

THÈSE DE DOCTORAT

Soutenue à Aix-Marseille Université
le 21 octobre 2021 par

Nina Dizet

Modélisation du risque incendie dans des structures multi-compartmentées

Discipline

Science pour l'Ingénieur

Spécialité

Energétique

École doctorale

ED 353 - Sciences pour l'Ingénieur :
Mécanique, Physique, Micro et
Nanoélectronique

Laboratoire/Partenaires de recherche

IUSTI UMR / CNRS 7343

Composition du jury

Pr Thomas ROGAUME *Rapporteur*

IRIAF, Institut P', Université de Poitiers

Pr Pascal BOULET *Rapporteur*

LEMTA, Université de Lorraine

Dr Elizabeth BLANCHARD *Examinatrice*

Directrice des Opérations, LISI

Dr Eric Guillaume *Examineur*

Directeur Général, EFECTIS France

Pr Bernard PORTERIE *Co-directeur de thèse*

IUSTI, Aix-Marseille Université

Dr Yannick PIZZO *Co-directeur de thèse*

IUSTI, CNRS

Invité

Dr Pierrick Mindykowski

RISE, Suède

Pr Richard SAUREL

LMA, Aix-Marseille Université/RS2N

Affidavit

Je soussignée, Nina Dizet, déclare par la présente que le travail présenté dans ce manuscrit est mon propre travail, réalisé sous la direction scientifique de Bernard Porterie et Yannick Pizzo, dans le respect des principes d'honnêteté, d'intégrité et de responsabilité inhérents à la mission de recherche. Les travaux de recherche et la rédaction de ce manuscrit ont été réalisés dans le respect à la fois de la charte nationale de déontologie des métiers de la recherche et de la charte d'Aix-Marseille Université relative à la lutte contre le plagiat.

Ce travail n'a pas été précédemment soumis en France ou à l'étranger dans une version identique ou similaire à un organisme examinateur.

Fait à Marseille, le 14 septembre 2021



Cette œuvre est mise à disposition selon les termes de la [Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Avant-propos

Cette thèse a été réalisée dans le cadre d'une convention CIFRE (n° 2017/1739) impliquant l'ANRT (Association Nationale de la Recherche et de la Technologie), l'Institut Universitaire Industriels des Systèmes Thermiques Industriels (IUSTI, UMR 7343) et l'entreprise RS2N.

Titre

Modélisation du risque incendie dans des structures multi-compartmentées

Résumé

Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre de projets de recherche collaboratifs dédiés à l'évaluation du risque incendie dans des structures comportant un grand nombre de locaux (e.g., navires, immeubles de grandes hauteurs, entrepôts). Les spécificités de ces grandes structures au regard de l'incendie peuvent être communes aux domaines civil et militaire, comme la transmission du feu par les parois, la combustion sous oxygénée et/ou multi-combustible, le transport de fumées, ..., ou propre à un domaine comme la propagation du feu par les façades d'un immeuble. Pour répondre à cette problématique duale, une approche hybride multi-échelle a été proposée combinant un modèle de feu à l'échelle d'un compartiment et un modèle de réseau probabiliste pour simuler en temps réel la propagation du feu et des fumées dans toute la structure. Selon le scénario considéré, le développement du feu dans un compartiment est simulé soit par un modèle à zones original, soit à l'aide d'un modèle CFD tridimensionnel, le code SAFIR 3D. De plus, une version unidimensionnelle du code SAFIR a été spécifiquement développée pour simuler la transmission du feu par une gaine de ventilation. Des expérimentations spécifiques dans le dispositif DIAMAN, représentatif d'une soute à munitions de navire militaire, ont été conduites et ont permis de valider les modèles utilisés. A ce stade de développement du modèle de réseau, le transport des fumées est calculé par un simple modèle de remplissage dont les limites ont été identifiées. La modélisation hybride proposée a conduit à la réalisation de démonstrateurs dans les domaines civil et militaire. Appliquée à un immeuble de bureaux de plusieurs étages, à une corvette et à un navire roulier, elle a permis d'obtenir la cartographie du sinistre en temps réel et une prévision opérationnelle du risque, ainsi qu'une évaluation des zones sensibles et vulnérables à défendre.

Title

Fire risk modeling in multi-compartment structures

Abstract

This thesis is part of collaborative research projects dedicated to the assessment of fire risk in structures with a large number of rooms (e.g., ships, high-rise buildings, warehouses). The specificities of these large structures with respect to fire can be common to both civil and military domains, such as fire transmission through walls, under-oxygenated and/or multi-fuel combustion, smoke transport, ..., or specific to a domain such as fire propagation through the facades of a building. To address this dual problematic, a multi-scale hybrid approach has been proposed combining a compartment-scale fire model and a probabilistic network model to simulate in real time the propagation of fire and smoke throughout the structure. Depending on the scenario considered, the fire development in a compartment is simulated either by an original zone model or by a three-dimensional CFD model, the SAFIR code. Moreover, a one-dimensional version of the SAFIR code has been specifically developed to simulate the transmission of fire through a ventilation duct. Specific experiments in the DIAMAN device, representative of an ammunition storage room onboard a warship, were conducted and allowed to validate the models used. At this stage of development of the network model, the smoke transport is calculated by a simple filling model whose limits have been identified. The proposed hybrid modelling has led to the realization of demonstrators in the civil and military domains. Applied to a multi-story office building, a generic corvette, and a ro-ro ship, it has provided real-time disaster mapping and operational risk prediction, as well as an assessment of the sensitive and vulnerable areas to be defended.

Table des matières

Nomenclature.....	8
Chapitre 1 Introduction et contexte	12
Chapitre 2 Principes fondamentaux.....	19
2.1 Phénoménologie d'un feu de compartiment.....	19
2.2 Modes de transmission du feu d'un local à un autre	20
Chapitre 3 Etude bibliographique	23
3.1 Modélisation du feu à l'échelle du local	23
3.1.1 Modèles nominaux ou paramétriques.....	23
3.1.2 Modèles à zones.....	26
3.1.3 Modèles CFD.....	28
3.2 Modélisation de la propagation à l'échelle de la structure	29
3.2.1 Modèles probabilistes	29
3.2.2 Approche hybride multi-échelle.....	32
Chapitre 4 Modélisation du développement du feu à l'échelle du local	33
4.1 Modèle à zones.....	33
4.1.1 Formulation mathématique	34
Hypothèses du modèle.....	34
Equations générales.....	35
Sous-modèles.....	37
Concept de combustible équivalent.....	40
Evaluation de la chaleur de combustion	41
4.1.2 Entrées et sorties du modèle.....	43
4.1.3 Validation du modèle à zones	44
Présentation du dispositif expérimental.....	44
Présentation des essais.....	49
Comparaison modèle à zones/essais	51
4.2 Code CFD SAFIR.....	53
4.2.1 Fonctionnalités du code.....	53
4.2.2 Extensions.....	55
Propagation du feu entre véhicules	55

Modèles de détecteurs	56
Chapitre 5 Modélisation CFD de la propagation du feu par les gaines de ventilation	58
5.1 Présentation du code CFD SAFIR 1D	59
5.2 Modèle mathématique.....	60
5.2.1 Equations générales	60
5.2.2 Résolution numérique.....	63
5.3 Entrées et sorties du modèle	63
5.4 Validation du modèle	64
5.4.1 Présentation des essais.....	64
5.4.2 Résultats de validation du code SAFIR 1D.....	68
Chapitre 6 Modélisation de la propagation du feu et des fumées à l'échelle de la structure par un modèle de réseau	70
6.1 Présentation du modèle de réseau.....	70
6.2 Hypothèses du modèle	71
6.3 Calcul des probabilités du modèle	72
6.4 Transport des fumées.....	74
6.5 Propagation par les façades	75
6.6 Entrées et sorties du modèle	76
6.7 Organigramme du modèle de réseau	76
Chapitre 7 Application du modèle de réseau à un immeuble de bureaux.....	78
7.1 Agencement général de l'immeuble	78
7.2 Données d'entrées du modèle de réseau.....	82
7.3 Résultats de simulations.....	85
7.4 Comparaison avec le code SAFIR.....	88
7.4.1 Issues de secours fermées.....	88
7.4.2 Issues de secours ouvertes	90

Chapitre 8 Application du modèle de réseau à une corvette militaire	92
8.1 Agencement général et contexte	92
8.2 Données d'entrées du modèle de réseau	98
8.3 Exemples d'applications	100
8.3.1 <i>Cas 1 : corvette non ventilée mécaniquement</i>	101
8.3.2 <i>Cas 2 : corvette ventilée mécaniquement</i>	105
8.4 Cartographie du risque feu	108
Chapitre 9 Application du modèle de réseau à un navire roulier	110
9.1 Agencement général	110
9.2 Définition des critères de sécurité	115
9.3 Résultats de simulations	116
9.3.1 <i>Méthodologie</i>	116
9.3.2 <i>Scénarios de feu</i>	117
9.3.3 <i>Cas 3.3 : résultats de simulation</i>	119
Conclusion et perspectives	133
Bibliographie	137
Liste des figures	144
Liste des tableaux	148
Annexe 1 Calcul de la conduction dans la paroi de la gaine de ventilation	150
Annexe 2 Synthèse des résultats de simulations de feux à bord du Stena Flavia	155

Nomenclature

Nomenclature

A	Aire	m^2
c_p	Chaleur spécifique à pression constante	$J/kg/K$
c_v	Chaleur spécifique à volume constant	$J/kg/K$
Ctl	Coefficient de contexte de feu dans le domaine naval militaire français	
D	Diamètre de la nappe de combustible	m
f_v	Fraction volumique	
FTP	Flux-Time Product	kW/m^2
g	Accélération de la pesanteur	m/s^2
h	Enthalpie	J/kg
	Coefficient convectif	$W/m^2/K$
HRR	Débit calorifique ou Heat Release Rate	W
H_0	Hauteur de l'ouverture du local	m
l	Longueur	m
m	Masse de combustible	kg
$\dot{m}$	Débit massique	kg/s
M	Masse molaire	kg/mol
$n_C, n_H, n_O, n_{Cl}, n_N$	Nombre d'atomes de carbone, d'hydrogène, d'oxygène, de chlore et d'azote de la molécule de combustible	
	$C_{n_C}H_{n_H}O_{n_O}Cl_{n_{Cl}}N_{n_N}$	
n	Exposant de la loi de puissance pour le calcul du FTP	
Nu	Nombre de Nusselt	
	Pression	Pa
p	Pourcentage de la masse initiale de combustible au-delà duquel la décroissance du feu a lieu	$\%$
P	Densité de probabilité	
Pr	Nombre de Prandtl	
$\dot{q}_i''$	Flux reçu au moment i	kW/m^2
qm	Quantité de mouvement	$kg\ m/s$
R	Constante universelle des gaz parfaits $R = 8,314472$	$J/mol/K$
RTI	Indice de temps de réponse du détecteur	$m^{1/2}\ s^{1/2}$
t	Temps	s
T	Température	K ou $^{\circ}C$
u	Vitesse	m/s
V	Volume	m^3
X_i	Fraction molaire de l'espèce i	
Y_i	Fraction massique de l'espèce i	
y_i	Rendement de l'espèce i	

W_0	Largeur de l'ouverture du local	m
z	Hauteur de flamme	m
$z_{interface}$	Position de l'interface	m
z_{room}	Hauteur sous plafond du local	m

Symboles grecs

α	Taux de croissance ou de décroissance du feu	W/s^2
Δh_{eff}	Chaleur de combustion effective du combustible	J/kg
$\Delta h_{f,i}^0$	Enthalpie de formation de l'espèce i	J/kg
Δh_{O_2}	Chaleur de combustion basée sur la consommation d'oxygène	J/kg
Δt	Pas de temps	s
Δx	Taille de maille	m
ε	Emissivité	
κ_g	Coefficient d'absorption de la phase gazeuse	m^{-1}
$\kappa\beta$	Coefficient de Babrauskas	m^{-1}
κ_m	Coefficient d'extinction massique	m^2/kg
λ	Conductivité thermique	$W/m/K$
μ	Durée moyenne des étapes du feu	s
	Viscosité dynamique	$kg/m/s$
ν_i	Coefficient stœchiométrique de l'espèce i	
ρ	Masse volumique	kg/m^3
σ	Ecart type de la densité de probabilité Constante de Stefan-Boltzmann	$W/m^2/K^4$
τ	Durée des phases du feu	s
χ_r	Fraction rayonnée	

Accentuation

'	Par unité de temps
"	Par unité de surface

Exposant, indice

0	Initial
amb	Ambiant
b	Barrière
c	Phase de croissance (du feu)
cr	Critique
$conv$	Convectif
d	Phase de décroissance (du feu) Détecteur

<i>e</i>	Entrant par les ouvertures
<i>eq</i>	Combustible équivalent
<i>ent</i>	Entrainé par le panache
<i>ext</i>	Extérieur de la conduite
<i>f</i>	Fumées
<i>fd</i>	Phase de feu pleinement développé
<i>fin</i>	Phase où le feu s'est éteint
<i>fo</i>	Phase d'embrasement généralisé (flashover)
<i>g</i>	Gaz
<i>i</i>	Espèce chimique de la phase gazeuse $i = \{C_{n_C}H_{n_H}O_{n_O}Cl_{n_{Cl}}N_{n_N}, CO, CO_2, O_2, H_2O, HCl, HCN, N_2, suies\}$
<i>int</i>	Intérieur de la conduite
<i>l</i>	Zone froide
<i>p</i>	Parois
<i>pan</i>	Panache
<i>pyr</i>	Pyrolyse
<i>rad</i>	Radiatif
<i>s</i>	Sortant par les ouvertures
<i>u</i>	Suies
<i>u</i>	Zone chaude
<i>w</i>	Elément de paroi
<i>w, e</i>	Faces du volume de contrôle scalaire
<i>W, E</i>	Nœuds centraux des volumes scalaires voisins du nœud P
∞	Bac de combustible de taille infinie

Acronymes

AS	Assembly Station (zone de rassemblement)
CFD	Computational Fluid Dynamics
CFL	Critère de Courant-Friedrichs-Levy
DZ	Drencher Zone (zone d'aspersion)
ETR	Equation de Transfert Radiatif
FTP	Flux-Time Product
GT	Gaine traversante
GD	Gaine débouchante
HRR	Heat Release Rate (chaleur libérée par la combustion)
OMI	Organisation Maritime Internationale
LSA	Life-Saving Appliances (station d'embarquement)
MSC/Circ.	Circulaire du Comité de la Sécurité Maritime de l'OMI
PMMA	Poly(méthacrylate de méthyle)
PU	Polyuréthane
PVC	Poly(chlorure de vinyle)
SOLAS	Convention internationale pour la sauvegarde de la vie humaine en mer

RHF	Flux thermique radiatif
RTI	Response Time Index (indice de temps de réponse)
tas	Terminologie anglo-saxonne
THF	Flux thermique total

Chapitre 1 Introduction et contexte

La maîtrise du risque incendie dans des structures comportant un grand nombre de locaux est un problème majeur entraînant des conséquences vis-à-vis des personnes, des biens, des structures, des activités et de l'environnement. Que cela soit dans le domaine de la défense ou dans le domaine civil, de nombreux ensembles de grande taille sont confrontés au risque incendie. Si les enjeux peuvent être parfois différents, les problématiques sont similaires puisqu'il s'agit dans tous les cas d'éviter l'éclosion puis la propagation du sinistre, de le détecter le plus rapidement possible et le plus précisément possible, de favoriser l'évacuation des personnes, d'optimiser la mitigation, voire l'extinction du feu, et de préserver l'intégrité de la structure et des réseaux fonctionnels. Les applications sont nombreuses et diverses. Citons par exemple les entrepôts, les établissements recevant du public (ERP), les immeubles de grande hauteur, et les navires civils ou militaires.

La propagation du feu d'un local à l'autre peut se faire suivant des modes de transmission variés et propres à chaque structure, par exemple au travers des ouvertures, des parois, des réseaux de ventilation, ou encore par les façades, essentiellement dans le domaine civil.

Par leur toxicité, leur niveau de température et leur capacité à envahir l'espace, les fumées produites par l'incendie sont la principale cause de décès. Elles provoquent également une diminution de la visibilité susceptible d'augmenter la durée de l'évacuation et donc la durée d'exposition des personnes aux contraintes thermiques et toxiques liées au feu et aux fumées.

On se préoccupe aussi des contraintes subies par les structures des ouvrages, les matériels et systèmes sensibles, ainsi que par les réseaux fonctionnels participant à la sécurité du bâtiment. A cela s'ajoute une exigence majeure, pour la défense, du maintien en conditions opérationnelles de l'infrastructure qu'une perte d'intégrité et son envahissement par les fumées peuvent compromettre.

Le problème du risque incendie devient plus critique encore à bord d'un navire. Après l'incendie survenu en 1990 à bord du navire à passagers *Scandinavian Star*, des avancées notables ont été réalisées par l'Organisation Maritime Internationale (OMI) au travers d'amendements de la Convention Internationale sur la sauvegarde de la vie humaine en mer (Convention SOLAS) sur l'évacuation des personnes, l'inflammabilité et la combustibilité des matériaux, les systèmes d'évacuation des fumées et de lutte par aspersion d'eau. Pour les bâtiments militaires, l'incendie du l'USS *STARK* (1987), consécutif à un impact de missile, a permis de dégager des enseignements sur la dangerosité des feux de matières pyrotechniques et sur l'importance d'une bonne organisation pour le désenfumage et la lutte, du dimensionnement des protections

thermiques, de l'emplacement et de la redondance des moyens de lutte, de l'optimisation des systèmes d'arrosage et des dalotages associés et du choix des matériaux structuraux (tenue au feu). Néanmoins, des progrès restent encore à accomplir en matière de maîtrise du risque incendie dans les grands ensembles. D'autant que l'on constate une complexification des architectures, une augmentation de la charge combustible et de la variété des matériaux pouvant être impliqués dans un incendie.

Traditionnellement, pour des configurations présentant un nombre limité de locaux, le problème du risque incendie est abordé en utilisant soit une approche prescriptive ou réglementaire, soit une approche analytique ou performancielle, de type Ingénierie de la Sécurité Incendie, le but étant non seulement de prévenir l'occurrence de l'incendie, mais surtout de proscrire l'accident majeur.

L'approche réglementaire permet de mettre en place des solutions types et élabore des dispositions à partir du retour d'expérience d'accidents survenus en France et dans le monde. Les feux sont souvent traduits par des courbes d'élévation de température au cours du temps comme celles définies dans l'EUROCODE 1 [1]. Cette norme expérimentale définit trois courbes température/temps, dont la courbe standard ou ISO 5834. Il convient de noter que, d'une part, des études ont montré les limites de l'approche réglementaire à reproduire une situation de feu réel [2] et, que d'autre part, ces courbes ne prennent pas en compte des facteurs influents comme le volume du local en feu, la charge calorifique présente ou les conditions de ventilation. Des tentatives de paramétrisation du feu par ces facteurs ont cependant été envisagées, mais elles nécessitent un grand nombre d'essais, ce qui explique qu'elles n'aient pas été reprises dans la norme.

L'approche prescriptive présente un certain nombre d'avantages dans des situations connues de sinistres et pour des configurations standards. En revanche, elle se révèle inadaptée et pénalisante pour le cas d'ouvrages spécifiques comme ceux évoqués ci-dessus, d'ouvrages évolutifs ou de conception nouvelle. Elle ne favorise pas l'innovation et se révèle non pertinente face aux nouveaux choix et solutions architecturales, aux nouveaux modes constructifs et face aux nouveaux matériaux mis en œuvre. L'utilisation de solutions types peut également conduire à une analyse *a minima* du risque incendie.

L'approche performancielle, quant à elle, présente une plus grande généralité. C'est une approche quantitative qui repose sur une modélisation plus ou moins fine de l'incendie. A l'échelle d'un local ou même de quelques locaux, un modèle macroscopique déterministe, de type modèle à zones ou de type modèle de champ (ou CFD), peut être utilisé. Les principaux modèles à zones et CFD utilisés actuellement par la communauté scientifique seront détaillés dans le Chapitre 3. Si, pour certaines configurations de feu, ces modèles ont été utilisés avec succès pour étudier le comportement de l'incendie dans un local et sa propagation vers les locaux adjacents, leur application à des ensembles massivement multi-compartmentés nécessite des temps de calcul plus ou moins importants, voire rédhibitoires notamment dans les études stochastiques qui nécessitent un grand nombre de simulations.

Pour y remédier, on peut alors recourir à d'autres types de modélisation. Jusqu'au début des années 2000, en raison de la difficulté à prendre en compte tous les facteurs physiques affectant la croissance et la propagation du feu, ces modèles ont été souvent construits en utilisant une approche purement probabiliste. Ramachanandran [3] résume et analyse les travaux marquants antérieurs à 2002 reposant sur ce type d'approche : modèle épidémique [4, 5], théorie de la marche aléatoire [6, 7], processus de Markov [8 à 10], percolation [11, 12], ou réseau probabiliste [13, 14]. Comme l'a souligné Ramachanandran dans son étude, ces modèles purement probabilistes, parce qu'ils ne contiennent aucune physique, ne permettent pas de modéliser correctement la propagation d'un feu dans un ensemble multi-compartmenté. C'est pourquoi des modèles probabilistes incluant tout ou partie des aspects physiques ont été développés. L'examen de ces modèles (voir Chapitre 3) a fait néanmoins ressortir certaines limites liées au nombre de locaux et à leur agencement simplifié, à la physique du développement du feu et des transmissions entre locaux considérée, ou à la non prise en compte de la dynamique en temps réel de la propagation.

L'approche hybride multi-échelle, reposant sur un couplage fort (ou multidirectionnel) de plusieurs types d'approches (modèles à zones, CFD ou de réseau), se généralise en sécurité incendie depuis quelques années, mais son champ d'applications reste encore limité et n'aborde pas le risque dans son ensemble [15]. Ce couplage fort nécessite en outre des ressources informatiques trop élevées.

Pour tirer profit des avantages des approches précitées, l'Institut Universitaire des Systèmes Industriels (IUSTI) a développé dans le cadre du projet ANR ASTRID MARINER (2012-2015) [16] et de la thèse de N. Giraud [17] une approche hybride multi-échelle à couplage faible (ou unidirectionnel) lui permettant de simuler une large gamme de scénarios de feu, en un temps très court. Cette approche reposait sur le développement d'un nouveau modèle de réseau probabiliste, polydisperse et amorphe, capable de simuler la propagation en temps réel d'un feu normalisé dans un ensemble de locaux, tel qu'à bord des navires de la Marine Nationale, sans réelle limite liée au nombre de locaux, à leur agencement et à leur forme [18, 19]. La physique du feu et des transmissions à courte distance, par des ouvertures et des parois, mais aussi à longue distance, par des gaines de ventilation y était intégrée. Le modèle reposait sur des paramètres d'entrée déterminés grâce à un modèle à zones, le code ŒIL développé par DGA TN [20], décrivant le comportement du feu à l'échelle du local, et la version unidimensionnelle du code CFD SAFIR [21] pour le calcul de l'écoulement compressible dans une gaine de ventilation.

Le concept a été validé pour des scénarios idéalisés de feux à bord de la corvette générique SURVIVE de QINETIQ composée de sept ponts et de 115 locaux, dont 96, dits sensibles, sont susceptibles de propager le feu dont les plans, non classifiés, ont été fournis par DGA TN. La Figure 1 montre une vue 3D de la corvette après 4h de feu.

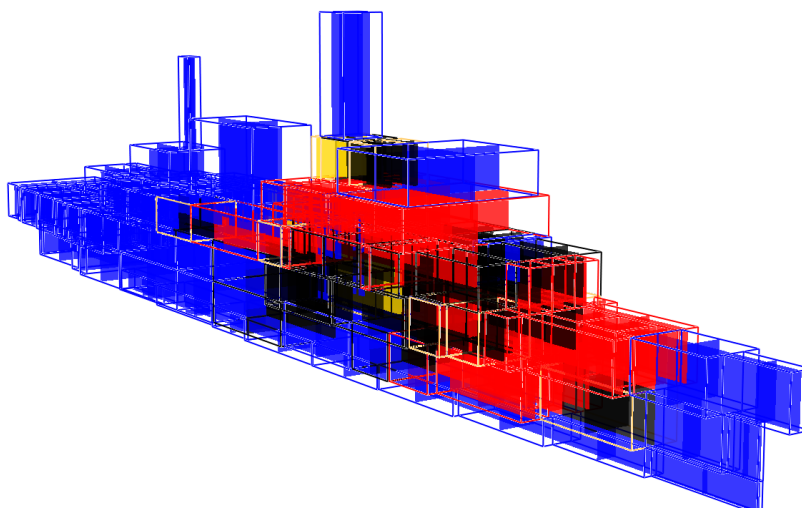


Figure 1 : Vue 3D de la maquette de navire après 4 h de feu, montrant les locaux enflammés avant embrasement généralisé (en jaune), les locaux où le feu est pleinement développé (en rouge) et les locaux où le feu est éteint (en noir).

Le projet initial MARINER nous a permis d'identifier un certain nombre de limitations et de verrous scientifiques :

- Les configurations géométriques ont été volontairement simplifiées et ne sont donc pas, ou peu, représentatives du système réel ;
- Le transport des fumées n'a pas été pris en compte. Cet aspect est crucial pour le traitement de l'évacuation ou de la mise en sécurité des personnes ;
- Le modèle de propagation du feu par une gaine de ventilation n'a été validé que sur des configurations académiques, éloignées là encore des configurations réelles de ventilation. Par ailleurs, la validation n'a porté que sur des écoulements d'air dans une conduite différentiellement chauffée, les écoulements de fumées chaudes n'ayant pas été abordés ;
- Le modèle à zones ŒIL de DGA TN a été utilisé pour décrire le comportement d'un feu et ses conséquences sur l'ambiance. Malheureusement, il présente des limites qui réduisent fortement son domaine d'applications. En effet, le code ŒIL ne permet pas de traiter la combustion sous-oxygénée et/ou de plusieurs combustibles présents dans un même local. Il nécessite en outre la calibration préalable de paramètres radiatifs et d'échange de chaleur aux parois, et demande des temps de calcul relativement importants pour ce type de modèle (plusieurs heures d'exécution pour un scénario de feu), ce qui était particulièrement pénalisant compte tenu du nombre important de simulations à réaliser.

