 49. Profils verticaux de température dans l'écoulement sous plafond pour plusieurs positions radiales [25].

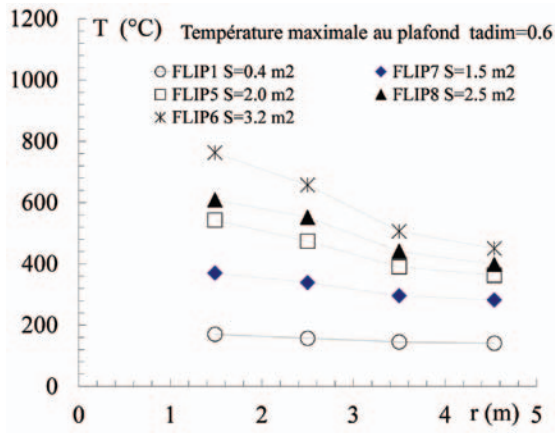


Figure 50. Profils radiaux de température pour plusieurs puissances de foyer [25].

Pour des applications en milieu confiné, les niveaux de température des fumées obtenus sont très supérieurs à ceux attendus en milieu ouvert. Une comparaison entre les données expérimentales et une prédiction de la température des fumées au plafond, pour une même puissance de feu en milieu ouvert, illustre l'effet du confinement (figure 51). Pour un foyer de 1,6 MW, la température maximum sous le plafond des fumées varie entre 400 et 600 °C en milieu confiné, à comparer à des valeurs de 100 à 150 °C en milieu ouvert. Comme pour le panache vertical, le confinement et ainsi l'échauffement du milieu ambiant dans l'enceinte suite au remplissage par les fumées contribue à augmenter significativement les températures des écoulements sous-plafond.

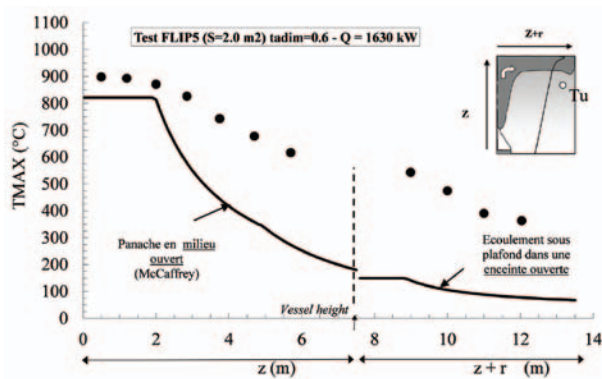


Figure 51. Évolution de l'excès de température dans un panache et dans l'écoulement sous plafond en milieu stratifié (confrontation expérience et modèle) [25].

4.3 Stratification thermique

La stratification verticale des fumées lors d'un **incendie** dans une enceinte est le résultat du remplissage du local par le panache thermique transportant les fumées vers le haut du local. Celles-ci s'accumulent en partie haute du local en raison de leur densité plus faible par rapport au gaz contenu initialement dans le local. Une stratification verticale, stable, des fumées est observée.

Cette stratification thermique est couplée à une stratification chimique caractérisée par des concentrations, plus élevées en partie haute, pour les produits de combustion (CO_2 , CO) et en partie basse, pour l'oxygène. L'analogie de ces deux stratifications est souvent vérifiée en raison de l'effet dominant du transport par convection vis-à-vis de celui par diffusion. Cependant, dans le cas des suies, cette analogie peut être discutée en raison de la masse des particules de suies, transportées également par dépôt gravitaire vers le sol du local.

La stratification verticale peut être modifiée par les écoulements de transferts (tels que ceux aux passages de porte), la ventilation mécanique ou des systèmes d'aspersion. La stratification peut être une situation recherchée du point de vue de la sécurité afin, par exemple, de garantir un niveau de température faible en partie basse du local permettant une intervention ou la visualisation du feu par exemple.

Dans le cas des scénarios d'**incendie** dans des enceintes fermées et ventilées, la stratification des fumées est une caractéristique majeure sur le déroulement du scénario d'incendie en raison de son influence, en retour, sur les écoulements de fumées (panache et écoulement sous-plafond) ainsi que sur le processus de combustion notamment en régime sous ventilé. Les champs de concentration en oxygène, de suie ainsi que celui de température à proximité du foyer influent sur la puissance du feu. La connaissance de la stratification des fumées et plus généralement de la distribution spatiale des fumées (en termes de température et de concentration en espèce et en suie) dans l'enceinte est un enjeu pour l'identification des zones à risques vis-à-vis du dysfonctionnement d'équipements de sûreté.

4.3.1 Exemples de stratification thermique

Les expériences de scénarios d'**incendie** réalisées dans le dispositif **DIVA** sont une source importante de données permettant d'illustrer différents types de stratification.

La configuration la plus simple et retenue dans les modèles dits « à zones » est celle constituée de deux couches à température homogène. La couche inférieure caractérise les gaz dits « frais » non viciés et la couche supérieure, les fumées. Cette situation est rencontrée dans les premières phases d'un incendie lors du processus de remplissage. Elle peut perdurer sur toute la durée de l'incendie si une ventilation mécanique est présente permettant d'injecter de l'air en partie basse et/ou d'évacuer les fumées en partie haute. Dans ce cas, la ventilation mécanique contribue à stabiliser la stratification dans une situation favorable au contrôle de l'incendie et à des actions d'intervention si nécessaire. La figure 52-a et la figure 52-b présentent deux exemples de stratification à deux zones avec une zone inférieure non viciée. Cette dernière peut présenter une température moyenne supérieure à la température ambiante initiale (ici environ 40 °C) en raison de l'échauffement par le rayonnement thermique du feu et de la couche supérieure, chaude.

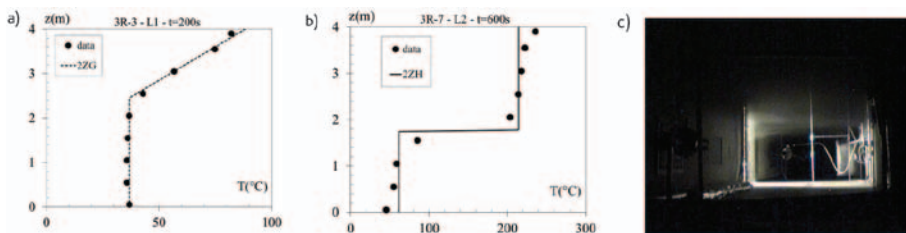


Figure 52. Exemple de stratifications thermiques lors d'expérimentations à grande échelle en deux zones (a-b) et illustration de la stratification lors d'une expérimentation dans le dispositif DIVA (c).

Ces stratifications à deux zones avec une couche inférieure non viciée sont rencontrées généralement dans les locaux adjacents alimentés en fumée uniquement par des écoulements de transferts (écoulements sortant au niveau d'un passage de porte ou de trémie) d'amplitude faible en comparaison avec l'écoulement de panache au-dessus d'un foyer. Le débit de fumées est modeste et est compensé par le débit de ventilation conduisant à un régime stationnaire stable. Dans le cas du local en feu, cette situation n'est observée que dans les premiers instants du scénario d'incendie.

Un autre type de stratification est celle caractérisant une enceinte entièrement remplie de fumées et présentant des profils verticaux de différentes natures dépendant du scénario d'incendie. Cette situation est généralement rencontrée dans le local « feu » après les premiers instants de remplissage. Le débit de panache, dépendant de la puissance du feu, est généralement très supérieur à celui apporté par la ventilation mécanique, ce qui conduit à un remplissage rapide du local par les fumées. La couche inférieure d'« air frais » disparaît et une couche de fumée

caractérisée par un gradient thermique vertical variable envahit le local. Un exemple de stratification est présenté sur la figure 53. Plusieurs types de profils verticaux sont identifiés avec des zones à température homogène (l'écoulement sous-plafond par exemple) et des zones présentant des gradients verticaux importants (notamment en partie basse du local).

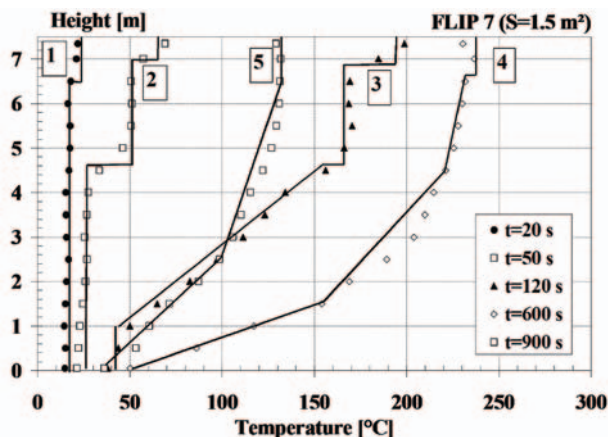


Figure 53. Évolution de la stratification thermique des fumées dans un local envahi par les fumées [26].

4.3.2 Méthode de caractérisation de la stratification verticale des fumées

La stratification verticale des fumées et le processus de remplissage avec une couche de fumées et une couche d'air frais est une des caractéristiques des incendies en milieu compartimenté ayant conduit à l'élaboration des logiciels de calcul dits « à zones ». La modélisation repose sur la partition du volume de l'enceinte en deux couches, ou zones, homogènes, une de fumées et l'autre d'air frais (figure 54). La couche supérieure de fumées est alimentée par le débit de panache et la couche inférieure d'air frais alimente le panache sur sa hauteur et le foyer en oxygène. En outre, les deux couches peuvent être alimentées par d'autres flux de masse (ventilation, passage de porte...). Afin de valider ces logiciels de calculs, des méthodes de régression sont développées permettant de déterminer, à partir des profils de température des gaz expérimentaux, les températures moyennes des couches, supérieure et inférieure, et la hauteur de l'interface (figure 54).

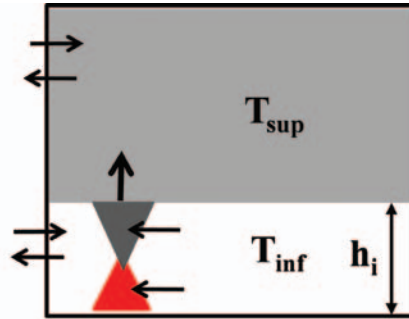


Figure 54. Description d'une modélisation à « zones ».

L'analyse des expérimentations à grande échelle a conduit à l'utilisation de méthodes existantes et aux développements de nouvelles. L'objectif de ces méthodes est de proposer des profils de température théoriques qui se rapprochent au mieux des données expérimentales et d'en déduire les trois variables, T_{inf} , T_{sup} et h_i , qui seront ensuite comparées à celles calculées par les logiciels dits à zones. Des études ont été menées sur trois types de profils théoriques ; (i) deux zones homogènes, (ii) deux zones dont une présente un gradient constant et (iii) trois zones dont deux homogènes et une avec un gradient constant (figure 55). Pour les profils à plus de deux zones, la position de l'interface est la hauteur de la couche la plus basse et la température, T_{sup} , est la température moyenne des deux couches supérieures.

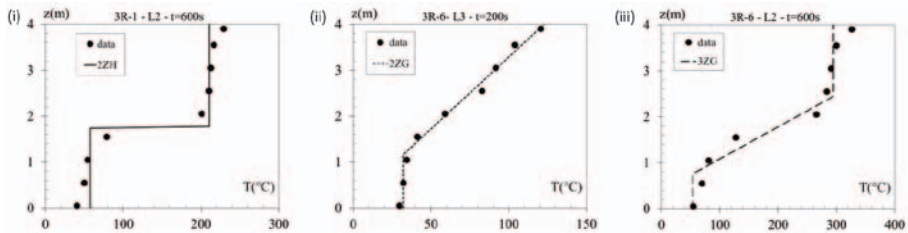


Figure 55. Exemple de comparaison de profils théoriques avec des données expérimentales pour trois configurations [38].

Ces résultats montrent qu'il est recommandé de tester plusieurs formes de profils théoriques permettant de reproduire au mieux la stratification expérimentale de la température des gaz. Pour chaque situation, une procédure d'optimisation, par minimisation des écarts par exemple, est appliquée permettant d'identifier le profil théorique s'approchant au mieux des résultats expérimentaux. Ensuite, les variables (T_{inf} , T_{sup} et h_i), calculées à partir du profil théorique choisi, sont les grandeurs comparées aux simulations réalisées avec les logiciels « à zones ».

4.3.3 Influence de la ventilation mécanique et des écoulements de transfert sur la stratification thermique

La stratification thermique verticale induite par le feu peut être modifiée par la ventilation mécanique ou par des écoulements de transfert entre les locaux (passage de porte, orifice, fuite...). L'apport ou l'extraction d'air frais ou de fumées modifient les profils verticaux de température des gaz dans le local. La stratification est amplifiée ou stabilisée en maintenant ou en augmentant l'écart de température sur la hauteur du local. L'interface peut être déplacée dans le cas d'une stratification homogène à deux zones. La stratification peut également être réduite (dé-stratification) en alimentant la partie supérieure en air frais et en extrayant les fumées en partie basse. Ces différentes configurations, souvent étudiées dans la gestion de la ventilation, illustrent l'influence des flux aux frontières sur la stratification ainsi que sur le déroulement de l'incendie. Deux exemples issus d'expérimentations de feux de nappe dans le dispositif DIVA sont présentés.

Le premier concerne un scénario de feu de nappe impliquant trois locaux connectés entre eux par des passages de porte et mécaniquement ventilés (figure 56). La stratification dans le local en feu présente une épaisse couche de fumée, seule une fine couche d'air frais en partie basse assure l'apport en oxygène. La stratification dans les deux pièces adjacentes est pilotée par la combinaison d'un écoulement bidirectionnel au niveau du passage de porte et d'une admission d'air pour le local adjacent amont (L1) et une extraction de fumée pour le local adjacent aval (L3). La stratification thermique présente des comportements différents suivant les caractéristiques des flux de masse alimentant le local.

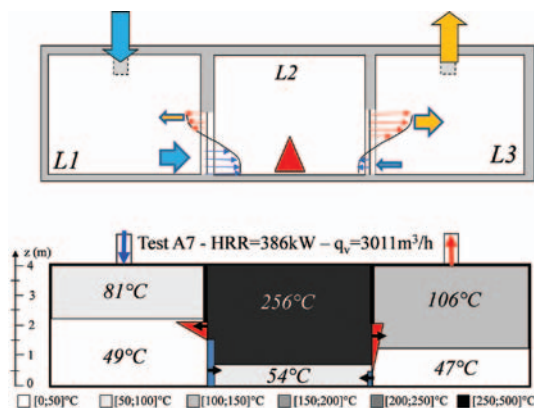


Figure 56. Stratifications thermiques pour un scénario d'incendie impliquant trois locaux connectés et ventilés [29].

Le second exemple concerne la propagation des fumées entre deux locaux superposés et ventilés mécaniquement avec une admission d'air dans le local inférieur et une extraction dans le local supérieur (figure 57). Des expérimentations de feu de gaz pour différents débits de ventilation (caractérisé ici par le taux de renouvellement $Tr = q_v/V$) montrent l'influence du débit de ventilation sur la stratification thermique. L'augmentation du débit de ventilation favorise le refroidissement des fumées dans le local en feu et modifie la forme du profil vertical de température. Dans la gamme de débits étudiée, l'influence sur la stratification thermique dans le local adjacent est faible. La stratification thermique peut être significativement influencée par le niveau du débit de ventilation.

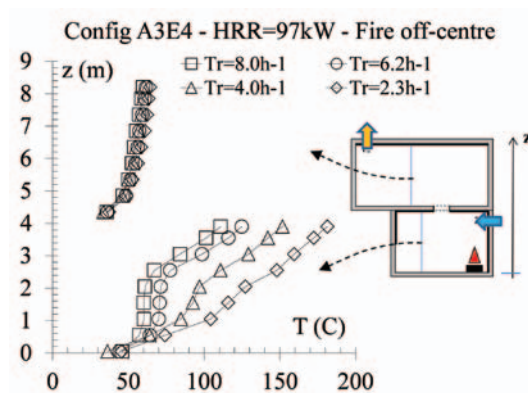


Figure 57. Influence du débit de ventilation sur la stratification thermique pour un scénario impliquant deux locaux superposés [35].

4.4 Écoulement de transferts aux niveaux d'ouvertures

Pour les scénarios d'incendie dans un ensemble d'enceintes connectées entre elles, la propagation des fumées d'un local vers un autre local, se fait à travers des éléments associés à l'architecture des bâtiments : passage de porte, trémie horizontale, passage de câbles, fuites... La compréhension et la modélisation de ces écoulements est nécessaire pour une prédiction globale de la propagation des fumées. Ces fumées sont mises en mouvement par des forces de flottabilité, fonction de différences de masse volumique (et de température) et d'inertie, fonction de différences de pression.

Deux écoulements typiques faisant l'objet de nombreuses études sont l'écoulement de passage de porte et l'écoulement à travers une trémie horizontale. Ces deux écoulements, schématisés sur la figure 58, sont caractérisés par un écoulement bidirectionnel induit par une différence de masse volumique. En convection

naturelle, les flux de matière entrant et sortant par la porte sont égaux. En présence d'une ventilation mécanique, un écoulement de convection mixte est observé et l'égalité des flux de matière n'est plus respectée. La ventilation mécanique permet d'influer sur un des écoulements (d'air frais ou de fumées) en limitant ou favorisant sa propagation.

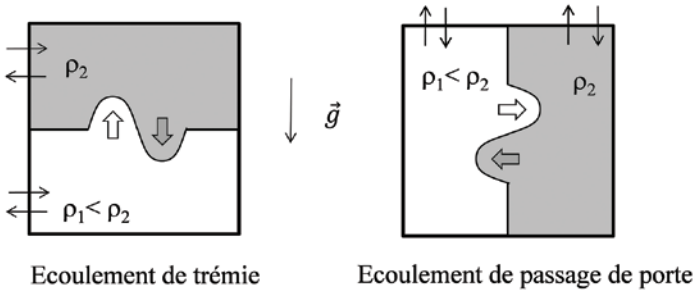


Figure 58. Illustrations des échanges de masse à travers un orifice séparant deux enceintes contenant des fluides de masses volumiques différentes.

4.4.1 Écoulement à un passage de porte

L'écoulement de passage de porte est largement étudié en raison de l'importance des flux de matière mis en jeu (section de porte d'environ 2 m²) et du nombre important de ce type d'ouverture dans les bâtiments. L'écoulement à travers un passage de porte est principalement piloté par des forces de flottabilité induites par la stratification verticale de température de part et d'autre de l'ouverture.

En convection naturelle, en l'absence de ventilation mécanique, un écoulement bidirectionnel, de fumées en partie haute et d'air frais en partie basse, est observé. À partir des formulations classiques de Bernoulli, une formulation simplifiée du profil vertical de vitesse peut être établie :

$$U(z) = \sqrt{\frac{2|\Delta P(z)|}{\rho(z)}} \quad (17)$$

$$\text{avec } \Delta P(z) = g \int_{h_N^0}^z \Delta \rho(z) dz + \Delta P_s$$

Le profil vertical de pression résulte de la somme d'une différence de pression hydrostatique issue de la différence de densité et d'une différence de pression statique due à la ventilation mécanique. La ventilation mécanique conduit ainsi

à translater le profil de vitesse suivant la direction du soufflage ou de l'extraction (figure 59).