Cette thèse a pour objectifs de lever les verrous scientifiques et les limitations évoqués précédemment, notamment par le développement d'un nouveau modèle à zones et la validation des modèles utilisés. Un effort important a donc été fourni, aux plans de la physique et de l'algorithmique, pour développer un modèle à zones capable de simuler,

en un temps très court (quelques dizaines de secondes), des scénarios de feu impliquant plusieurs combustibles dans un même foyer, sans limite sur le taux d'oxygène disponible, ni calibration de paramètres. Pour certains scénarios de feu, l'utilisation d'un code CFD, en l'occurrence le code SAFIR, s'est avéré indispensable : à l'échelle du local, lorsque le modèle à zones ne peut s'appliquer (e.g., local de grandes dimensions à fort rapport d'aspect, conditions de ventilation particulières, propagation du feu de cible en cible au sein du local) ; ou à l'échelle de la structure, pour le calcul du transport des fumées, lorsque les conditions de ventilation créent un couplage fort entre le feu et la structure.

Cette thèse se propose également de traiter le problème de la détection de chaleur et de fumée, de fournir les données d'entrée nécessaires au traitement de l'évacuation, et d'étendre le champ d'applications de la méthode hybride au domaine civil, renforçant son caractère dual civil/militaire.

Le présent travail a été mené dans le cadre de deux projets distincts auxquels a participé la société RS2N : le projet ANR ASTRID Maturation MARINER-DECM (ANR ASTRID MARINER 12-ASRT-0002-01, 2017-2021) et le projet H2020 LASHFIRE (Grant agreement n° 814975, 2019-2023). Ces projets sont décrits brièvement ci-dessous.

Projet MARINER DECM

Le projet MARINER DECM fait suite au projet initial MARINER. Il a été réalisé dans le cadre d'un partenariat entre le Laboratoire Energies et Mécanique Théorique et Appliqué (LEMTA) de Nancy, la Délégation Générale de l'Armement Techniques Navales (DGA TN) de Toulon, l'institut PPRIME de Poitiers, l'Institut des Systèmes Thermiques Industriels (IUSTI) de Marseille et la Société RS2N.

L'objectif du projet était double : 1) développer un outil capable de fournir en continu une information complète et synthétique d'aide à la décision, à savoir une cartographie de l'état actuel du sinistre et une prévision opérationnelle du risque, à intervalles de temps prédéfinis, permettant l'évacuation et la mise en sécurité des personnes et une évaluation des zones sensibles et vulnérables à défendre, et 2) réaliser des démonstrations en environnement représentatif des domaines civil et militaire. Sur ce dernier point, l'approche hybride a été appliquée dans le domaine civil à un immeuble de bureaux de plusieurs étages et dans le domaine militaire à une corvette générique, pour des scénarios réalistes de feu.

Projet LASHFIRE

LASHFIRE est un projet européen visant à réduire le risque incendie à bord des navires rouliers. Le consortium comprend 26 partenaires de 13 états membres de l'union européenne dont des partenaires industriels, des instituts de recherches, des universités et des organismes de réglementations. Le projet a pour but de fournir une base technique

pour les futures révisions des réglementations maritimes de même que pour la construction de navires plus sûrs.

Les solutions techniques et opérationnelles développées dans le projet ont été intégrées à deux modèles génériques de navires rouliers, le Stena Flavia, navire transporteur de passagers et de véhicules, et le Magnolia Seaways, navire transporteur de véhicules (voir Figure 2), dans le but d'estimer les conséquences d'un incendie dans un pont garage sur les personnes, la cargaison et le navire, pour des scénarios de feux critiques.

Le feu prenant naissance dans un espace de très grandes dimensions à rapport d'aspect élevé, i.e., des conditions qui sortent du domaine de validité du modèle à zones, le code CFD SAFIR a été utilisé et étendu pour prendre en compte de nouvelles problématiques, à savoir la transmission du feu d'un véhicule à l'autre et la modélisation de la détection de chaleur et de fumée.



Figure 2 : Vues du Stena Flavia (à gauche) et du Magnolia Seaways (à droite).

Plan de thèse

Le mémoire comporte 9 chapitres :

Après un premier chapitre introduisant le contexte de l'étude, un rappel sur les principes fondamentaux du développement du feu est présenté au chapitre 2 ; on y rappelle la phénoménologie du feu de compartiment, ainsi que les différents modes de transmission du feu d'un local à un autre.

Le chapitre trois est une étude bibliographique des travaux entrepris sur la modélisation du feu à l'échelle du local et de sa propagation dans une structure multi-compartmentée.

L'approche hybride et ses applications sont présentées dans les chapitres 4 à 9. La Figure 3 montre l'architecture générale de cette approche et les options retenues selon le scénario de feu étudié.

Le chapitre quatre concerne le calcul du développement du feu à l'échelle d'un compartiment. On dispose pour cela de deux modèles : un modèle à zones original et le code CFD SAFIR 3D lorsque les conditions d'application sortent du domaine de validité du modèle zonal.

On présente tout d'abord le nouveau modèle à zones, puis sa validation grâce à des expérimentations réalisées dans le dispositif DIAMAN de l'IUSTI pour des feux impliquant un ou plusieurs combustibles. On précise ensuite les fonctionnalités du code SAFIR et les extensions réalisées pour prédire la propagation du feu à l'intérieur du compartiment et pour évaluer les délais de détection de chaleur et de fumées.

Dans le cinquième chapitre, nous abordons le problème de la transmission du feu par les gaines de ventilation. Dans le projet initial MARINER, la version unidimensionnelle du code CFD SAFIR a été développée puis validée pour des gaines de ventilation, différentiellement chauffées, où circule de l'air. Le développement et la validation du code sont poursuivis afin de traiter le cas d'une gaine où circulent les fumées chaudes issues du local en feu. Les essais de validation sont réalisés dans le réseau de ventilation du dispositif DIAMAN.

Le chapitre six est dédié au développement du feu à l'échelle de la structure. Le modèle de réseau, intégrant le transport des fumées d'incendie et la propagation du feu par les façades, y est présenté. Il repose sur l'utilisation de densités de probabilité d'occurrence des phases du feu et de transmission d'un local à l'autre, dont les durées moyennes sont préalablement calculées par les différents modèles à l'échelle du local.

Dans les chapitres 7 à 9, l'approche hybride est appliquée à trois structures différentes : un immeuble de bureaux de plusieurs étages, une corvette générique et un navire roulier, le STENA FLAVIA, dans des environnements représentatifs des domaines civil et militaire et en prenant en compte les spécificités propres à chacune des structures.

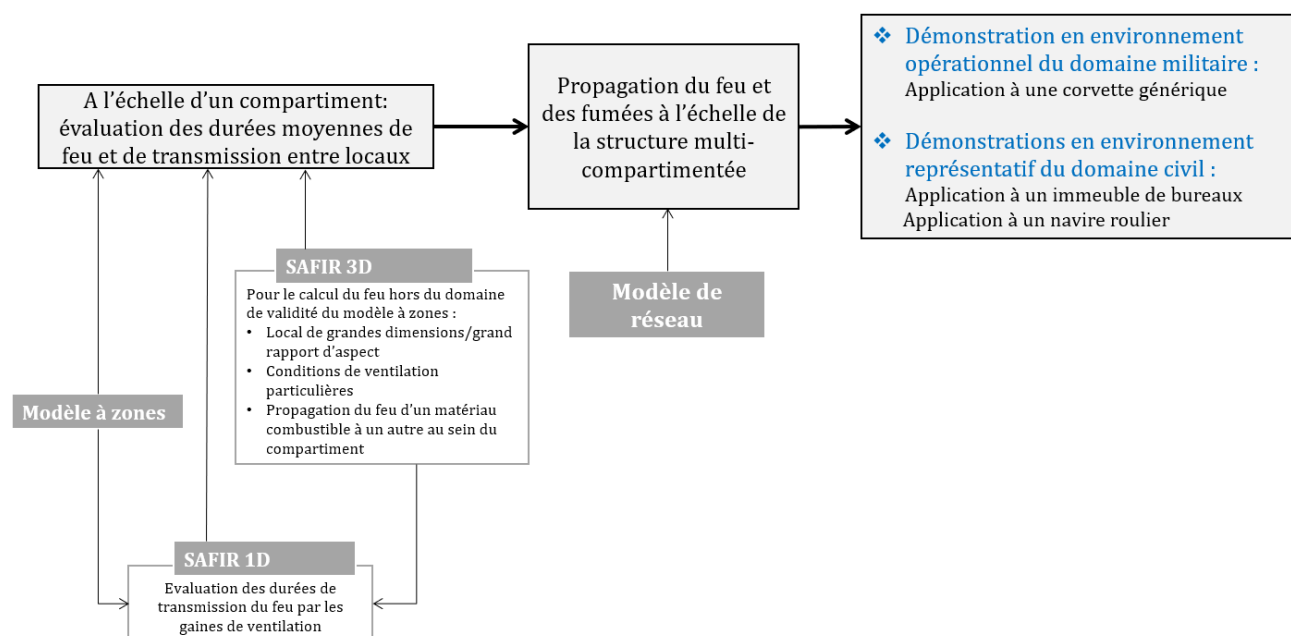


Figure 3 : L'approche hybride multi-échelle et ses applications.

Le dernier chapitre conclut sur le travail effectué et suggère des pistes d'amélioration de l'approche hybride multi-échelle proposée.

Chapitre 2 Principes fondamentaux

2.1 Phénoménologie d'un feu de compartiment

Le feu dans un compartiment se déroule généralement en quatre étapes : naissance, croissance, feu pleinement développé, et décroissance (Figure 4). Cependant, les feux de compartiment ne suivent pas toujours cette courbe d'évolution. En effet, la vitesse de développement du feu, le taux de libération de chaleur et la durée de combustion dépendent à la fois des caractéristiques du combustible et des conditions de ventilation.

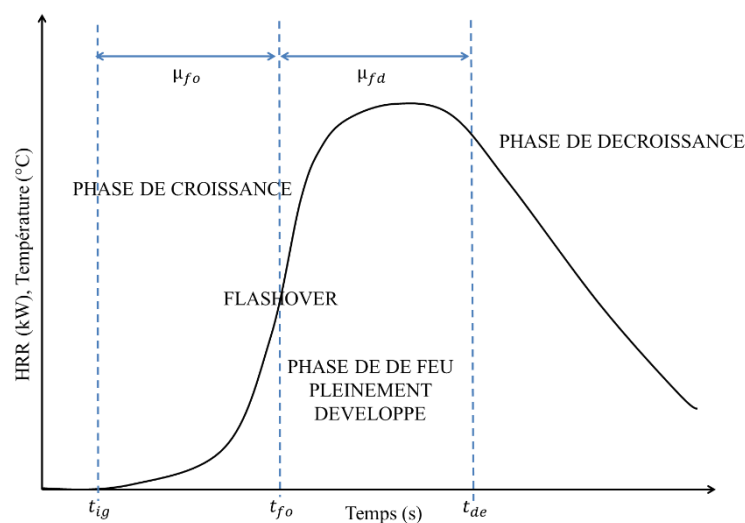


Figure 4 : Phases d'un feu de compartiment. μ_{fo} et μ_{fd} représentent les durées moyennes de flashover et de feu pleinement développé.

Croissance

Après l'inflammation du combustible, la température dans le local augmente progressivement et un panache de fumées se forme. Ce panache alimente la couche chaude en produits de combustion et en air entraîné depuis la couche froide.

En fonction de la puissance du feu, de la géométrie du local et des conditions de ventilation, un phénomène soudain d'embrasement généralisé, ou flashover dans la terminologie anglo-saxonne, peut se produire. Le flashover n'est pas une étape du développement du feu, mais une transition rapide de la phase de croissance vers la phase de feu pleinement développé, avec des conditions particulières définies généralement comme suit : la température dans la couche chaude à l'intérieur du compartiment doit atteindre entre 500 à 600°C ou le flux de chaleur reçu par le plancher du compartiment doit atteindre 15 à 20 kW/m². Lorsque le flashover se produit, l'ensemble des matériaux combustibles présents dans le local, et même l'atmosphère du local chargé en imbrûlés, s'embrasent brusquement.

Feu pleinement développé

Que le feu ait atteint le flashover ou non, la puissance instantanée du feu est généralement maximale dans la phase de feu pleinement développé. A ce stade, le feu peut être contrôlé par la ventilation ou par la quantité de combustible disponible. Dans le premier cas, il n'y a pas assez d'oxygène pour consommer l'intégralité du combustible. La puissance du feu est diminuée et le combustible non consommé se retrouve alors dans les fumées et en couche chaude. Les gaz imbrûlés peuvent sortir du local, se mélanger avec l'air extérieur et s'enflammer, générant des flammes extérieures favorisant la propagation du feu. Dans le second cas, la ventilation est suffisante et l'ampleur du feu dépend uniquement de la quantité de combustible disponible.

Décroissance

La phase de feu pleinement développée est suivie d'une phase de décroissance et d'extinction, soit par épuisement du combustible, soit par épuisement de l'oxygène disponible.

La durée de chacune des phases, et donc la durée totale de l'incendie, est étroitement liée à la nature du combustible, à sa répartition dans le local et aux conditions de ventilation.

2.2 Modes de transmission du feu d'un local à un autre

On suppose généralement que les phases de croissance et de décroissance du feu ne permettent pas la transmission du feu aux locaux adjacents, car la chaleur dégagée durant ces périodes n'est pas suffisante, mais plutôt dans la phase de feu pleinement développé où la puissance du feu y est maximale.

Le local peut alors transmettre le feu à d'autres locaux par quatre modes de transmission différents : par les parois, par les ouvertures horizontales ou verticales (porte ou trappe), par les façades et/ou par les gaines de ventilation. La Figure 5 montre un exemple de configuration où tous ces modes sont représentés.

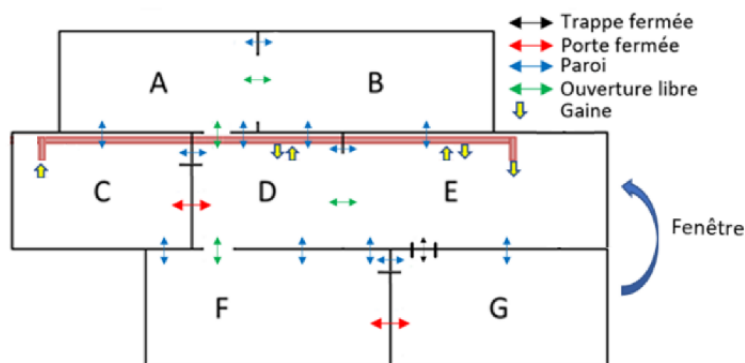


Figure 5 : Modes de transmission du feu dans une structure multi-compartimentée.

Transmission du feu par convection

Lorsque l'incendie dans le local source a atteint la phase de feu pleinement développé, les gaz chauds et les flammes s'échappant de ce local peuvent transférer de la chaleur par convection à d'autres locaux (nommés par la suite, locaux cibles), entraînant une propagation du feu. Cela peut se produire lorsque le local source présente des ouvertures ou qu'il est connecté à un autre local par une gaine de ventilation qui y débouche.

La Figure 6 illustre schématiquement les deux cas de gaine de ventilation débouchante. La gaine qui débouche dans le local cible *m* peut contenir de l'air (a), chauffé au travers de la conduite par le feu dans le local source, ou des fumées (b), issues de la combustion dans le local source. Dans les deux cas, les matériaux combustibles présents dans ce local, en contact avec l'air chaud ou les fumées, peuvent s'enflammer si la température du gaz est comprise entre 500 et 600°C, par analogie avec les conditions de flashover mentionnées précédemment.

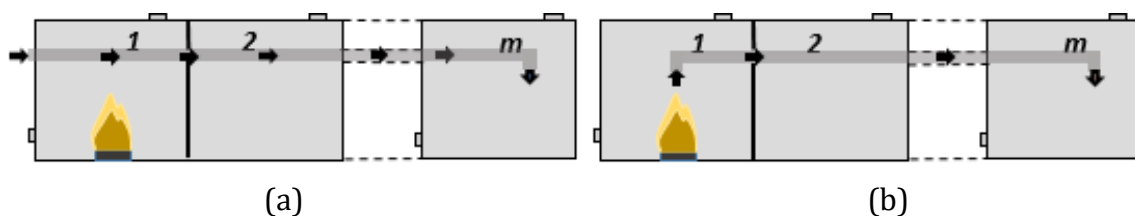


Figure 6 : Configurations de gaines de ventilation débouchant dans le local cible *m*.

Transmission par conduction

Le feu peut se transmettre également du local source vers un local cible par conduction, au contact de surfaces chaudes. Ces surfaces peuvent être des cloisonnements (e.g., cloisons, portes fermées, plancher), ou des gaines de ventilation traversantes (Figure 7). Les matériaux combustibles présents dans le local cible peuvent alors s'enflammer au contact de la surface.

La température d'inflammation de ces matériaux dépend de nombreux facteurs, comme leur composition ou leur épaisseur. Elle dépend aussi de la nature du contact avec la surface chaude. La température minimale d'inflammation de divers matériaux, principalement cellulosiques, peut être déterminée à partir de tests standards [22 à 25] ou de tests spécifiques, comme ceux menés par DGA TN [26]. Ces derniers ont permis d'évaluer la température d'auto-inflammation de matériaux cellulosiques placés sur la face non exposée d'une plaque en acier, soumise à une flamme ou un panneau radiant, ou des parois du local source du dispositif DIAMAN où un feu de 1,25 MW se développait. Ces essais ont montré que l'inflammation peut se produire lorsque la température de la surface chaude excède 340°C.

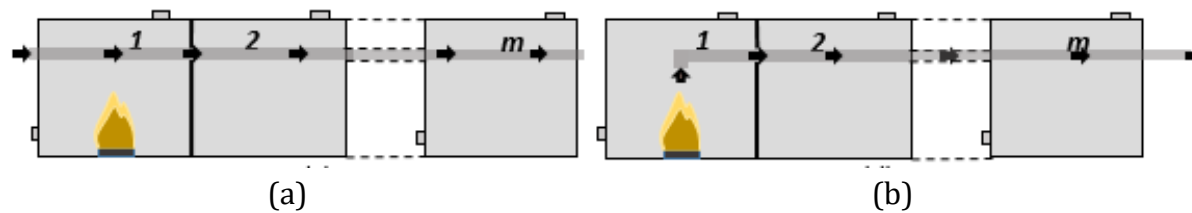


Figure 7 : Configurations de gaines de ventilation traversant le local cible m.

Transmission en façade

Lorsqu'un feu se développe dans un compartiment possédant des ouvertures vitrées donnant vers l'extérieur, les flux thermiques générés par l'incendie peuvent provoquer la rupture des vitrages. Si le feu est suffisamment puissant, en phase de feu pleinement développé essentiellement, et qu'il est limité par la ventilation (feu sous-oxygéné), les gaz imbrûlés qui se sont accumulés au niveau du plafond s'enflamment au contact de l'air extérieur lorsqu'ils sortent du compartiment, produisant des flammes extérieures qui peuvent propager le feu vers les étages supérieurs. Il existe d'autres conditions d'apparition de flammes extérieures, présentées notamment par M. Duny [27].

Pour répondre aux objectifs de la règlement thermique RT2012, les façades sont parfois isolées de l'extérieur. Les matériaux utilisés sont souvent combustibles, amplifiant le risque de propagation du feu par l'inflammation des matériaux constitutifs de la façade. Afin de caractériser les matériaux d'isolation et de vérifier qu'ils respectent les exigences des normes de sécurité incendie, le Centre Scientifique et Technique du bâtiment (CSTB) réalise des campagnes d'essais dans sa plateforme Vulcain. Il dispose notamment d'un équipement spécifique, nommé LEPIR II (pour Local Expérimental Pour Incendie Réel à deux niveaux) pour qualifier la propagation du feu en façades.

Bien qu'il existe une norme européenne définie pour les feux de façades, (ISO 13785-1&2), chaque pays possède des réglementations et des tests de classification différents. C'est pourquoi, des laboratoires de recherches comme le Laboratoire National de métrologie et d'Essais (LNE) ou l'institut suédois RISE (pour Research Institutes of Sweden) réalisent des simulations de feu de façades avec le logiciel Fire Dynamics Simulator (FDS) afin de comparer les différents bancs d'essais européens et de proposer un protocole européen pour évaluer le comportement au feu des matériaux et solutions constructives de façade dans des conditions réelles d'utilisation.

Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes volontairement limités à des applications où la façade n'est pas recouverte de matériaux combustibles, ni isolée de l'extérieur.

Chapitre 3 Etude bibliographique

Ce chapitre présente, de façon non exhaustive, les travaux réalisés sur la modélisation du feu à l'échelle d'un compartiment et de sa propagation à l'ensemble de la structure multi-compartimentée.

3.1 Modélisation du feu à l'échelle du local

Pour simuler le développement d'un feu dans un compartiment, il existe plusieurs catégories de modèles correspondant à différents niveaux de représentation des phénomènes physiques mis en jeu et donc de complexité. Le choix du modèle dépend de l'objectif recherché.

3.1.1 Modèles nominaux ou paramétriques

Modèle de feu nominal

L'impact thermique d'un feu nominal est caractérisé par la donnée d'une courbe standard température/temps indépendamment de la ventilation, de la taille du compartiment et de la charge calorifique qu'il contient, et des propriétés thermiques des parois. Elle représente le comportement du feu durant la phase de feu pleinement développé et suppose que la température est uniforme dans tout le compartiment.

Cette approche, développée pour classer divers matériaux et éléments de construction en fonction de leur résistance au feu lors d'essais effectués dans des fours, montre des inconvénients et limites :

- Le feu nominal ne représente pas le feu réel notamment en termes d'intensité et de durée, ce qui peut aboutir à des comportements structurels très différents ;
- Les feux nominaux ne représentent pas toujours les conditions de feu les plus graves, principalement parce qu'ils ne tiennent pas compte du volume, de la charge calorifique et des conditions de ventilation réels du local. Les dommages causés aux éléments de structure, conçus à partir de ces feux standards, sont donc sous-estimés. L'exemple le plus concret est celui d'un incendie dans un bureau contenant une grande quantité de combustibles (meublier, matériels informatiques et électriques, etc.). Dans ce cas, le feu qui se développe est bien plus sévère que le feu nominal.

L'Eurocode 1, et plus précisément la norme EN1991-1-2 [1], fournit par exemple les trois courbes de feux nominaux suivantes :

- Feu standard ou feu ISO 834 :

$$T_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1)$$

- Feu d'extérieur :

$$T_g = 660(1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-3,8t}) + 20$$

- Feu d'hydrocarbure :

$$T_g = 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) + 20$$

où t est le temps en minutes et T_g est la température du gaz dans le local en °C.

La norme britannique PD7974-1[28] adopte les mêmes équations pour les feux d'hydrocarbure et standard. Elle fournit également des courbes température/temps pour des grands feux de nappe d'hydrocarbure et des feux couvants :

- Feu d'hydrocarbure

$$T_g = 1100(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,204e^{-1,417t} - 0,471e^{-15,833t}) + 20$$

- Feu couvant

$$T_g = \begin{cases} 154t^{0,25} + 20 & \text{pour } 0 < t \leq 21 \text{ min} \\ 20 + 345 \log_{10}[8(t - 20) + 1] & \text{pour } t > 21 \text{ min} \end{cases}$$

Sur la Figure 8, nous avons tracé les courbes température/temps pour les feux nominaux mentionnés ci-dessus. On observe que les feux d'hydrocarbure sont les plus sévères, atteignant un palier à environ 1100 °C au-delà de 20 minutes. Les élévations temporelles de température des feux standard et extérieur sont similaires sur les 8 premières minutes, mais ce dernier sature ensuite à 680 °C. Le feu couvant se développe plus lentement, mais tend asymptotiquement vers le feu standard, en particulier après environ une heure de feu.

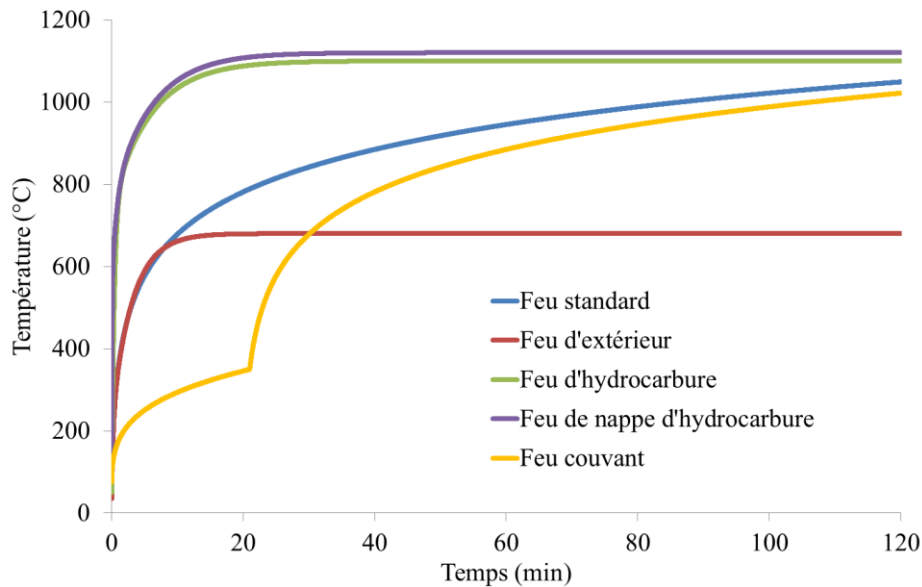


Figure 8 : Courbes de feux nominaux.

Feu du domaine naval militaire

Dans le domaine naval militaire, le Centre national de Prévention et de Protection (CNPP) a proposé la courbe de feu empirique suivante [29] :

$$T_g = 20 + 160(t \times Ctl)^{0,4}$$

Où Ctl est un coefficient qui dépend du contexte et du type de local où le feu se développe. Les valeurs du coefficient Ctl , en fonction des différents contextes et pour certains locaux de référence, sont regroupés dans le Tableau 1.

Par exemple, lorsque le feu se développe dans un local « logement » et que ce local est à l'origine du feu et possède un accès ouvert vers l'extérieur, le coefficient de contexte est de 0,7. Il passe à 1 si, dans le même contexte, le local est de type « atelier ».

Type de local	Volume de référence (m ³)	Ctl 1	Ctl 2	Ctl 3	Ctl 4	Ctl 5	Ctl 6	Ctl 7	Ctl 8
Atelier	514,8	1	0,35	1	1,2	0,1	1,6	0,2	1
Coursive	95,7	0,4	0,3	1	1,4	0,1	1,6	0,2	1
Énergie	514,8	2	2	1	2,33	0,18	2,33	0,35	1
Logement	48,4	0,7	0,35	1	1,4	0,14	1,6	0,28	1
Magasin	275	0,9	0,35	1,2	1,6	0,14	1,6	0,28	1,2
Opérationnel	198	0,9	0,35	1	1,6	0,1	1,6	0,2	1

Tableau 1 : Coefficients associés aux différents contextes et types de locaux du domaine naval militaire.

Parce qu'elle tient compte du contexte et du type de local, la courbe de feu du CNPP présente un intérêt certain lorsque le scénario de feu est proche de ceux pour lesquels elle

a été établie. En revanche, comme cela a été mis en évidence dans les travaux de thèse de N. Giraud [17], cette courbe ne peut pas être généralisée à des locaux du même type présentant des caractéristiques différentes en termes de volume, de charge calorifique ou de conditions de ventilation. Par ailleurs, la température du local obtenue par la courbe du CNPP augmente continuellement, ce qui limite son utilisation à la phase de croissance. Pour toutes ces raisons, la courbe du CNPP n'a pas été retenue dans la présente étude.

Modèle paramétrique

L'évolution temporelle de la température dans un compartiment peut être également obtenue à partir d'une courbe paramétrique [30 à 34].

L'approche paramétrique présente certains intérêts, notamment sa simplicité d'utilisation dans la mesure où elle nécessite peu d'informations et de simples calculs analytiques. Le modèle paramétrique s'appuie sur des corrélations empiriques qui permettent, contrairement aux courbes nominales, de mieux représenter les phénomènes physiques mis en jeu.

A titre d'exemple, S. Deshanghere a comparé les courbes de feu expérimentale et paramétrique [35] relatives à l'Eurocode 1 [1] (Figure 9). Si l'ordre de grandeur de la température maximale atteinte est correctement reproduit, on observe une montée en température plus marquée pour la courbe paramétrique et une décroissance plus rapide.

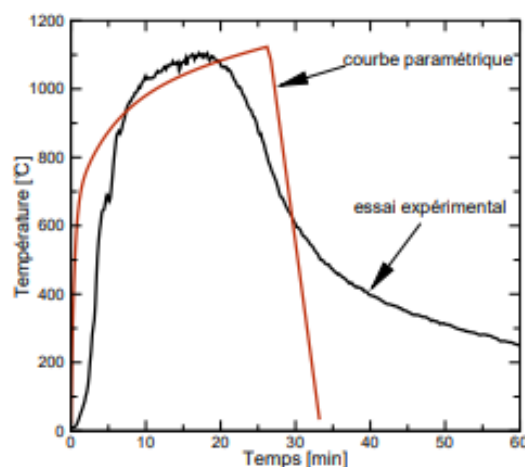


Figure 9 : Courbe de feu paramétrique issue de l'Eurocode 1 (extrait de [35]).

Chaque courbe paramétrique est cependant établie pour un type d'application en termes de nature et charge de combustible, de conditions de ventilation et de propriétés thermiques des parois du compartiment, ce qui limite son domaine de validité. Son utilisation à d'autres conditions peut conduire à des solutions erronées.

3.1.2 Modèles à zones

Parce qu'ils nécessitent une faible puissance informatique et relativement peu de données d'entrée, les modèles à zones ont été massivement utilisés depuis de nombreuses années

pour étudier les feux de compartiment. Les calculs effectués avec un modèle à zones ne prennent que quelques dizaines de secondes sur un ordinateur de bureau.

Le principe des modèles à zones est de diviser le compartiment en une ou plusieurs zones dans lesquelles les propriétés du milieu gazeux (température, pression, composition et énergie) sont supposées uniformes. Des bilans de conservation de la masse et de l'énergie permettent de traduire les échanges se produisant entre ces zones. Pour des feux de puissance réduite comparativement à la taille du compartiment, le volume du compartiment est généralement séparé en une couche « chaude » sous le plafond et une zone « froide » au niveau du sol. Lorsque le feu est suffisamment puissant par rapport à la taille du compartiment, les propriétés du gaz deviennent homogènes dans tout le compartiment et il n'existe plus de distinction entre couches chaude et froide, de sorte qu'il est possible d'utiliser un modèle à une seule zone.

Ces modèles à zones sont très largement utilisés en raison de leur relative simplicité de mise en œuvre et de leur faible coût de calcul. Leur utilisation requiert néanmoins un certain niveau d'expertise. En effet, comme le souligne E. Guillaume [36], les modèles à zone(s) reposent sur des hypothèses limitantes, notamment celles relatives à la configuration géométrique du local, comme un grand rapport d'aspect ou une forme complexe.

Une excellente revue des principaux modèles à zone(s) a été réalisée par E. Guillaume [36]. Parmi les nombreux modèles à zones de la littérature, on peut citer les modèles à zones suivants :

CFAST [37]

CFAST est un modèle à deux zones, développé par le National Institute of Standards and Technology (NIST) depuis les années 1990 qui calcule le développement d'un incendie dans des configurations mono- ou multi-compartiment. Bien que le débit de pyrolyse soit prescrit, il permet la modification du débit calorifique en fonction de la quantité d'oxygène présente dans le local, pouvant aller jusqu'à l'extinction du combustible. Il inclut également des sous-modèles de ventilation mécanique, de jet impactant et de détection du feu. S'il a été validé avec succès sur de nombreux essais, des simulations récentes de feu dans des configurations multi-compartimentées ont montré que CFAST ne permet pas de reproduire correctement l'évolution de l'interface de fumées [38]. L'utilisation d'une pression uniforme dans le compartiment (i.e., la pression du gaz dans les couches chaude et froide est identique) permet, en s'affranchissant des ondes acoustiques, de réduire le temps de calcul, mais, pour certains scénarios de feu, au détriment du calcul de la position de l'interface.

MAGIC [39]

MAGIC est un modèle à deux zones développées par Electricité De France (EDF), depuis 1985. Il peut prendre en compte jusqu'à 24 compartiments communiquant au travers

d'ouvertures. Il est généralement utilisé pour prédire l'endommagement de matériels exposés au feu et les délais de détection.

CEIL [20]

Le code CEIL est le modèle à zones développé par DGA TN [20] et utilisé dans le projet initial MARINER [16]. Il diffère essentiellement des modèles à zones classiques, comme CFAST, par le fait que chaque zone a une pression propre. Cette approche accroît le temps de calcul (plusieurs heures d'exécution pour un scénario de feu) puisque le pas d'intégration dans le temps des équations de bilan est alors limité par une contrainte de stabilité numérique, mais elle permet de mieux décrire l'évolution de l'interface de fumée au cours du temps.

Comme cela a été évoqué précédemment, le code CEIL ne permet pas de traiter la combustion sous-oxygénée ou la combustion de plusieurs combustibles présents dans un même local, comme cela est souvent le cas dans des situations réelles d'incendie. Le code CEIL nécessite en outre la calibration préalable de nombreux paramètres, ce qui constitue un réel problème conceptuel.

3.1.3 Modèles CFD

Dans les modèles CFD (pour Computational Fluid Dynamics) ou modèles à champ, le domaine d'étude est divisé en un grand nombre de volumes élémentaires (ou mailles) dans lesquels les grandeurs de l'écoulement sont supposées uniformes. Dans chacun de ces volumes élémentaires sont résolues, de façon locale et instationnaire, les équations de Navier-Stokes traduisant les bilans de masse, de quantité de mouvement et d'énergie. Les principaux modèles CFD utilisés dans la sécurité incendie sont répertoriés dans la référence [36]. Ces modèles permettent une description tridimensionnelle de l'écoulement compressible et réactif à bas nombres de Mach et de Froude caractéristique d'un incendie. L'ensemble des phénomènes de base qui régissent le développement du feu sont pris en compte, à savoir le transport de gaz, la turbulence, la combustion, le rayonnement et, pour certains, le couplage avec la phase liquide en cas d'aspersion d'eau.

Ces modèles sont très détaillés et utilisent moins d'empirisme que les modèles à zones. En contrepartie, ils nécessitent des ressources informatiques (puissance et place mémoire) et des données d'entrée plus importantes. Par ailleurs, leur utilisation est réservée à des utilisateurs confirmés ayant une solide expertise en science du feu.

Parmi les codes CFD incendie, on peut citer entre autres :

FDS [40]

FDS est un code CFD développé par le NIST. Il en est actuellement à sa sixième version. Il a fait l'objet d'une validation très poussée dans plusieurs sortes de configurations en

milieux ouverts et confinés. C'est sans aucun doute la référence dans le domaine de la sécurité incendie.

OpenFOAM / FireFOAM [41]

OpenFOAM est un code CFD libre, développé par Factory Mutual, qui dispose d'un large éventail de fonctionnalités permettant de résoudre plusieurs types de problématiques depuis les écoulements complexes de fluides impliquant des réactions chimiques, la turbulence et les transferts de chaleur, jusqu'à la dynamique des solides ou l'électromagnétisme. Il contient de nombreux solveurs dont FireFOAM dédié à la modélisation des incendies.

ISIS [42, 43]

ISIS est un code à champ développé par L'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) pour l'étude des incendies dans les installations nucléaires. Il a été validé sur un ensemble de tests mettant en jeu des écoulements avec et sans réactions de combustion. Le modèle est également couplé au logiciel SYLVIA, qui simule le développement du feu dans une structure multi-compartmentée composée d'un réseau complexe de ventilation.

SAFIR [21, 44]

SAFIR est un logiciel développé conjointement par DGA TN et l'IUSTI pour décrire le développement d'un incendie, ses effets sur l'environnement et la lutte par aspersion d'eau dans des configurations mono- ou multi-compartment tels qu'à bord des bâtiments de surface et des sous-marins de la Marine Nationale. Dans sa dernière version, sa capacité prédictive a été améliorée en y intégrant un modèle d'évaporation d'une nappe d'hydrocarbure liquide afin d'étudier les régimes d'oscillations de combustion dans une enceinte ventilée mécaniquement [21, 44, 45].

Le code SAFIR, utilisé durant cette thèse, sera décrit plus en détail par la suite.

3.2 Modélisation de la propagation à l'échelle de la structure

3.2.1 Modèles probabilistes

Comme cela a été évoqué dans le contexte général de l'étude, la recherche et le développement des modèles de propagation de feu dans des ensembles massivement multi-compartmentés (EMC) ont subi de nombreuses évolutions ces dernières décennies. Des modèles probabilistes incluant tout ou partie des aspects physiques liés à la sécurité incendie dans les EMC, ont vu le jour.

FIRECAM [46, 47] et FiERASystem [48, 49]

Ces deux outils, développés par le Conseil National de Recherches du Canada, reposent sur un même concept. FIRECAM est plutôt dédié à l'évaluation du risque dans les immeubles d'appartements et de bureaux, FiERASystem à celle dans les bâtiments industriels légers. Ils possèdent un certain nombre de sous-modèles pour décrire le développement du feu, la production de fumées et leur propagation, le fonctionnement des détecteurs et des systèmes d'extinction, l'évacuation des occupants et le comportement de la structure à l'agression du feu. Ils reposent sur un graphe orienté où, pour simplifier le problème, tous les compartiments d'un même étage sont regroupés en un seul compartiment, à l'exception de l'étage où le feu a éclaté. L'étage d'éclosion comprend ainsi le compartiment d'origine du feu et un deuxième compartiment qui regroupe tous les autres compartiments de cet étage. Cette simplification et le caractère statique de ces outils limitent leur portée à des configurations simples.

SCHEMA-SI [50]

Le modèle développé par le CSTB permet, lui aussi, l'évaluation du risque incendie. Il est basé sur l'utilisation des réseaux de Pétri et de modèles simplifiés d'évaluation des grandeurs physiques liées à l'incendie comme la température de la couche de fumée ou la hauteur libre de fumée. À l'aide de nombreuses simulations, le niveau de sécurité est représenté par le rapport du nombre de fois où les événements non souhaités (décès multiples, embrasement généralisé...) se produisent au nombre total de simulations. Ainsi, plus le rapport est faible, meilleure est la sécurité. L'intérêt exclusif du modèle est d'identifier les mesures de sécurité les plus efficaces.

CRISP II [51, 52]

CRISP II est un modèle développé par le centre de recherche britannique Fire Research Station (FRS) qui s'appuie sur des simulations stochastiques de Monte-Carlo pour générer de multiples scénarios d'incendie. Il permet d'évaluer différents dispositifs capables d'améliorer la sécurité incendie. Le modèle est composé de sous-modèles comme le modèle à zones CFAST, un sous-modèle de comportement humain et de nombreux sous-modèles de comportement de composants. Après de nombreux scénarios simulés, le risque incendie représente le nombre de décès sur le nombre total de scénarios.

PFS (Probabilistic Fire simulator) [53]

PFS est un outil d'analyse du risque développé par le Technical Research Centre of Finland (VTT). Basé sur les simulations de Monte Carlo pour faire varier l'état initial de la configuration étudiée, il utilise différents sous-modèles tels que le modèle à zones CFAST et un modèle d'arbre d'événements.

CESARE-Risk [54]

CESARE-Risk est un modèle développé par le Centre de Recherche pour la Sécurité de l'Environnement et de l'Ingénierie des Risques en Australie. Il utilise plusieurs sous-modèles déterministes afin de décrire le développement du feu, la production de fumées et leur propagation dans un bâtiment comme un modèle zonal (NRCC Fire Growth Model). Un arbre d'événements décrit les conditions de l'immeuble et représente les différents scénarios de feu survenant avec une certaine probabilité en utilisant la méthode de Monte-Carlo.

QRA (Quantitative Risk Assessment) de l'Université de Lund [55, 56]

L'université de Lund a développé un modèle pour estimer le risque incendie en utilisant la norme probabiliste QRA basée sur un nombre élevé de résultats de sous-scénarios déterministes où les scénarios sont décrits comme un arbre d'événements. Cette norme a été étendue afin de prendre en compte les incertitudes liées aux différentes variables utilisées. Elle intègre différents sous-modèles comme le modèle à zones FAST [57].

FSSIM [58, 59]

FSSIM (pour Fire and Smoke SIMulator) est un modèle de réseau pour simuler le développement d'un feu et la propagation des fumées dans un ensemble de quelques compartiments en présence d'un système complexe de ventilation. Il inclut la conduction de chaleur à travers des parois multi-matériaux, les échanges radiatifs, le réseau HVAC (tas : Heating, Ventilation and Air Conditioning), la détection, la suppression et la combustion sous-oxygénée. Un nœud du réseau est soit un compartiment, soit un composant du système HVAC. Les transferts de chaleur et de masse se produisent aux jonctions entre nœuds. La principale limitation du code FSSIM est qu'il repose, à l'échelle d'un local, sur un modèle à une seule zone, ce qui a pour effet, en cas de stratification, de surestimer le transfert de chaleur dans la partie basse du local et de le sous-estimer dans la partie haute.

Modèle de Cheng et Hadjisophocleous [60]

Le modèle de propagation du feu de Cheng et Hadjisophocleous est un modèle de réseau bayésien reposant sur un graphe orienté et sur l'utilisation de lois normales pour calculer les probabilités d'inflammation et d'embrasement généralisé dans un local, de transmission par une paroi, une fenêtre ou une porte. Les durées moyennes de transmission sont déduites de corrélations empiriques et la puissance du feu est donnée par une simple relation quadratique en temps, de la forme αt^2 , où le paramètre α dépend du type de feu standard retenu. Le modèle suppose de plus un arrangement très simple de locaux types.

L'examen des modèles présentés ci-dessus a donc fait ressortir certaines limites liées au nombre de locaux et à leur agencement simplifié, à la physique du développement du feu et des transmissions entre locaux considérée, ou à la non prise en compte du transport des fumées ou de la dynamique en temps réel de la propagation.

3.2.2 Approche hybride multi-échelle

Depuis quelques années, l'approche hybride multi-échelle, couplant des modèles (modèles à zones, CFD ou de réseau) ayant des complexités et des coûts de calcul différents, est utilisée en sécurité incendie. Une revue exhaustive des travaux sur le sujet a été conduite par Ralph et Carvel [15].

L'approche hybride à couplage fort permet de prendre en compte les interactions mutuelles entre le local en feu et le système complet, mais elle requiert des ressources informatiques importantes, ce qui va à l'encontre de l'objectif opérationnel recherché dans le cadre de cette thèse.

La méthode hybride à couplage faible (unidirectionnel), initiée lors de la thèse de N. Giraud, couplant le modèle à zones CEIL ou le code CFD SAFIR à l'échelle du local et un modèle probabiliste de réseau à l'échelle de la structure, est un bon compromis en termes de précision et de coût de calcul. Nous verrons cependant qu'elle présente des limites, notamment pour le calcul du transport des fumées à l'échelle de la structure, lorsque les conditions de ventilation créent un couplage fort entre le feu et la structure.

Chapitre 4 Modélisation du développement du feu à l'échelle du local

Pour décrire le comportement du feu à l'échelle du local, l'approche hybride utilise soit un modèle à zones, soit un code à champ, le code CFD SAFIR.

Pour les raisons évoquées dans le contexte général, le code ŒIL a été abandonné au profit d'un nouveau modèle à zones, spécifiquement développé pour traiter la plupart des scénarios de feu rencontrés dans les domaines civil et militaire. Pour les situations qui sortent du champ d'applications du modèle à zones, comme les locaux à grand rapport d'aspect ou pour certaines conditions de ventilation, le code CFD SAFIR, validé sur des feux confinés (voir par exemple [21, 45]), est utilisé.

Nous présentons tout d'abord dans ce chapitre le modèle à zones et son évaluation par confrontation avec des résultats d'essais conduits dans le dispositif DIAMAN. Nous décrivons ensuite les principales fonctionnalités du code SAFIR ainsi que les extensions réalisées pour répondre aux objectifs des projets MARINER-DECM et LASHFIRE.

4.1 Modèle à zones

Le modèle développé pour décrire le comportement du feu dans un local et ses conséquences sur l'ambiance (gaz et parois) est un modèle à deux zones séparées par une interface : une zone chaude contenant les produits de combustion, et pour certaines conditions de ventilation, l'excès d'air et du combustible imbrûlé, et une zone froide contenant l'air frais. Le feu et son panache agissent comme une pompe enthalpique entre les deux zones.

On résout pour chaque zone les équations bilan de masse et d'énergie. Contrairement à la très grande majorité des modèles à zones (e.g., CFAST [37]), la vitesse de l'interface est régie par une équation de quantité de mouvement dépendant de la différence de pression entre les couches chaude et froide, ce qui augmente le temps de calcul, mais permet de mieux suivre l'évolution de l'interface. La pression dans chaque zone est obtenue par l'équation d'état des gaz parfaits.

Le modèle calcule les transferts de chaleur par rayonnement entre le feu, les couches de gaz et les éléments de parois (4 ou 10 en fonction de la symétrie géométrie du local). Il prend aussi en compte la contribution radiative (émission et absorption) des suies et des espèces gazeuses CO_2 et H_2O . Le modèle calcule aussi les transferts de chaleur par convection et conduction.

Le débit de pyrolyse est prescrit mais la puissance peut être limitée en cas de sous oxygénation. Une équation de combustion à une étape calcule la fraction massique des

produits de combustion (H_2O , CO , CO_2 , suies, HCN et HCl) en fonction de la formule chimique du (ou des) combustible(s) dont la molécule est de la forme $C_{n_C}H_{n_H}O_{n_O}Cl_{n_{Cl}}N_{n_N}$.

Le modèle utilise une base de données "combustibles". Pour chaque combustible, elle fournit : la formule chimique, les rendements en suie, en monoxyde de carbone (CO) et en cyanure d'hydrogène (HCN), la chaleur de combustion effective et sa fraction rayonnée. Il utilise également une base de données "matériaux" dans laquelle sont enregistrées les propriétés thermiques de matériaux constitutifs des cloisonnements du local. Cette base fournit la conductivité thermique, la masse volumique et la chaleur spécifique sous la forme de polynômes de degré 2 en fonction de la température, ainsi que l'émissivité.

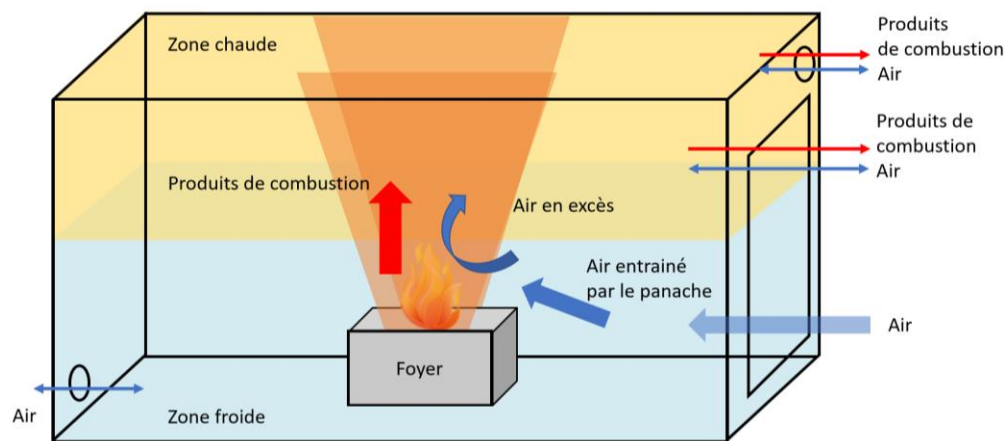


Figure 10 : Schéma du modèle à zones.

4.1.1 Formulation mathématique

Hypothèses du modèle

Le modèle repose sur les hypothèses principales suivantes :

- Le local, supposé parallélépipédique, est divisé en deux zones, une zone chaude et une zone froide. Cela suppose que les deux zones coexistent en permanence et que l'écoulement est bien stratifié ;
- A l'intérieur de chaque couche, la température, la pression et la composition du gaz sont uniformes. Dans chacune des zones, les équations bilan de masse et d'énergie sont résolues. La vitesse de l'interface est régie par une équation de quantité de mouvement dépendant des pressions des couches chaudes et froides. La résolution de cette équation entraîne une réduction du pas de temps, imposée par la propagation des ondes acoustiques (critère de Courant-Friedrichs-Levy ou CFL), mais permet de suivre avec précision le déplacement de l'interface ;
- Le feu est supposé rayonné de façon isotrope à partir d'un point source, situé à un tiers de la hauteur de flamme ;

- Le rayonnement émis est gris et diffus (i.e., les flux émis sont indépendants de la longueur d'onde et de la direction). Le rayonnement à travers les ouvertures est négligé ;
- Le débit de combustion est prescrit ;
- Les débits de ventilation mécanique (admission/extraction) sont également prescrits, alors que les débits au niveau des ouvertures de ventilation naturelle sont calculés à l'aide de l'équation de Bernoulli ;
- Les paramètres thermodynamiques sont constants. Les chaleurs spécifiques à volume constant et pression constante, c_v et c_p , la constante des gaz et le rapport des chaleurs spécifiques γ , sont reliés par les relations : $\gamma = c_p/c_v$ et $R = c_p - c_v$;

Les équations générales dans chacune des zones, ainsi que les relations de fermeture sont données ci-dessous.

Equations générales

Bilan de masse

Les équations de conservation de la masse de l'espèce i dans chaque zone s'écrivent :

$$\begin{aligned} \frac{dm_{iu}}{dt} = & \underbrace{\dot{m}_i^{ent}}_{\substack{\text{débit massique} \\ \text{de l'espèce } i \\ \text{de l'air entraîné} \\ \text{par le panache}}} + \underbrace{\dot{m}_i^{pyr}}_{\substack{\text{débit massique} \\ \text{de l'espèce } i \\ \text{dû à la combustion}}} + \underbrace{\dot{m}_{i,eu}}_{\substack{\text{débit massique} \\ \text{de l'espèce } i \\ \text{entrant par les ouvertures} \\ \text{en zone chaude}}} \\ & - \underbrace{\dot{m}_{i,su}}_{\substack{\text{débit massique} \\ \text{de l'espèce } i \\ \text{sortant par les ouvertures} \\ \text{de la zone chaude}}} \end{aligned} \quad (4-1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dm_{il}}{dt} = & -\dot{m}_i^{ent} + \underbrace{\dot{m}_{i,el}}_{\substack{\text{débit massique} \\ \text{de l'espèce } i \\ \text{entrant par les ouvertures} \\ \text{en zone froide}}} - \underbrace{\dot{m}_{i,sl}}_{\substack{\text{débit massique} \\ \text{de l'espèce } i \\ \text{sortant par les ouvertures} \\ \text{de la zone froide}}} \end{aligned} \quad (4-2)$$

où l'indice u correspond à la zone chaude, l'indice l à la zone froide.