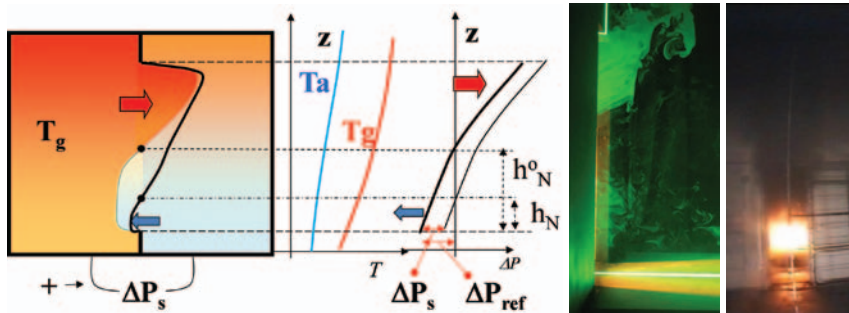


Figure 59. Description schématique et photographies d'un écoulement à travers un passage de porte.

Des investigations expérimentales avec des diagnostics de mesure avancés de type Stéréo PIV (mesure de champs de vitesse en 3D par analyse d'images successives de particules ensemencées dans l'écoulement) permettent de proposer une description détaillée de l'écoulement et une mesure instantanée des débits entrants et sortants (figures 60 et 61). L'écoulement de fumée en partie haute de la porte présente une section ovoïde. La zone de cisaillement, entre l'écoulement sortant et entrant, est associée à des vitesses nulles et présente une forme concave. En convection naturelle, sans ventilation, l'augmentation de la puissance du feu et ainsi de la température des gaz dans le local en feu conduit à augmenter la section de passage des fumées et ainsi à abaisser la position de la zone de cisaillement sur la hauteur de la porte.

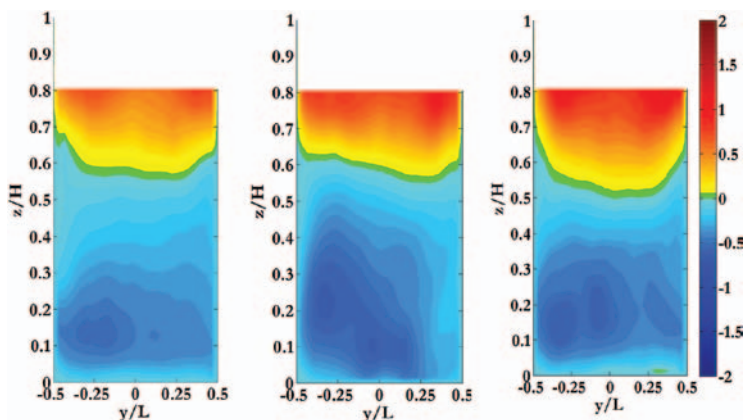


Figure 60. Champs de vitesse mesurés par SPIV au passage de porte en convection naturelle à échelle réduite pour trois puissances de feu (7,8 kW, 10,6 kW, 15,5 kW) [32].

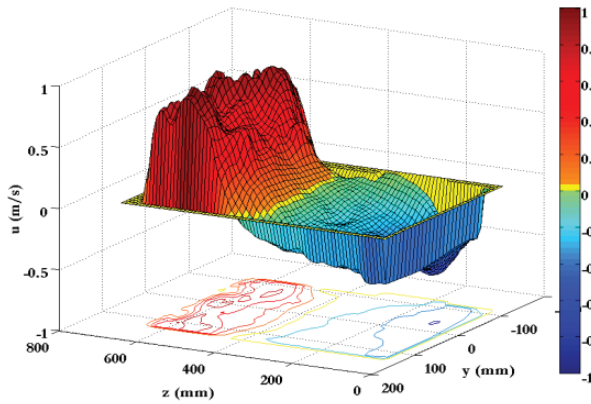


Figure 61. Représentation 3D du champ de la composante w de la vitesse pour une puissance de feu de 7,8 kW.

Cette description détaillée a fourni une base de données, spatialement résolues, permettant de valider les logiciels de simulation dits à champs. Des confrontations avec le logiciel ISIS de l'IRSN montrent un accord satisfaisant pour ce type d'écoulement. La forme de l'écoulement de fumées et les amplitudes de vitesse sont retrouvées (figure 62).

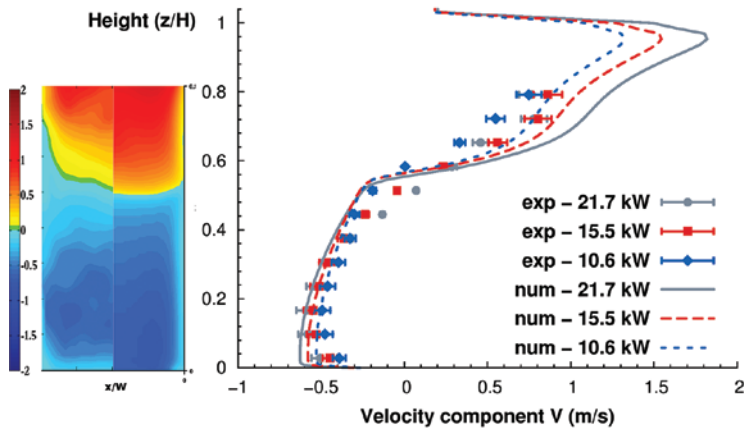


Figure 62. Comparaison expériences/simulations CFD d'un écoulement de passage de porte pour une puissance de feu de 21,7 kW [40].

En présence de ventilation mécanique, l'écoulement bidirectionnel de convection naturelle est modifié avec une augmentation d'un des deux flux de matière (de

fumées ou d'air frais) au détriment du flux de matière opposé. Des conditions critiques de débit de ventilation sont identifiées correspondant à l'annulation d'un des deux écoulements (de fumées ou d'air frais). Des expérimentations à grande échelle dans le dispositif DIVA montrent le rôle de la ventilation mécanique sur l'écoulement de passage de porte (figure 63).

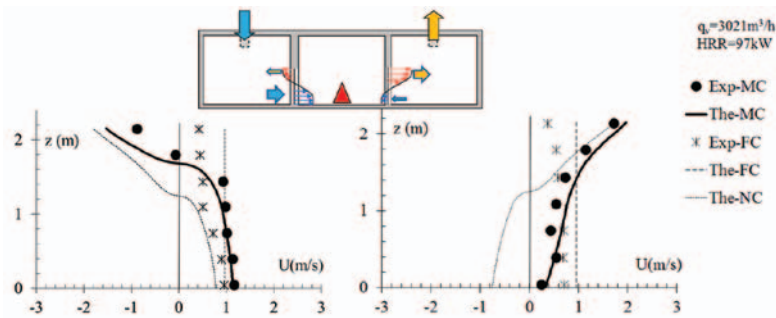


Figure 63. Influence de la ventilation mécanique sur les profils de vitesse à un passage de porte pour deux configurations opposées (feu de gaz propane de 97 kW) [29].

Le scénario étudié comprend trois locaux connectés par des passages de porte. Le foyer se trouve dans le local central et la ventilation mécanique est spécifiée de façon à avoir deux configurations opposées aux portes amont et aval du local en feu. Sur le passage de porte amont la ventilation souffle de l'air dans le sens de l'écoulement entrant d'air frais en partie basse. Sur la seconde porte, dite aval, la ventilation souffle dans le sens de l'écoulement sortant de fumée en partie haute. Une comparaison des mesures expérimentales, « Exp MC » avec le comportement en convection naturelle (prédiction « The-NC ») montre la translation du profil de vitesse sous l'effet de la ventilation mécanique. Pour cette expérience (97 kW de puissance de feu et 3 021 m³/h de débit de ventilation), l'arrivée d'air frais en provenance du troisième local est stoppée par la ventilation. Ces résultats mettent en évidence les rôles combinés de la ventilation mécanique et du foyer sur l'écoulement de convection mixte à un passage de porte.

La mesure Stéréo PIV permet une mesure instantanée du champ de vitesse dans la section du passage de porte et ainsi la détermination des débits instantanés sortant et entrant. Cette mesure peut être utilisée comme grandeur de référence pour une détermination expérimentale du coefficient de décharge du passage de porte C_D . Ce coefficient est introduit dans les modèles utilisés dans les logiciels à zones. Des valeurs proches de 0,6–0,7 sont préconisées dans la littérature pour des configurations en convection naturelle avec un passage de porte ouvert vers l'atmosphère. En milieu

confiné avec l'influence de la ventilation mécanique, la forme de l'écoulement est significativement modifiée. Ce coefficient de décharge a été calculé pour des situations en convection mixte et des valeurs très inférieures à celles mesurées en convection naturelle ont été obtenues. Les coefficients de décharge peuvent varier significativement sous l'effet de la ventilation mécanique modifiant le profil de vitesse.

4.4.2 Écoulement à travers une trémie horizontale

L'écoulement à travers une trémie horizontale est un sujet d'étude peu abordé pour les applications *incendies* en régime de convection mixte. La configuration étudiée est celle d'une couche chaude située dans un local inférieur et se propageant dans un local supérieur. En convection naturelle, un écoulement bidirectionnel est observé. Cependant, par opposition à l'écoulement de passage de porte, la configuration horizontale, perpendiculaire à la direction de la gravité, ne présente aucune région privilégiée pour le passage des fluides montant et descendant. L'écoulement bidirectionnel se fait alors de façon désordonnée. Des expérimentations sur des dispositifs à échelle réduite avec des mesures SPIV ont mis en évidence ce phénomène (figure 64-a). Une moyenne, sur une durée de plusieurs minutes, montre que l'écoulement d'air chaud se propage dans une zone de forme ovoïde au centre de la trémie (figure 64-b). Les zones périphériques concentrent l'écoulement descendant d'air frais.

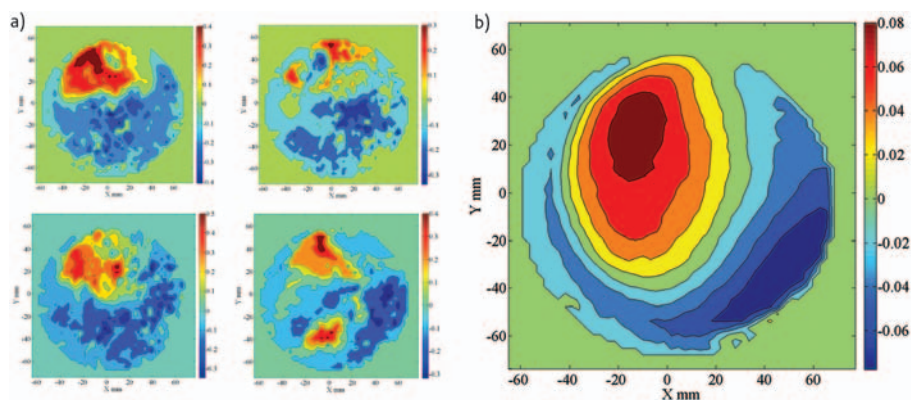


Figure 64. Champs de vitesse verticale instantanée (a) et moyen (b) obtenus par SPIV à travers une trémie circulaire [42].

Des expérimentations à grande échelle ont pu mettre en évidence l'influence de la ventilation mécanique sur les profils de vitesse à une trémie. La configuration étudiée

comprend un local en feu relié par une trémie carrée de 1 m de coté à un local supérieur (figure 65). La configuration de ventilation comprend une admission d'air dans le local en feu et une extraction dans le local adjacent supérieur (figure 65-a). L'influence du débit de ventilation sur l'écoulement à la trémie est analysée sur les profils de vitesse sur une des diagonales de la trémie (figure 65-b). Pour des faibles débits de ventilation ($Tr = 2 h^{-1}$), l'écoulement est dominé par des forces de flottabilité et le profil de vitesse présente une évolution symétrique avec des écoulements descendant et ascendant répartis de façon homogène. L'augmentation du débit de ventilation contribue à limiter le flux d'air descendant et à favoriser la propagation des fumées. Le rôle de la ventilation mécanique est similaire à celui rencontré pour un écoulement de passage de porte. Dans le cas particulier de ce scénario, l'écoulement ascendant se situe dans une partie de la trémie en raison de la direction préférentielle induite par l'écoulement sous-plafond (voir schéma sur la figure 65-a).

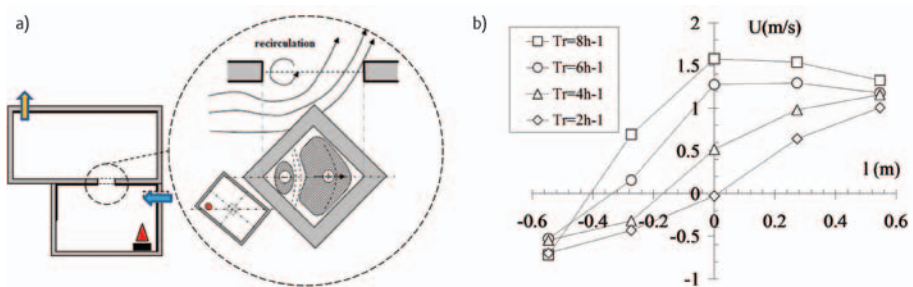


Figure 65. Scénario d'incendie pour l'étude des écoulements à une trémie (a) et influence du débit de ventilation sur les profils de vitesse à la trémie (b) [33].

Pour ce scénario, l'influence de l'écoulement d'air frais dans la couche de fumées du local en feu a été investiguée en suivant l'évolution des caractéristiques (température et concentration en oxygène) en partie supérieure du local en feu. Deux situations ont été observées (figure 66). La première se traduit par un réentraînement rapide de l'écoulement d'air frais dans le flux de fumée. Son impact sur la couche de fumées du local inférieur est faible. L'air frais contribue à modifier les conditions initiales du panache se propageant dans le local supérieur sans modifier la couche chaude dans le local en feu. La seconde situation se traduit par peu d'interaction entre les deux écoulements, ascendant et descendant, mais une influence notable de l'écoulement d'air frais sur les caractéristiques de la couche de fumées dans le local en feu. Ces observations mettent en évidence différentes situations induites par l'écoulement de convection mixte à travers une trémie horizontale.

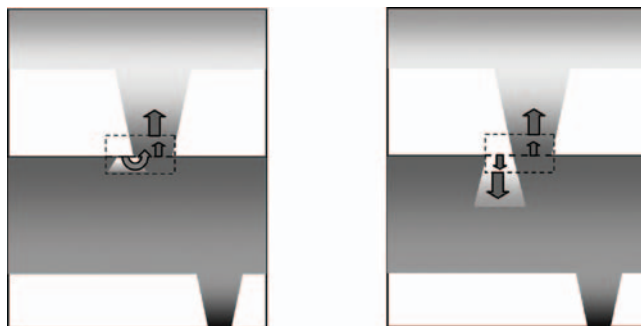


Figure 66. Illustration de deux situations relatives à l'influence de l'écoulement d'air frais descendant [35].

4.5 Application de diagnostic laser sur les écoulements de fumées

En raison du développement important des logiciels de calcul CFD sur des applications **incendies**, la mise en œuvre de métrologies adaptées pour la validation de ces outils est recherchée. Par ailleurs, la maturité des techniques de mesure de champs de vitesse (LDV ou PIV) ou de concentration (LIF ou PLIF) d'écoulements de gaz permet d'envisager leurs applications sur la propagation des fumées d'incendie. Des challenges technologiques demeurent et le développement d'une expertise dans ce domaine permet d'envisager la fourniture de bases de données détaillées pour la validation des outils numériques.

Dans le cadre des actions de recherche sur la propagation des fumées, la technique Stéréo PIV a été appliquée sur les écoulements de fumées à un passage de porte et à une trémie (figure 67). La technique PIV (vélocimétrie par images de particules) repose sur la mesure du déplacement de particules, présentes dans un fluide, éclairées par un faisceau laser et visualisées par des caméras. Cette technique non intrusive permet la mesure des trois composantes du champ de vitesse. Les enjeux techniques associés à sa mise en œuvre sur des écoulements de fumées concernent la prise en compte des particules de suies, l'influence perturbatrice de la lumière renvoyée par les flammes, l'accès optique dans des caissons dédiés aux expérimentations de feu. Des expériences à échelle réduite et à moyenne échelle ont été réalisées sur la propagation des fumées, issues d'un feu de gaz propane, à un passage de porte. Pour l'étude de l'écoulement à un passage de trémie, la technique de mesure a été appliquée sur des écoulements d'air chaud en l'absence de combustion. Pour ces deux scénarios, un des enjeux techniques est la mesure simultanée de deux

écoulements de direction opposée (air frais entrant et air chaud sortant) en assurant un ensemencement des deux fluides. En outre, la résolution spatiale et temporelle du champ de vitesse nécessite d'adapter la puissance du laser, la focale des optiques, le temps de réponse et la résolution spatiale des caméras. Dans le cas particulier d'un écoulement à travers une section de passage, la technique PIV 3D (ou stéréo PIV) permet une mesure instantanée des champs des trois composantes de vitesse et ainsi le calcul de la valeur instantanée du débit de l'écoulement. C'est une particularité de la Stéréo PIV.

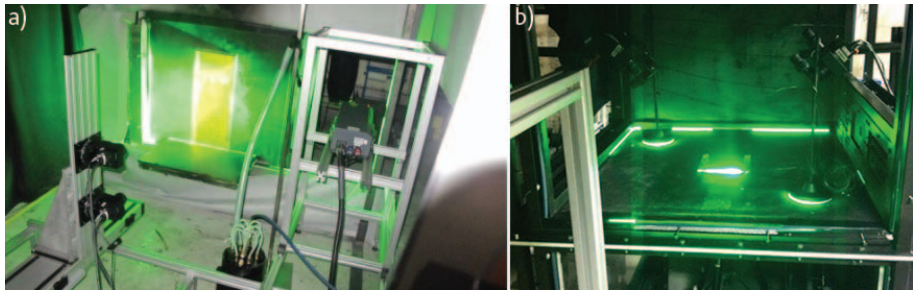


Figure 67. Illustration de la mise en œuvre de la technique de mesure SPIV pour un écoulement de fumées à un passage de porte (a) et un écoulement de trémie (b) [36], [43].

La mise en œuvre de cette technique de mesure avancée a permis d'acquérir une meilleure description des écoulements de fumées ainsi que d'élaborer des bases de données adaptées à la validation des logiciels de simulation CFD. Elle permet notamment la mesure de grandeurs fluctuantes telles que les intensités turbulentes et l'identification de zones de recirculation.

4.6 Conclusion

Ce chapitre illustre plusieurs axes de recherches relatives à la propagation des fumées d'incendie pour des scénarios dans des enceintes confinées et ventilées mécaniquement.

Le confinement des enceintes conduit à une accumulation de fumées dans les pièces et une stratification thermique. Ce phénomène modifie la nature des écoulements de type panache ou sous-plafond en limitant leur refroidissement. La stratification thermique est caractérisée par un profil vertical de température dont la forme dépend de la puissance du feu et des conditions de ventilation. Des méthodes de régression

sont développées afin de pouvoir en extraire les données nécessaires à la validation des logiciels simplifiés dits « à zones ». L'influence de la ventilation mécanique sur la stratification thermique est significative. La prédiction de la propagation des fumées nécessite la connaissance des écoulements de transfert entre les pièces. L'écoulement de passage de porte et celui à travers une trémie horizontale jouent un rôle important sur la propagation des fumées. Ces écoulements bidirectionnels de convection naturelle sont significativement modifiés en présence d'une ventilation mécanique.