En sommant sur toutes les espèces, on obtient une équation régissant la masse de gaz dans chaque zone :

$$\frac{dm_u}{dt} = \sum_i \frac{dm_{iu}}{dt} \quad (4-3a)$$

$$\frac{dm_l}{dt} = \sum_i \frac{dm_{il}}{dt} \quad (4-3b)$$

De sorte que :

$$\frac{dm_u}{dt} = \underbrace{\dot{m}^{ent}}_{\text{débit massique d'air entraîné par le panache}} + \underbrace{\dot{m}^{pyr}}_{\text{débit massique dû à la combustion}} + \underbrace{\dot{m}_{eu}}_{\text{débit massique entrant par les ouvertures en zone chaude}} - \underbrace{\dot{m}_{su}}_{\text{débit massique sortant par les ouvertures de la zone chaude}}$$

$$\frac{dm_l}{dt} = -\dot{m}^{ent} + \underbrace{\dot{m}_{el}}_{\text{débit massique entrant par les ouvertures en zone froide}} - \underbrace{\dot{m}_{sl}}_{\text{débit massique sortant par les ouvertures de la zone froide}}$$

On rappelle que les débits massiques des écoulements entrant et sortant du local sont prescrits si la ventilation est mécanique et calculés par l'équation de Bernoulli si la ventilation est naturelle. La composition des gaz entrants est imposée.

Bilan d'énergie

Les équations de conservation de l'énergie dans chaque zone s'écrivent :

$$\frac{dm_u c_v T_u}{dt} = HRR_{conv} + \dot{h}^{pyr} + \dot{h}^{ent} + \dot{h}_{eu} - \dot{h}_{su} - \dot{h}_{w,u}^{conv} - \dot{h}_{interface}^{conv} + \dot{h}_u^{rad} - p_u \frac{dV_u}{dt} \quad (4-4)$$

$$\frac{dm_l c_v T_l}{dt} = -\dot{h}^{ent} + \dot{h}_{el} - \dot{h}_{sl} - \dot{h}_{w,l}^{conv} + \dot{h}_{interface}^{conv} + \dot{h}_l^{rad} - p_l \frac{dV_l}{dt} \quad (4-5)$$

où :

- p : pression du gaz ;
- HRR_{conv} : puissance convective du feu ;
- $\dot{h}^{pyr} = c_p \dot{m}^{pyr} T_{ext}$, où T_{ext} est la température extérieure
- $\dot{h}^{ent} = c_p \dot{m}^{ent} T_l$;
- $\dot{h}_e, \dot{h}_s$: termes source d'enthalpie relatifs aux écoulements entrant et sortant par les ouvertures. Par exemple, en cas d'extraction mécanique en zone chaude, on aurait : $\dot{h}_{su} = \dot{m}_{su} c_p T_u$;
- $\dot{h}_w^{conv}$: terme source d'enthalpie relatif à l'ensemble des pertes convectives par les éléments de paroi w de la zone correspondante ;
- $\dot{h}_{interface}^{conv} = h A_{room} (T_u - T_l)$: terme source d'enthalpie relatif à l'échange convectif à l'interface, avec $h = 1,52 |T_u - T_l|^{\frac{1}{3}}$ [61] et A_{room} est l'aire du plancher du local ;
- $\dot{h}^{rad}$: terme source d'enthalpie relatif aux échanges radiatifs au sein de chaque zone.

Bilan de quantité de mouvement à l'interface

L'équation de quantité de mouvement régissant le déplacement de l'interface entre les deux zones est donnée par :

$$\frac{dm_u u_{interface}}{dt} = qm^{pan} + (p_u - p_l)A_{room} - g m_u \quad (4-6)$$

où $u_{interface}$ est la vitesse de l'interface et qm^{pan} la quantité de mouvement apportée par le panache au niveau de l'interface.

Le volume de chaque zone est alors directement relié à la vitesse de l'interface grâce aux relations suivantes :

$$\frac{dV_u}{dt} = -u_{interface}A_{room} \quad (4-7a)$$

$$\frac{dV_l}{dt} = +u_{interface}A_{room} \quad (4-7b)$$

Le calcul du volume de la zone froide permet d'accéder à la hauteur de l'interface de fumée :

$$z_{interface} = V_l/A_{room} \quad (4-8)$$

Equation d'état

La température et la masse de gaz dans chaque zone est déduite de la loi des gaz parfaits :

$$\rho_u V_u = m_u R T_u \quad (4-9a)$$

$$\rho_l V_l = m_l R T_l \quad (4-9b)$$

Compte tenu du faible pas de temps imposé par le critère CFL, un simple schéma d'Euler explicite peut être utilisé pour la résolution du système d'équations différentielles ordinaires (4-1) à (4-7). Un processus itératif permet d'obtenir la solution instationnaire à chaque pas de temps.

Sous-modèles

Le modèle inclut des sous-modèles pour le calcul du panache, de la combustion mono- et multi-combustible, des échanges radiatifs au sein du gaz et avec les parois, des échanges convectifs entre le gaz et les parois, mais aussi au niveau de l'interface, ainsi que des échanges conductifs aux parois.

Pour le calcul des échanges de chaleur, les parois du local sont découpées en 4 ou 10 éléments (Figure 11), selon que le problème est symétrique ou non, au regard des dimensions et de l'emplacement des parois, et de la position du foyer. Par exemple, le modèle utilisera 4 éléments de paroi si le local est cubique et que le foyer est placé au centre du plancher. Chaque élément de paroi est supposé à température uniforme.

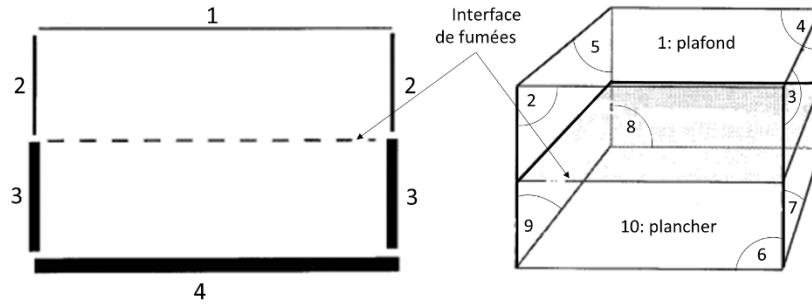


Figure 11 : Modèles à 4 et 10 éléments de paroi.

Panache

Le panache permet le transfert de masse et d'énergie de la zone froide vers la zone chaude. Différentes théories ont été développées pour calculer les propriétés du panache. La théorie d'Heskestad [62] est ici utilisée pour évaluer le débit et la vitesse moyenne de l'air entraîné par le panache qui interviennent dans les équations générales du modèle.

Rayonnement

Le terme source d'enthalpie relatif aux échanges radiatifs, $\dot{h}^{rad}$, qui apparaît dans l'équation de l'énergie, mais aussi les flux radiatifs nets utilisés pour le calcul de la conduction aux parois sont calculés à l'aide de la méthode développée dans la référence [63] pour un local à 4 ou 10 éléments de paroi. Le sous-modèle de rayonnement prend en compte la contribution radiative (émission et absorption) du mélange gazeux, composé d'espèces gazeuses participatives (ici, CO_2 , H_2O) et de particules de suie.

Conduction

Le transfert de chaleur par conduction est résolu en dans la direction normale à l'élément de paroi (ici, dans la direction x) :

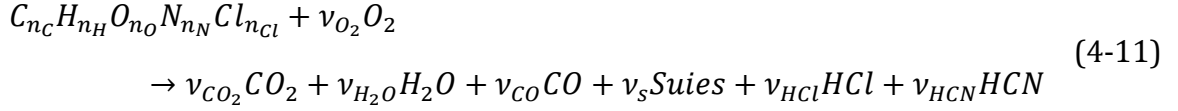
$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (4-10)$$

Cette équation est discrétisée par la méthode des volumes finis en utilisant un maillage uniforme afin de calculer précisément les gradients thermiques de part et d'autre de la paroi. La taille de maille est alors déterminée par la relation : $\Delta x_{min} = \sqrt{\frac{\lambda}{\rho c_p}}$ où λ , ρ et c_p sont respectivement la conductivité thermique, la masse volumique et la chaleur spécifique du matériau qui constitue l'élément de paroi. Ces propriétés thermiques peuvent varier en fonction de la température.

Si l'élément de paroi est constitué de plusieurs matériaux, la résolution est inchangée, mais la conductivité thermique à l'interface entre ces matériaux est calculée à l'aide d'une moyenne harmonique [65]. Le système algébrique obtenu après discrétisation est résolu par l'algorithme de Thomas [65].

Combustion

La réaction de combustion d'un combustible de formule chimique, $C_{n_C}H_{n_H}O_{n_O}N_{n_N}Cl_{n_{Cl}}$, est représentée par une équation à une étape :



Les coefficients stœchiométriques sont alors donnés par :

$$\begin{aligned} \nu_s &= y_s \frac{M_{fuel}}{M_{suies}} \\ \nu_{CO} &= y_{CO} \frac{M_{fuel}}{M_{CO}} \\ \nu_{CO_2} &= n_C - (\nu_{CO} + \nu_{HCN} + \nu_s) \\ \nu_{H_2O} &= 0,5 [n_H - (\nu_{HCl} + \nu_{HCN})] \\ \nu_{O_2} &= \nu_{CO_2} + 0,5 (\nu_{H_2O} + \nu_{CO} - n_O) \\ \nu_{HCl} &= n_{Cl} \\ \nu_{HCN} &= \min \left(n_N ; y_{HCN} \frac{M_{fuel}}{M_{HCN}} \right) \end{aligned} \quad (4-12)$$

où y_s, y_{CO} et y_{HCN} sont les rendements prescrits de suies, de CO et de HCN , du combustible.

Le débit de pyrolyse $\dot{m}^{pyr}$ étant prescrit, la puissance libérée par la combustion se déduit de la relation :

$$HRR = \dot{m}^{pyr} \Delta h_{eff} \quad (4-13)$$

où Δh_{eff} est la chaleur de combustion effective du combustible [61].

Dans le cas où le feu est sous-oxygéné, la puissance libérée dépend de la quantité d'oxygène disponible [16] :

$$HRR = \min(\dot{m}^{pyr} \Delta h_{eff}, \dot{m}^{ent} Y_{O_2} C_{LII} \Delta h_{O_2}) \quad (4-14)$$

où Y_{O_2} est la fraction massique d'oxygène dans la zone du feu, Δh_{O_2} la chaleur de combustion basée sur la consommation d'oxygène, prise par défaut à $13,1 \text{ MJ/kg}$ [64], et C_{LII} , une fonction d'amortissement comprise entre 0 et 1 [16].

La puissance est libérée ensuite sous forme convective et radiative :

$$HRR_{conv} = \chi_r HRR \quad (4-15a)$$

$$HRR_{rad} = (1 - \chi_r) HRR \quad (4-14b)$$

Où χ_r est la fraction rayonnée [61].

Concept de combustible équivalent

L'une des originalités du modèle est de pouvoir simuler la combustion de plusieurs combustibles présents dans un même local.

L'approche consiste à définir à chaque instant une molécule fictive de combustible dont les nombres d'atomes n_C, n_H, n_O, n_N et n_{Cl} varient au cours du temps en fonction des molécules initiales et des débits de combustion des combustibles impliqués.

Par exemple, si deux combustibles, référencés 1 et 2, sont susceptibles de brûler, le nombre d'atomes de carbone de la molécule équivalente sera calculée de la façon suivante :

$$n_C^{eq}(t) = \frac{n_C^1 \dot{m}_1^{pyr}(t) + n_C^2 \dot{m}_2^{pyr}(t)}{\dot{m}^{pyr}(t)} \quad (4-16)$$

avec :

- $\dot{m}_1^{pyr}$: débit de pyrolyse prescrit du combustible 1 ;
- $\dot{m}_2^{pyr}$: débit de pyrolyse prescrit du combustible 2 ;
- $\dot{m}^{pyr}(t) = \dot{m}_1^{pyr}(t) + \dot{m}_2^{pyr}(t)$;
- n_C^1 : le nombre d'atomes de carbone de la molécule du combustible 1 ;
- n_C^2 : le nombre d'atomes de carbone de la molécule du combustible 2.

On procède de même pour les nombres d'atomes d'hydrogène, d'oxygène, d'azote et de chlore de la molécule équivalente.

L'intérêt de cette formulation est qu'elle respecte les règles stœchiométriques et qu'elle ne modifie pas la chimie de la combustion, même sous-oxygénée. Il convient néanmoins de recalculer certaines propriétés du combustible équivalent, comme le rendement de suie, de CO et de HCN, la chaleur de combustion effective et la fraction rayonnée par la flamme. Pour un mélange de N combustibles, elles s'expriment comme :

$$\text{Rendement : } y^{eq}(t) = \frac{\sum_{i=1}^N y_i \dot{m}_i^{pyr}(t)}{\sum_{i=1}^N \dot{m}_i^{pyr}(t)} \quad (4-17a)$$

$$\text{Chaleur de combustion effective : } \Delta h_{eff}^{eq}(t) = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta h_{eff,i} \dot{m}_i^{pyr}(t)}{\sum_{i=1}^N \dot{m}_i^{pyr}(t)} \quad (4-16b)$$

$$\text{Fraction rayonnée : } \chi_r^{eq}(t) = \frac{\sum_{i=1}^N \chi_{r,i} \Delta h_{eff,i} \dot{m}_i^{pyr}(t)}{\sum_{i=1}^N \dot{m}_i^{pyr}(t) \Delta h_{eff,i}} \quad (4-16c)$$

Evaluation de la chaleur de combustion

La limitation des modèles à zones comme des codes de CFD est la difficulté de prédiction du débit de pyrolyse $\dot{m}$ (en kg/s), et donc du débit calorifique HRR (W), ces deux grandeurs étant liées par la relation $HRR = \dot{m} \Delta h_{eff}$. C'est pourquoi le débit est généralement prescrit. Pour des feux de puissance moyenne, la perte de masse du combustible mesurée en cours d'essai permet d'accéder à l'évolution temporelle du débit de pyrolyse. Pour des feux de plus forte puissance, nous avons développé une méthode de « mise à l'échelle » permettant d'estimer, en première approximation, le HRR en nous basant sur la corrélation de Babrauskas, un profil de feu en αt^2 et les résultats d'essais menés dans le caisson DIAMAN.

Evolution du HRR

Dans la procédure de « mise à l'échelle », on suppose que l'évolution temporelle du HRR suit trois phases : une phase de croissance, suivie d'une phase où le HRR est constant, puis une phase de décroissance jusqu'à extinction, de sorte que :

$$HRR = \begin{cases} \alpha_c t^2 & \text{si } t < t_{fd} \\ HRR_{max} & \text{si } t_{fd} \leq t \leq t_d \\ \alpha_d (t_{fin} - t)^2 & \text{si } t_d \leq t \leq t_{fin} \\ 0 & \text{si } t > t_{fin} \end{cases} \quad (4-18)$$

où :

- α_c : le taux de croissance. La valeur du taux de croissance est généralement comprise entre 3 W/s² pour une vitesse de combustion lente et 190 W/s² pour une vitesse très rapide ;
- α_d : le taux de décroissance en W/s² ;
- HRR_{max} : la puissance maximale du feu en W ;
- t_{fd} , t_d et t_{fin} : les instants (en secondes) où le feu atteint sa puissance maximale (feu pleinement développé), commence à décroître et s'éteint.

Le calcul du HRR nécessite de connaître la masse initiale de combustible m_0 , la puissance maximale du feu HRR_{max} et son taux de croissance α_c , mais aussi le pourcentage p de la masse initiale de combustible au-delà duquel la décroissance du feu a lieu.

Après quelques calculs, on obtient finalement les relations suivantes :

$$t_{fd} = \left(\frac{HRR_{max}}{\alpha_c} \right)^{0.5} \quad (4-19)$$

$$t_d = t_{fd} + \frac{p m_0 \Delta h_{eff} - \frac{1}{3} \alpha_c t_{fd}^3}{HRR_{max}} \quad (4-20)$$

$$\alpha_d = \frac{HRR_{max}^3}{[3m_0(1-p)]^2} \quad (4-21)$$

$$t_{fin} = t_d + \left(\frac{HRR_{max}}{\alpha_d} \right)^{0.5} \quad (4-22)$$

Bien qu'elle ait été établie pour des feux brûlant à l'air libre, la formule de Babrauskas [66] a été utilisée pour rendre compte de la dépendance fonctionnelle du débit surfacique de combustion avec le diamètre :

$$\dot{m}'' = \dot{m}''_{\infty} (1 - e^{-\kappa\beta D}) \quad (4-23)$$

Celle relation relie, pour un combustible donné, le débit de combustion surfacique d'une nappe de diamètre D , à celui d'une nappe de taille infinie $\dot{m}''_{\infty}$, via le coefficient d'extinction de la nappe $k\beta$. Les valeurs de $\dot{m}''_{\infty}$ et $k\beta$ ont été déterminées par Babrauskas pour un grand nombre de combustibles [66].

Validation de la méthode

La procédure consiste tout d'abord à déterminer un jeu optimal de paramètres (HRR_{max1} , α_c et p), i.e. conduisant au meilleur accord entre les résultats donnés par la relation (4-18) et les mesures expérimentales obtenues lors d'un seul essai de feu de nappe de diamètre D_1 du combustible considéré.

On détermine ensuite, grâce à la relation (4-23), la puissance maximale HRR_{max2} d'un feu, noté 2, de diamètre D_2 , de la façon suivante :

$$\frac{HRR_{max2}}{HRR_{max1}} = \frac{\dot{m}_2'' \Delta h_{eff}}{\dot{m}_1'' \Delta h_{eff}} \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 = \frac{1 - \exp^{-k\beta D_2}}{1 - \exp^{-k\beta D_1}} \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 \quad (4-24)$$

le paramètre $k\beta$ étant supposé intrinsèque au combustible.

La procédure a été vérifiée en comparant les puissances de feux d'heptane et de JP5 (code OTAN : F44) de 0,3 et 0,7 m de diamètre, en utilisant les jeux de paramètres (HRR_{max} , α_c et p) établis pour des nappes de 0,5 m de diamètre. On rappelle que pour l'heptane, la chaleur de combustion effective $\Delta h_{eff} = 41,2 \times 10^6$ J/kg [61] et le coefficient d'extinction $k\beta = 1,1 \text{ m}^{-1}$ [66], et que, pour le JP5 : $\Delta h_{eff} = 40 \times 10^6$ J/kg [61] et $k\beta = 1,6 \text{ m}^{-1}$ [66].

L'évolution temporelle du HRR de ces feux est donnée sur la Figure 12. Elle montre un accord satisfaisant en termes de durée et de puissance maximale du feu.

NB : Les effets de bord du bac de combustible en fin d'essai, que l'on distingue nettement sur les évolutions du HRR , notamment pour des diamètres de nappe de 0,5 et 0,7 m, ne peuvent pas être reproduits par la relation (4-18), ce qui n'est pas plus mal dans la mesure où cet artefact expérimental n'existe pas en conditions réelles de feu.

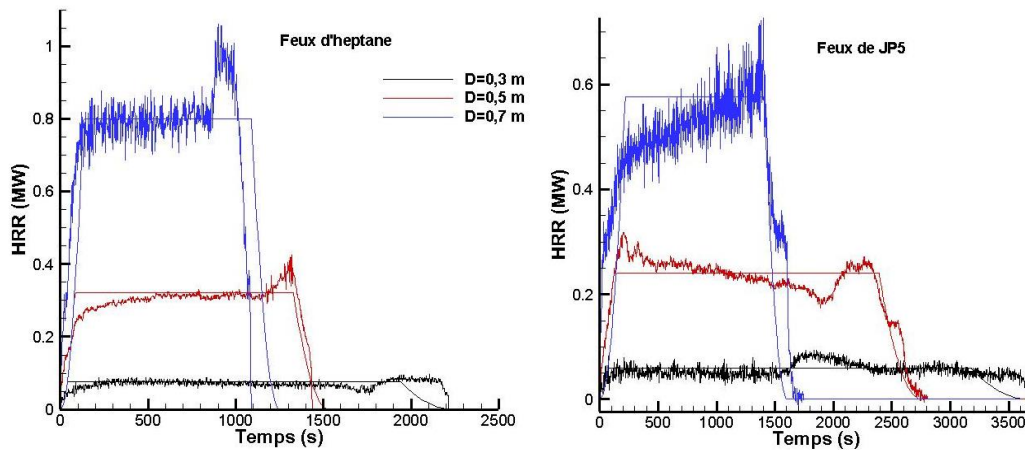


Figure 12 : Evolution temporelle du *HRR* (en MW) pour des feux d'heptane et de JP5 de 0,3, 0,5 et 0,7 m de diamètre.

La procédure décrite ci-dessus a été utilisée pour évaluer la chaleur libérée par des feux de forte puissance, les résultats que nous avons obtenus à moyenne puissance dans le dispositif DIAMAN ayant servi de référence pour cette évaluation.

4.1.2 Entrées et sorties du modèle

- Le modèle utilise les bases de données "combustibles" et "matériaux", donnant les propriétés des combustibles impliqués et des matériaux constitutifs des cloisonnements.

Pour chacun des combustibles impliqués dans le feu, un fichier donnant le débit de combustion en fonction du temps est nécessaire. Il peut être déterminé expérimentalement ou à partir de la procédure de « mise à l'échelle ».

Toutes les autres données sont contenues dans un autre fichier, à savoir :

- Le nombre d'éléments de paroi : 4 ou 10 ;
- Le pas d'intégration en temps ;
- La durée de simulation ;
- Le nombre et la nature des combustibles présents dans le local ;
- Les dimensions du local ;
- L'emplacement et les dimensions du foyer ;
- La nature (ouvertures de ventilation naturelle ou forcée) et la position des ouvertures. Si la ventilation est mécanique, le débit d'admission ou d'extraction est imposé ;

- La nature et le nombre des matériaux qui constituent les parois, ainsi que leur épaisseur ;
- La teneur minimale en oxygène, en-deçà de laquelle la combustion n'a pas lieu ;
- Les conditions extérieures (pression, température et humidité relative) ;
- La chaleur spécifique et le rapport des chaleurs spécifiques du gaz ;
- Le critère d'occurrence de l'embrasement généralisé. Ce critère porte sur la température du gaz ;
- Le critère de transmission du feu par les parois (durée de tenue au feu). Ce critère porte sur la température des éléments de paroi.

En sortie, le modèle fournit :

- L'instant où l'embrasement généralisé a lieu, s'il se produit ;
- La durée de tenue au feu des parois ;
- L'évolution temporelle des grandeurs en zone chaude et froide (pression, température, masse volumique, volume, concentration des espèces chimiques, températures intérieures et extérieures des éléments de parois, etc.) ;
- Le débit de fumée sortant du local par les ouvertures de ventilation naturelle ;
- La position de l'interface au cours du temps ;
- La puissance au cours du temps et sa valeur maximale ;
- L'énergie totale libérée par le feu.

4.1.3 Validation du modèle à zones

Présentation du dispositif expérimental

Le dispositif DIAMAN est composé de deux locaux cubiques adjacents de 27 m³ chacun. Il possède deux portes étanches de 1 m × 2 m en acier, l'une donnant vers l'extérieur, l'autre disposée sur la cloison de séparation des locaux (Figure 13). Les parois du caisson, ainsi que les portes ont une épaisseur de 1 cm. Un système d'aspersion d'eau (brouillard, spray ou déluge) peut être utilisé pour interrompre l'essai à tout moment si cela s'avère nécessaire.



Figure 13 : Vues générales du caisson DIAMAN.

Le caisson dispose de quatre fenêtres de visualisation rectangulaires en Pyrex® de 200mm×300mm sur les faces F (FRONT) et B (BACK) (en vert sur la Figure 14). Il dispose également de quatre ouvertures de 100mm×200mm au sol pour le passage de l'instrumentation (non visible sur la Figure 14) et de sept ouvertures circulaires de diamètre 200 mm pour la ventilation: 2 bouches d'admission (basse et haute) sur la face W (WEST) du local 1 (en bleu sur la Figure 14), 1 bouche d'extraction en plafond dans chacun des locaux (en rouge sur la Figure 14), 3 ouvertures pour le passage de gaines, en partie haute des parois W et E (EAST) et de la cloison (en orange sur la Figure 14). Les faces W et E du caisson et la cloison comportent des ouvertures de 800mm×300mm, équipées de guillotines réglables en hauteur. La position de ces ouvertures est indiquée sur la Figure 14.

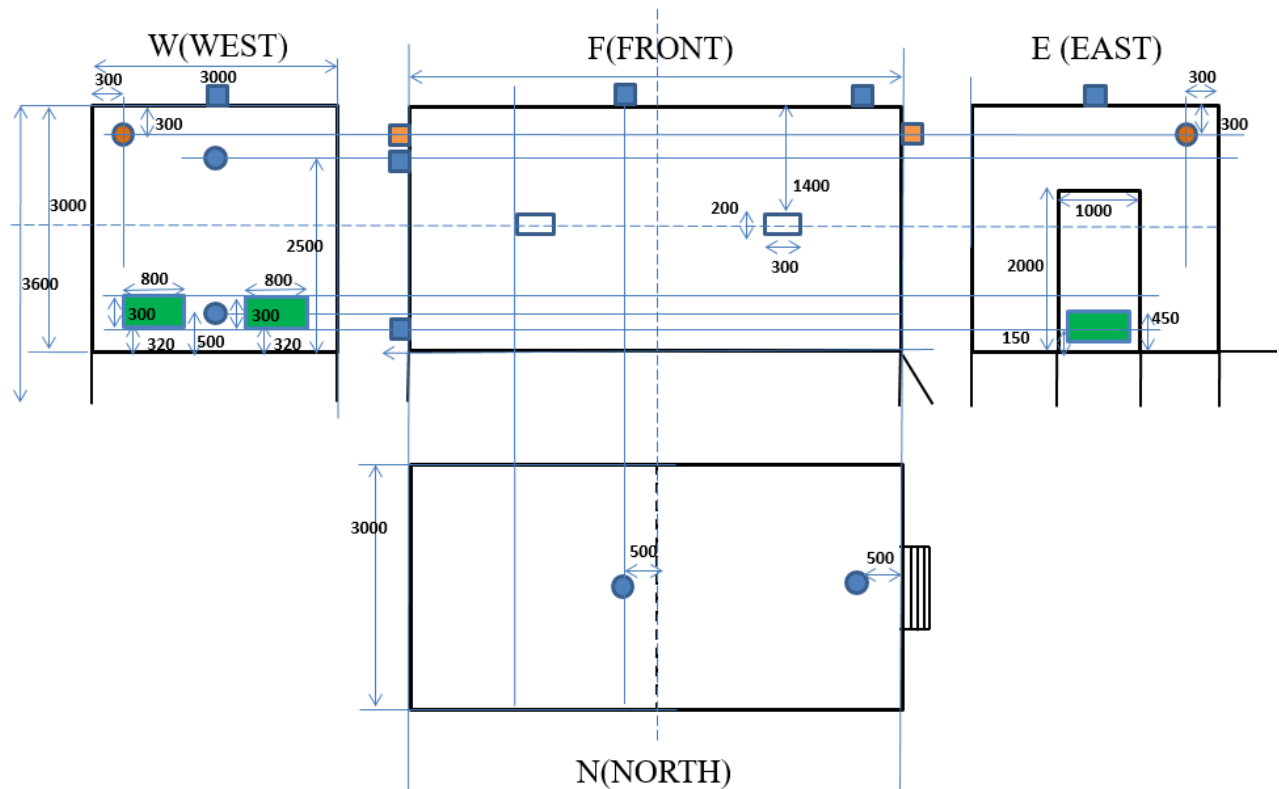


Figure 14 : Ensemble des vues du caisson (dimensions en mm).