La propagation des fumées dans des enceintes confinées et ventilées est fortement influencée par l'ensemble de ces écoulements (panache, sous-plafond, remplissage, la stratification thermique, écoulement de passage de porte, écoulement de trémie). Ces travaux permettent d'améliorer la connaissance des phénomènes, de valider les corrélations existantes ou de les revisiter et enfin de valider les logiciels de calcul (de type CFD et « à zones »).

Plusieurs perspectives de recherche sur la thématique de la propagation des fumées sont identifiées :

- la première concerne la poursuite de l'exploitation des techniques de mesure avancée pour la caractérisation des écoulements. Il s'agit de préciser la compréhension des écoulements et de fournir des bases de données pour la validation des logiciels de type CFD. Les grandeurs visées sont les mesures de vitesses (PIV) et de concentrations (PLIF) moyennes et instantanées afin notamment d'accéder aux grandeurs fluctuantes et de valider les modèles de turbulence ;
- une seconde perspective concerne l'analyse des corrélations de mécanique des fluides établies dans les années 1970-1990 et utilisée dans les logiciels dits « à zones » (lois de panache, écoulements sous-plafond, écoulements de transferts) à partir de simulations numériques. Il s'agit de revisiter ces corrélations en utilisant les logiciels CFD pour réaliser des expérimentations numériques. La maturité des logiciels CFD pour certains écoulements peut permettre de consolider ou de modifier les corrélations utilisées dans les logiciels dits « à zones ».

Bibliographie

23. H. Prêtre, L. Audouin, M. Chaussin et J.M. Such, Thermal plume of large pool fires in confined and forced ventilation enclosures, 3rd International Seminar on Fires and Explosions Hazard (ISFEH), Lake Windermere, England, April 2000.
24. H. Prêtre, J. Coutreau et J.M. Such, Fire plume from large pool fires in forced-ventilated enclosures, Proceedings of the International Conference on Engineered Fire protection design, San Francisco, USA, June 2001.
25. H. Prêtre, J. Lazard, J.M. Such, Ceiling jet in under-ventilated pool fire compartment: experimental study from large scale tests, 7th International Symposium on Fire Safety Science (IAFSS 2002), June 16-21, Worcester, USA, 2002.
26. H. Prêtre, J.M. Such and D. Texier, Observations of gas stratification phenomenon during experimental pool fire in a confined and forced ventilated enclosure, 5th International Conference on Fire Safety, March 11-12, Munich, Germany, 2004.
27. C. Lucchesi, H. Prêtre, O. Vauquelin, Ph. Bournot, Study of the flow induced by injecting a hot gas into a confined and mechanically ventilated room: application to fire smoke propagation in multi-rooms scenarios, 9th International Symposium on Fire Safety Science (IAFSS), September 21-26, Karlsruhe, Germany, 2008.
28. H. Prêtre, L. Audouin, Smoke Movement Induced by Buoyancy and Total Pressure between two Confined and Mechanically Ventilated Compartments, Proceedings of the 2010 Interflam conference, *Interscience Communications Limited*, 1053-1065, 2010.
29. H. Prêtre, L. Audouin, Doorway Flows Induced by the Combined Effects of Natural and Forced Ventilation in a Three Compartment Assembly, in: 10th International Symposium on Fire Safety Science, June 19-24, Maryland, USA, 2011.
30. C. Lucchesi, O. Vauquelin, H. Prêtre, Ph. Bournot, Doorway flow from a reduced scale isothermal air/helium approach, *International Journal of Thermal Sciences*, 50, 1920-1929, 2011.
31. S. Vaux, H. Prêtre, Relative effects of inertia and buoyancy on smoke propagation in confined and forced ventilated enclosure fire scenarios, *Fire Safety Journal*, Vol. 62, Part B, 206-220, November 2013.

32. A. Koched, H. Prétrel, O. Vauquelin, L. Audouin, Experimental determination of the discharge coefficient of a doorway using SPIV technique for fire induced flow applications, Proceedings of the 2013 Interflam conference, *Interscience Communications Limited*, 2013.
33. H. Prétrel, J. Liberati, O. Vauquelin, L. Audouin, Smoke flow through an horizontal vent separating two mechanically ventilated rooms from large scale fire tests, Proceedings of the 2013 Interflam conference, *Interscience Communications Limited*, 2013.
34. H. Prétrel, A. Brunner, O. Vauquelin, F. Candelier, Effect of vertical density stratification on the buoyancy-induced flow at a doorway opening, *Journal of Fire Sciences*, Vol. 32(4): 295-315, 2014.
35. H. Prétrel, K. Varral, O. Vauquelin, L. Audouin, Smoke induced flow in two rooms mechanically ventilated and linked with a horizontal vent type opening, in: 11th International Symposium on Fire Safety Science, February 10-14, Christchurch, New Zealand, 2014.
36. A. Koched, H. Prétrel, O. Vauquelin, L. Audouin, Experimental determination of the discharge flow coefficient at a doorway for fire induced flow in natural and mixed convection, *Fire and Materials*, 40, 1, 114-128, 2016.
37. S. Suard, A. Koched, H. Prétrel, L. Audouin, Numerical simulations of fire-induced doorway flows in a small scale enclosure, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 81, 578-590, 2015.
38. H. Prétrel, L. Audouin, New developments in data regression methods for the characterization of thermal stratification due to fire, *Fire Safety Journal*, 76, 54-64, 2015.
39. H. Prétrel, A. Koched, L. Audouin, Doorway flows induced by the Combined Effects of Natural and Forced Ventilation in case of multi-compartments large-scale fire experiments, *Fire Technology Journal*, 52, 2, 489-514, 2016.
40. S. Suard, A. Koched, H. Prétrel, L. Audouin, CFD simulations of fire-induced doorway flows in a small scale enclosure, 15th International Conference on Numerical Combustion, April 19-22, Avignon, France, 2015.

41. K. Varrall, H. Prétrel, S. Vaux, O. Vauquelin, Étude expérimentale de l'écoulement de convection naturelle à une trémie avec des fluides non-miscibles, Congrès de la SFT 2015, 26-29 mai, La Rochelle, France, 2015.
42. K. Varrall, H. Prétrel, S. Vaux, O. Vauquelin, Mesure par Stéréo PIV d'un écoulement de convection naturelle à travers un orifice horizontal, 17^e Journée internationale de thermique (JITH), 28-30 octobre, Marseille, France, 2015.
43. K. Varral, H. Prétrel, S. Vaux, O. Vauquelin, Effect of the mechanical ventilation on the bidirectionnal smoke flow through horizontal vent using Stereo PIV technique, 2nd European Symposium on Fire Safety Science (ESFSS), June 16-18, Nicosie, Chypre, 2015.

Chapitre 5

Métrologie pour les expériences d'incendies à grande échelle

Ce chapitre traite de développements métrologiques pour la réalisation d'expériences d'incendie à grande échelle. Un exemple de développement d'une méthode inverse pour la détermination expérimentale de la puissance d'un feu est proposé. Une méthode, dite « chimique », de calcul par calorimétrie a ainsi été adaptée à l'étude des incendies dans des enceintes fermées et mécaniquement ventilées. Il s'agit de déterminer la puissance d'un feu en mesurant son impact (flux de chaleur et de masse) sur le milieu environnant. Ce travail met en avant l'intérêt des techniques de mesure « inverses » pour les applications incendie pour lesquelles certaines grandeurs sont difficilement mesurables directement.

Nomenclature

C_p	Capacité calorifique (J/°C/kg)	Lettre grecque	
$E, \Delta H$	Enthalpie (J/kg)	ρ	Masse volumique (kg/m ³)
g	Gravité (m/s ²)	∞	Condition ambiante
h	Hauteur (m)	Indice et exposant	
\dot{m}	Débit massique (kg/s)	c	Carbone ou consommé
M	Masse (kg)	CO ₂	Dioxyde de carbone
P	Pression (Pa)	CO	Monoxyde de carbone
\dot{Q}	Puissance, HRR, (W)	G	Généré
R	Constante des gaz parfait	H	Hauteur de porte
S	Surface (m ²)	i	Admission (<i>in</i>)
T	Température (°C)	N	Plan neutre
t	Temps (s)	o	Extraction (<i>out</i>)
U	Vitesse (m/s)	O ₂	Oxygène
\dot{v}	Débit volumique (m ³ /h)	s	Pression statique
V	Volume (m ³)	O	Sans ventilation
X	Fraction molaire (mol/mol)	*	Sans dimension
Y	Fraction massique (g/g)	<i>init</i>	Initiale
z	Altitude (m)	m	mesuré

5.1 Introduction

La réalisation d'expériences dites « globales » reproduisant le déroulement d'un incendie réel constitue une action de recherche importante pour la compréhension des incendies et la validation des outils de simulation (illustration du dispositif DIVA de l'IRSN sur la figure 68). Ces expériences permettent d'étudier le couplage entre les différents phénomènes physiques, pouvant être étudiés séparément avec des essais dits à effets séparés, mais également de valider les expérimentations réalisées à échelle réduite en réalisant la transposition à l'échelle réelle. Ces expériences alimentent des bases de données nécessaires à la validation des logiciels de simulation, en appui aux démonstrations de sûreté et à la caractérisation de situations accidentelles.

Compte tenu du nombre réduit d'essais globaux à grande échelle (en raison de leur complexité et de leur coût), la métrologie mise en œuvre pour ces essais doit être

suffisamment exhaustive, robuste et fiable pour fournir les mesures des grandeurs nécessaires à la compréhension des phénomènes physiques et de leurs interactions. Les phénomènes analysés sont principalement le foyer et son environnement (perte de masse combustible, température des gaz, flux de chaleur radiatif émis par la flamme), le mouvement et les caractéristiques des fumées (température et concentration en espèces chimiques des gaz) et le comportement des structures environnantes (températures, flux de chaleur reçu).

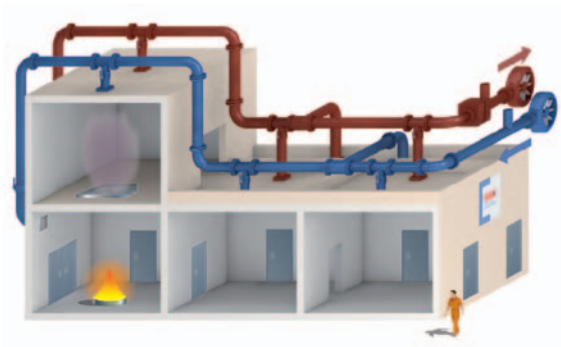


Figure 68. Illustration du dispositif grande échelle DIVA de l'IRSN.

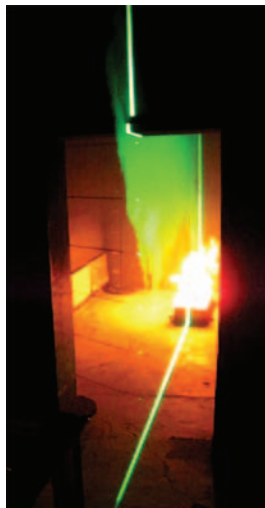


Figure 69. Photographies illustrant la mise en œuvre des diagnostics SPIV sur un écoulement de passage de porte.

Les grandeurs expérimentales, et les techniques de mesure associées, lors d'expérimentations à grande échelle sont la perte de masse d'un combustible (système de pesée), les concentrations d'espèces (O_2 , CO_2 , CO ...) ou de particules solides (suie) dans le gaz (analyseurs de gaz, FTIR, impacteurs...), la température des

gaz (thermocouples), les flux de chaleur radiatif et convectif (sondes fluxmètres), les vitesses et débits d'écoulement de fumées (sondes déprimogènes, PIV, LDV). La mise en place de ces mesures est couplée au développement de systèmes d'acquisition, de méthodes de traitement du signal et d'évaluation des incertitudes. Enfin, les grandeurs physiques obtenues avec leur incertitude sont ensuite exploitées pour calculer des grandeurs physiques dites « élaborées » nécessaires à la compréhension de la physique de l'**incendie** telles que la puissance du feu, la stratification thermique des fumées ou les débits de perte de masse du combustible.

Le développement du calcul de la puissance du feu par calorimétrie pour les applications en milieu confiné et mécaniquement ventilé a été un axe de recherche important développé ces dernières années au LEF. Il a permis de proposer des méthodes de détermination expérimentale de la puissance de l'**incendie**, spécifiques à des expériences d'incendies en milieu confiné et ventilé. Cette section présente un exemple pour les méthodes dites chimiques de détermination de la puissance d'un feu.

5.2 *Éléments sur la calorimétrie pour l'incendie*

La détermination expérimentale de la puissance d'un **incendie** est un enjeu important lors d'expérimentations d'incendie. Il s'agit d'évaluer expérimentalement la source d'énergie délivrée par l'incendie vers l'environnement proche. Les méthodes existantes sont classées en trois catégories suivant les grandeurs physiques mesurables : la masse de combustible (méthode mécanique), la masse d'oxygène ou de produits de combustion impliqués dans la réaction de combustion (méthode chimique) ou la quantité de chaleur transférée par le foyer à son environnement proche (méthode thermique).

La méthode mécanique est basée sur une relation entre la puissance (appelée HRR pour *Heat Release Rate*) et le débit de perte de masse du combustible. La puissance est exprimée comme le produit entre le taux de brûlage du combustible et une enthalpie de combustion effective. Cette méthode nécessite la mesure de la perte de masse et la connaissance de l'enthalpie de combustion. Elle est adaptée lorsque la mesure de la perte de masse est possible, que la nature du combustible est connue et que les conditions de combustion sont suffisamment bien ventilées de manière à maintenir relativement constante l'enthalpie de combustion et égale à sa valeur en milieu ouvert. Cette méthode est communément utilisée pour les feux de gaz, de liquides, pour quelques combustibles solides « simples » et pour des conditions de combustion proche de la stœchiométrie.

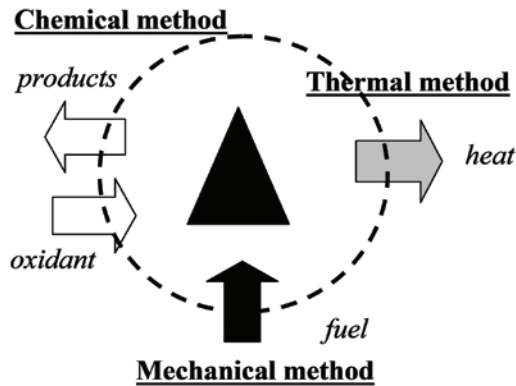


Figure 70. Illustration des différentes méthodes pour le calcul de la puissance d'un incendie.

Pour des combustibles plus complexes et pour lesquels la mesure de perte de masse est technologiquement complexe et/ou l'enthalpie de combustion est très incertaine, la méthode chimique peut être une alternative adaptée. Cette méthode est basée sur une relation de proportionnalité entre la puissance de l'incendie et le débit de comburant (oxygène) consommé ou le débit de produit (dioxyde de carbone) généré. La puissance de l'incendie est ainsi le produit entre les débits massique (d' O_2 ou de CO_2) et une enthalpie de combustion par unité d' O_2 consommé (méthode OC pour *oxygen consumption*) ou de CO_2 généré (méthode CDG pour *carbone dioxide generation*). Un grand nombre d'expérimentations montre que cette enthalpie de combustion est quasi constante pour les combustibles carbonés, $\Delta H = 13,1 \text{ MJ/kg } O_2$ ou $13,3 \text{ MJ/kg } CO_2$. Le calcul de la puissance nécessite alors uniquement la mesure des débits massiques d' O_2 ou de CO_2 . Cette méthode proposée dans les années 1980 pour la mesure de la puissance des incendies en milieu ouvert, est très largement utilisée de nos jours à grande et à petite échelle dans des dispositifs expérimentaux tels que des hottes ou cônes calorimètres. De plus, couplée à la méthode mécanique, elle permet la mesure de l'enthalpie de combustion effective du combustible. Cependant, dans certains cas, les méthodes chimiques peuvent ne plus être applicables pour des foyers composés de matériaux complexes et pour des régimes de combustion sous-ventilés pour lesquels l'hypothèse de l'enthalpie de combustion par unité de masse d'oxygène constante ($13,1 \text{ MJ/kg } O_2$) n'est plus vérifiée.

Une alternative est alors la méthode thermique basée sur un bilan d'énergie au sein d'un système contenant la source incendie. Il s'agit alors d'évaluer expérimentalement l'ensemble des flux de chaleur dissipés aux frontières du système et d'en déduire la puissance, produite par l'incendie, ayant généré ces flux. Cette méthode, dite

« inverse », nécessite un nombre important de mesures (de température et flux de chaleur notamment) qui peut la rendre couteuse en instrumentation.

Ces trois méthodes (mécanique, chimique et thermique) ont été développées initialement pour l'étude des incendies en milieu totalement ou partiellement ouvert pour lesquels l'alimentation en oxygène est libre (figure 71-a et -b). Dans le cas d'essais d'incendie dans des enceintes fermées et ventilées mécaniquement, l'alimentation d'air est contrôlée et les méthodes précédemment exposées doivent être adaptées. C'est cet objectif de développement que l'IRSN a poursuivi ces dernières années en proposant des nouvelles formulations pour les méthodes chimiques [51, 52] et thermiques [52]. Ces méthodes ont été développées à partir des expériences réalisées à l'IRSN [48 à 53]. Cette partie expose un exemple de ces travaux concernant le développement de la méthode chimique.

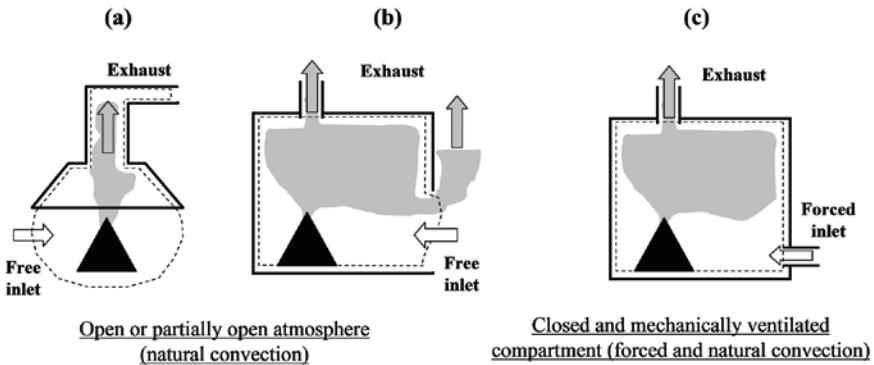
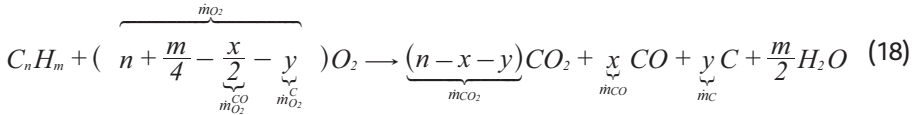


Figure 71. Illustration des configurations d'essais suivant la nature de l'apport d'air, libre ou contrôlée.

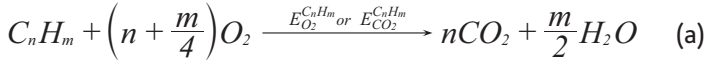
5.3 Description de la méthode chimique

5.3.1 Formulation générale développée en milieu ouvert

L'estimation de la puissance d'un incendie par la méthode chimique repose sur l'expression de la réaction chimique associée au processus de combustion. Dans le cas d'un hydrocarbure, la combustion est approchée par une réaction d'oxydation du combustible gazeux formant du dioxyde et monoxyde de carbone, du carbone seul (représentant les particules de suie) et de l'eau :



Cette réaction peut être décomposée en trois étapes décrivant une combustion complète à laquelle sont soustraites deux réactions d'oxydation, du CO et du carbone :



De cette décomposition, deux relations pour la puissance sont proposées.

La première s'appuie uniquement sur le débit de comburant (d'oxygène) consommé lors de l'oxydation :

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{OC} &= \underbrace{E_{O_2}^{C_n H_m} (\dot{m}_{O_2} + \dot{m}_{O_2}^{CO} + \dot{m}_{O_2}^C)}_{R-2a} - \underbrace{E_{O_2}^{CO} \dot{m}_{O_2}^{CO}}_{R-2b} - \underbrace{E_{O_2}^C \dot{m}_{O_2}^C}_{R-2c} \quad (20) \\ &= E_{O_2}^{C_n H_m} \dot{m}_{O_2} - (E_{O_2}^{CO} - E_{O_2}^{C_n H_m}) \frac{M_{O_2}}{2M_{CO}} \dot{m}_{CO} - (E_{O_2}^C - E_{O_2}^{C_n H_m}) \frac{M_{O_2}}{M_C} \dot{m}_C \end{aligned}$$

L'énergie dégagée par l'incendie est ainsi égale à celle produite par la réaction d'oxydation complète (a) moins les contributions issues des réactions (b) et (c).

Une seconde relation peut être proposée en s'appuyant uniquement sur les débits de gaz de combustion produits :

$$\dot{Q}_{CDG} = E_{CO_2}^{C_n H_m} \dot{m}_{CO_2} + E_{CO}^{C_n H_m} \dot{m}_{CO} + E_C^{C_n H_m} \dot{m}_C \quad (21)$$

Les enthalpies de combustion pour les réactions d'oxydation (2-b et 2-c) sont connues ($E_{O_2}^{CO} = 17,6$ MJ/kg de O_2 and $E_{O_2}^C = 12,3$ MJ/kg de O_2 , $E_{CO} = 10,8$ MJ/kg de CO et $E_C = 15,8$ MJ/kg de C). Les enthalpies de combustion par masse d'oxygène consommé, $E_{O_2}^{fuel}$, ou masse de CO_2 produit, $E_{CO_2}^{fuel}$, dépendent de la nature du combustible. Cependant, l'analyse d'un large spectre de combustibles, en particulier organiques, montre que cette valeur varie très peu pour un grand nombre de combustibles ($E_{O_2}^{fuel} = 13,1$ MJ/kg de O_2 et $E_{CO_2}^{fuel} = 13,3$ MJ/kg de CO_2). C'est sur

cette hypothèse que reposent les méthodes chimiques dites « calorimétriques » pour la détermination expérimentale de la puissance d'un incendie. Cette méthode repose ainsi principalement sur la détermination des débits de consommation d'oxygène ou de production des gaz de combustion (CO_2 , CO et C).

Dans le cas d'un foyer en milieu ouvert, placé sous une hotte d'aspiration, ces débits d'espèces (O_2 , CO_2 , CO et C) sont obtenus par les mesures du débit total d'air extrait et des concentrations des espèces chimiques (figure 71-a). Pour des applications dans un environnement fermé, des nouvelles formulations des bilans de masse doivent être proposées en intégrant les termes instationnaires induits par la dynamique de l'incendie et ceux relatifs à l'apport d'air (figure 71-c).

5.3.2 Application pour un environnement fermé

Les débits de consommation d'oxygène et de génération de CO_2 sont obtenus à partir d'un bilan de masse sur un système contenant l'incendie. C'est cette particularité d'adaptation de la méthode qui a été développée. Il s'agit d'évaluer les termes instationnaires et l'ensemble des flux de masse aux niveaux des frontières pour en déduire le débit de consommation d' O_2 ou de production de CO_2 qui en est la source. La méthode développée s'apparente à une méthode inverse dont l'objectif est de déterminer une grandeur (la puissance), en mesurant d'autres grandeurs (débits massiques d'espèces), reliées à la première par des équations de bilans. Les bilans de masse pour l'oxygène et le CO_2 sont exprimés par les relations :

$$\dot{m}_{\text{O}_2}^{\text{C}} = -\frac{dm_{\text{O}_2}}{dt} - \sum \dot{m}_{\text{O}_2} \quad (\text{a})$$

$$\dot{m}_{\text{CO}_2}^{\text{G}} = \frac{dm_{\text{CO}_2}}{dt} + \sum \dot{m}_{\text{CO}_2} \quad (\text{b}) \quad (22)$$

La détermination de ces débits d'espèces ($\dot{m}_{\text{O}_2}^{\text{C}}$ et $\dot{m}_{\text{CO}_2}^{\text{G}}$) repose sur l'évaluation des termes instationnaires et des flux de matière aux frontières (branches de ventilation, fuite, porte...) à partir des grandeurs mesurées.

5.3.3 Évaluation expérimentale des grandeurs recherchées

La variation temporelle de la masse de chaque espèce dans le volume de contrôle et les flux aux frontières s'expriment par les relations :

$$\frac{d}{dt} m_i = \frac{M_i}{R} V \frac{d}{dt} \left(\frac{PX_i}{T} \right) \quad (\text{kg/s}) \quad (\text{a})$$

$$\text{et } \dot{m}_i = \frac{M_i P}{R T} X_i \dot{v} \quad (\text{b}) \quad (23)$$

L'évaluation de ces grandeurs nécessite la mesure, dans le domaine et au niveau des frontières (gaine de ventilation, ouvertures, fuite), des concentrations des espèces (oxygène, CO_2 notamment) et les débits massiques. Les concentrations sont mesurées avec des analyseurs de gaz (infra-rouge, paramagnétiques...) et les flux de matière généralement par des sondes déprimogènes (tube de Pitot ou équivalent) reliées à des transmetteurs de pression pour la mesure dans des gaines de ventilation, des passages de porte ou des trémies. Le temps de réponse, la teneur en humidité dans le gaz et les caractéristiques des appareils de mesure et de la chaîne de mesure sont à prendre en compte dans l'évaluation finale des débits de consommation d'oxygène ou de production de CO_2 .

5.4 Application à un feu de gaz dans un local

Un premier exemple discute des spécificités des deux méthodes OC et CDG à partir d'un scénario d'un feu de gaz propane dans une enceinte fermée et mécaniquement ventilée.

5.4.1 Description de l'expérience

L'expérience reproduit un scénario d'**incendie** dans un local de 120 m^3 en béton armé connecté à un réseau de ventilation (figure 72). Le scénario est un feu de gaz propane dans un local ventilé avec un taux de renouvellement de 16 h^{-1} (ou $1\,900 \text{ m}^3/\text{h}$).

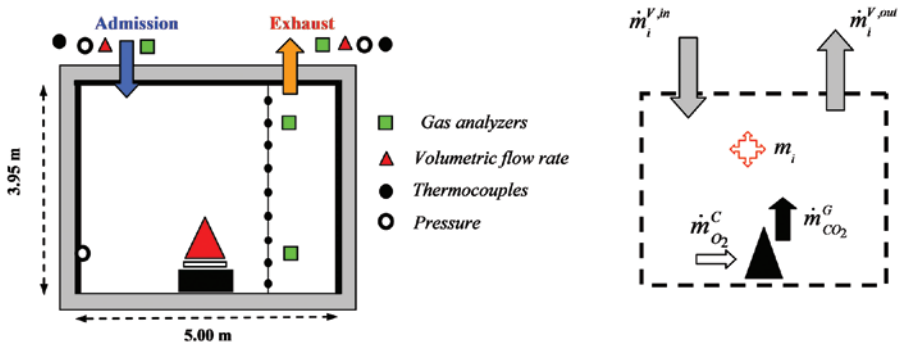


Figure 72. Schéma décrivant l'implémentation des mesures pour la détermination expérimentale de la puissance de l'incendie.

Pour la détermination expérimentale de la puissance, le local est équipé d'un réseau de mesures spécifiques. Les grandeurs mesurées sont le débit de propane, la température des gaz (par des thermocouples), les concentrations en espèces chimiques (analyseurs de gaz), la pression (transmetteurs de pression) et les débits de gaz dans les gaines de ventilation (sondes déprimogènes couplées à des capteurs de pression).

Un exemple de l'évolution temporelle de ces mesures aux cours de l'incendie est présenté sur la figure 73. Avant l'allumage du feu, les débits de ventilation sont ajustés au taux de ventilation souhaité. Le feu est ensuite allumé pour un débit de propane fixé. La température des gaz dans le local augmente progressivement. Les débits de ventilation varient en raison des variations de pression et de température dans l'enceinte. La concentration d'oxygène diminue et celle de CO_2 augmente en raison de la consommation d'oxygène et la production de CO_2 issues de la réaction d'oxydation. Ce comportement est typique de celui d'un incendie dans un local fermé et ventilé.

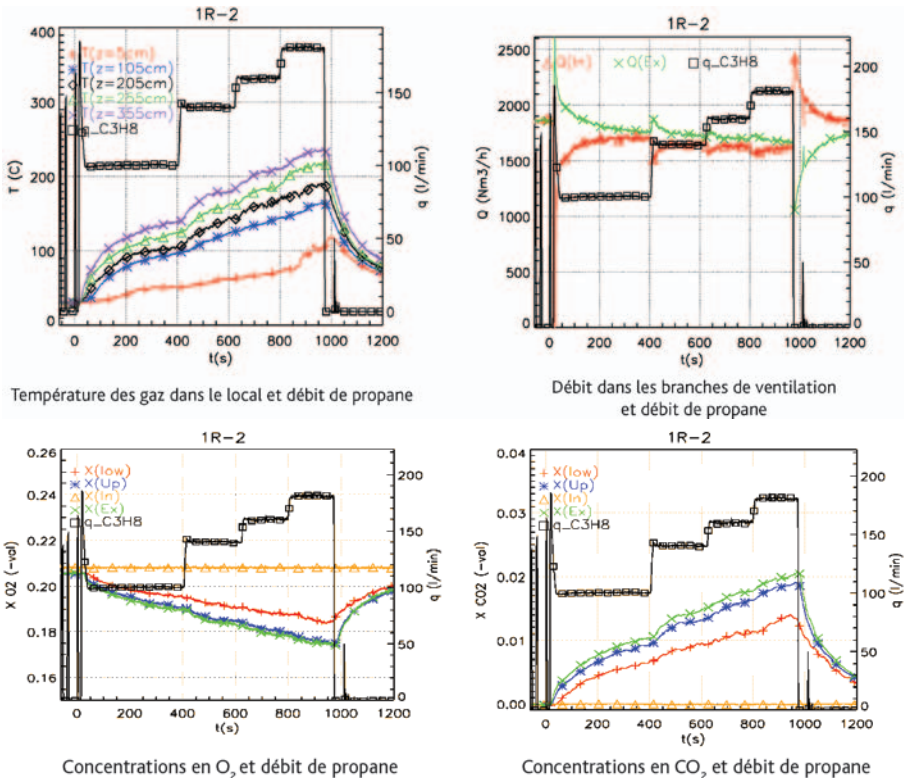


Figure 73. Évolution temporelle des grandeurs mesurées au cours de l'expérience d'un feu de gaz dans un local.

5.4.2 Détermination expérimentale de la puissance

Dans le cas de cette expérience, le débit de propane étant mesuré, la puissance de l'incendie peut se calculer par les deux méthodes, mécanique et chimique. Cette possibilité permet de confronter la méthode chimique à une mesure de référence de la puissance obtenue par la méthode mécanique. Pour cette expérience, le volume de contrôle est défini comme celui de l'enceinte. L'expression de la puissance en intégrant les formulations des bilans de masse est, pour les méthodes OC et CDG :

$$\dot{Q}_{OC} = E_{O_2}^{C_3H_8} \left\{ -\frac{d}{dt} m_{O_2} + \dot{m}_{O_2}^{V,in} - \dot{m}_{O_2}^{V,out} \right\} \quad (a)$$

$$\dot{Q}_{CDG} = E_{CO_2}^{C_3H_8} \left\{ \frac{d}{dt} m_{CO_2} + \dot{m}_{CO_2}^{V,in} - \dot{m}_{CO_2}^{V,out} \right\} \quad (b) \quad (24)$$

Les bilans de masse font apparaître un terme instationnaire et deux termes de flux aux frontières pour les branches d'admission et d'extraction de la ventilation. Les masses d'O₂ et de CO₂ dans le volume de contrôle sont obtenues en prenant en compte les stratifications de température, par neuf points de mesure sur un mat vertical (figure 72) et des concentrations, par deux points de mesure. L'expression de la masse de l'espèce *i* est de la forme :

$$m_i = \frac{M_i P}{R} S dz \left(X_i^L \sum_{j=0}^k \frac{1}{T_j} + X_i^U \sum_{j=k+1}^n \frac{1}{T_j} \right) \quad (25)$$

avec *i* = O₂ et CO₂

Cette discrétisation spatiale en neuf points de température et deux points de concentrations est spécifique à cette expérience et ne présente pas un caractère générique. Elle est définie de manière à saisir l'ensemble des variations spatiales attendues. Généralement, elle résulte d'un compromis entre une discrétisation détaillée, les contraintes techniques et les moyens de mesure disponibles.

Le terme instationnaire est obtenu en calculant la dérivée de la masse au cours du temps. Les flux de masse aux frontières (débits d'O₂ et de CO₂ dans les gaines de ventilation) sont obtenus avec l'équation 23. Pour la détermination des trois contributions, une attention particulière doit être portée sur le traitement des mesures (fréquence d'échantillonnage des signaux, temps de réponse, filtrage...) et le calcul des dérivées. La précision du calcul et la capacité à saisir les phénomènes instationnaires en dépendent.

5.4.3 Analyse de méthodes OC et CDG

Une étude comparative des deux méthodes OC et CDG est proposée en analysant la valeur des grandeurs impliquées dans la formulation de la puissance. La figure 74 présente l'évolution temporelle de ces termes ainsi que les valeurs finales de la puissance.

L'analyse des grandeurs de la méthode CDG montre que le processus de combustion conduit à une augmentation progressive de la masse de CO_2 dans l'enceinte, ce qui est le résultat de deux effets opposés, la production de CO_2 par la combustion mais également la diminution de la masse totale en raison de l'augmentation de la température. Pour cet exemple, un gain net d'environ 2 kg de CO_2 dans l'enceinte est mesuré en fin d'essai. Cette présence de CO_2 , conduit à un débit de CO_2 dans la branche d'extraction. Pour cette méthode, la puissance est la somme du terme provenant du débit d'extraction et du terme instationnaire (le débit d'admission ne joue aucun rôle, n'apportant pas de CO_2). Le terme instationnaire permet de saisir l'augmentation en début de feu lors de l'augmentation de la température des gaz. La confrontation avec la puissance de référence mesurée à partir du débit de propane donne un accord satisfaisant.

L'analyse des grandeurs de la méthode OC montre que la masse d'oxygène dans le local diminue en raison de deux effets qui se cumulent, la consommation d'oxygène par la réaction de combustion et la diminution de la masse totale dans l'enceinte par augmentation de la température. Par ailleurs, les termes associés aux débits de ventilation présentent des comportements différents que ces mêmes termes dans la méthode CDG en raison des variations de pression dans l'enceinte et de la présence d'oxygène avant la combustion. Leurs amplitudes sont très grandes et présentent des variations issues du comportement de l'incendie. Pour la méthode OC, la puissance est ainsi la somme de termes de signes opposés et d'amplitudes beaucoup plus importantes (environ 1 500 kW) que le niveau de puissance recherché (environ 200 kW).

La différence entre les deux méthodes repose notamment sur l'amplitude des termes calculés. La méthode OC repose sur la différence de termes de grandes amplitudes, pouvant être très supérieurs à la valeur de la puissance recherchée. Cette caractéristique peut conduire à des niveaux d'incertitudes importants. La méthode CDG présente une incertitude plus faible reposant sur la somme de termes de même signe et d'amplitude du même ordre de grandeur que la puissance recherchée.

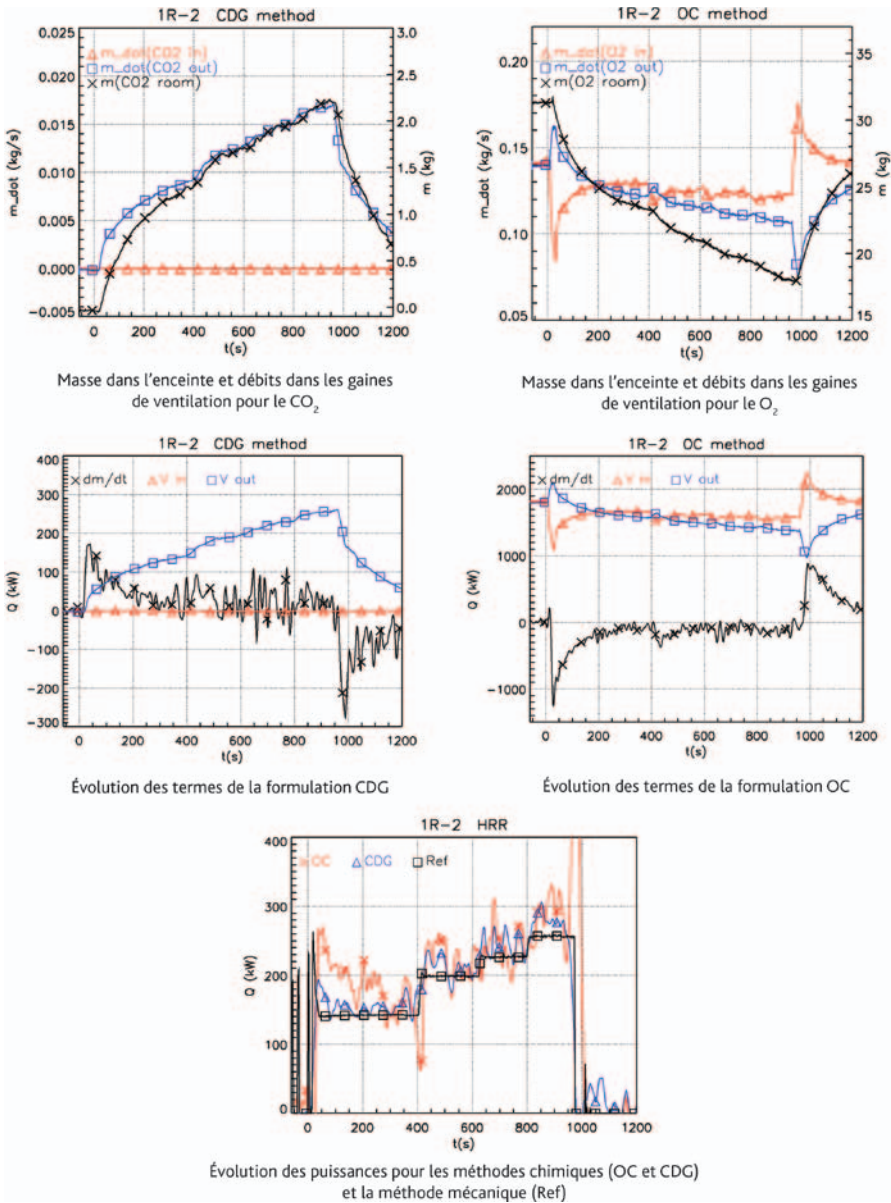


Figure 74. Analyse comparative des méthodes OC et CDG dans le cas d'un feu de gaz dans un local.