Le caisson dispose de deux types de ventilation :

- Ventilation mécanique : l'admission d'air peut se faire en partie haute et en partie basse du local source. L'extraction en plafond peut se faire dans un seul local ou simultanément dans les deux locaux (Figure 15 et Figure 16), avec un taux maximal de 30 renouvellements à l'heure.
- Ventilation naturelle : les guillottes réglables en hauteur permettent de modifier la surface de l'ouverture pour moduler l'apport d'air frais venant de l'extérieur.

L'instrumentation comprend :

- Une caméra CCD permettant d'étudier le comportement général du foyer ;
- Une balance de précision SARTORIUS, placée dans une boîte en acier inox, isolée thermiquement, pour la mesure de la perte de masse du combustible au cours du temps (gamme : 0-150 kg à ± 1 g, avec un temps de réponse de 0,1 s) ;
- Des thermocouples pour la mesure des températures de paroi et des températures de gaz à l'intérieur des locaux (Figure 17 et Figure 18) ;
- Un fluxmètre refroidi total mis en place au centre de la face FRONT à 2 m de hauteur ;

- Des tubes de Pitot avec ou sans thermocouple intégré. Chaque branche d'admission possède deux tubes de Pitot, dont un avec thermocouple intégré. Un tube de Pitot avec thermocouple est placé sur chaque branche d'extraction ;
- Deux analyseurs de gaz, un par local, pour les mesures concomitantes de O_2 , CO et CO_2 localisés dans le caisson feux à 1,4 m de hauteur et à 50 cm des parois FRONT et EAST ;
- Une prise de mesure de pression statique dans chaque local. Un capteur associé à une « queue de cochon » permet la mesure de la différence de pression entre l'intérieur du local et la pression atmosphérique. Cette queue de cochon permet de refroidir le gaz prélevé, par simple dissipation, afin de ne pas endommager le capteur de pression.

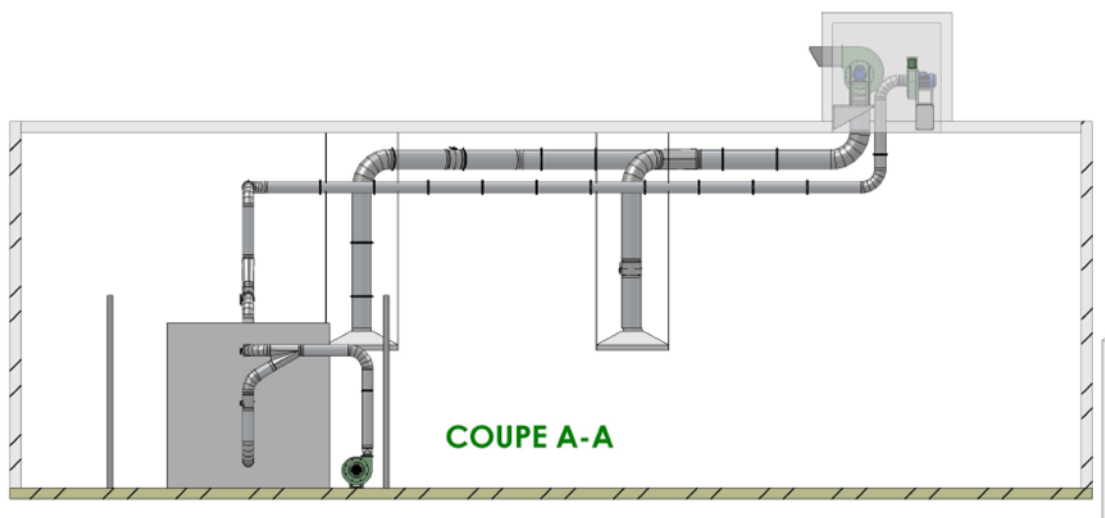


Figure 15 : Réseau de ventilation mécanique du caisson feu.



Figure 16 : Gaines de ventilation pour l'admission et l'extraction d'air.

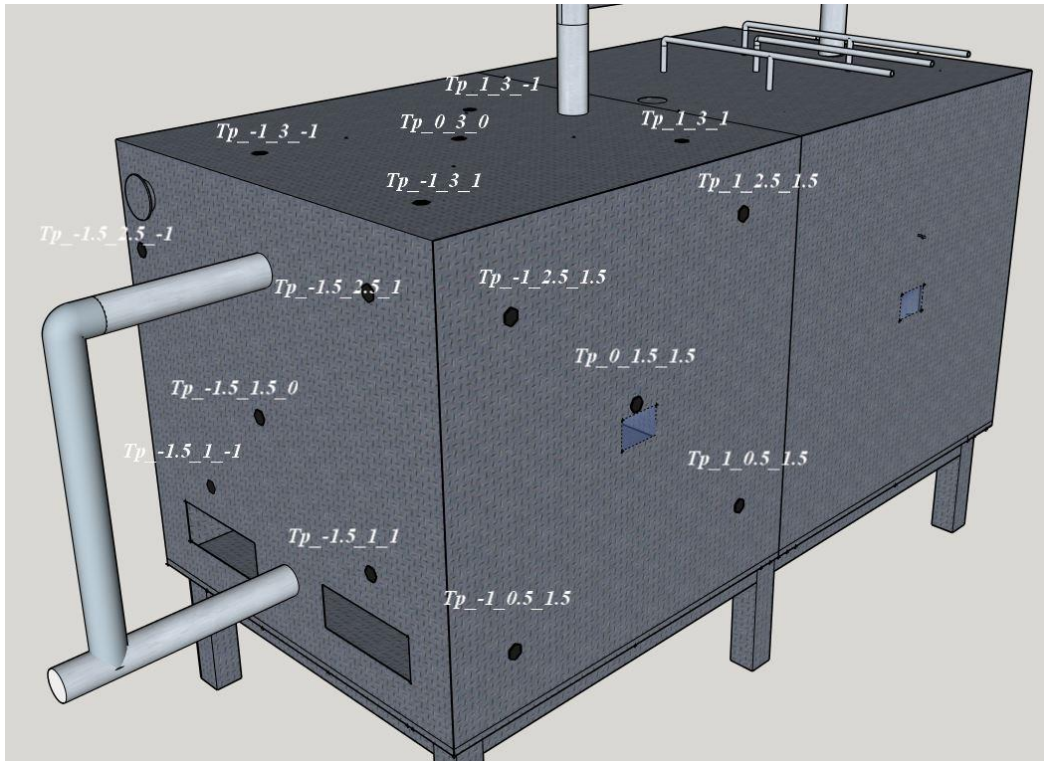


Figure 17 : Position des thermocouples sur les parois. On note $Tp_{x_y_z}$ la température de la paroi en x , y et z .

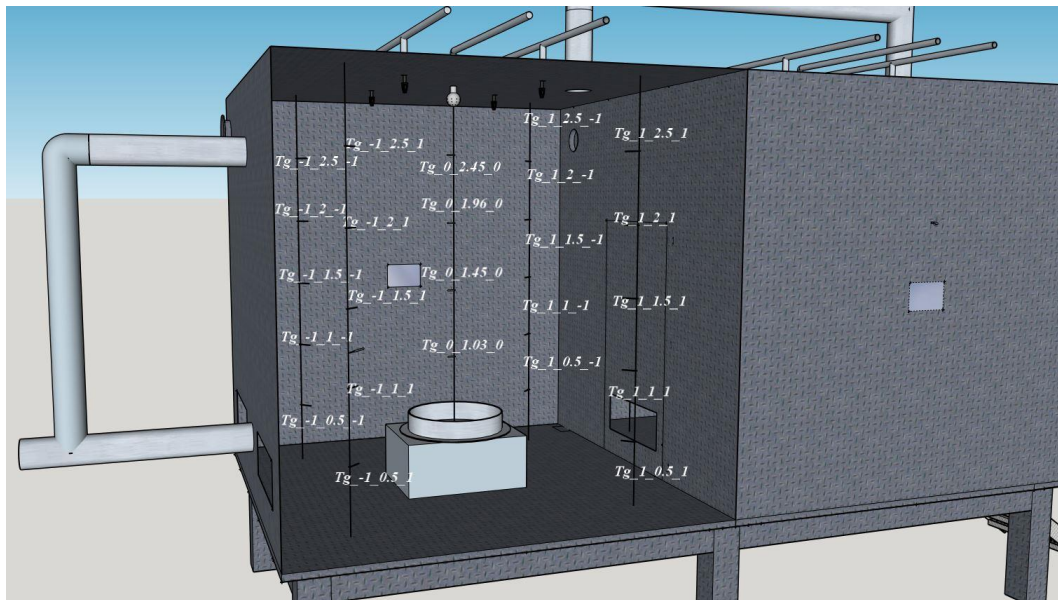


Figure 18 : Position des thermocouples à l'intérieur des locaux. On note $Tg_{x_y_z}$ la température du gaz en x , y et z .

Présentation des essais

Plusieurs campagnes d'essais ont été réalisées dans le caisson DIAMAN et ont permis la validation du modèle à zones dans différentes configurations, en termes de foyer (mono- ou multi-combustible, type et charge de combustible(s)) et de conditions de ventilation.

Deux essais sont présentés ici, utilisant des combustibles représentatifs de ceux que l'on peut trouver à bord des bâtiments de la Marine Nationale et dans le domaine civil. Le premier essai porte sur la combustion d'une nappe d'heptane ; le second, sur celle de deux combustibles, l'heptane et le poly(méthacrylate de méthyle) ou PMMA.

Pour ces deux essais, la porte de communication entre les locaux a été maintenue fermée et le débit d'extraction du local source fixé à 800 m³/h.

Feu mono-combustible d'heptane

Pour cette configuration mono-combustible, une nappe d'heptane de 12 L a été placée au centre du local source. La Figure 20 présente les évolutions temporelles du débit de combustion d'heptane et des températures de gaz dans un coin du local. Nous observons une durée de combustion de 750 s environ, avec une production modérée de fumées et une interface positionnée à 80 cm environ de hauteur (Figure 19).



Figure 19 : Feu d'heptane : vue générale du foyer après 250 s de feu.

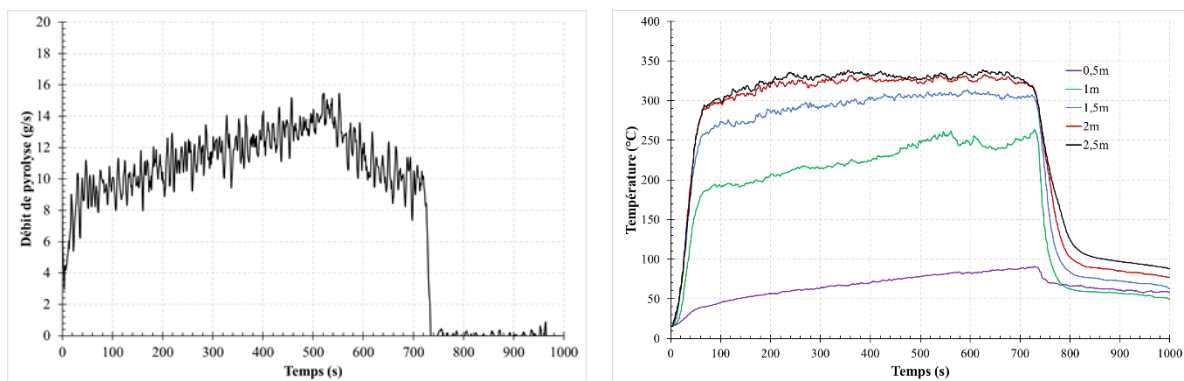


Figure 20 : Feu d'heptane : débit de combustion (à gauche) et température du gaz à différentes hauteurs dans un coin du local (à droite).

Feu multi-combustible d'heptane et de PMMA

La configuration spécifique aux foyers multi-combustible est présentée sur la Figure 21. Elle permet la pesée séparée des deux combustibles.

L'essai présenté correspond à un feu multi-combustible impliquant une nappe de 8 L d'heptane, placée au centre du local source, et une plaque de 7 kg de poly(méthacrylate de méthyle) ou PMMA, disposée dans un bac, le tout légèrement décalé vers une des parois du local source.

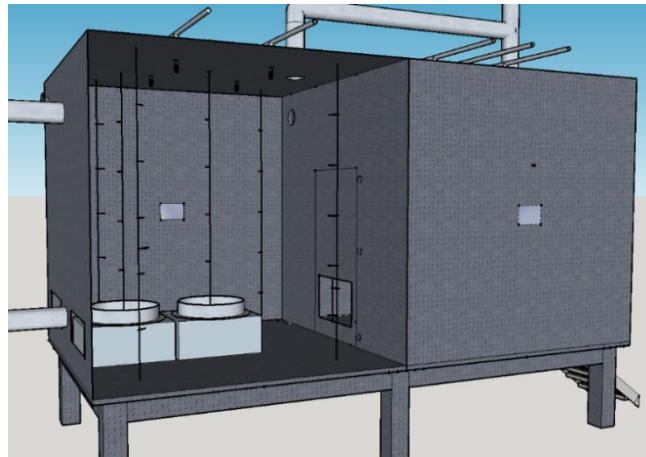


Figure 21 : Configuration du dispositif DIAMAN pour les essais de feux multi-combustible.

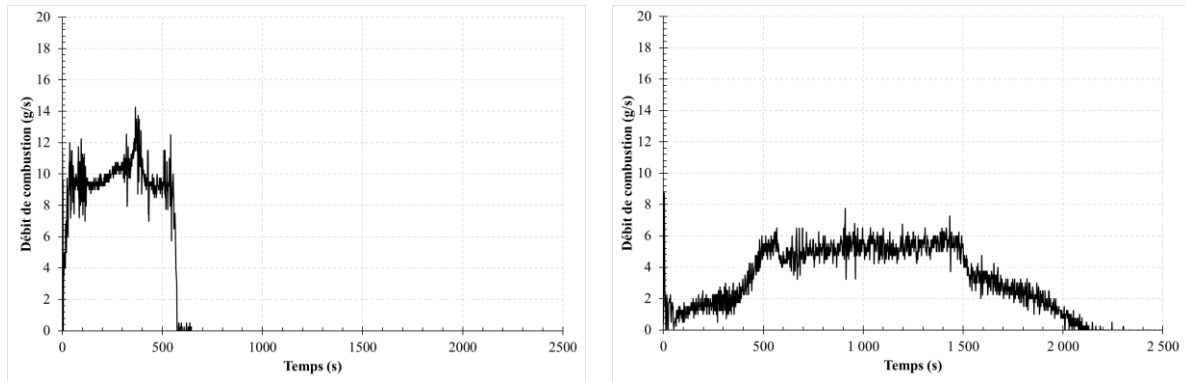
L'essai présenté correspond à feu multi-combustible impliquant une nappe de 8 L d'heptane, placée au centre du local source, et une plaque de 7 kg de poly(méthacrylate de méthyle) ou PMMA, disposée dans un bac, le tout légèrement décalé vers une des parois du local source. La figure ci-dessous montre une vue générale du foyer après 540 s de feu.



Figure 22 : Feu d'heptane et de PMMA : vue générale du foyer après 540 s de feu.

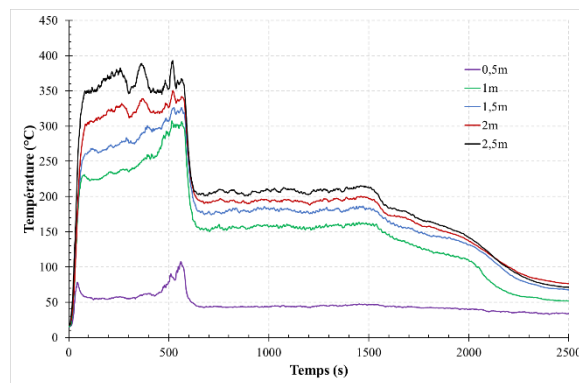
La Figure 23 présente les évolutions temporelles des débits de combustion et des températures de gaz mesurées dans un coin du local à différentes hauteurs.

La comparaison des diagrammes (a) et (b) montre des cinétiques de combustion très différentes entre l'heptane et le PMMA, ce qui rend cet essai particulièrement intéressant à modéliser. Comme le montre le diagramme (c), la température du gaz évolue d'abord comme si l'heptane était pratiquement seul, puis subit ensuite une légère augmentation en raison de la combustion concomitante des deux combustibles, pour enfin atteindre un plateau résultant de la combustion seule du PMMA.



a) Débit de combustion d'heptane

b) Débit de combustion du PMMA



c) Température du gaz à différentes hauteurs dans un coin du local

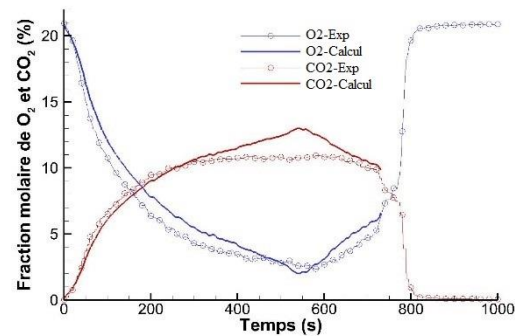
Figure 23 : Feu d'heptane et de PMMA : débits de combustion et température de gaz.

Comparaison modèle à zones/essais

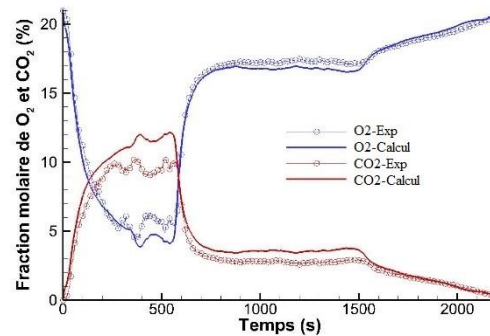
Le modèle à zones fournit des températures moyennes sur les éléments de parois situées dans les couches chaude et froide, mais ne permet pas d'accéder à des valeurs locales, comme celles mesurées par les thermocouples. Nous avons donc choisi de comparer la température moyenne des parois latérales, issue des mesures, et les températures de paroi prédites en couches chaude et froide. La comparaison a porté également sur les fractions molaires de O_2 et CO_2 à l'extraction et sur la température moyenne du gaz.

Comme le montrent les diagrammes (a) de la Figure 24 et de la Figure 25, le modèle à zones reproduit de façon satisfaisante la déplétion d'oxygène, la production de CO_2 et le retour à des conditions atmosphériques, ce qui consolide le concept de combustible équivalent. L'accord sur les températures moyennes de gaz (Figure 24b et Figure 25b) est excellent, ainsi que sur la température de plafond pour le feu d'heptane (Figure 24c).

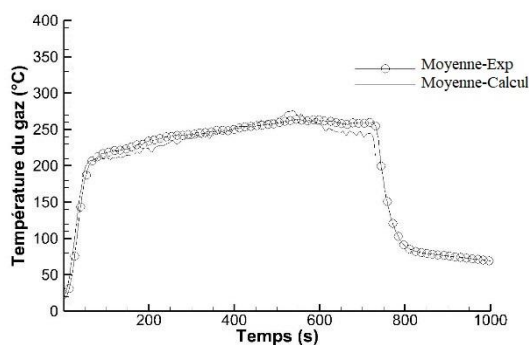
Néanmoins, sur le diagramme c de la Figure 25, relative au feu combiné d'heptane et de PMMA, on note une surestimation de la température en plafond, sans doute due au panache impactant. Ce dernier point pourrait être corrigé par l'utilisation d'autres corrélations que celle d'Heskestad (voir §4.1), mais il permet cependant de donner un caractère dimensionnant aux échanges en plafond.



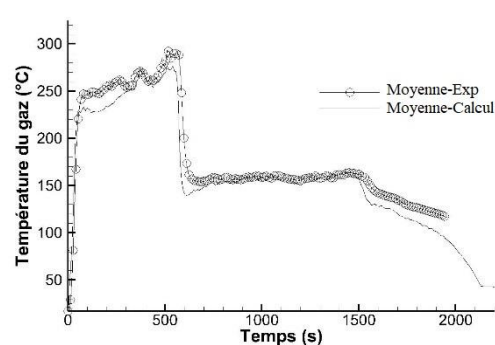
a) Fractions molaires de O_2 et CO_2 à l'extraction



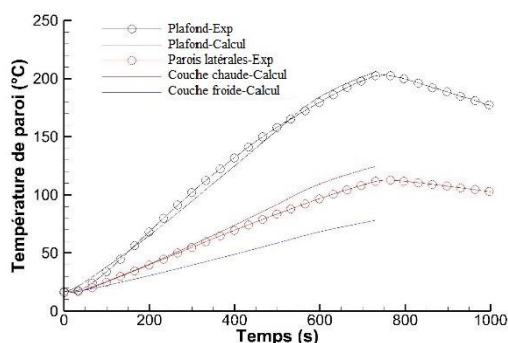
a) Fractions molaires de O_2 et CO_2 à l'extraction



b) Températures moyennes du gaz

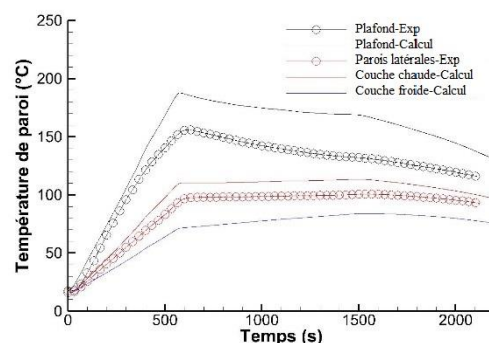


b) Températures moyennes du gaz



Températures moyennes en plafond ;
Température moyenne des parois latérales
mesurée vs températures de paroi prédites
en couches chaude et froide

Figure 24 : Feu d'heptane : comparaison
modèle à zones/essais.



c) Températures moyennes en
plafond ; Température moyenne des
parois latérales mesurée vs
températures de paroi prédites en
couches chaude et froide

Figure 25 : Feu d'heptane et de PMMA :
comparaison modèle à zones/essais.

4.2 Code CFD SAFIR

Le code SAFIR [16] permet une description tridimensionnelle, stationnaire ou instationnaire, de l'écoulement compressible et réactif, à bas nombres de Mach et de Froude, caractéristique d'un incendie. Dans l'hypothèse d'un faible nombre de Mach, la masse volumique du gaz est calculée à la pression thermodynamique. Elle permet de filtrer les ondes acoustiques tout en autorisant de fortes variations de masse volumique et de température.

L'ensemble des phénomènes de base qui régissent le développement et la propagation du feu sont pris en compte : transports de gaz, turbulence, combustion turbulente et rayonnement, au travers des équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement, de l'énergie et des espèces, de transport de l'énergie cinétique turbulente et de son taux de dissipation, et de l'équation de transfert radiatif. Le code prend en compte la présence de régions dites bloquées, régions solides présentes dans le domaine de calcul (bac de combustible, cloisons, obstacles ...) [67, 68].

4.2.1 Fonctionnalités du code

Par souci de concision, seules les fonctionnalités du code SAFIR sont présentées ci-dessous, ainsi que les extensions relatives aux applications des projets MARINER-DECM et LASHFIRE. Pour plus de détails sur le modèle mathématique et la méthode de résolution, le lecteur pourra se référer à la thèse de M. Mense [45].

Aspects physiques

- Configuration géométrique : mono ou multi-compartiment.
- Régime d'écoulement : stationnaire ou instationnaire
- Prise en compte de régions bloquées présentes dans le domaine
- Phase gazeuse : newtonienne et constituée au maximum de 8 espèces chimiques gazeuses (i.e., le combustible de formule chimique $C_{n_c}H_{n_H}O_{n_O}Cl_{n_{Cl}}N_{n_N}, CO, O_2, H_2O, HCl, HCN, N_2$) et de particules de suie.
- Le nombre de Lewis (rapport du nombre de Prandtl et de Schmidt) de l'écoulement est unitaire et les coefficients de diffusion thermique et de diffusion des espèces chimiques sont égaux (flamme équidiffusive).
- Coefficients de transport de la phase gazeuse : la viscosité dynamique moléculaire et les propriétés thermodynamiques de chacune des espèces gazeuses dépendent de la température du gaz.
- Turbulence : La turbulence est décrite par le modèle $k - \epsilon$ standard [69], incluant des termes de production/destruction de turbulence due à la gravité. Ces termes

de flottabilité sont modélisés par une approche de type SGDH (Simple Gradient Diffusion Hypothesis) ou GGDH (Generalized Gradient Diffusion Hypothesis).