Cette dernière méthode se caractérise ainsi par une incertitude plus faible et ainsi une meilleure précision. Sur une série d'expériences (incluant celle présentée précédemment), les deux méthodes permettent d'approcher de façon satisfaisante la puissance effective de l'incendie (figure 75-a). Cependant, la méthode CDG offre,

une plus grande précision, plus proche de la valeur de référence, et une plus faible incertitude, plus faible dispersion autour de la valeur moyenne (figure 75-b).

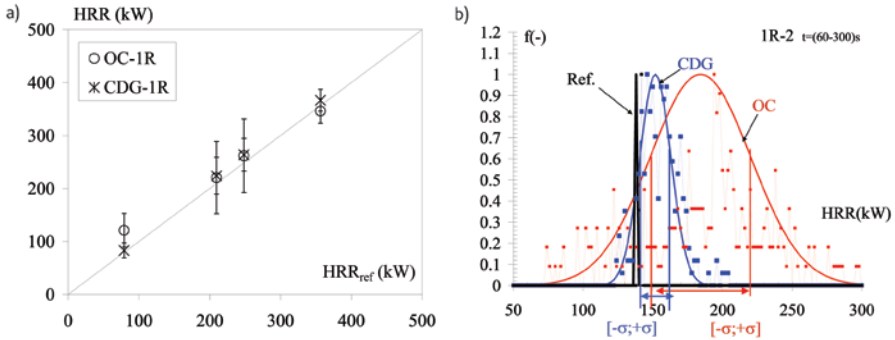


Figure 75. Comparaison entre la méthode OC et CDG pour plusieurs puissances de feu (a) et distribution autour de la valeur moyenne pour un essai (b).

5.5 Application pour une configuration multi-local

L'application de la méthode à une configuration d'essai plus complexe impliquant plusieurs locaux est présentée afin de mettre en évidence le rôle important de la définition du volume de contrôle et sa conséquence sur la précision des résultats. Cette analyse est proposée sur la méthode CDG.

5.5.1 Description de l'expérience

L'expérimentation est un scénario d'incendie dans un ensemble de trois locaux ventilés et reliés entre eux par des passages de portes. L'incendie est un feu de gaz propane dans le local central. Une ventilation mécanique est constituée d'une arrivée d'air dans un local et une extraction d'air dans le local opposé (figure 76). L'instrumentation est similaire à celle mise en œuvre pour un seul local, dupliqué sur l'ensemble des trois locaux.

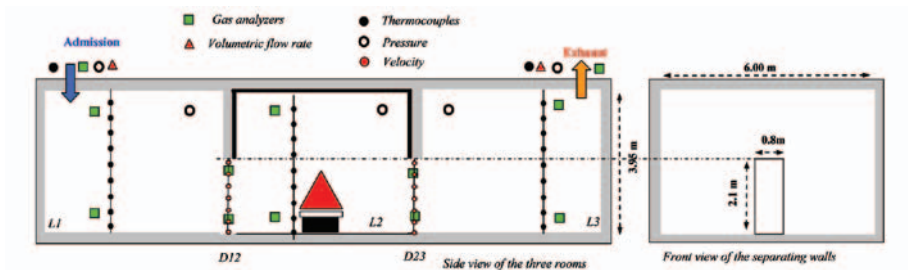


Figure 76. Illustration d'une expérimentation impliquant trois locaux.

5.5.2 Détermination expérimentale de la puissance

Le principe des méthodes chimiques, basées sur des bilans de masse, n'impose pas de critères sur la définition du volume de contrôle. Cependant, ce choix peut avoir une influence sur la qualité des résultats. Afin d'étudier ce paramètre, deux définitions sont retenues pour cette expérience : le volume de l'ensemble des trois locaux (formulation V) et le volume du local dans lequel se trouve le foyer (formulation D) (figure 77).

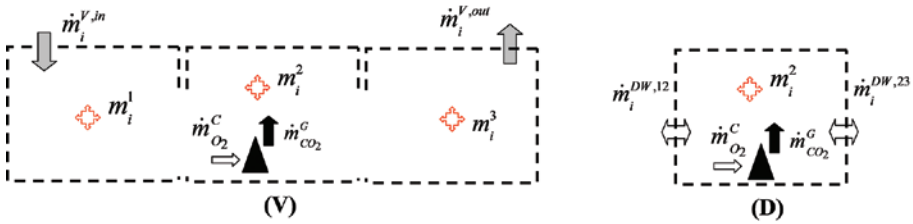


Figure 77. Illustration de deux volumes de contrôle notés (V) et (D).

Les deux définitions conduisent à deux formulations pour la méthode CDG :

$$\dot{Q}_{CDG-V} = E_{CO_2}^{C_3H_8} \left\{ \frac{d}{dt} m_{CO_2}^1 + \frac{d}{dt} m_{CO_2}^2 + \frac{d}{dt} m_{CO_2}^3 - \dot{m}_{CO_2}^{V,in} - \dot{m}_{CO_2}^{V,out} \right\} \quad (a)$$

$$\dot{Q}_{CDG-D} = E_{CO_2}^{C_3H_8} \left\{ \frac{d}{dt} m_{CO_2}^2 - \dot{m}_{CO_2}^{DW,12} - \dot{m}_{CO_2}^{DW,23} \right\} \quad (b) \quad (26)$$

Pour les deux définitions, les masses des espèces chimiques dans le local ou les trois locaux sont calculées. Pour la configuration (V), les débits dans la ventilation sont calculés comme pour la configuration avec un seul local. Pour la configuration (D), les flux aux frontières sont les débits aux niveaux des portes, mesurés après intégration de profils de vitesse et de température par la relation :

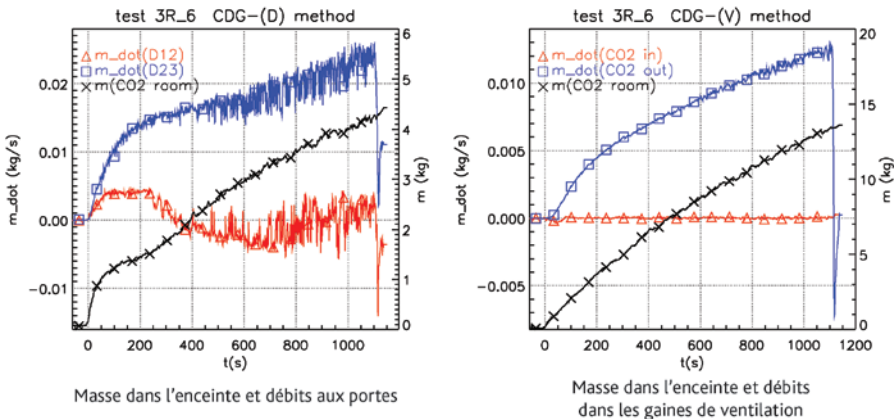
$$\dot{m}_i^{DW} = \frac{M_i P}{R} L dz \left(X_i^{DW,L} \sum_{j=0}^k \frac{u_j}{T_j} + X_i^{DW,U} \sum_{j=k+1}^m \frac{u_j}{T_j} \right) \text{ avec } i = O_2 \text{ et } CO_2 \quad (27)$$

Ces débits sont généralement des flux bidirectionnels (flux d'air frais entrant et de fumées chaudes sortantes) de faibles amplitudes de vitesse (0,5-2 m/s) mais dont les débits peuvent être importants en raison de la section importante d'une porte ouverte. Comme pour la mesure de la masse dans le local, le choix du nombre et des positions des capteurs de mesure (de vitesse, de température et de concentration), est important dans la précision finale de la puissance.

5.5.3 Analyse comparative entre les approches (V) et (D)

La comparaison des approches (V) et (D) est présentée sur la figure 78. Les deux approches donnent des résultats similaires. Les différences concernent plus particulièrement le poids des différents termes sur le résultat final et l'incertitude sur les différentes contributions. L'approche utilisant un local (volume de contrôle [D]), donne une accumulation de CO_2 dans le local de plus faible volume et des flux aux frontières, plus importants par rapport à l'approche mettant en jeu les trois locaux (volume de contrôle [V]). L'approche impliquant les trois locaux nécessite ainsi une bonne détermination des termes instationnaires (la contribution totale étant plus importante, évaluée sur les trois locaux) alors que la méthode avec un seul local nécessite d'appréhender correctement les échanges bidirectionnels aux niveaux des passages de porte (écoulements bidirectionnels complexes ayant généralement des vitesses de faibles amplitudes). Pour cet exemple, la mesure des flux de matière au niveau des passages de porte présente une incertitude très supérieure par rapport à celle dans les gaines de ventilation. Les résultats sur la puissance montrent ainsi une plus grande précision avec le volume de contrôle incluant les trois locaux (figure 79).

La définition du volume de contrôle est ainsi un choix déterminant dans la précision de la méthode. La métrologie mise en place doit être adaptée à ce choix et la précision des mesures doit être évaluée ainsi que les conséquences sur le calcul de la puissance. Suivant le scénario d'incendie et le dispositif expérimental, la détermination du volume de contrôle doit être définie de manière à minimiser les incertitudes sur les mesures et ainsi à choisir un système pour lequel les grandeurs impliquées dans la formule de la puissance soient obtenues avec le minimum d'incertitude.



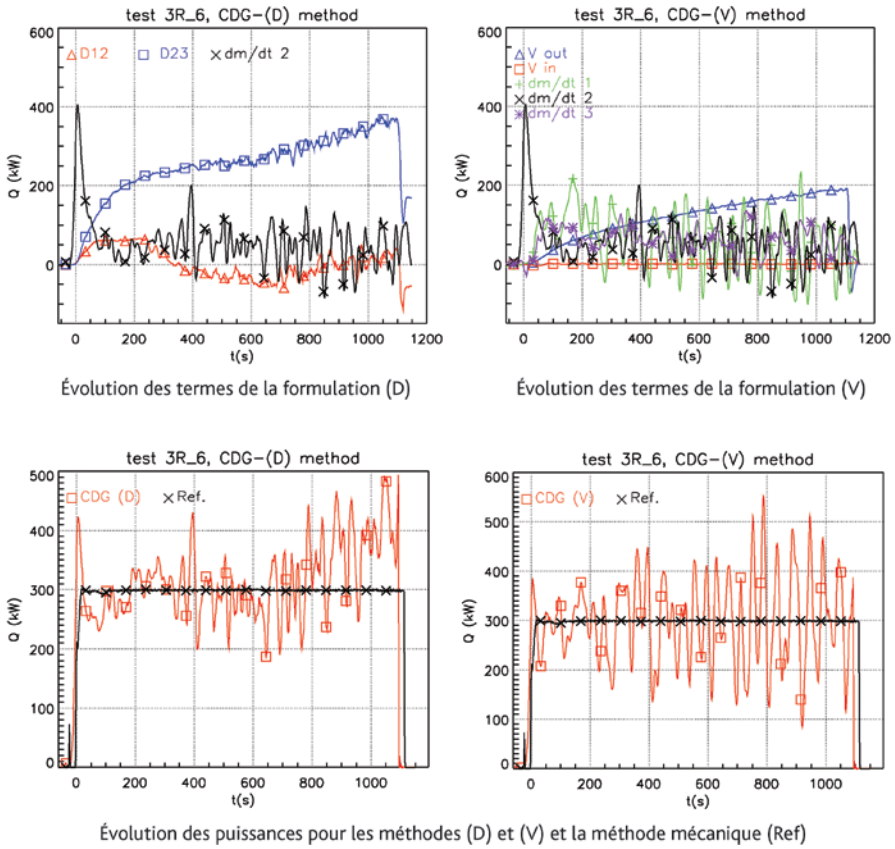


Figure 78. Analyse comparative des définitions (D) et (V) du volume de contrôle pour la méthode CDG dans le cas d'un feu de gaz.

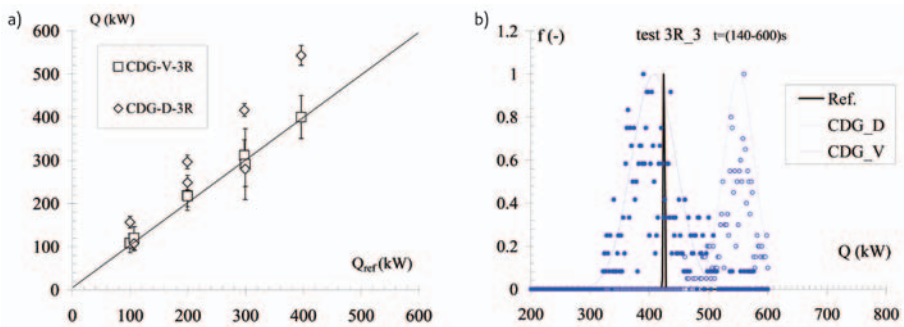


Figure 79. Comparaison des deux approches de volume de contrôle (D) et (V) pour la méthode CDG pour plusieurs puissances de feu (a) et distribution autour de la valeur moyenne pour un essai (b).

5.6 Application à des feux d'hydrocarbure

Une troisième illustration est présentée sur une série d'expérimentations d'incendie produisant des suies et du CO, ce qui est souvent le cas pour des régimes de combustion sous-ventilée.

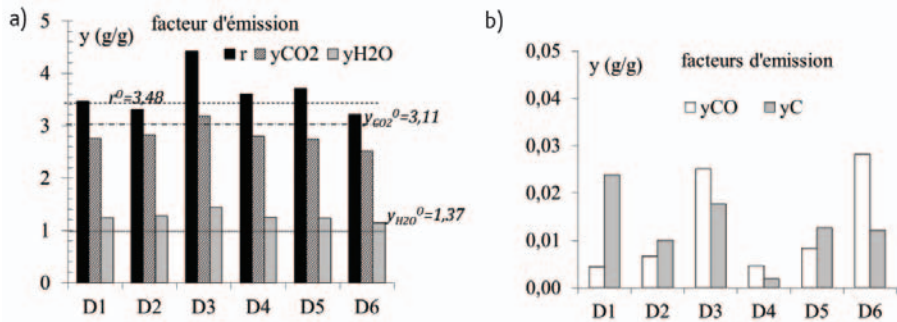
5.6.1 Description de la série d'expériences

La série d'expérimentations concerne des incendies de nappe d'hydrocarbure (de type dodécane) produisant du CO et des suies dans un seul local fermé et ventilé décrit dans le premier exemple (figure 72). Ces essais concernent deux dimensions de nappe (0,2 et 0,4 m²) et différents débits de ventilation ($Tr = 1,5 ; 4,5$ et $8,4$ h⁻¹).

5.6.2 Évaluation des bilans d'espèces

Avant l'application des formulations de puissance, la mesure de l'ensemble des espèces impliquées dans la réaction d'oxydation (O₂, CO₂, CO, suie) permet d'évaluer les bilans de masse sur le comburant (O₂) et les produits (CO₂, CO et C) ainsi que le bilan dit « carbone » (conservation de la masse de carbone) et ainsi la qualité des mesures.

Une des méthodes permettant d'évaluer la qualité des bilans consiste à calculer les facteurs d'émission des produits ainsi que le facteur de consommation d'oxygène r (en ayant mesuré par ailleurs le débit de consommation du combustible). Un exemple de résultats est présenté figure 80, pour la série d'expériences. Les résultats sont en bon accord avec les niveaux de référence attendus pour une réaction complète de ce



combustible ($r = 3,48$; $y_{\text{CO}_2} = 3,11$ et $y_{\text{H}_2\text{O}} = 1,37$) et ainsi conforte la cohérence des mesures. Dans le cas où la nature du combustible est connue, ces bilans de masse et de carbone peuvent également être exploités afin de corriger les mesures de CO, de suie ainsi que celle de la vapeur d'eau de façon à respecter les bilans de masse et de carbone. Cette analyse des bilans de masse est une étape importante permettant de valider la précision des mesures avant leur utilisation pour le calcul de la puissance.

5.6.3 Détermination expérimentale de la puissance

Dans les formulations de la puissance par les méthodes OC et CDG, la présence de CO et de suie est prise en compte *via* des termes correctifs par rapport à une situation d'oxydation complète produisant uniquement du CO₂ et de la vapeur d'eau. La formulation de la puissance (équ. 3) est reproposée en distinguant, pour les deux méthodes, OC et CDG, cinq termes :

$$\dot{Q}_{OC} = - \underbrace{E_{O_2}^{C_n H_m} \frac{d}{dt} m_{O_2}}_{MTD} + \underbrace{E_{O_2}^{C_n H_m} \dot{m}_{O_2}^{V, in}}_{IV} - \underbrace{E_{O_2}^{C_n H_m} \dot{m}_{O_2}^{V, out}}_{EV} \quad (a)$$

$$- \underbrace{\left(E_{O_2}^{CO} - E_{O_2}^{C_n H_m} \right) \frac{M_{O_2}}{2M_{CO}} \dot{m}_{CO}^G}_{CCO} - \underbrace{\left(E_{O_2}^C - E_{O_2}^{C_n H_m} \right) \frac{M_{O_2}}{M_C} \dot{m}_C^G}_{CC}$$

$$\dot{Q}_{CDG} = \underbrace{E_{CO_2}^{C_n H_m} \frac{d}{dt} m_{CO_2}}_{MTD} - \underbrace{E_{O_2}^{C_n H_m} \dot{m}_{CO_2}^{V, in}}_{IV} - \underbrace{E_{O_2}^{C_n H_m} \dot{m}_{CO_2}^{V, out}}_{EV} \quad (b) \quad (28)$$

$$+ \underbrace{E_{CO}^{C_n H_m} \dot{m}_{CO}^G}_{CCO} + \underbrace{E_C^{C_n H_m} \dot{m}_C^G}_{CC}$$

Les trois premiers termes concernent ceux discutés précédemment (contributions instationnaires et contributions des flux issues des branches de la ventilation) auxquels sont ajoutés les termes correctifs pour le CO et la suie.

L'évolution de la puissance pour deux essais est présentée sur la figure 81. Les termes instationnaires significatifs pour ces essais permettent de reproduire raisonnablement les variations rapides de la puissance, notamment pour le deuxième exemple et les deux méthodes convergent vers des résultats semblables.

L'importance de la production de CO et de suies est analysée en comparant l'amplitude de ces termes par rapport à la puissance totale pour l'ensemble de la série d'essais (figure 82). Pour cette série, les corrections dues à la production de suie et de CO est de l'ordre de 10 % et sont essentiellement apportées par le terme de production de CO. Pour ces essais, la production de suie n'entraîne pas de corrections

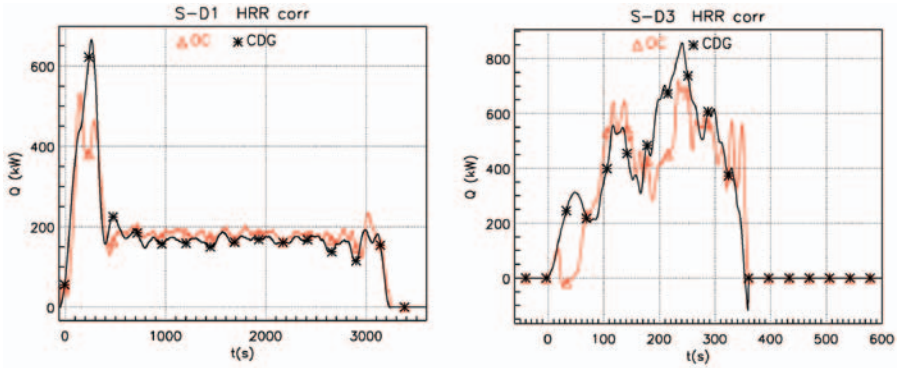


Figure 81. Évolutions de la puissance calculée par les méthodes OC et CDG pour deux expériences.

très importantes. Cette conclusion est spécifique à cette série d'essais et ne peut être généralisée.

Cette analyse montre que la modification de la réaction chimique par rapport à une réaction standard (ici la réaction d'oxydation complète avec uniquement production de CO_2 et d'eau) doit toujours être évaluée lors de l'utilisation de ces méthodes chimiques. Pour les combustibles comme les hydrocarbures, la correction liée au CO et aux suies est faible et son impact sur la puissance finale peut être du même ordre que l'incertitude. Par contre, pour d'autres combustibles ayant des formules chimiques complexes (charge minérale, possibilité de réactions endothermiques), la formule de la méthode chimique doit être réévaluée en considérant les nouvelles espèces et les nouvelles réactions.

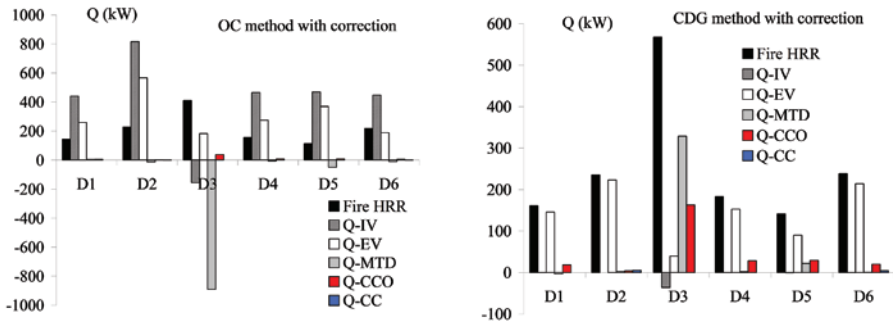


Figure 82. Distributions des termes dans les formulations de la puissance pour les méthodes OC et CDG.

5.7 Conclusion

Une méthode de calcul de la puissance du feu par calorimétrie existante et adaptée à un milieu ouvert a été adaptée à l'étude des incendies dans des enceintes fermées et/ou ventilées mécaniquement. Ce développement a abouti à une formulation qui permet d'évaluer la puissance du feu lors d'expérimentations pour ce type de scénarios d'incendie. Cette méthode est systématiquement appliquée pour analyser les expériences réalisées dans le dispositif DIVA. Elle permet, en complément des méthodes mécaniques et/ou thermiques, de proposer une évaluation de la puissance avec une bonne précision. C'est un atout important dans la réalisation d'expérimentations à grande échelle. Ce travail met en évidence l'intérêt des techniques de mesure « inverse » pour les applications incendie pour lesquelles certaines grandeurs sont difficilement mesurables directement.

Une des perspectives de ces travaux concerne notamment le développement de techniques d'optimisation des points de mesure des écoulements lors d'expérimentations à grande échelle. Il s'agit d'utiliser la simulation CFD (avec en particulier le logiciel ISIS de l'IRSN) pour optimiser la spécification de la métrologie (type et nombre points de mesure, positionnement et gamme) et dans un objectif plus large d'optimiser la définition (et les coûts) des expérimentations incendie à grande échelle. Les points de mesure concernés sont notamment les profils verticaux de température, les mesures de vitesse aux passages de porte, les points de mesure de concentration des espèces gazeuses.

Une perspective plus large sur la métrologie des expérimentations à grande échelle concerne l'application de techniques de mesure « avancées », développées à échelle réduite, sur des expérimentations à grande échelle. Les techniques de mesure visées sont des diagnostics dits « laser » pour les écoulements (PIV, LDV) et pour les mesures de concentration (LIF et PLIF). Il s'agit de mettre en adéquation les bases de données expérimentales avec les résultats spatialement résolus obtenus avec des logiciels de calcul de type CFD.

Bibliographie

44. P. Zavaleta, W. Le Saux, M. Coutin, M. Piller, H. Prêtrerel et J.M. Such, Les dispositifs expérimentaux de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) pour la recherche sur l'incendie, accepté pour le Congrès français de thermique « Les défis thermiques dans l'industrie nucléaire », 16-19 mai, Ile de Ré, France, 2006.
45. M. Piller, M. Coutin, H. Prêtrerel, J.M. Such, Étude expérimentale de la dégradation de matériaux de l'industrie nucléaire soumis à un rayonnement thermique, Congrès français de thermique « Les défis thermiques dans l'industrie nucléaire », 16-19 mai, Ile de Ré, France, 2006.
46. W. Le Saux, H. Prêtrerel, J.M. Such, Étude expérimentale des pertes thermiques à travers les parois en béton d'un local lors d'un incendie en milieu confiné et ventilé, Congrès français de thermique « Les défis thermiques dans l'industrie nucléaire », 16-19 mai, Ile de Ré, France, 2006.
47. M. Piller, M. Coutin, H. Prêtrerel, Étude expérimentale de la dégradation de matériaux de l'industrie nucléaire soumis à un rayonnement thermique, Journée internationale de thermique (JITH), 27-29 mars, Djerba, Tunisie, 2009.
48. S. Moreau, H. Prêtrerel, P. Zavaleta, F.X. Ouf, Specific measurement technique to determine high level of soot concentration during large scale fire experiment, European Aerosols Conference (EAC), 24-29 août, Thessalonique, Grèce, 2008.
49. W. Le Saux, H. Prêtrerel, M. Coutin, M. Piller, P. Zavaleta, P. Guillou, Les dispositifs expérimentaux de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) pour la recherche sur l'incendie, Journée internationale de thermique (JITH), 27-29 mars, Djerba, Tunisie, 2009.
50. A. Koched, H. Prêtrerel, L. Audouin, O. Vauquelin, F. Candelier, Application de la PIV sur un écoulement de fumée à un passage de porte induit par une source incendie, 13^e Congrès francophone de techniques laser, CFTL 2012, 18-21 septembre, Rouen, France, 2012.
51. [H. Prêtrerel](#), W. Le Saux, L. Audouin, Determination of the heat release rate of large scale hydrocarbon pool fires in ventilated compartments, *Fire Safety Journal*, Vol. 62, Part B, 192-205, November 2013.

52. H. Prétel, W. Le Saux, L. Audouin, Experimental determination of fire heat release rate with OC and CDG calorimetry for ventilated compartments fire scenario, *Fire and Materials*, 38, 4, 474-506, 2014.
53. A. Koched, H. Prétel, L. Audouin, O. Vauquelin, Utilisation de la stéréo PIV pour l'optimisation des mesures de vitesse de fumée d'incendie à un passage de porte par des sondes bidirectionnelles, 14^e Congrès francophone de techniques Laser, CFTL 2014, 15-19 septembre, Marseille, France, 2014.
54. M. Coutin, W. Plumecocq, S. Melis, L. Audouin, Energy balance in a confined compartment fire to assess the heat release rate of an electrical cabinet fire, *Fire Safety Journal*, 52, 34-45, 2012.

Chapitre 6 Conclusion

Des exemples d'avancées scientifiques sur des thèmes de recherche traitant de la dynamique des [incendies](#) en milieu confiné et ventilé ont été présentés dans ce mémoire. Ces travaux ont été menés au cours des dix dernières années dans le cadre de mon activité de recherche au sein du [Laboratoire d'expérimentation de feux](#) de l'[IRSN](#). L'exposé a porté sur la combustion en régime sous-ventilé, les effets de pression et les instabilités de combustion, la propagation des fumées et un exemple de développement d'une technique d'analyse de données issues d'expérimentations à grande échelle d'incendies.

Cette conclusion synthétise les différents acquis scientifiques obtenus au cours de ces recherches, et propose d'identifier comment ces travaux peuvent être appliqués pour améliorer la sûreté vis-à-vis du risque [incendie](#).

Enfin, des perspectives de recherche sont identifiées au regard des thématiques propres aux **incendies** en milieu confiné et ventilé.

6.1 Bilans des acquis sur les axes de recherche présentés

Les acquis, issus des travaux de recherche que j'ai pu mener, concernent l'amélioration de la connaissance des phénomènes physiques mis en jeu dans les **incendies** dans des locaux confinés et ventilés, la mise au point ou l'amélioration de modèles et la validation des logiciels de simulation.

6.1.1 Le couplage entre la source incendie et le milieu environnant

Les conditions de température des gaz et des parois, les flux de chaleur et les concentrations en espèces chimiques (oxygène et produits de combustion) environnant le foyer modifient les mécanismes de combustion et la puissance de l'**incendie**. La réduction de la concentration en oxygène et la présence de produits de combustion contribuent à réduire la puissance d'un incendie. L'augmentation de la température des gaz et l'augmentation des flux de chaleur reçus par le foyer contribuent à augmenter la puissance de l'**incendie**. Le processus de combustion proche des conditions d'extinction ainsi que les mécanismes de production de suie jouent un rôle important dans l'évolution d'un incendie. Des premières modélisations ont été développées et validées sur certains scénarios d'incendie comme les feux de nappe liquide d'hydrocarbure en ambiance sous-oxygénée.

Ce couplage entre la source **incendie** et le milieu environnant modifie également la propagation des fumées. Les écoulements de panache, sous-plafond et les écoulements de transfert dépendent également de la stratification thermique induite par l'accumulation des fumées dans les locaux. Les approches corrélatives développées en milieu libre conservent leur validité dans une ambiance stratifiée thermiquement.

6.1.2 La dynamique des feux et les variations de pression

Des programmes d'essais à grande échelle ont permis d'identifier les mécanismes conduisant aux variations de pression rencontrées lors d'un **incendie**. Ces variations sont un élément de couplage entre le processus de combustion et le transport des fumées et de l'air. La simulation des variations de pression par les outils de calcul

(logiciels simplifiés dits « à zones » et logiciels CFD) sont en accord avec les résultats expérimentaux moyennant la connaissance des caractéristiques du scénario d'*incendie*. Les scénarios d'incendie instables sont fortement liés aux variations de pression des gaz du local et leur modélisation dépend étroitement d'une prédiction précise des variations de pression des gaz.

6.1.3 La propagation des fumées dans un environnement confiné et mécaniquement ventilé

Les expérimentations de scénarios d'*incendie* dans des enceintes ventilées et confinées ont permis de constituer une base de données importante sur la propagation des fumées impliquant les mécanismes couplés de flottabilité et d'inertie apportée par la ventilation. Les écoulements de panache, sous-plafond, de remplissage, les écoulements de transfert au niveau d'un passage de porte ou d'une trémie sont modifiés. Les approches expérimentales et les expérimentations numériques avec des outils CFD ont permis de valider les outils de calcul CFD et de corriger ou revisiter des approches corrélatives utilisées dans les logiciels « à zones ».

6.1.4 Les expérimentations à grande échelle

La réalisation d'un grand nombre d'expérimentations à grande échelle a permis de mettre en évidence et de quantifier un ensemble de phénomènes physiques, non observables à échelle réduite. Ces programmes expérimentaux ont permis de développer une expertise sur les approches expérimentales à grande échelle et sur le développement de méthodes d'analyse des données comme les méthodes inverses pour le calcul de la puissance d'un feu. Ces approches expérimentales ont permis également le développement de métrologies avancées comme la PIV permettant de produire des données en adéquation avec l'objectif de validation des logiciels de modélisation de type CFD.

6.2 Les applications de cette recherche

Les connaissances acquises au cours de ces recherches sur les *incendies* ont amélioré la compréhension du développement et du déroulement d'un feu dans une installation nucléaire et permis de mieux appréhender les conséquences en terme de sûreté et de mieux quantifier les contraintes thermiques et chimiques auxquelles les équipements importants pour la sûreté peuvent être soumis (portes et clapets coupe-feu, filtres THE, équipements électriques). Par ailleurs les bases de données expérimentales constituées ont aidé à l'amélioration de la modélisation

de certains phénomènes physiques et à la validation des logiciels de simulation qui ont été confrontés à des résultats représentatifs de situations réelles (configurations géométriques et scénarios) à évaluer par l'expertise de sûreté. Ainsi, l'amélioration des outils de simulation, l'acquisition de nouvelles connaissances (et leur capitalisation dans des modèles implémentés dans les logiciels) et l'élaboration de bases de données contribuent à accroître la pertinence des expertises de sûreté des installations nucléaires vis-à-vis du risque **incendie**.

Plus précisément, les travaux de recherche sur les régimes sous-ventilés ont permis de proposer des modèles de pyrolyse dépendant du milieu environnant. Leurs implémentations dans les outils de calculs (« à zones » et CFD) et leur validation a sensiblement amélioré le caractère prédictif des outils de simulations pour certains scénarios d'**incendie**, avec un calcul de la puissance dégagée par le foyer plus réaliste.

Les données obtenues sur les écoulements dans le local (panache, écoulements sous plafond), entre locaux *via* des portes et trémies ont permis de généraliser les corrélations existantes ou de vérifier leur applicabilité dans les logiciels simplifiés. Elles constituent des données nouvelles et uniques ayant permis une validation fine de logiciels simplifiés et CFD sur cette phénoménologie importante pour la sûreté.

L'analyse de l'évolution de la pression des gaz a mis en évidence les paramètres influents ses variations temporelles, caractéristiques d'un **incendie** confiné et ventilé. La pression dans le local est un indicateur et un moteur d'instabilité de combustion de très faible fréquence et forte amplitude pouvant avoir un impact sérieux sur la sûreté de l'installation en risquant de ruiner la sectorisation. La compréhension et la modélisation de ces phénomènes sont à leur début et doivent être approfondies.

6.3 Des axes de recherche futures

Sur la base des recherches que j'ai pu mener et de l'expérience acquise, des axes de recherche à poursuivre sont proposés.

6.3.1 Combustion en régime sous-ventilé

Les axes de recherche concernent notamment l'influence couplée sur le processus de combustion de la température, de la concentration en espèces chimiques (O_2 , CO_2 , $CO...$) du milieu gazeux environnant le foyer et des flux de chaleur reçus par le combustible. Sur ce thème, les régimes de combustion proches des limites

d'extinction doivent être étudiés. Ces régimes de combustion peuvent impliquer des flammes triples (flammes de pré-mélange, riches et pauvres, et flammes de diffusion) et occasionner des instabilités de combustion.

D'autre part, la compréhension de la combustion en régime sous-ventilé doit être étendue à d'autres combustibles (liquide ou solide) pour lesquels le processus de pyrolyse de la phase condensée présente des comportements différents (formation de résidus carbonneux pour certains solides).

6.3.2 Combustion de solides

Cette thématique concerne le processus de pyrolyse des combustibles solides, de type polymères, pour des applications sur des câbles électriques ou des boîtes à gants. Il s'agit de traiter le processus de dégradation thermique du solide en atmosphère libre. Suivant la nature des solides, différents processus de dégradation peuvent être rencontrés (dépôt de résidus carbonneux par exemple). En outre, le rôle de la géométrie du combustible solide (plaque, assemblage de couches, tube), de sa mise en œuvre (composition, multi-composants) et de son agencement dans une configuration réelle (boîte à gants, groupe de câbles, superposition de chemin de câbles) ajoute une complexité qui doit être étudiée.

6.3.3 Production de suie

Les suies produites par la combustion de nombreux combustibles jouent un rôle important dans le processus de combustion. Elles sont également impliquées dans la combustion sous-ventilée et la combustion de solides. Il s'agit de poursuivre le développement et la validation des modèles de production de suie pour une prédiction lors d'un scénario d'[incendie](#).

6.3.4 Les écoulements de fumées en milieux confinés

Il s'agit de poursuivre cette thématique en exploitant une certaine maturité des logiciels CFD pour la prédiction des écoulements afin de revisiter les approches corrélatives existantes. Cette démarche consiste à réaliser des expériences numériques pour consolider ou modifier les approches corrélatives développées sur des expérimentations académiques, soit à échelle réduite ou avec une instrumentation limitée. Cette thématique concerne également l'étude des modèles de turbulence pour la simulation d'un scénario d'[incendie](#).

6.3.5 La métrologie pour les expérimentations incendie

Il s'agit de poursuivre le développement de métrologies de façon à répondre aux besoins de données pour valider les logiciels de simulation et notamment la finesse des modèles physiques implémentés. Cette thématique a pour objectif d'améliorer la connaissance des phénomènes physiques en accédant à de nouvelles grandeurs (intensités turbulentes, champ de concentration) mais également d'assurer la validation des logiciels de calculs.

Chapitre 7

Présentation personnelle

7.1 *Curriculum vitae*

Hugues PRÉTREL
Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire ([IRSN](#))
Laboratoire d'expérimentation des feux ([LEF](#))
BP 3
13115 Saint-Paul-Lez-Durance Cedex
Tél : + 33 (0)4 42 19 96 65
Fax : 04 42 19 91 63
email : hugues.pretrel@irsn.fr



Fonctions actuelles

- Ingénieur de recherche, expert IRSN ;
- Co-directeur du Laboratoire commun de recherche ETiC (Laboratoire d'étude de l'incendie en milieu confiné).

Parcours professionnel

- **Centre d'étude nucléaire de Grenoble (CENG)**. Recrutement en CDD en attente du service militaire en coopération au laboratoire DTP/STR/LETC. « Étude de scénarios d'accidents au niveau du cœur d'un réacteur nucléaire et interprétations de tests et modélisation des transferts thermiques dans un bain en ébullition soumis à une dissipation interne de puissance », encadrement J.M. Seiler, (1990-1991).
- **Von Karman Institute for Fluid Dynamics**, Belgique (1992-1997). Service militaire au titre de la coopération (1992-1994), activité d'ingénieur de recherche :
 - « Étude expérimentale de l'influence du déversement d'une source chaude sur la température de surface de l'eau dans le port de Zeebrugge en présence des phénomènes de marée », (1993).
 - « Étude expérimentale des performances thermiques du dégivrage d'ailes d'avion par jets d'air », (1994).
 - travail de thèse sur l'étude du comportement thermo-hydraulique de pulvérisations liquides sous l'effet d'un rayonnement infrarouge, (1994-1997).
- **Cambridge University, Engineering Department**, UK. Contrat post-doctoral sur un projet Européen Brite Euram ACIACOC, encadrement Prof. Ann Dowling : étude des instabilités acoustiques dans les chambres de combustion des turbines à gaz et développement de stratégies de contrôle actif et mise en place d'un banc d'essais, mesures et analyses des instabilités, élaboration d'un contrôle actif, (1998).
- **Laboratoire d'expérimentation des feux, IRSN**, Cadarache (depuis 1999).
 - Directeur d'essais sur des programmes d'expérimentations à grande échelle :
 - Programme FLIP : réalisation et analyse de campagnes d'essais à grande échelle sur l'interaction d'un feu de nappe avec une paroi dans un local confiné et ventilé mécaniquement (1999-2003).
 - Programme PRISME-SOURCE : réalisation et analyse de campagnes d'essais sur le comportement d'un feu de nappe en milieu ouvert et en milieu confiné et mécaniquement ventilé (2004-2006).