- Combustion : schéma réactionnel à 1 étape, incluant la formation de CO , HCl , HCN et de suies, avec la possibilité d'introduire une limite inférieure d'inflammabilité [70]. La production de CO et HCN , en kg produits par kg de combustible consommé, repose sur la donnée de rendements ou taux de conversion, fixés par l'utilisateur.
- Combustion turbulente : Le modèle « Eddy Dissipation » de Magnussen et Hjertager [71] est utilisé pour le calcul du taux de consommation du combustible. Il est basé sur l'hypothèse de chimie rapide, le taux de réaction étant contrôlé par le mélange turbulent.
- Rayonnement : la phase gazeuse est considérée comme un milieu gris absorbant, émettant et non diffusant. Le rayonnement est calculé par l'équation de transfert radiatif (ETR) [72]. La contribution des suies au coefficient d'absorption est calculée à partir de la fraction volumique de suies f_{vs} et de la température du gaz par la relation de Kent et Honnery [73] ; celle des espèces gazeuses hétéro-nucléaires (CO , CO_2 et H_2O) peut être calculée de deux façons différentes : par le modèle RADCAL [74] ou par la relation de Magnussen et Hjertager [71] selon que l'on considère ou non la dépendance en température du coefficient d'absorption de ces mêmes espèces. Le modèle de suie repose sur une seule équation de transport de la fraction massique de suies en considérant qu'une partie du combustible (quelques pourcents, typiquement) se transforment en suies. Les suies produites sont supposées en équilibre dynamique et thermique avec la phase gazeuse.
- Pression thermodynamique : en milieu ouvert ou faiblement confiné, la pression thermodynamique est supposée égale à la pression ambiante. En milieu confiné, notamment ventilé mécaniquement, elle peut évoluer au cours du temps en fonction des conditions de ventilation. Elle est alors calculée à partir de l'équation de bilan de masse étendue au volume du local.
- Conditions aux limites du domaine : différents types de limites sont considérés : paroi conductrice, plan de symétrie, frontière libre (écoulement entrant ou sortant), ouverture libre (écoulement entrant ou sortant) ou imposée (injection volumique, injection massique ou ventilation) en paroi.
- Loi de paroi : Aux parois et sur les faces des régions bloquées, l'énergie cinétique de turbulence et son taux de dissipation sont déterminés en utilisant une loi de paroi (LDP) hors-équilibre afin de traiter les zones de stagnation ou de séparation de l'écoulement [75].
- La conduction dans les régions « bloquées », mono ou multi-matériau, est traitée en résolvant l'équation 1D de la chaleur.

- Le coefficient de transfert de chaleur par convection peut être imposé aux parois et sur les faces des régions bloquées par l'utilisateur, calculé au moyen de corrélations empiriques [76] ou déduit de la LDP.
- Le code intègre une base de données « combustibles », incluant les coefficients des polynômes permettant de calculer la viscosité et la chaleur spécifique du gaz en fonction de la température, ainsi qu'une base de données des propriétés thermiques et radiatives de matériaux constitutifs des cloisonnements et autres régions bloquées.

Aspects numériques

- La résolution des équations de transport de la phase gazeuse, de type volumes finis, est totalement implicite, y compris aux parois et sur les faces des régions « bloquées », les limitations liées au pas d'intégration dans le temps ayant pour unique origine l'instationnarité de l'écoulement
- Les maillages du domaine, des parois et des régions bloquées, sont cartésiens non uniformes.
- Le couplage pression-vitesse est assuré par la procédure itérative PISO [77].
- Le couplage de toutes les équations de transport est obtenu par une autre procédure itérative qui englobe la précédente.
- L'ETR est résolue par la méthode des volumes finis ou des Ordonnées discrètes.

4.2.2 Extensions

La version originale du code SAFIR a été étendue de deux façons pour répondre aux objectifs des projets auxquels participent la société RS2N. La première extension a été rendue nécessaire pour prédire la propagation d'un véhicule à un autre dans un espace routier, la seconde pour évaluer les délais de détection de chaleur et de fumée.

Propagation du feu entre véhicules

La méthode Flux-Time Product (FTP), définie à l'origine par Smith et Satija [78], est un concept qui permet d'estimer le temps nécessaire à l'inflammation d'un matériau combustible exposé à un rayonnement incident. Le concept a ensuite été étendu par Smith et Green [79], Toal et al. [80], et Shields et al. [81], puis améliorée ensuite par Shields et al. [82] et Silcock et al. [83] pour y inclure des matériaux, comme des plastiques et du bois, de différentes épaisseurs thermiques.

Le concept est que lorsqu'un matériau combustible est exposé à un flux de chaleur externe, le FTP s'accumule jusqu'à dépasser une valeur critique où l'inflammation du matériau combustible se produit.

L'accumulation de FTP est calculée à chaque pas de temps comme suit :

$$FTP_i = \sum_{i=1}^m (\dot{q}''_i - \dot{q}''_{cr})^n \Delta t_i \quad (4-25)$$

où n est un exposant de la loi de puissance et $\dot{q}''_i$ et $\dot{q}''_{cr}$ correspondent respectivement au flux total reçu par le matériau au moment i et au flux critique du matériau combustible, en kW/m².

L'inflammation se produit lorsque FTP_i dépasse la valeur critique FTP_{cr} dépendant de la nature et de l'épaisseur du matériau exposé.

Cette méthode fournit des prédictions d'inflammation plus générales que les solutions thermiques classiques en permettant d'ajuster l'indice de la loi de puissance afin de reproduire au mieux les données expérimentales plutôt que de forcer une solution basée sur l'épaisseur physique de l'échantillon [84].

Les paramètres FTP sont connus pour une large gamme de matériaux solides [85].

Modèles de détecteurs

Deux modèles ont été implémentés dans le code SAFIR dans le but d'évaluer les temps de détection de chaleur et de fumée.

Pour la détection de chaleur, le modèle calcule la température du détecteur à l'aide d'une équation différentielle d'ordre un [86] :

$$\frac{dT_d}{dt} = \frac{u^{0,5}}{RTI} (T_g - T_d) \quad (4-26)$$

où T_d et T_g correspondent respectivement à la température du détecteur et à celle du gaz autour du détecteur, u à la vitesse du gaz au niveau du détecteur et RTI à un indice de temps de réponse du détecteur. La valeur utilisée dans les simulations est de $100 \text{ m}^{0,5} \cdot \text{s}^{0,5}$, comme celle préconisée par [87] pour des détecteurs de chaleur et de fumée combinés.

Le modèle de détecteur de fumées est basé sur la variation de la fraction massique de fumées dans la chambre de détection du détecteur [89] :

$$\frac{dY_c}{dt} = \frac{(Y_e - Y_c)}{L/u} \quad (4-27)$$

Avec Y_e et Y_c les fractions massiques de fumées dans l'écoulement hors du détecteur (kg/kg) et dans la chambre de détection, et L la longueur caractéristique du détecteur, dont la valeur par défaut est celle du modèle d'Heskestad [90], soit 1,8 m.

Le détecteur est activé lorsque Y_c devient supérieure à Y_e .

La fraction de fumées dans le détecteur $Y_c(t)$ est ensuite convertie en pourcentage d'obscurité par unité de longueur :

$$Obs = (1 - e^{-\kappa_m \rho Y_c l}) \times 100 \quad (4-28)$$

où :

- κ_m : coefficient d'extinction massique dont la valeur pour la plupart des combustibles est $8700 \text{ m}^2/\text{kg}$ [91] ;
- ρ : masse volumique du gaz à l'emplacement du détecteur ;
- l : longueur sur laquelle la lumière est atténuée (par défaut, 1 m).

Conformément aux normes définies par l'Organisation Maritime Internationale, à savoir les normes EN 54:2001 et IEC 60092:504 (FSS Ch. 9 §2.3.1 et MSC/Circ.1035 [88]), les limites supérieure et inférieure de la température d'activation ont été choisies respectivement à 54 et 78°C pour les détecteurs de chaleur, et une valeur d'obscurité de 12,5 %/m a été retenue pour l'activation des détecteurs de fumées.

Chapitre 5 Modélisation CFD de la propagation du feu par les gaines de ventilation

Lorsqu'un feu prend naissance dans un bâtiment, la ventilation est généralement en cours de fonctionnement. A la transmission du feu par les parois et les ouvertures s'ajoute alors la transmission par les gaines du réseau de ventilation. La transmission vers un local cible proche ou distant, jusqu'à l'arrêt de la ventilation consécutif à la détection du feu, peut se faire par le mode conductif ou convectif. Comme le montre schématiquement la Figure 26, quatre cas peuvent se présenter selon que la gaine dans le local source (1) ou dans le local cible (m) est traversante (GT) ou débouchante (GD), et que le gaz qui s'y écoule est composé d'air ou de produits de combustion :

- Configuration GT/GT (Figure 26a) : la gaine, remplie d'air chauffé par le feu dans le local source, traverse le local cible m. Les matériaux combustibles présents dans ce local, en contact avec la gaine, peuvent s'enflammer.
- Configuration GD/GT (Figure 26b) : la gaine, remplie des fumées chaudes générées par la combustion dans le local source, traverse le local cible m. Les matériaux combustibles présents dans ce local, en contact avec la gaine, peuvent s'enflammer.
- Configuration GT/GD (Figure 26c) : la gaine, remplie d'air chauffé par le feu dans le local source, débouche dans le local cible m. Les matériaux combustibles présents dans ce local, en contact avec la phase gazeuse, peuvent s'enflammer.
- Configuration GD/GD (Figure 26d) : la gaine, remplie des fumées chaudes générées par la combustion dans le local source, débouche dans le local cible m. Les matériaux combustibles présents dans ce local, en contact avec la phase gazeuse, peuvent s'enflammer.

Dans la thèse de N. Giraud [17] et dans le cadre du projet MARINER [16], une version unidimensionnelle du code SAFIR a été développée pour simuler la transmission du feu par des gaines, à section circulaire, contenant de l'air surchauffé (diagrammes a et c de la Figure 26). Cette version a été validée par comparaison avec des résultats d'essais fournis par DGA TN [92]. Dans ces essais, une gaine en acier inoxydable de 80 mm de diamètre et de 2 mm d'épaisseur traverse un local source, dans lequel on impose un profil de température, puis quatre caissons cibles en série. Plusieurs essais, correspondant à différentes conditions de montée en température du local source et de débits d'air entrant ont été simulées avec succès, montrant un bon accord entre le modèle et les expériences.

Dans le cadre de cette thèse, nous avons tout d'abord étendu le modèle aux configurations GD/GT et GD/GD (voir Figure 26 b et d). Pour ces configurations, le gaz à l'intérieur de la conduite est constitué de fumées chaudes d'incendie et, par là-même, ne peut plus être considéré comme transparent sur le plan radiatif. Il a été alors nécessaire de calculer le rayonnement dans un milieu semi-transparent absorbant. Pour cela, l'équation de transfert radiatif en configuration axisymétrique a été résolue en utilisant la méthode des volumes finis et en incluant les contributions des suies et des produits gazeux de combustion au coefficient d'absorption du gaz. Les échanges radiatifs et convectifs ont été également pris en compte pour le calcul de la conduction dans la paroi de la conduite.

On présente ci-dessous la nouvelle version du code SAFIR 1D permettant de simuler l'écoulement d'un milieu gazeux, semi-transparent ou non, dans une conduite cylindrique, et sa validation par confrontation avec les résultats d'essais réalisés dans le réseau de ventilation du dispositif DIAMAN. La validation a porté sur l'ensemble des configurations de ventilation.

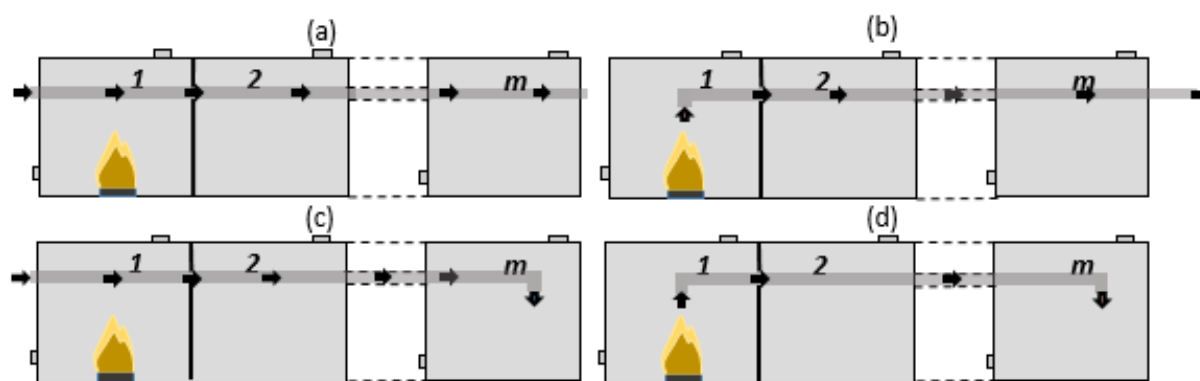


Figure 26 : Configurations du réseau de ventilation étudiées.

5.1 Présentation du code CFD SAFIR 1D

Le code SAFIR 1D repose sur les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie régissant l'écoulement unidimensionnel d'un milieu gazeux, semi-transparent ou non, circulant dans une conduite rectiligne à section variable. Le gaz est supposé inerte chimiquement, de sorte que sa composition reste constante. Ses propriétés thermo-physiques dépendent de la température. Les équations, y compris l'équation de transfert radiatif, sont résolues par la méthode des volumes finis sur grilles décalées.

5.2 Modèle mathématique

5.2.1 Equations générales

Les équations régissant l'écoulement 1D d'un milieu gazeux dans une conduite cylindrique à section variable sont données ci-dessous. Le fluide est constitué de N espèces chimiques dont les fractions massiques sont reliées par la relation suivante :

$$\sum_{i=1}^N Y_i = 1$$

Equation de continuité

$$A \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho A u}{\partial x} = 0 \quad (5-1)$$

Quantité de mouvement

$$A \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial \rho u u A}{\partial x} = -A \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{4}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left(A \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (5-2)$$

où μ est la viscosité dynamique du gaz (en kg/m/s).

Equation de l'énergie

L'équation de conservation de l'énergie est écrite pour l'enthalpie du mélange gazeux, définie par $h = \sum_i Y_i h_i$, où h_i est l'enthalpie de l'espèce i :

$$A \frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial \rho u h A}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A \frac{\mu}{Pr} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{DAp}{Dt} + AS_{ext} \quad (5-3)$$

où :

- $\frac{D}{Dt}$: dérivée particulaire, $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x}$;
- Pr : nombre de Prandtl ;
- S_{ext} : terme source d'énergie (par exemple, un apport de chaleur extérieur).

La phase gazeuse est supposée se comporter comme un gaz parfait, de sorte que :

$$p = \rho R T \sum_i \frac{Y_i}{M_i} \quad (5-4)$$

où M_i est la masse molaire de l'espèce i et $R = 8,314472$ J/mol/K.

L'enthalpie massique de l'espèce i à une température T , qui se compose de l'enthalpie de formation à une température de référence et d'une enthalpie sensible est définie par :

$$h_i(T) = \Delta h_{f,i}^0(T_{ref}) + \int_{T_{ref}}^T c_{p,i}(T')dT' \quad (5-5)$$

La chaleur massique à pression constante de l'espèce i , $c_{p,i}$, et l'enthalpie de formation à la température de référence, $\Delta h_{f,i}^0(T_{ref})$, s'expriment en fonction de la température par des polynômes de degrés 4 et 5 respectivement :

$$c_{p,i}(T) = a_{1i} + a_{2i}T + a_{3i}T^2 + a_{4i}T^3 + a_{5i}T^4 \quad (5-6)$$

$$\Delta h_{f,i}^0(T_{ref}) = a_{1i}T_{ref} + \frac{a_{2i}}{2}T_{ref}^2 + \frac{a_{3i}}{3}T_{ref}^3 + \frac{a_{4i}}{4}T_{ref}^4 + \frac{a_{5i}}{5}T_{ref}^5 + a_{6i} \quad (5-7)$$

L'enthalpie d'espèce se déduit alors de l'expression polynomiale suivante :

$$\begin{aligned} h_i(T) &= a_{1i}T + \frac{a_{2i}}{2}T^2 + \frac{a_{3i}}{3}T^3 + \frac{a_{4i}}{4}T^4 + \frac{a_{5i}}{5}T^5 + a_{6i}h_i(T) \\ h_i(T) &= \Delta h_{f,i}^0(T_{ref}) + \int_{T_{ref}}^T c_{p,i}(T')dT' \end{aligned} \quad (5-8)$$

Les coefficients a_{1i} à a_{6i} sont extraits de la base de données thermodynamiques CHEMKIN [93] et de celle, plus complète, de Burcat [94], pour lesquelles $T_{ref} = 298.15$ K.

L'enthalpie et la chaleur massique du mélange sont définies par :

$$h = \sum_{i=1}^N Y_i h_i \quad (5-9)$$

$$c_p = \sum_{i=1}^N Y_i c_{p,i}(T) \quad (5-10)$$

A noter qu'en raison de la dépendance en température des chaleurs massiques des espèces chimiques, le calcul de la température à partir de l'enthalpie nécessite une procédure itérative. L'obtention de la solution ne nécessite cependant que quelques itérations.

La viscosité dynamique du mélange μ est calculée à partir des viscosités dynamiques de chacune des espèces constituant la phase gazeuse [95]. La viscosité dynamique de chacune des espèces constituant la phase gazeuse est donnée par la théorie simplifiée de la cinétique des gaz. La conductivité thermique du gaz λ est déduite de la relation donnant le nombre de Prandtl : $Pr = \mu C_p / \lambda$.

Sous-modèle de rayonnement

Lorsque le milieu gazeux qui circule dans la conduite ne peut plus être considéré comme transparent, le rayonnement doit être pris en compte. Dans ce cas, le rayonnement est calculé par l'équation de transfert radiatif (ETR) en configuration axisymétrique pour un milieu gris émettant, absorbant, mais non diffusant [96].

La source radiative de l'équation de bilan d'énergie 1D est alors moyennée sur la section de la conduite, de sorte que le terme source devient :

$$S_{ext} = \frac{4}{D} h_{int} (T_{p_{int}} - T) + \frac{1}{V_P} \int_{V(x,0)}^{V(x,R)} \kappa_g (G - 4\sigma T^4) dV \quad (5-11)$$

où :

- $T_{p_{int}}$: température intérieure de la conduite ;
- G : rayonnement incident, calculé après résolution de l'ETR ;
- κ_g : coefficient d'absorption de la phase gazeuse.
- h_{int} : coefficient de convection à l'intérieur de la conduite. Les propriétés du fluide sont évaluées à la température du film $(T_{p_{int}} + T)/2$. Le coefficient est calculé à l'aide de la corrélation de Colburn [76] donnant le nombre de Nusselt :

$$Nu = \frac{h_{int} D}{\lambda} = 0,023 \left(\frac{\rho u D}{\mu} \right)^{4/5} Pr^{1/3}$$

Le coefficient d'absorption de la phase gazeuse inclut les contributions des suies $\kappa_{g,s}$ et des produits gazeux $\kappa_{g,pr}$ qui participent au rayonnement (ici, CO, CO2 et H2O) :

$$\kappa_g = \kappa_{g,s} + \kappa_{g,pr} \quad (5-12)$$

Le coefficient d'absorption des suies, $\kappa_{g,s}$ est donné par la relation de Sazhin [95] :

$$\kappa_{g,s} = 1232,4 \times \rho_s f_{vs} \times [1 + 4,8 \times 10^{-4} (T - 2000)] \quad (5-13)$$

Avec $\rho_s = 1800 \text{ kg/m}^3$ et f_{vs} la fraction volumique de suies.

Pour le calcul de la contribution des produits gazeux $\kappa_{g,pr}$, on considère la dépendance en température du coefficient d'absorption des espèces gazeuses qui participent au rayonnement :

$$\kappa_{g,pr} = a_{CO}(T) p_{CO} + a_{CO2}(T) p_{CO2} + a_{H2O}(T) p_{H2O} \quad (5-14)$$

où p_{CO} , p_{CO2} et p_{H2O} sont les pressions partielles de CO, CO2 et H2O ($p_i = pX_i$ où X_i est la fraction molaire de l'espèce i et p , la pression locale exprimée en Atm).

Les coefficients a_{CO_2} , a_{H_2O} et a_{CO} dépendent de la température et peuvent être approchés pour des températures comprises entre 300 et 2500 K, par des polynômes de degré 5 [74] en fonction de T ou $TT = 1000/T$:

$$\begin{aligned}
 a_{CO_2} &= 18,741 - 121,31 TT + 273,5 TT^2 - 194,05 TT^3 + 56,31 TT^4 - 5,8169 TT^5 \\
 a_{H_2O} &= 0,23093 - 1,12390 TT + 9,4153 TT^2 - 2,9988 TT^3 + 0,51382 TT^4 - 1,8684 \times 10^{-5} TT^5 \\
 a_{CO} &= \begin{cases} \text{Pour } T \leq 750 \text{ K :} \\ 4,7869 - 0,06953T + 2,95775 \times 10^{-4}T^2 - 4,25732 \times 10^{-7}T^3 + 2,02894 \times 10^{-10}T^4 \\ \text{Pour } T > 750 \text{ K :} \\ 10,09 - 0,01183T + 4,7753 \times 10^{-6}T^2 - 5,87209 \times 10^{-10}T^3 - 2,5334 \times 10^{-14}T^4 \end{cases} \quad (5-15)
 \end{aligned}$$

5.2.2 Résolution numérique

La discrétisation spatiale des équations régissant l'écoulement s'effectue par la méthode des volumes finis sur grilles décalées [65, 97]. Les grandeurs scalaires sont calculées au centre de chaque volume élémentaire, alors que la vitesse est calculée aux centres des faces latérales. Les flux convectifs sont approchés par un schéma unilatéral, les termes diffusifs par un schéma centré d'ordre 2. Un schéma de type Euler décentré d'ordre 2 est ensuite employé pour la discrétisation temporelle. Une attention particulière est portée au couplage pression-vitesse afin de satisfaire à chaque étape de temps la conservation de la masse. Pour plus de détails sur la résolution numérique, le lecteur pourra se référer à la thèse de N. Giraud [17].

La conduction unidimensionnelle à travers la paroi de la gaine mono- ou multi-matériau prend en compte les transferts convectif et radiatif sur les faces interne et externe de la conduite. Elle peut être traitée en axisymétrique ($i = 1$) ou en plan ($i = 0$) si le rayon intérieur de la conduite est grand devant son épaisseur. Si l'élément de paroi est constitué de plusieurs matériaux, la conductivité thermique à l'interface entre ces matériaux est calculée à l'aide d'une moyenne harmonique [65]. La résolution de l'équation de conduction est donnée en Annexe 1.

Pour le calcul du rayonnement à l'intérieur de la conduite, l'équation de transfert radiatif en configuration axisymétrique est résolue par la méthode des volumes finis (MVF) [98].

5.3 Entrées et sorties du modèle

SAFIR 1D utilise comme conditions aux limites la composition, la température et la vitesse du gaz (fumées ou air) à l'entrée de la conduite. Ces données peuvent être calculées grâce au modèle à zones ou issues d'expérimentations. En sortie, le code fournit en particulier la position d'isothermes d'intérêt relatifs à la température du gaz et de peau de la conduite afin d'évaluer le délai d'une possible transmission du feu vers des locaux adjacents.

5.4 Validation du modèle

5.4.1 Présentation des essais

Les essais, couvrant l'ensemble des configurations mentionnées précédemment, ont été réalisés dans le dispositif DIAMAN. Cela a nécessité deux modifications importantes du dispositif. La première a consisté à instrumenter la gaine d'extraction du local source, la seconde à rajouter au dispositif une gaine traversant les deux locaux et à l'instrumenter.

Gaine d'extraction

Une vue générale de la gaine d'extraction du dispositif DIAMAN est donnée sur la Figure 27. La gaine d'extraction est en acier inoxydable de 1 mm d'épaisseur. Elle a été instrumentée en disposant 16 thermocouples sur la face externe de la conduite, à environ 1 m d'intervalles pour la mesure de la température de peau (face externe), notés Tp1 à Tp16 ; et 6 tubes de Pitot avec thermocouple intégré pour la mesure de la vitesse et de la température du gaz dans la conduite, notés V1, T1 à V6, T6 (Figure 28).

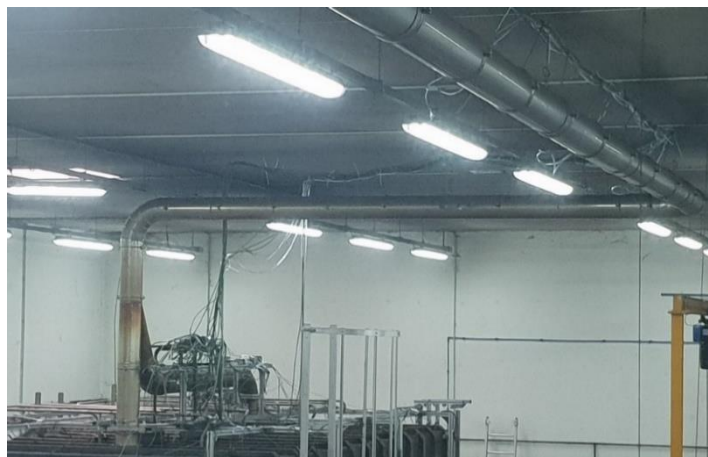


Figure 27 : Vue générale de la gaine d'extraction.