- Programme PICSEL-V : spécification technique et préparation du dispositif expérimental pour l'étude des feux d'armoires électriques dans le dispositif [DIVA](#) (2007).
- Programme [PRISME-LEAK](#) : réalisation et analyse de campagnes d'essais sur la propagation des fumées lors d'un scénario de feu de nappe impliquant deux locaux mécaniquement ventilés (2008-2009).
- Programme [PRISME-INTEGRAL](#) : réalisation et analyse de campagnes d'essais sur la propagation des fumées lors d'un scénario de feu de nappe impliquant trois locaux mécaniquement ventilés (2010-2011).
- Programme [PRISME-2-VSP](#) : réalisation et analyse de campagnes d'essais sur la propagation verticale des fumées lors d'un scénario de feu de nappe impliquant deux locaux mécaniquement ventilés (2012-2013).
- Programme [PRISME-2-FES](#) : réalisation et analyse d'une campagne d'essais sur l'étude des techniques d'aspersion pour le refroidissement des fumées dans des locaux mécaniquement ventilés (2014-en cours).
- Développement et mise en place de techniques de mesure pour l'incendie :
 - métrologie des suies par aspiration ;
 - visualisation par tomographie laser à grande échelle ;
 - mesure de champs de vitesse par Stéréo PIV.

Formation initiale

- Doctorat en thermique et énergétique, « Étude du comportement thermo-hydraulique de pulvérisations liquides sous l'effet d'un rayonnement infrarouge - application à la protection incendie », Directeurs de thèse J.F. Sacadura ([INSA](#)) et J.M. Buchlin (VKI). Inscrit à l'école doctorale de l'[Institut national des sciences appliquées de Lyon](#) (France). Travail réalisé à l'institut [Von Karman Institute for Fluid Dynamic](#) (Belgique) (1993-1997).
- Diplôme de spécialisation à la recherche en Mécanique des fluides, Von Karman Institute For Fluid Dynamic, Département EA Environmental applied fluid dynamic, 1992.
- Diplôme d'Ingénieur, [École nationale supérieure d'ingénieurs de Poitiers](#) (ENSIP), spécialisation énergétique industrielle (1987-1990).
- Diplôme universitaire de technologie, spécialisation thermique et équipement du bâtiment, [Université Claude Bernard](#), Lyon (1985-1987).
- Secouriste du travail (2000-2010).
- Habilitation à l'utilisation des lasers (2006-en cours).

Thématiques de recherche

- Combustion incendie : flamme de diffusion, combustion sous ventilé, mécanisme de pyrolyse, feu de nappe liquide.
- Écoulements des fumées : écoulements à masses volumiques variables, panache thermique, écoulement à une trémie, à un passage de porte.
- Dynamique des incendies en milieu confiné : couplage incendie/ventilation, combustion sous-ventilé, instabilité de combustion, effet de pression, ventilation mécanique, pilotage de la ventilation, système d'aspersion.
- Approche expérimentale : métrologie incendie, métrologie non-intrusive LDV/SPIV, approche à grande échelle et échelle réduite, traitement de données, incertitudes.

Activités de recherche

- Effet de variation de pression lors d'incendie en milieu confiné et ventilé.
- Stratification des fumées lors d'incendie en milieu confiné et ventilé.
- Pilotage de la ventilation lors d'un incendie.
- Développement de méthodes de détermination de la puissance d'un incendie par calorimétrie.
- Écoulement des fumées à travers un passage de porte et une trémie.
- Animation scientifique du laboratoire et des relations avec les laboratoires universitaires (2006-2009).
- Participation à la définition du programme de recherche international : support à la définition du programme [PRISME OCDE](#) (2003) et [PRISME 2 OCDE](#) (2011).

Laboratoire commun [CNRS-IRSN ETIC](#), Cadarache (2010-en cours) :

- Co-animation du thème de recherche « Mouvement de fumées pour l'incendie » avec O. Vauquelin.
- Étude de la stratification des fumées (2010-2013).
- Développement de la métrologie PIV à grande échelle (Projet PIVFEU) (2011-2014).
- Étude des instabilités de combustion lors d'un incendie (2014- en cours).
- Co-directeur du laboratoire (2014-en cours).

Activités d'enseignement et d'encadrement

Enseignement

Pour un total de 35 h/an (2013-2014)

- Master « Science du feu, Ingénierie de la sécurité incendie » (15 h), incendie compartimenté, pyrolyse, métrologie, travaux pratiques, [université Aix-Marseille](#), depuis 2010.
- École nationale supérieure d'ingénieurs de Poitiers ([ENSIP](#)) (8 h), 5^e année, incendie compartimenté, depuis 2008.
- Master « Prévention des risques et nuisances technologiques » (4 h), incendie compartimenté, [campus Santé TIMONE](#), université Aix –Marseille, depuis 2010.
- Licence professionnelle « Radioprotection et sûreté nucléaire » (4 h), incendie compartimenté, [IUT La Ciotat](#), université Aix –Marseille.
- Formation continue "Training course on fire safety in nuclear power plants" (4 h), incendie compartimenté, [ENSTII](#), depuis 2012.
- Activité d'animation scientifique (intervention dans les collèges, fête de la science...).

Encadrement de stages

Stage de 4 à 6 mois, niveau MASTER (encadrement 100 %)

- M. Chaussin (09/1999) : « Étude du comportement d'un panache », précalculs de la seconde campagne d'essais FLIP, [ENSIP Poitiers](#), rapport SESHP/LEF/LEF/FLI/S10/RU/99-1285.
- J. Coutreau (09/2000) : « Étude d'un panache généré par un feu de nappe en interaction avec une paroi dans un local confiné et ventilé », [ENSMA](#), Poitiers, DEA, rapport LEF/LEF/FLI/S31/RU/00.940.
- J. Poniatowski (09/2001) : contribution à l'interprétation des essais FLIP sur les aspects liés à l'évolution de la pression, [ENSMA](#), Poitiers, rapport LEF/LEF/FLI/E30/RU/01-497.
- J. Lazardoux (09/2001) : « Étude de l'écoulement des gaz au plafond », essais FLIP, [ESEM](#), Orléans, DEA, rapport LEF/LEF/FLI/E30/RU/01.512.
- D. Texier (09/2002) : « Étude de la température des gaz lors d'un feu de nappe de TPH/TBP dans un local confiné et ventilé », application aux essais FLIP, [ENSMA](#), Poitiers, rapport LEF/LEF/FLI/S31/RU/02.513.
- L. Vignaroli (09/2002) : « Étude de la composition des gaz dans un local et dans le réseau de ventilation lors des feux de nappe de TPH/TBP », programme expérimental FLIP, [ENSMA](#), Poitiers, DEA, rapport LEF/LEF/FLI/S31/RU/02.514.

- S. Brun (09/2003) : « Détermination de la production de suies lors d'un feu en milieu confiné et ventilé », DESS Nancy, rapport SESHP/LEF/LEF/DIV/S31/RU/08-341.
- R. Thome (09/2004) : « Application du calcul de la puissance chimique d'un feu à la hotte SATURNE », [EN SMA](#), Poitiers, rapport LEF/LEF/PRI/S51/RU/04.661.
- N. Pauty (09/2005) : « Étude des échanges thermiques au niveau d'une nappe de liquide en feu », [ENSIP Poitiers](#), rapport IRSN 2005-220.
- S. Tirlot (09/2005) : « Étude de la propagation des fumées lors d'un incendie dans deux locaux ventilés », [UNIMECA](#), Marseille, rapport IRSN SEREA-2005-232.
- P. Damay (02-08/2006) : « Étude des écoulements de fumées d'incendie à partir de traitement d'image », [IUSTI](#), Marseille, MASTER Recherche, rapport IRSN SEREA/2006-220.
- F. Zumtangwald (08/2006) : « Étude des méthodes de détermination expérimentale du débit de perte de masse lors d'un incendie », [ENSIP Poitiers](#), rapport IRSN SEREA 2006-233.
- J. Segala (09/2007) : « Étude d'un panache thermique, déversant à une porte. Application à la propagation de fumées d'incendie en milieu confiné et ventilé », [ENSIP Poitiers](#), MASTER, rapport DPAM/SEREA-2007-246.
- C. Mazy (02-08/2008) : « Étude de la puissance d'un incendie dans un local fermé et ventilé mécaniquement », [ENSIP Poitiers](#), rapport DPAM/SEREA-2008-213.
- H. Devine (02-08/2009) : « Étude d'un écoulement de fumées d'incendie au travers d'une fente verticale », [Polytech Marseille](#), rapport DPAM-SEREA-2008-210.
- J. Le Magueresse (02-09/2009) : « Étude de la propagation des fumées d'incendie au travers d'une fente verticale », [ENSIAME Valenciennes](#), rapport DPAM/SERCI/2008-385.
- Th. Lasserre (02-08/2009) : « Étude des transferts thermiques entre une gaine de ventilation et le panache thermique d'un feu de nappe », [ENSIP Poitiers](#), rapport DPAM/SERCI/2009-297.
- Arnaud Brunner (02-08/2010) : « Étude du mécanisme de remplissage, par des fumées, d'une enceinte fermée », application à la stratification des fumées d'incendie, [ENSIP Poitiers](#), rapport SERCI-2010-275.
- Hicham Maiden (02-08/2010) : « Étude des écoulements de fumées à travers une porte ouverte lors d'un incendie dans une enceinte ventilée mécaniquement », [ENSIP Poitiers](#), rapport SERCI-2010-275.
- Julien Liberati (02-08/2012) : « Étude des écoulements de fumées à travers une trémie lors d'un incendie dans une enceinte ventilée mécaniquement », Master – [ISI Marseille](#), rapport SA2I-2012-241.

- Singa Engani (02-08/2013) : « Étude expérimentale par traitement d'images d'instabilités de combustion lors d'un incendie dans une enceinte mécaniquement ventilée », Master – ISI Marseille, rapport SA2I-2013-306.
- Raphael Sayada (02-08/2014) : « Étude expérimentale et numérique des écoulements de fumées d'incendie au niveau d'une trémie reliant deux locaux ventilés mécaniquement », Master – ISI Marseille, rapport SA2I-2014-258.
- Patricio Becerra (02-08/2015) : « Étude numérique des écoulements de fumées à un passage de trémie en convection naturelle avec le logiciel de calcul ISIS », Master – ISI Marseille, co-encadrement avec S. Vaux et O. Vauquelin.

Tuteur de thèses

- [Caroline Lucchesi](#) (2006-2008) : « Étude des écoulements induits par l'injection d'un gaz chaud dans un local ventilé mécaniquement - application à l'étude de la propagation des fumées d'incendie en milieu confiné et ventilé d'un local source vers un local cible ». Directeurs de thèse Ph. Bournot et O. Vauquelin, [université Marseille II \(UNIMECA\)](#), co-encadrement 30 %.
- Housna Kamel (2009-2010) : « Étude de la dispersion d'un panache de faible densité dans une enceinte confinée. Application à la propagation des fumées d'incendie dans des configurations multi-locaux confinés et mécaniquement ventilés ». Directeur de thèse O. Vauquelin, université Marseille, co-encadrement 50 %, thèse avortée sept. 2010 par démission de la candidate.
- [Kévin Varrall](#) (2012-2015) : « Étude de la dispersion d'un panache de faible densité dans une enceinte confinée. Application à la propagation des fumées d'incendie dans des configurations multi-locaux confinés et mécaniquement ventilés ». Directeur de thèse O. Vauquelin, université Marseille, co-encadrement 50 %.
- Maxime Mense (2015-2018) : « Étude expérimentale et théorique des régimes d'instabilité de combustion à basse fréquence lors d'un incendie dans une enceinte mécaniquement ventilée ». Directeur de thèse B. Porterie, université Marseille, co-encadrement 50 %, thèse en cours.

Encadrement de post-doctorants

- Stéphane Moreau (2007-2008) : « Développement de la métrologie des aérosols d'incendie en milieux confinés et ventilés sur des dispositifs expérimentaux à grande échelle », encadrement 100 %.
- Amine Koched (2011-2013) : « Développement de la métrologie PIV à grande échelle sur des fumées d'incendie », co-encadrement 80 %.

Autres activités

Activités de représentation et de valorisation

Membre de sociétés savantes

- [International Association for Fire Safety Science \(IAFSS\)](#), depuis 2004.
- [Société française de thermique \(SFT\)](#), depuis 2002.
- [Section française du Combustion Institute \(GFC\)](#), depuis 2005.
- [Association française de vélocimétrie laser \(AFVL\)](#), depuis 2008.
- Représentant français au conseil d'administration des anciens de l'[Institut Von Karman](#) depuis 2008.

Participation à des groupes de travail de l'IRSN

- Groupe de travail (GT) sur les effets de pression (2003-2004).
- Groupe de travail (GT) sur la filière « expert » à l'[IRSN](#) (2004).
- Membre du collège des experts de l'IRSN de (2008-2012).

Participation à des programmes nationaux et internationaux

- Junior Staff Programme (JSP) (2003-2007).
- Projet national sur Ingénierie de la sécurité incendie (PN ISI).
- Programme [PRISME OCDE](#) (2003-2011).
- Programme PRISME 2 OCDE (2012-en cours).

Activités éditoriales, d'enseignements et de collaborations

Expertise d'articles

- Période 2005-2006 (9) :
 - [Heat Transfer Engineering Journal](#) (1),
 - [International Symposium on Combustion](#) (5),
 - [International Symposium on Fire Safety Science](#) (2),
 - [Fire safety journal](#) (1).
- Période 2007-2008 (9) :
 - [International Symposium on Combustion](#) (4),
 - [International Symposium on Fire Safety Science](#) (3),
 - [Fire safety journal](#) (1),
 - [Journal of hazardous Materials](#) (1).

- Période 2009-2010 (8) :
 - *International Symposium on Combustion* (5),
 - *Fire safety journal* (1),
 - *International Symposium on Fire Safety Science* (3).
- Période 2011-2013 (8) :
 - *International Symposium on Combustion* (4),
 - *Fire and Materials* (1),
 - *Fire safety journal* (3).
- Période 2014-2015 (14) :
 - *International Symposium on Combustion* (3),
 - *Fire safety journal* (4),
 - *International Journal of Thermal Science* (1),
 - *Asian–Oceanian Symposium on Fire Science* (3),
 - *Fire and Materials* (1),
 - *Combustion and Flame* (2).
- Période 2016- en cours (4) : *International Symposium on Combustion* (4).

Collaborations universitaires

- Université de Méditerranée Aix –Marseille II, Institut de mécanique et thermique (**UNIMECA**), (2005-2008) : encadrement commun d'une thèse sur la propagation des fumées en milieu confiné (Ph. Bournot) (2005-2008).
- **IUSTI**-Marseille :
 - encadrement commun d'une thèse sur les mouvements de fumées en milieu stratifié (O.Vauquelin) (2008-2011) ;
 - suivi d'une étude sur le développement d'un fluxmètre thermique basé sur des méthodes inverses (C. Le Nilliot) ;
 - co-direction du laboratoire **ETIC**.
- Entretien d'un réseau de contacts universitaires : **PPRIME** de Poitiers (J.P. Garo), **CORIA** de Rouen (A. Coppalle), **Institut von karman** (J.M. Buchlin & J. van Beeck), **université de Kingston** en Angleterre (S. Dembélé), **université du Maryland** aux USA (A. Trouvé), **Université de Gent** en Belgique (B. Merci), **université de Lund** en Suède (P. van Hees).
- Participations régulières au groupe de recherche **CNRS** « **GDR incendie** ».

Président de session lors de conférences

- 10th International Symposium on Fire Safety Science, 2011, Maryland, USA, session *Smoke transport*.
- 11th International Symposium on Fire Safety Science 2014, Christchurch New Zealand, session *Compartment fire dynamics*.

Participation à des jurys de thèse et/ou comités de suivi de thèse

- Rapporteur de la thèse de Charles Fourneau, « Développement d'un cône calorimètre et d'une méthode de caractérisation associée des substances chimiques impliquées dans la combustion pour des conditions de sous-ventilation », [université de Mons](#), Belgique, septembre 2013.
- Comité de suivi de la thèse de Thomas Le Dez intitulée « Approche par similitude du couplage des effets thermiques et du vent sur les transferts de masse dans les réseaux aérauliques des bâtiments complexes » (2012-2015).

7.2 Publications

7.2.1 Articles dans des revues internationales ou nationales à comité de lecture (ACL)

1. [H. Prétrel](#), J.M. Such, Effect of ventilation procedures on the behaviour of a fire compartment scenario, *Nuclear Engineering and Design*, 235, 20, 2155-2169, 2005.
2. [C. Lucchesi](#), O. Vauquelin, H. Prétrel, Ph. Bournot, Doorway flow from a reduced scale isothermal air/helium approach, *International Journal of Thermal Sciences*, 50, 10, 1920-1929, 2011.
3. [H. Prétrel](#), W. Le Saux, L. Audouin, Pressure variations induced by a pool fire in a well-confined and force-ventilated compartment, *Fire Safety Journal*, 52, 11-24, 2012.
4. [H. Prétrel](#), L. Audouin, Periodic puffing instabilities of buoyant large-scale pool fires in a confined compartment, *Journal of Fire Sciences*, 31, 3, 197-210, 2013.
5. [S. Vaux](#), H. Prétrel, Relative effects of inertia and buoyancy on smoke propagation in confined and forced ventilated enclosure fire scenarios, *Fire Safety Journal*, 62, Part B, 206-220, November 2013.

6. H. Prétrel, W. Le Saux, L. Audouin, Determination of the heat release rate of large scale hydrocarbon pool fires in ventilated compartments, *Fire Safety Journal*, 62, Part B, 192-205, November 2013.
7. L. Audouin, L. Rigollet, H. Prétrel, W. Le Saux, M. Röwekamp, OECD PRISME project: Fires in confined and ventilated nuclear-type multi-compartments - Overview and Main Experimental Results, *Fire Safety Journal*, 62, Part B, 80-101, November 2013.
8. H. Prétrel, W. Le Saux, L. Audouin, Experimental determination of fire heat release rate with OC and CDG calorimetry for ventilated compartments fire scenario, *Fire and Materials*, 38, 474-506, 2014.
9. H. Prétrel, A. Brunner, O. Vauquelin, F. Candelier, Effect of vertical density stratification on the buoyancy-induced flow at a doorway opening, *Journal of Fire Sciences*, 32, 4, 295-315, 2014.
10. S. Suard, A. Koched, H. Prétrel, L. Audouin, Numerical simulations of fire-induced doorway flows in a small scale enclosure, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 81, 578-590, 2015.
11. H. Prétrel, L. Audouin, New developments in data regression methods for the characterization of thermal stratification due to fire, *Fire Safety Journal*, 76, 54-64, 2015.
12. H. Prétrel, A. Koched, L. Audouin, Doorway flows induced by the Combined Effects of Natural and Forced Ventilation in case of multi-compartments large-scale fire experiments, *Fire Technology Journal*, 52, 2, 489-514, 2016.
13. A. Koched, H. Prétrel, O. Vauquelin, L. Audouin, Experimental determination of the discharge flow coefficient at a doorway for fire induced flow in natural and mixed convection, *Fire and Materials*, 40, 114-128, 2016.
14. H. Prétrel, S. Suard, L. Audouin, Experimental and numerical study of low frequency oscillatory behaviour of a large-scale hydrocarbon pool fire in a mechanically ventilated compartment, *Fire safety journal*, 83, 38-53, 2016.
15. H. Prétrel, R. Sayada, K. Varral, L. Audouin, O. Vauquelin, Experimental study from large scale fire tests of smoke propagation through a vent connecting two compartments mechanically ventilated, *to be submitted in 2015*.

16. R. Sayada, H. Prétrel, K. Varral, O. Vauquelin, Comparative study of flow models through a horizontal vent: does Cooper (1994) improved Cooper (1989), *to be submitted in 2015*.

7.2.2 Communications orales avec actes dans un congrès international (ACTI)

17. J.M. Seiler, H. Prétrel, C. Perret et M. Bede, One component, volume heated, boiling pool thermohydraulics modelisations and interpretations of experiments, 14th Liquid Metal Boiling Working Group, Florence Italy, Avril 1991.
18. J.M. Seiler, H. Prétrel, C. Perret, M. Bede, One component, volume heated, boiling pool thermohydraulics. Part 1. Experiments and heat transfer correlations, *AIChE Symposium Series*, 88, 288, 44-53, 1992.
19. J.M. Seiler, H. Prétrel, C. Perret, M. Bede, One component, volume heated, boiling pool thermohydraulics. Part 2. Modelisation, *AIChE Symposium Series*, 88, 288, 54-63, 1992.
20. H. Prétrel et J.M. Buchlin, Modelling of thermal shielding by liquid sprays, EUROTherm Heat Transfer in Radiating and Combusting Systems, Saluggia, Italie, October 1994.
21. H. Prétrel et J.M. Buchlin, Thermal Shielding by Liquid Sprays, 8th Int. Symp Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, Antwerp, Belgique, juillet 1995.
22. H. Prétrel et J.M. Buchlin, Theoretical study of Radiative Shield with liquid sprays - EUROTherm 2nd European Thermal Sciences, Rome, Italy, mai 1996.
23. H. Prétrel et J.M. Buchlin, Radiative and Thermohydraulic behaviour of Water Spray Curtain submitted to Thermal Radiation, 4th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Bruxelles, Belgique, juin 1997.
24. H. Prétrel, L. Audouin, M Chaussin et J.M. Such, Thermal plume of large pool fires in confined and forced ventilation enclosures, 3rd International Seminar on Fires and Explosions Hazard (ISFEH), Lake Windermere, England, April 2000.

25. H. Prétrel, J. Coutreau et J.M. Such, Fire plume from large pool fires in forced-ventilated enclosures, Proceedings of the International Conference on Engineered Fire protection design, San Francisco, USA, June 2001.
26. H. Prétrel, S. Mélis, S. Minétian and P. Querre, Experimental observations of pressure instabilities during a pool fire in a confined and ventilated enclosure, 4th International Seminar on Fires and Explosions Hazard (ISFEH), LondonDerry, September 2003.
27. H. Prétrel, J.M. Such and D. Texier, Observations of gas stratification phenomenon during experimental pool fire in a confined and forced ventilated enclosure, 5th International Conference on Fire Safety, 11-12 March, Munich, Germany, 2004.
28. H. Prétrel, W. Le Saux, Y. Pizzo and J.M. Such, Over-pressure peaks and low-pressure peaks during compartment fire tests in forced ventilated configuration, 10th International Fire Science and Engineering Conference, 5-7 July, Edinburgh, RU, 2004.
29. H. Prétrel and W. Le Saux, Experimental study of the burning rate behaviour of a pool fire in confined and ventilated compartment, Post-SMIRT 18, Vienna, Austria, 2005.
30. H. Prétrel, P. Querre, M. Forestier, Experimental Study of Burning rate Behaviour in Confined and Ventilated Fire Compartments, 8th International Symposium on Fire Safety Science, September 18-23, Pekin, Chine, 2005.
31. H. Prétrel, J.M. Such, Study based on large scale experiments on periodic instabilities of pressure and burning rate during pool fire in confined and mechanically ventilated compartment, 3rd European Combustion Meeting, ECM, April 11-13, Crete, Greece, 2007.
32. S. Moreau, H. Prétrel, P. Zavaleta, F.X. Ouf, Specific measurement technique to determine high level of soot concentration during large scale fire experiment, European Aerosols Conférence (EAC), 24-29 août, Thessalonique, Grèce, 2008.
33. W. Le Saux, H. Prétrel, C. Lucchesi, P. Guillou, Experimental study of the fire mass loss rate in confined and mechanically ventilated multi-room scenarios, 9th International Symposium on Fire Safety Science (IAFSS), 21-26 septembre, Karlsruhe, Germany, 2008.

34. C. Lucchesi, H. Prétrel, O. Vauquelin, Ph. Bournot, Study of the flow induced by injecting a hot gas into a confined and mechanically ventilated room: application to fire smoke propagation in multi-rooms scenarios, 9th International Symposium on Fire Safety Science (IAFSS), 21-26 septembre, Karlsruhe, Germany, 2008.
35. W. Le Saux, H. Prétrel, S. Moreau, L. Audouin, The OECD Prisme research project: experimental results about mass loss rate and soot concentration in confined and mechanically ventilated compartments, 11th International Seminar on Fire Safety in Nuclear Power Plants and Installations (Post-SMIRT), August 17-19, Helsinki, Finland, 2009.
36. H. Prétrel, L. Audouin, Smoke Movement Induced by Buoyancy and Total Pressure between two Confined and Mechanically Ventilated Compartments, Proceedings of the 2010 Interflam conference, Interscience Communications Limited, 1053-1065, 2010.
37. H. Prétrel, L. Audouin, Doorway Flows Induced by the Combined Effects of Natural and Forced Ventilation in a Three Compartment Assembly, in: 10th International Symposium on Fire Safety Science, June 19-24, Maryland, USA, 2011.
38. L. Audouin, H. Prétrel, W. Le Saux, Overview of the OECD PRISME project - Main experimental results, 12th International Post Conference Seminar on fire safety in nuclear power plants and installations (Post-SMIRT), September 13-15, Munchen, Germany, 2011.
39. A. Koched, H. Prétrel, O. Vauquelin, L. Audouin, Experimental determination of the discharge coefficient of a doorway using SPIV technique for fire induced flow applications, Proceedings of the 2013 Interflam conference, Interscience Communications Limited, 2013.
40. H. Prétrel, J. Liberati, O. Vauquelin, L. Audouin, Smoke flow through an horizontal vent separating two mechanically ventilated rooms from large scale fire tests, Proceedings of the 2013 Interflam conference, Interscience Communications Limited, 2013.
41. L. Audouin, H. Prétrel, P. Zavaleta, OECD PRISME 2 FIRE RESEARCH PROJECT (2011-2016) - Current Status and Perspectives, Post-SMiRT-22 Conference on Fire Safety in Nuclear Power Plants and Installation, September 18-20, Columbia, USA, 2013.

42. H. Prétrel, K. Varral, O. Vauquelin, L. Audouin, Smoke induced flow in two rooms mechanically ventilated and linked with a horizontal vent type opening, in: 11th International Symposium on Fire Safety Science, February 10-14, Christchurch, New Zealand, 2014.
43. S. Suard, A. Koched, H. Prétrel, L. Audouin, CFD simulations of fire-induced doorway flows in a small scale enclosure, 15th International Conference on Numerical Combustion, April 19-22, Avignon, France, 2015.
44. H. Prétrel, L. Audouin, Experimental characterization of the water density generated by water spray system in a confined and mechanically compartment, 2nd European Symposium on Fire Safety Science (ESFSS), June 16-18, Nicosie, Chypre, 2015.
45. K. Varral, H. Prétrel, S. Vaux, O. Vauquelin, Effect of the mechanical ventilation on the bidirectionnal smoke flow through horizontal vent using Stereo PIV technique, 2nd European Symposium on Fire Safety Science (ESFSS), June 6-18, Nicosie, Chypre, 2015.
46. L. Audouin, H. Prétrel, S. Vaux, Experimental and numerical study of smoke propagation through a vent separating two mechanically ventilated rooms, 14th International Post Conference Seminar on fire safety in nuclear power plants and installations (Post-SMIRT), August 10-14, Manchester, UK, 2015.

7.2.3 Communications orales avec actes dans un congrès national (ACTN)

47. P. Zavaleta, W. Le Saux, M. Coutin, M. Piller, H. Prétrel et J.M. Such, Les dispositifs expérimentaux de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) pour la recherche sur l'incendie, accepté pour le Congrès français de thermique « Les défis thermiques dans l'industrie nucléaire », 16-19 mai, Ile de Ré, France, 2006.
48. M. Piller, M. Coutin, H. Prétrel, J.M. Such, Étude expérimentale de la dégradation de matériaux de l'industrie nucléaire soumis à un rayonnement thermique, Congrès français de thermique « Les défis thermiques dans l'industrie nucléaire », 16-19 mai, Ile de Ré, France, 2006.
49. W. Le Saux, H. Prétrel, J.M. Such, Étude expérimentale des pertes thermiques à travers les parois en béton d'un local lors d'un incendie en milieu confiné et ventilé, Congrès français de thermique « Les défis thermiques dans l'industrie nucléaire », 16-19 mai, Ile de Ré, France, 2006.

50. C. Lucchesi, O. Vauquelin, H. Prétrel, Ph. Bournot, Étude expérimentale de la combustion de petits feux de bacs de Tetra-Propylène Hydrogéné (TPH), Congrès de la SFT 2007, 25 mai-1^{er} juin, Iles des Embiez, France, 2007.
51. M. Piller, M. Coutin, H. Prétrel, Étude expérimentale de la dégradation de matériaux de l'industrie nucléaire soumis à un rayonnement thermique, Journée internationale de thermique (JITH), 27-29 mars, Djerba, Tunisie, 2009.
52. C. Lucchesi, H. Prétrel, Étude expérimentale de la combustion d'un feu de nappe d'hydrocarbure en atmosphère libre pour un large spectre de diamètre de nappe, Journée internationale de thermique (JITH), 27-29 mars, Djerba, Tunisie, 2009.
53. W. Le Saux, H. Prétrel, M. Coutin, M. Piller, P. Zavaleta, P. Guillou, Les dispositifs expérimentaux de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) pour la recherche sur l'incendie, Journée internationale de thermique (JITH), 27-29 mars, Djerba, Tunisie, 2009.
54. A. Koched, H. Prétrel, L. Audouin, O. Vauquelin et F. Candelier, Application de la PIV sur un écoulement de fumées à un passage de porte induit par une source incendie, 13^e Congrès francophone de techniques laser, CFTL 2012, 18-21 septembre, Rouen, France, 2012.
55. A. Koched, H. Prétrel, L. Audouin, O. Vauquelin, Utilisation de la stéréo PIV pour l'optimisation des mesures de vitesse de fumées d'incendie à un passage de porte par des sondes bidirectionnelles, 14^e Congrès francophone de techniques Laser, CFTL 2014, 15-19 septembre, Marseille, France, 2014.
56. K. Varrall, H. Prétrel, S. Vaux, O. Vauquelin, Étude expérimentale de l'écoulement de convection naturelle à une trémie avec des fluides non-miscibles, congrès de la SFT 2015, 26-29 mai, La Rochelle, France, 2015.
57. H. Prétrel, S. Suard, L. Audouin, Application de l'approche du réacteur homogène pour interpréter l'influence de la sous-oxygénation sur le taux de combustion d'un feu de nappe dans un compartiment mécaniquement ventilé, 17^e Journée internationale de thermique (JITH), 28-30 octobre, Marseille, France, 2015.
58. K. Varrall, H. Prétrel, S. Vaux, O. Vauquelin, Mesure par Stéréo PIV d'un écoulement de convection naturelle à travers un orifice horizontal, 17^e Journée internationale de thermique (JITH), 28-30 octobre, Marseille, France, 2015.

7.2.4 Communications par affiche dans un congrès international ou national (AFF)

59. H. Prétrel, J.M. Such, Pressure variations induced by large scale pool fires in forced-ventilated enclosures, 9th International Fire Science and Engineering Conference, September 17-19, Edinburgh, RU, 2001.
60. H. Prétrel, J. Lazardoux, J.M. Such, Ceiling jet in under-ventilated pool fire compartment: experimental study from large scale tests, 7th International Symposium on Fire Safety Science (IAFSS 2002), June 16-21, Worcester, USA, 2002.
61. H. Prétrel, J.M. Such, J. Poniatowski, Overpressure peaks induced at ignition by large pool fires in confined and forced ventilated compartment 7th International Symposium on Fire Safety Science (IAFSS 2002), June 16-21, Worcester, USA, 2002.
62. W. Le Saux, H. Prétrel, J.M. Such, The DIVA Multiroom experimental facility and the DIVA 0 program, 8th International Symposium on Fire Safety Science, IAFSS 2005, September 18-23, Pekin, Chine, 2005.
63. W. Le Saux, H. Prétrel et J.M. Such, Étude expérimentale de scénarios d'incendie multi-locaux en milieu confiné et ventilé à partir de tests à grande échelle, 12^e Journées internationales de thermique, 15-17 novembre, Tanger, Maroc, 2005.
64. L. Bouilloux, H. Prétrel, W. Le Saux and J. Richard, Studies about pressure variations and their effects during a fire in a confined and forced ventilated room, Eurosafe Forum, November 7-8, Brussel, Belgique, 2005.
65. M. Forestier, H. Prétrel, L. Rigollet, J.M. Such, Fire propagation in a confined multiroom configuration: the PRISME OECD project, Eurosafe Forum, November 7-8, Brussel, Belgique, 2005.
66. N. Reinke, H. Prétrel, J. Kaulard *and al.*, Toward a common future of technical safety organizations: the IRSN-GRS Junior Staff Programme, Eurosafe Forum, November 7-8, Brussel, Belgique, 2005.
67. H. Prétrel *and al.*, JS3P, Junior Staff programme Pilote Project, poster presented at Eurosafe Forum, 13-14 novembre, Paris, France, 2006.

68. H. Prétrel, M. Coutin, W. Le Saux, M. Piller, P. Guillou, Recent results on fire scenarios in confined and mechanically ventilated compartment from large scale experiments, 2007 NIST Fire Annual Conference, BFRL, NIST Gaithersburg, April 4-5, Maryland, USA, 2007.
69. C. Lucchesi, O. Vauquelin, H. Prétrel, Ph. Bournot, Étude expérimentale à échelle réduite d'un panache de fumées déversant au niveau d'une ouverture reliant deux locaux, 13^e Journées internationales de thermiques (JITH), 28-30 août, Albi, France, 2007.
70. S. Moreau, H. Prétrel, Investigation of soot particles in confined and mechanically ventilated multi-rooms fire scenarios from large scale tests, 9th International Symposium on Fire Safety Science (IAFSS), 21-26 septembre, Karlsruhe, Germany, 2008.
71. Ph. Querre, H. Prétrel, Évaluation de l'incertitude de la puissance d'un feu en milieu ouvert en utilisant la propagation de Monte-Carlo de distributions d'erreurs obtenues expérimentalement, Journées GDR Feux, 25-27 juin, Corte, France, 2014.

7.2.5 Communications orales sans actes dans un congrès international ou national (COM)

72. J.M. Buchlin, H. Prétrel et P. Planquart, Étude thermographique d'un système de dégivrage à jets d'air, Société française des thermiciens, Journée d'étude sur la thermographie Infra-rouge, décembre 1994.
73. H. Prétrel, J.M. Buchlin, Experimental study on the performance of water spray curtain to attenuate thermal radiation, European Seminar on Research in Industrial Fires, Roskilde, Denmark, septembre 1996.
74. O. Vauquelin, Ph. Bournot, C. Lucchesi, H. Prétrel, J.M. Such, Smoke Propagation between Rooms in Forced Ventilated and Confined Multi-Enclosures Fire Scenario, Preliminary Investigations on Reduced Scale Models, Workshop on Fires in Enclosures, May 30-31, University of Ulster, Royaume-Uni, 2006.
75. S. Moreau, H. Prétrel, W. Le Saux et P. Zavaleta, Étude des aérosols au cours d'un feu d'hydrocarbure dans une installation à plusieurs locaux ventilés, Congrès français sur les aérosols (CFA), 14-15 janvier, Paris, France, 2009.

76. H. Prétrel, L. Audouin, Mouvements de fumées entre deux enceintes fermées et ventilées mécaniquement, 12^e journées du GDR Incendie, 20-21 janvier, LNE, Paris, France, 2011.
77. H. Prétrel, L. Audouin, Écoulement à un passage de porte sous les effets combinés de la ventilation naturelle et forcée, 13^e journées du GDR Incendie, 30-31 juin, IUSTI, Marseille, France, 2011.
78. A. Koched, H. Prétrel, Caractérisation expérimentale des écoulements de fumées au passage d'une porte, 16^e journées du GDR incendie, 11-12 avril, Institut P-Prime, Poitiers, France, 2013.
79. H. Prétrel, Écoulement de fumée entre deux pièces ventilées mécaniquement et reliées par une trémie, 18^e journées du GDR incendie, 23-24 janvier, IRIAF, Niort, France, 2014.

Imprimerie [Copiver](#)
20, avenue Édouard Herriot, 92350 Le Plessis-Robinson
Dépôt légal : juin 2018



Collection HDR

Mémoire d'habilitation à diriger des recherches

Contribution à l'étude de la dynamique des incendies en milieu confiné et mécaniquement ventilé

HDR de l'Université d'Aix-Marseille
soutenue le 27 janvier 2016

Par Hugues PRÉTREL,
Laboratoire d'expérimentation des feux (LEF),
(IRSN/PSN-RES/SAZI/LEF)

L'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) est un organisme public d'expertise et de recherche pour la sûreté nucléaire et la radioprotection. Il intervient comme expert en appui aux autorités publiques. Il exerce également des missions de service public qui lui sont confiées par la réglementation. Il contribue notamment à la surveillance radiologique du territoire national et des travailleurs, à la gestion des situations d'urgence et à l'information du public. Il met son expertise à la disposition de partenaires et de clients français ou étrangers.

ISBN 978-2-9545237-6-7

IRSN
INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Siège social

31, avenue de la Division Leclerc
92260 Fontenay-aux-Roses
RCS Nanterre B 440 546 018

Téléphone +33 (0) 1 58 35 88 88

Courrier

BP 17 - 92262 Fontenay-aux-Roses Cedex

Site internet www.irsn.fr