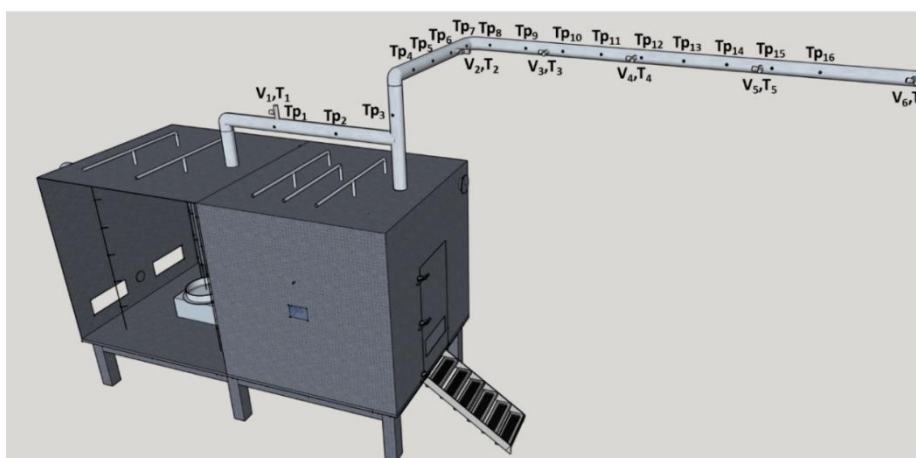
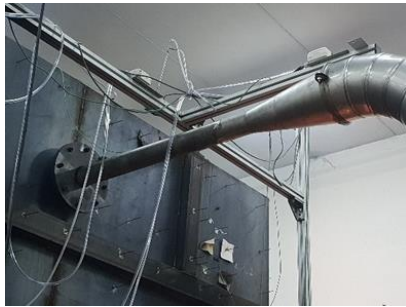


Figure 28 : Schéma du dispositif DIAMAN avec gaine d'extraction instrumentée.

Gaine interne

Cette gaine interne, parfaitement instrumentée, est une gaine en inox de 8 cm de diamètre et de 2 mm d'épaisseur, isolée ou non, où l'air frais qui s'y écoule est chauffé par le feu qui se développe dans le local source (Figure 29 et Figure 30). L'isolant retenu pour la gaine interne, de type USEAPROTECT ROLL 24/50, est constitué d'une couche de laine de roche (densité : 24 kg/m³, épaisseur : 50 mm) revêtue d'une feuille d'aluminium. Seule la portion de gaine intérieure au local cible (Figure 30a) et celle débouchant vers l'extérieur (Figure 30b) ont été isolées.



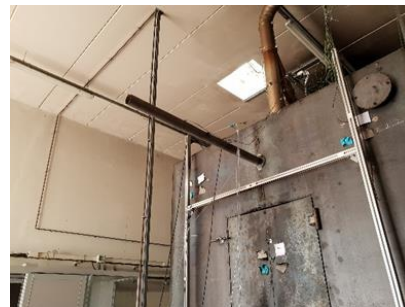
(a)



(b)



(c)

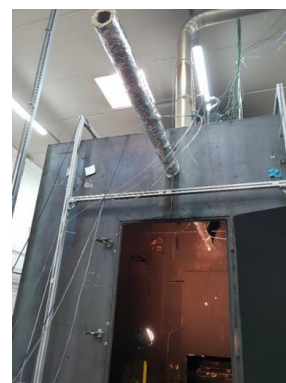


(d)

Figure 29 : Vues de la gaine interne non isolée : (a) réduction de la section d'admission d'air, (b) traversée du local source, (c) traversée du local cible, et (d) sortie du dispositif DIAMAN.



(a)



(b)

Figure 30 : Vues de la gaine interne isolée : (a) traversée du local cible et (b) sortie du dispositif DIAMAN.

L'instrumentation de la gaine comportait (Figure 31) : 13 thermocouples sur la face externe de la portion de la conduite traversant le dispositif DIAMAN, à environ 0,5 m d'intervalles pour la mesure de la température de peau, notés Tp1 à Tp13 ; 4 mesures de température de gaz à l'intérieur de la conduite, notés T1 à T4 ; et 2 mesures de vitesse à l'entrée et à la sortie de la conduite, notés V1 et V2.

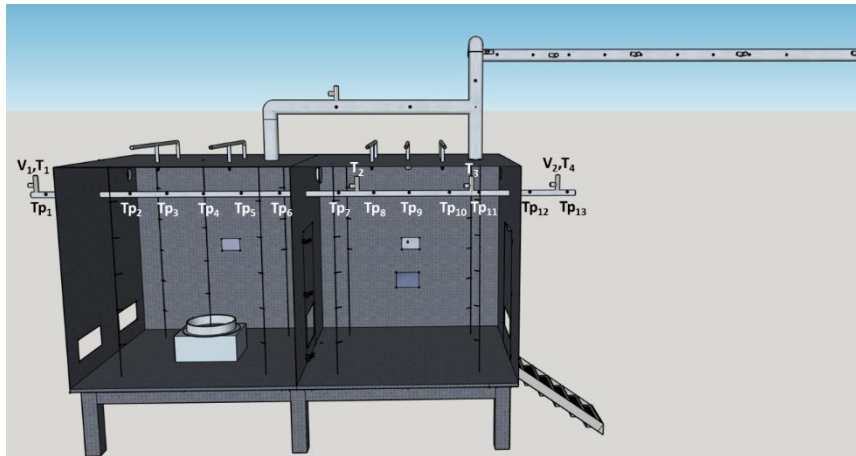


Figure 31 : Schéma du dispositif DIAMAN avec gaine interne instrumentée.

Configurations d'essais

Lors des essais, le feu a été généré par la combustion d'une nappe d'heptane de 70 cm de diamètre, de 12 ou 24 L, et nous avons fait varier le débit d'extraction et la configuration du réseau de ventilation. Pour les essais 4 à 8, les débits d'admission d'air dans la gaine interne de 18,1, 36,2 et 72,4 m³/h correspondent à des vitesses d'écoulement de 1, 2 et 4 m/s. Les durées de transmission du feu par une gaine de ventilation ont été déduites respectivement des évolutions temporelles de la température de peau (face externe) de la gaine et de la température du gaz chaud qui s'écoule dans la gaine et qui peuvent être, selon la configuration, de l'air ou des produits de combustion.

Essai	Volume d'heptane (L)	Q_{ext} (m ³ /h)	Q_{int} (m ³ /h)	Configuration
1	12	500	-	Gaine d'extraction Ø20cm
2	12	750	-	
3	12	1000	-	
4	12	1000	18,1	Gaine d'extraction Ø20cm et gaine interne Ø8cm non isolée
5	12	1000	36,2	
6	12	1000	72,4	
7	24	1000	36,2	
8	24	1000	36,2	Gaine d'extraction Ø20cm et gaine interne Ø8cm, isolée au-delà du local source

Tableau 2 : Matrice d'essais, Q_{ext} représente le débit d'extraction des fumées et Q_{int} le débit d'admission d'air dans la gaine interne aux deux locaux.

Etude paramétrique

L'étude paramétrique a consisté tout d'abord à vérifier la répétabilité des résultats relatifs au développement du feu, le changement de configuration du réseau de ventilation n'ayant que peu d'effet sur le développement du feu. Pour cela, nous avons comparé les résultats obtenus lors des essais 7 et 8. La répétabilité s'est révélée excellente, comme le confirme, à titre d'exemple, la comparaison en Figure 32, en termes de débit de pyrolyse, mais aussi de températures moyennes des gaz en zone chaude, à 2,5 m de hauteur.

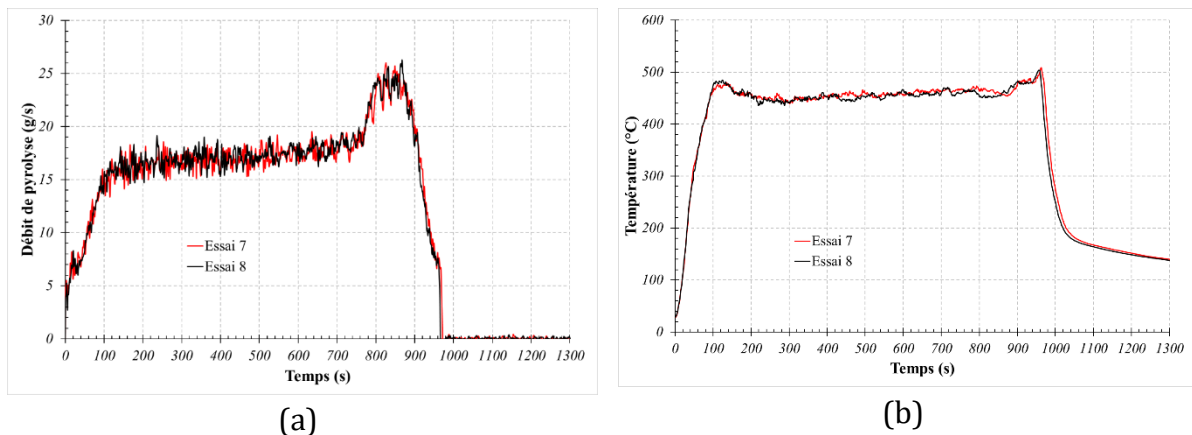


Figure 32 : Comparaison des essais 7 et 8 : débit de pyrolyse d'heptane (a) et température moyenne du gaz en zone chaude à 2,5 m de hauteur (b).

Isothermes d'intérêt pour la transmission du feu par une gaine de ventilation

En ce qui concerne les températures critiques de transmission du feu, nous avons retenu celles utilisées par le logiciel LUCIFER de DGA TN, à savoir :

- Critère S180 pour une GT : la température en un point quelconque de la surface externe de la conduite (température de peau) dans le local cible ne s'élève pas de plus de 180 °C par rapport à sa température initiale. Cet isotherme a été retenu par DGA TN car il est un isotherme d'intérêt au sens de la norme SOLAS [99] ;
- Critère S250 pour une GD : la température du gaz dans le local cible n'excède pas 250°C [100].

En d'autres termes, si le critère S180 (resp. S250) est en défaut, la transmission du feu par une GT (resp. GD) peut avoir lieu.

Une étude récente [92] a montré que ces critères étaient très dimensionnants, confirmant les résultats de la littérature (voir par ex. [22, 23]), ce qui peut conduire à une surestimation de la vitesse de propagation du feu calculée par le modèle de réseau. Toutefois, leur utilisation dans le cadre de la validation du code SAFIR1D ne pose pas de problème majeur dans la mesure où ces critères ne sont que des données d'entrée du code SAFIR1D et qu'ils peuvent être modifiés par l'utilisateur selon le type de matériaux combustibles exposés.

5.4.2 Résultats de validation du code SAFIR 1D

Le code SAFIR 1D a été validé sur les essais du Tableau 2.

Comme conditions aux limites, le code utilise les mesures expérimentales de la composition, de la température et de la vitesse du gaz entrant dans la conduite. Pour la gaine d'extraction, le gaz est composé des fumées extraites du local source, i.e., un mélange d'air et de produits de combustion, alors que pour la gaine interne traversante, il est constitué d'air.

Le code utilise également les données d'entrée et paramètres numériques suivants :

- Conduite :
 - Longueur : 21,31 m depuis la sortie du local source
 - Epaisseur : 1 mm
 - Propriétés de l'acier inoxydable qui constitue la gaine:
 - conductivité thermique : 50 W/m/K
 - capacité calorifique : 502 J/kg/K
 - masse volumique : 7960 kg/m³
 - émissivité : 0,4
- Coefficient de convection à l'extérieur de la gaine de ventilation : $h_{ext} = 5 \text{ W/m}^2/\text{K}$.
Pour la partie de la gaine interne se situant dans le local source, ce coefficient a été évalué préalablement par la code SAFIR 3D : $h \sim 20 \text{ W/m}^2/\text{K}$.
- Nombre de Prandtl : $Pr = 0,71$
- Température initiale : $T_{amb} = 20^\circ\text{C}$
- Pas d'intégration dans le temps : $\Delta t = 1 \text{ s}$
- Maillage :
 - Dans la direction longitudinale : maillage uniforme à 200 volumes élémentaires;
 - Pour le calcul de conduction dans la paroi : maillage radial uniforme à 10 volumes élémentaires; et
 - Pour le calcul du rayonnement, le cas échéant, un maillage à 200×20 volumes a été retenu, avec un nombre de directions angulaires de 4×12.

L'analyse comparative des résultats numériques et expérimentaux a montré un excellent accord, même sur les essais de forte puissance. Cela est illustré sur la Figure 33 donnant les distances parcourues au cours du temps dans la gaine d'extraction par les isothermes d'intérêt S180 et S250 pour les essais 7 et 8.

La Figure 33 montre que le code SAFIR 1D reproduit bien les montées en température du gaz et de la conduite au cours du temps. Il est alors possible d'évaluer les délais de transmission du feu vers d'autres locaux. A titre d'exemple, dans les conditions de l'essai 7 (Figure 33a), un local cible situé à 15 m du local source sera susceptible de s'enflammer au bout de 150 s si la gaine y débouche, alors que ce délai sera de 450 s si la gaine le traverse.

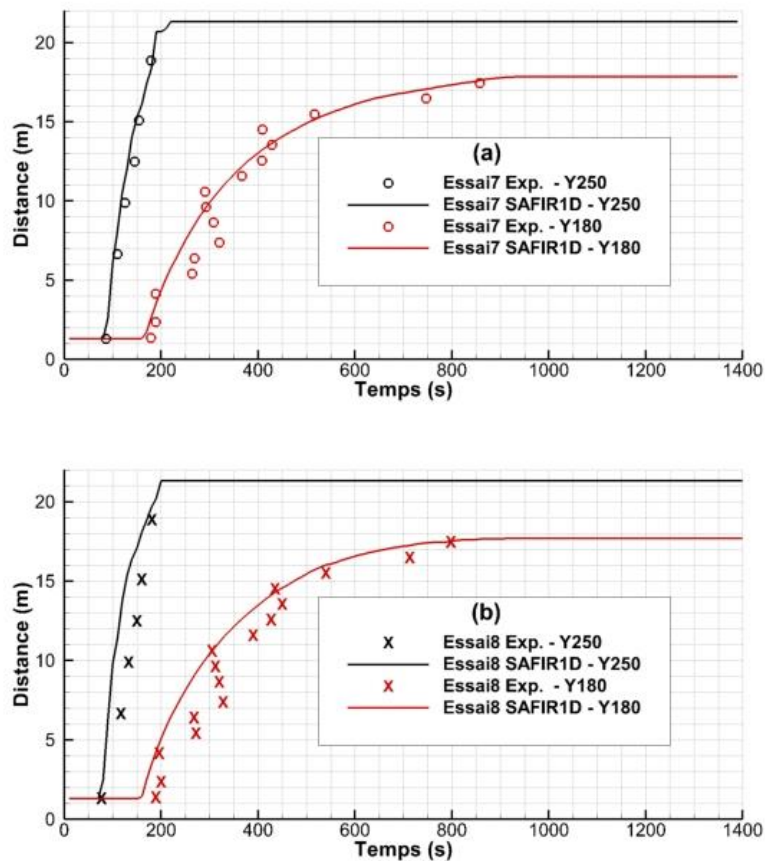


Figure 33 : Comparaison SAFIR1D/expérience pour les essais 7 (a) et 8 (b) : distances parcourues au cours du temps par les isothermes d'intérêt S180 et S250.

Chapitre 6 Modélisation de la propagation du feu et des fumées à l'échelle de la structure par un modèle de réseau

A l'échelle de la structure, la propagation du feu et des fumées est simulée grâce à un modèle de réseau, développé initialement au cours du projet MARINER [16] et amélioré depuis pour prendre en compte les spécificités des structures multi-compartimentées des domaines civil et militaire.

Le modèle de réseau est au cœur de l'approche hybride multi-échelle. Il utilise comme données d'entrée les durées moyennes des phases du feu et de transmission vers d'autres locaux, ainsi que l'évolution temporelle des grandeurs de l'écoulement de fumées, déterminées préalablement par le modèle à zones ou le code SAFIR, le but étant de simuler la propagation du feu et des fumées dans toute la structure.

6.1 Présentation du modèle de réseau

Le modèle repose sur un réseau de locaux polydisperse (i.e., les locaux peuvent avoir des tailles différentes) et amorphe (i.e., pas de régularité géométrique), ce qui lui permet de supporter un agencement réaliste de locaux de formes plus ou moins complexes. À partir des informations de connectivité des locaux, il est possible de définir une représentation sous forme de graphe des chemins existants entre les différents locaux de la structure. Dans ce type de graphe, les nœuds représentent les locaux, et les liens, les connections entre deux locaux par une barrière ou une ouverture libre. On assimilera à une barrière tout élément structurel par lequel le feu peut se transmettre d'un local à un autre, comme une paroi, une gaine de ventilation, une porte fermée, ou une trappe fermée. Une cage d'escalier peut être assimilée à une ouverture libre. Il en est de même d'une fenêtre donnant vers l'extérieur dans les applications civiles si elle est initialement ouverte ou, dans le cas contraire, si elle éclate sous l'effet du flashover qui s'est produit dans le local.

La Figure 34 donne un exemple de graphe de connectivités pour une structure présentant plusieurs barrières et traversée par une gaine de ventilation où la propagation se fait du local C vers le local E.

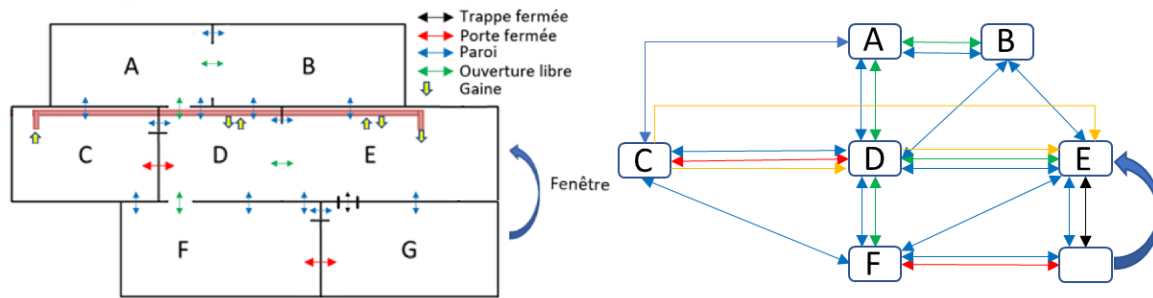


Figure 34: Schéma de la structure et graphe de connectivités du réseau.

6.2 Hypothèses du modèle

Le modèle proposé repose sur les hypothèses et principes suivants :

1. L'occurrence d'embrasement généralisé ou flashover dans un local, la transmission du feu au travers d'une barrière et sa propagation d'un local à un autre sont représentées par des lois normales de probabilité, chacune d'elles dépendant de deux paramètres : la valeur moyenne et l'écart-type. L'écart type représente une fraction (généralement, de 10 à 15%) de la valeur moyenne.
2. La probabilité de transmission par une ouverture libre (e.g., une trappe ouverte ou une porte ouverte), est égale à 1.
3. L'inflammation d'un local cible, noté 2, adjacent à un local en feu, noté 1, ne se produit que si le feu dans le local 1 est pleinement développé et qu'il y a eu transmission du local 1 au local 2.
4. La transmission du feu par une barrière a lieu lorsque sa température dans le local cible dépasse une valeur critique prédéfinie.
5. La probabilité de transmission dans la phase décroissance du feu est nulle. Des calculs préliminaires ont en effet montré que la phase de décroissance était sans influence sur la propagation du feu.
6. La propagation du local 1 vers le local 2 n'est effective que lorsque l'inflammation a eu lieu dans le local 2 et que le feu dans ce local y est pleinement développé.
7. La durée moyenne de flashover est définie comme l'intervalle de temps entre l'inflammation et le temps au bout duquel la température du gaz dans le local atteint une température critique, généralement comprise entre 500 et 600°C [101].

Les durées moyennes d'occurrence du flashover, de feu pleinement développé et de décroissance, ainsi que les durées moyennes de transmission du feu par les barrières sont déterminées par le modèle à zones ou le code CFD SAFIR, en fonction des caractéristiques du local (e.g., type et matériau(x) des cloisonnements, charge calorifique, dimensions, conditions d'isolation ou de ventilation), et par le code SAFIR 1D pour les gaines de

ventilation. Elles sont préalablement calculées pour chacun des locaux composant la structure.

6.3 Calcul des probabilités du modèle

Probabilité de transmission d'une barrière dans la phase de feu pleinement développé

La fonction de densité de probabilité de transmission du feu du local source 1 vers le local cible 2 au travers d'une barrière b , dans la phase de feu pleinement développé ($0 \leq t - t_{fo} \leq \tau_{fd}$) peut s'écrire comme suit :

$$P_b(1 \rightarrow 2) = \frac{1}{\sigma_b \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(t - t_{fo} - \mu_b)^2}{2\sigma_b^2} \right] \quad (6-1)$$

où t_{fo} est l'instant du flashover, τ_{fd} la durée du feu pleinement développé, σ_b et μ_b représentent l'écart type et la durée moyenne de tenue au feu de la barrière b .

La probabilité cumulative correspondante est alors :

$$P_b(1 \rightarrow 2) = \int_{t_{fo}}^t \frac{1}{\sigma_b \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(t - t_{fo} - \mu_b)^2}{2\sigma_b^2} \right] dt \quad (6-2)$$

Au-delà de $t_{de} = t_{fo} + \tau_{fd}$, la probabilité est supposée nulle (hypothèse 5).

Pour le calcul de l'intégrale, la méthode de Simpson était utilisée dans [16]. Elle est désormais calculée via la fonction erreur, de sorte que la probabilité cumulative à l'instant t s'exprime de la façon suivante :

$$P_b(1 \rightarrow 2) = \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left(\frac{t - t_{fo} - \mu_b}{\sigma_b \sqrt{2}} \right) + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left(\frac{\mu_b}{\sigma_b \sqrt{2}} \right) \quad (6-3)$$

ce qui a conduit à un gain en temps CPU significatif.

Probabilité de croissance du feu jusqu'à la phase de feu pleinement développé

Immédiatement après le flashover, le feu dans le local i peut devenir un feu pleinement développé dont la probabilité cumulative est définie par :

$$P_{fd}(i) = \begin{cases} \int_{t_{ig}}^t \frac{1}{\sigma_{fo} \sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{[(t - t_{ig}) - \mu_{fo}]^2}{2\sigma_{fo}^2} \right) dt & \text{si } t_{ig} < t < t_{de} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (6-4)$$

où σ_{fo} et μ_{fo} représentent l'écart type et la durée moyenne de flashover.

On tire ensuite un nombre aléatoire R_{fd} , compris entre 0 et 1, que l'on compare à la probabilité cumulative calculée :

$$R_{fd} < P_{fd}(i) \rightarrow \text{feu pleinement développé}$$

$$R_{fd} > P_{fd}(i) \rightarrow \text{pas de feu pleinement développé}$$

Si $R_{fd} < P_{fd}(i)$, alors le temps de flashover est égal au temps courant, $t_{fo}(i) = t$.

Probabilité d'inflammation

D'après l'hypothèse 3, l'inflammation du local cible 2 ne se produit que si le feu dans le local source 1 est pleinement développé et que la transmission du feu du local 1 au local 2, au travers de la barrière b , a eu lieu. On peut donc écrire en termes de probabilité :

$$P_{ig}(1 \rightarrow 2) = P_b(1 \rightarrow 2) \times P_{fd}(1) \quad (6-5)$$

L'approche statistique consiste à tirer un nombre aléatoire R_{ig} , compris entre 0 et 1, et à comparer ce nombre aléatoire à la probabilité d'inflammation :

$$R_{ig} < P_{ig}(1 \rightarrow 2) \rightarrow \text{inflammation}$$

$$R_{ig} > P_{ig}(1 \rightarrow 2) \rightarrow \text{pas d'inflammation}$$

Si l'inflammation a lieu, alors le temps d'inflammation du local 2 est égal au temps courant, $t_{ig}(2) = t$.

Lorsqu'un local cible est connecté à plusieurs locaux en feu pleinement développé, le calcul de la probabilité est plus complexe. Par exemple, dans le cas où le feu est pleinement développé dans les locaux source 1 et 3, connectés au local cible 2, la probabilité d'inflammation du local 2 est alors donnée par :

$$P_{ig}(1 \text{ et } 3 \rightarrow 2) = P_b(1 \rightarrow 2) + P_b(3 \rightarrow 2) - P_b(1 \rightarrow 2) \times P_b(3 \rightarrow 2) \quad (6-6)$$

Le critère d'inflammation du local 2 devient : $R_{ig} < P_{ig}(1 \text{ et } 3 \rightarrow 2)$.

Probabilité de propagation

Compte tenu de l'hypothèse 6, la probabilité que le feu se propage du local 1 au local 2 est égale au produit de la probabilité d'inflammation du local 2 par la probabilité de feu pleinement développé dans ce local :

$$P_{fs}(1 \rightarrow 2) = P_{ig}(1 \rightarrow 2) \times P_{fd}(2) \quad (6-7)$$

6.4 Transport des fumées

Le calcul du transport des fumées a été intégrée au modèle de réseau.

Il repose sur un simple modèle de remplissage (voir par exemple, celui de Yamaguchi et Tanaka [103]) dont les hypothèses sont les suivantes :

- L'envahissement de la structure par les fumées n'est lié qu'à la configuration géométrique de la structure et au développement du feu (couplage faible entre le feu et la structure) ; ce qui revient à supposer que la ventilation, naturelle ou mécanique, de la structure n'a pas d'impact significatif sur l'écoulement des fumées ;
- Les fumées n'interagissent pas avec le ou les locaux en feu, ce qui est d'autant plus vrai que le domaine qui peut être touché par les fumées est grand ;
- Le débit de fumées issu du ou des locaux en feu se répartit sur les locaux qui leur sont connectés par une ouverture libre, i.e. une porte ouverte ou une trappe ouverte ;

Le modèle simplifié utilise comme données d'entrée les évolutions temporelles du débit, de la masse volumique et de la température des fumées calculées par le modèle à zones pour chaque local en feu. Il repose sur l'équation de conservation de la masse :

$$\frac{d}{dt}(\rho V) = q_f$$

où ρ et V sont respectivement la masse volumique et le volume de la couche de fumée, et q_f le débit de fumée s'accumulant dans le local.

Le local étant supposé parallélépipédique :

$$V = A_{room}(z_{room} - z_{interface})$$

où A_{room} est l'aire du plancher, z_{room} la hauteur sous plafond et $z_{interface}$ la hauteur de l'interface de fumée, de sorte que l'évolution de cette dernière est régie par l'équation suivante :

$$\frac{dz_{interface}}{dt} = -\frac{q_f}{\rho A_{room}}$$

Pour tenir compte du refroidissement des fumées qui se propagent, de nombreux auteurs ont établi des corrélations dont la forme générale repose sur la résolution des équations de bilan de masse, de quantité de mouvement et d'énergie (voir par exemple [104, 105]). Dans notre étude, la corrélation de Bailey et al. [104], validée sur des feux de corridor, a été utilisée pour calculer l'évolution de la température des fumées $T_f(x)$ en fonction de la distance x à la source :

$$\log \left(\frac{T_f(x) - T_{amb}}{T_{f0} - T_{amb}} \right) \cong 0,003 - 0,018 x$$

où T_{f0} représentent la température des fumées dans le local source (i.e., en $x = 0$), et T_{amb} la température ambiante.

6.5 Propagation par les façades

Lorsqu'un feu se propage dans un immeuble, les flux thermiques générés peuvent entraîner la rupture des vitrages. Dans certains cas, les flammes peuvent alors être projetées vers l'extérieur de la structure et transmettre le feu vers les étages supérieurs. Cela se produit lorsque le feu dans le local source est pleinement développé et qu'il est sous-oxygéné. Le modèle à zones (voir §4.1), permet désormais de connaître le régime de combustion du feu (régime contrôlé par la ventilation ou le combustible) et de déterminer les conditions pour lesquelles la propagation verticale, d'un étage à l'autre, peut se produire.

La procédure utilisée s'inspire de celle proposée par Cheng [106] et validée sur des feux à échelle un. Elle consiste à évaluer la hauteur de flamme au-dessus du soffite de la fenêtre donnant vers l'extérieur de la façon suivante :

$$z = 12,8 \left(\frac{\dot{m}_v}{W_0} \right)^{2/3} - H_0$$

où $\dot{m}_v$ est le débit de combustion (en kg/s) en régime de feu pleinement développé pour des feux contrôlés par la ventilation, W_0 est la largeur de l'ouverture et H_0 sa hauteur (en m).

Le débit de combustion s'exprime comme suit [107] :

$$\dot{m}_v = 0,18 \frac{(1 - e^{-0,036\Omega}) A_0 \sqrt{H_0}}{\sqrt{D/W}}$$

où D représente la profondeur du local source (en m), W sa largeur (en m), $A_0 = H_0 W_0$ l'aire de l'ouverture (en m²) et $\Omega = \frac{A_T}{A_0 \sqrt{H_0}}$, A_T étant l'aire totale de la surface du local source (en m²). A noter que le terme $A_0 \sqrt{H_0}$ n'est autre que le facteur de ventilation.

Cette procédure a été directement implémentée dans le modèle de réseau.

6.6 Entrées et sorties du modèle

Le modèle de réseau requiert un certain nombre de paramètres que sont les durées moyennes d'occurrence du flashover, des phases de feu pleinement développé et de décroissance, ainsi que les durées moyennes de tenue au feu des barrières de la structure. A l'exception du mode de transmission par les fenêtres, implémenté directement dans le modèle de réseau, ces paramètres sont évalués à l'aide du modèle à zones et du code SAFIR 1D. On notera que cette procédure de détermination des paramètres du modèle de réseau a été considérablement améliorée et simplifiée par rapport à celle utilisée dans [16]. Cela a été rendu possible grâce au nouveau modèle à zones qui présente une plus grande généralité et fournit des solutions en un temps très court.

D'après l'hypothèse 1, l'écart-type est un pourcentage de la valeur moyenne, compris entre 10 et 15% [60]. Dans les simulations réalisées par la suite, la valeur dimensionnante de 15% a été retenue.

Le modèle nécessite également d'établir au préalable le réseau des connectivités par les barrières et les ouvertures libres.

En sortie, à l'issue des tirages statistiques, le modèle de réseau donne les valeurs moyennes des temps d'inflammation, de flashover, de feu pleinement développé, de décroissance et de fin de feu pour chaque local. En d'autres termes, il renseigne sur la chronologie du feu, donnant au cours du temps l'état des locaux, classés en locaux sains, locaux enflammés, locaux où le feu s'est pleinement développé et locaux où le feu s'est éteint par défaut de combustible ou d'air.

Le calcul du transport des fumées et du remplissage des locaux est basé sur les valeurs moyennes mentionnées ci-dessus. Les fichiers de sortie fournissent les temps de remplissage à 1,80 m et jusqu'au plancher pour chaque local touché par la fumée.

6.7 Organigramme du modèle de réseau

La séquence d'opérations du modèle de réseau est donnée ci-dessous. Compte tenu du caractère probabiliste du modèle de feu, il est nécessaire d'effectuer un grand nombre d'essais afin d'en extraire les moyennes statistiques. Des calculs préliminaires ont montré qu'un échantillonnage de 100 tirages était suffisant pour obtenir une bonne précision statistique.

- | |
|--|
| <ol style="list-style-type: none">1. Lecture des fichiers de données d'entrée :<ul style="list-style-type: none">• Pour chaque local : son type, son référencement en fonction de la position du local dans la structure, ses propriétés géométriques (barrières et ouvertures libres incluses), les durées des phases du feu et de transmission par les barrières, les temps de détection et d'inertage par la lutte• Pour la structure : réseau de connectivités par les barrières et les ouvertures libres• Paramètres numériques : temps de simulation, pas de temps, nombre de tirages statistiques• Gisement d'éclosion du feu2. Initialisation des moyennes statistiques des temps caractéristiques du feu (phases et propagation)3. Boucle sur les tirages statistiques |
|--|

- a. Initialisation des temps caractéristiques du feu et de transmission des barrières, des probabilités cumulatives associées
- b. Conditions initiales du gisement d'éclosion i_{ecl} :
On suppose que l'inflammation a lieu dans ce local : $P_{ig}(i_{ecl}) = 1$; $t_{ig}(i_{ecl}) = 0$
4. Boucle sur le temps
 - a. Si la détection a lieu dans un local i_{det} à t_{det} , alors on suppose qu'à cet instant l'inflammation a lieu dans ce local : $P_{ig}(i_{det}) = 1$; $t_{ig}(i_{det}) = t_{det}$
 - b. Calcul des probabilités de transmission du feu vers par les barrières
Boucle sur tous les locaux i en feu pleinement développé (NB : ce qui exclut les locaux ne contenant pas de combustibles et inertés)

Si $t > t_{fo}(i)$ ou si $t < t_{de}(i)$ alors :

 - i. Boucle sur tous les locaux (j) connectés au local (i) par une barrière
Si $t < t_{ig}(j)$: calcul de $P_b(i \rightarrow j)$

Fin de la boucle sur les locaux (j)
 - ii. Boucle sur tous les locaux (j) connectés au local (i) par une ouverture libre
Si $t < t_{ig}(j)$: $P_b(i \rightarrow j) = 1$

Fin de la boucle sur les locaux (j)

Fin de la boucle sur les locaux (i)
 - c. Calcul des probabilités d'inflammation
Boucle sur tous les locaux (i) contenant du combustible et non inertés

Si $t > t_{fo}(i)$ alors $P_{ig}(i) = 1$

Sinon, calcul de $P_{ig}(i)$:

Boucle sur tous les locaux (j) connectés au local (i) par une barrière ou une ouverture libre

Si $t > t_{fo}(j)$: $P_{ig}(j) = P_{ig}(j) + P_b(i \rightarrow j) P_{fd}(j) - P_{ig}(i) P_{b(i \rightarrow j)} P_{fd}(j)$

Fin de la boucle sur les locaux (j)

Fin de la boucle sur les locaux (i)
 - d. Calcul des probabilités de feu pleinement développé
Boucle sur tous les locaux i contenant du combustible et non inertés

Si $t < t_{ig}(i)$ alors : local i suivant

Si $t < t_{de}(i)$ alors calcul de $P_{fd}(i)$; Sinon $P_{fd}(i, j) = 0$

Fin de la boucle sur les locaux (i)
 - e. Calcul des probabilités de propagation du feu
Boucle sur tous les locaux i contenant du combustible et non inertés

$P_{fs}(i) = P_{ig}(i) P_{fd}(i)$

Fin de la boucle sur les locaux (i)
5. Fin de la boucle en temps
6. Fin de la boucle sur les tirages statistiques
7. Calcul des moyennes statistiques des temps d'inflammation, d'embrasement généralisé, de décroissance et de propagation
8. Lecture des fichiers relatifs aux fumées (i.e., le débit, la masse volumique et la température des fumées) pour chaque local contenant du combustible
9. Pour chaque local contenant du combustible, identification des chemins possibles de propagation des fumées et des niveaux de voisinage à partir du réseau de connectivité des ouvertures libres
10. Calcul des distances entre chaque local contenant du combustible et un local qui lui est connecté
11. Initialisation de la hauteur de fumée dans chaque local
12. Boucle sur le temps
13. Calcul de la hauteur de fumées dans les locaux
14. Fin de la boucle en temps

Chapitre 7 Application du modèle de réseau à un immeuble de bureaux

Dans le cadre du projet MARINER DECM, nous avons mené une démonstration dans un environnement civil, consistant à appliquer le modèle de réseau à un immeuble de bureaux de plusieurs étages. Pour cette application, le modèle prend en compte le mode de propagation du feu en façade par les fenêtres donnant vers l'extérieur.

La simulation se fait en deux étapes :

- Dans un premier temps, le modèle à zones est utilisé dans chaque local contenant du combustible pour estimer les durées moyennes des différentes phases du feu et de transmission entre locaux, ainsi que l'évolution temporelle de l'état des fumées (i.e., en termes de débit, de masse volumique et de température) ;
- Dans un second temps, le modèle de réseau est utilisé pour simuler la propagation du feu et des fumées dans la structure.

7.1 Agencement général de l'immeuble

Le cas d'étude considéré est un immeuble de bureaux de quatre étages, notés de A à D en commençant par le bas. La Figure 35 donne le plan de l'immeuble, montrant la répartition des locaux, ainsi que la position et l'état des ouvertures.

Chaque étage a une hauteur sous plafond de 3 m et comporte 15 locaux :

- 8 bureaux indépendants de 5m × 4m (01 à 04 et 11 à 15), à l'exception de l'étage A pour lequel le local A04 correspond à l'entrée principale ;
- 3 espaces ouverts ou de cotravail de 5m × 8m (07 à 09), à l'exception de l'étage A qui comporte 2 espaces de cotravail (A07 et A09) et une salle d'archives et de lecture (A08) ;
- 3 locaux ne contenant aucune charge combustible, à savoir la cage d'escalier (06), la cage d'ascenseur (05), et le local « toilettes » (10).

L'immeuble comporte quatre issues de secours qui sont placées dans les locaux 07 et qui sont considérées comme fermées. Les portes et les issues de secours sont de dimensions 2 m × 1 m.

Les fenêtres dont disposent certains locaux sont de dimensions 1 m × 2 m. Elles sont initialement fermées mais le vitrage peut se briser si le feu dans le local correspondant atteint le flashover.

Dans les cas test présentés, on suppose que l'immeuble n'est pas ventilé mécaniquement ; en d'autres termes, le feu ne peut pas se transmettre d'un local à un autre par le réseau de ventilation.

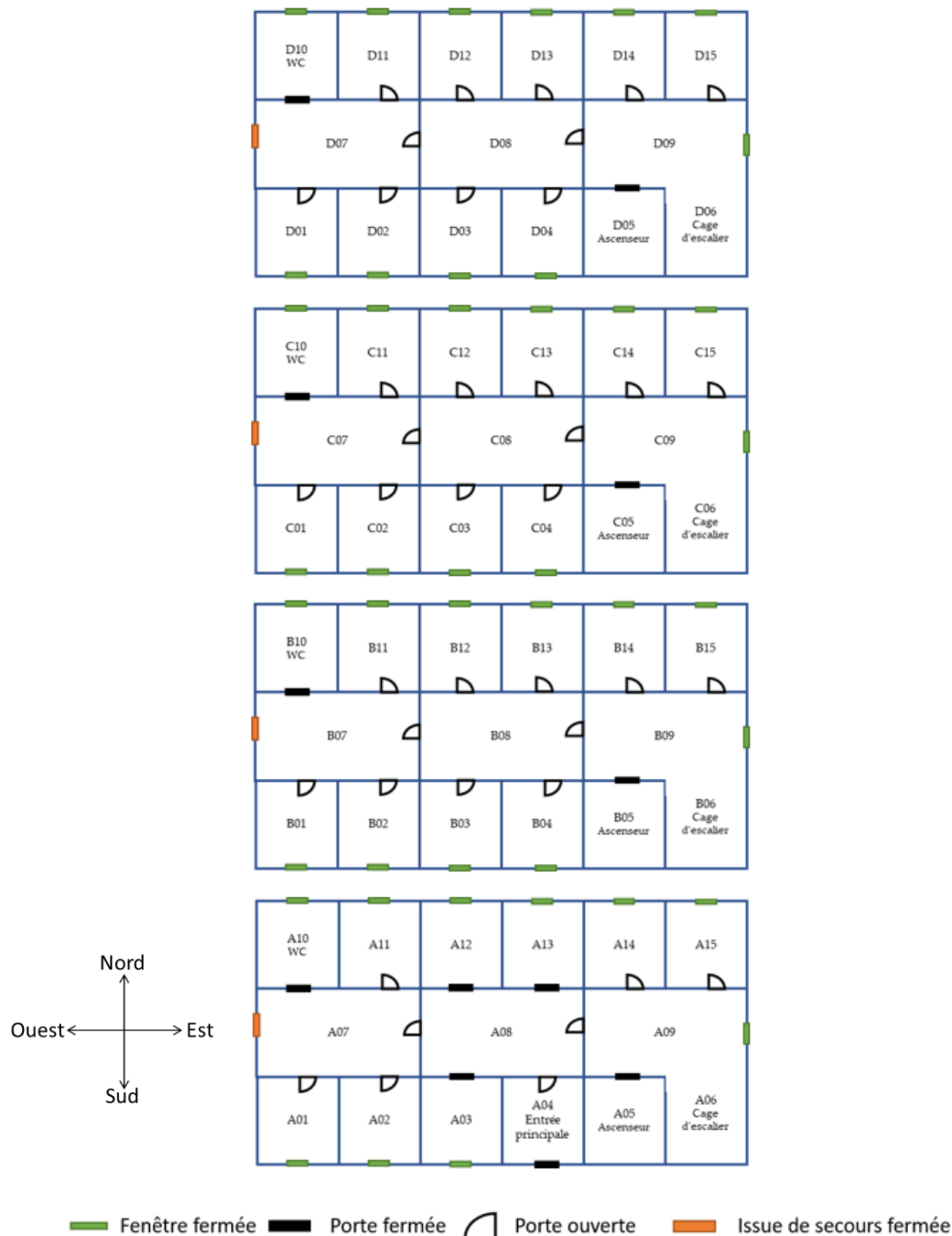


Figure 35 : Plan de l'immeuble avec référencement des locaux et répartition des ouvertures.

Cloisonnements

Les murs périphériques et les planchers sont en béton et ont des épaisseurs respectives de 15 et 10 cm. Ils sont isolés grâce à un doublage associant une plaque de placoplâtre BA13, de 1,25 cm d'épaisseur, et un panneau de laine de roche de 6 cm d'épaisseur. Les cloisons sont constituées d'un complexe BA13/laine de roche/BA13 de 10 cm d'épaisseur.

Les cloisonnements de l'immeuble font donc intervenir plusieurs matériaux, en l'occurrence du placoplâtre, du béton et de la laine de roche, dont les propriétés thermiques, déduites des données fournies par l'institut PPRIME dans le cadre du projet MARINER-DECM [108], sont regroupées dans le Tableau 3.

Matériau	Conductivité ($W/m/K$)	Masse volumique (kg/m^3)	Chaleur spécifique ($J/K/kg$)	Emissivité
Placoplâtre	0,25	900	1000	0,9
Laine de roche	0,038	60	1030	0,9
Béton	1,75	2300	2160	0,7

Tableau 3 : Propriétés thermiques du placoplâtre, de la laine de roche et du béton.

Eléments combustibles

L'immeuble est composé de locaux « vides », de bureaux indépendants et communs, et d'une salle d'archives et de lecture, le local A08.

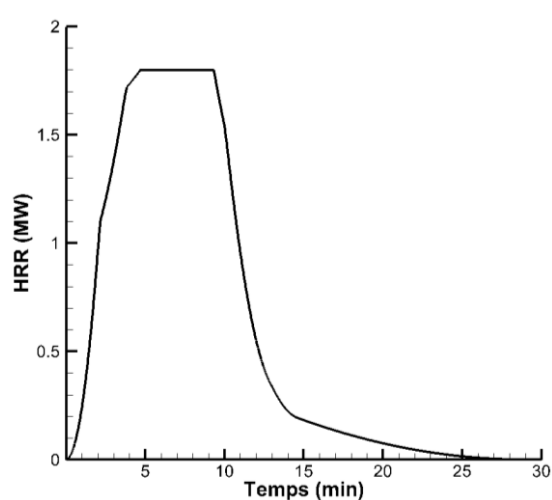
Dans les bureaux, on peut trouver une grande variété de matériels et fournitures combustibles : mobilier en bois, matériel informatique (e.g., ordinateurs, imprimantes), fauteuils ou banquettes rembourrés. Pour représenter cette diversité, le combustible présent dans un local est supposé être constitué d'un mélange de trois éléments au maximum : du bois, en l'occurrence du pin, un polymère thermoplastique, le poly (méthacrylate de méthyle) ou PMMA, et de la mousse polyuréthane (PU), dont la répartition et la charge diffèrent selon le local.

Dans le local d'archives et de lecture, on trouve principalement des matériaux cellulosiques (papier, cartons, mobilier en bois, etc.) que nous avons assimilés à du bois.

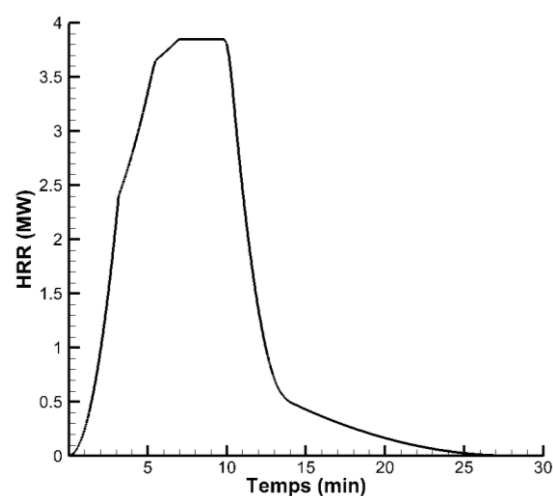
Pour chaque type de local, l'évolution temporelle du débit calorifique (HRR) associé à chaque élément combustible est calculée par la méthode présentée dans le §4.1.1. La puissance totale dégagée par la combustion est supposée additive ; en d'autres termes, l'interaction entre les différents foyers n'est pas prise en compte dans les simulations. On rappelle que la courbe de puissance repose sur la donnée de trois paramètres : le taux de croissance du feu α_c , le pourcentage p de la masse initiale m_0 de combustible au-delà duquel la décroissance du feu a lieu, et sa puissance maximale HRR_{max} . A ce stade de développement, les valeurs de ces paramètres, ainsi que les charges de combustibles, ont été évaluées par nos soins sur la base des essais réalisés dans le dispositif DIAMAN et de visites de bureaux. Elles sont données dans le Tableau 4. Les courbes de puissance totale associées aux différents types de locaux sont représentées ci-dessous (Figure 36).

Local	Combustible(s)	m_0 (kg)	α (W/s ²)	p (%)	HRR_{max} (MW)	Surface au sol (m ²)
Bureau indépendant	Bois	17,5	3	65	0,24	1
	PMMA	15	15	85	0,76	1
	Mousse PU	17,5	49	85	0,81	1
Espace de cotravail	Bois	35	3	65	0,52	2
	PMMA	30	15	85	1,56	2
	Mousse PU	35	49	85	1,77	2
Salle d'archives et de lecture (A08)	Bois	200	3	65	4	2

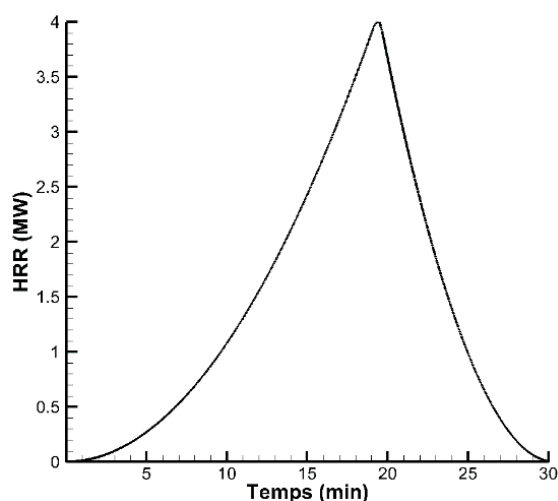
Tableau 4 : Charge, nature et surface au sol des éléments combustibles présents dans les différents types de locaux et paramètres de la courbe de puissance associée.



a) Bureau indépendant.



b) Espace de cotravail.



c) Salle d'archives et de lecture.

Figure 36 : Courbe de puissance de feu pour les différents types de locaux de l'immeuble.

Propriétés des combustibles

Comme nous l'avons déjà mentionné, le modèle à zones intègre une base de données "combustibles" regroupant les propriétés de combustion d'une grande variété de combustibles. La plupart de ces données sont issues des travaux de Tewarson [61]. Le Tableau 5 rassemble les propriétés de combustion des éléments combustibles présents dans les différents types de locaux de l'immeuble.

Combustible	Formule chimique	Facteur d'émission			Δh_{eff} (MJ/kg)	χ
		Suies	CO	HCN		
PMMA	$C_5H_8O_2$	0,022	0,01	0,0	24,2	0,314
Mousse polyuréthane (PU GM 23)	$CH_{1,8}O_{0,35}N_{0,06}$	0,227	0,031	0,0	19,0	0,458
Bois	$CH_{1,7}O_{0,83}$	0,015	0,004	0,0	12,4	0,298

Tableau 5 : Propriétés de combustion des combustibles présents dans les différents types de locaux.

7.2 Données d'entrées du modèle de réseau

Localisation des locaux

L'immeuble est placé dans un repère fixe dont l'origine est située au niveau du plancher du premier étage (altitude zéro) dans le coin sud-ouest du local A01 (Figure 35).

Réseau de connectivités

Le réseau des connectivités entre locaux inclut les connexions par les barrières et les ouvertures libres :

- Les connexions par les barrières sont créées automatiquement, grâce aux positions des locaux et des barrières dans le repère fixe. Par exemple, dans la configuration de l'immeuble donnée sur la Figure 35, le local A02 est connecté par une cloison verticale aux locaux A01 et A03 du même étage et par le plafond au local B02 de l'étage supérieur.
- Les connexions par les ouvertures libres sont créées manuellement. Par exemple, le local A02 est connecté par une porte au local A07. Autre exemple : les locaux A02 et B02 sont connectés par une fenêtre, mais la transmission ne sera effective que si le flashover se produit dans le local A02, provoquant l'éclatement du vitrage, et que le feu y est sous-ventilé.

Disposition des fenêtres

La prise en compte du mode de transmission par les façades rajoute des données d'entrées au modèle de réseau. Pour chaque fenêtre, il faut renseigner :

- Sa position (ici, au centre de la paroi, à 1 m du plancher) ;
- Ses dimensions (ici, 1m×2m) ;
- Son état initial (fermée ou ouverte) ;
- Sa distance, le cas échéant, avec la fenêtre de l'étage supérieur (ici, 1,72 m).

Résultats du modèle à zones

Compte tenu de la géométrie, de la charge et des conditions de ventilation des locaux (Tableau 6), le modèle à zones a dû être appliqué à sept scénarios de feu distincts. Le temps de calcul pour chacune des simulations est inférieur à 1 minute (70s) pour 30 minutes de temps réel.

Le Tableau 6 présente les résultats obtenus à l'aide du modèle à zones, i.e., le temps où se produit le flashover, s'il se produit, le temps à partir duquel le feu commence à décroître et la durée de feu. Pour l'ensemble des simulations, nous avons considéré que le flashover a lieu lorsque la température des fumées excède 550°C.

Les deux premiers cas correspondent aux simulations réalisées dans un local de type "bureau indépendant". Ces locaux possèdent une seule ouverture et une fenêtre qui peut être initialement fermée (cas 1) ou ouverte (cas 2). On peut remarquer que les conditions de ventilation conditionnent l'occurrence du flashover. En effet, lorsque la fenêtre est initialement ouverte, le local en feu n'atteint pas le flashover, en raison notamment des déperditions d'énergie par cette ouverture. Dans le cas contraire, le flashover se produit après 7'49" de feu.

Le même résultat est constaté en comparant les résultats de simulation des cas 4 et 5 pour les espaces de cotravail. Lorsque le local ne possède pas de fenêtre (cas 3) ou qu'elle est initialement fermée (cas 4), la phase d'embrasement généralisé est atteinte en 9'20". Cependant, lorsque la fenêtre est initialement ouverte (cas 5) ou que le local possède 6 portes ouvertes, le flashover n'a pas lieu. Là encore, l'évacuation des fumées par les ouvertures génère des pertes thermiques qui limitent l'augmentation de la température du gaz en zone chaude.

Bien que les espaces de travail soient deux fois plus grands que les bureaux indépendants, on peut constater que les temps de flashover, de décroissance et de fin de feu dans ces locaux sont assez similaires (9'20" vs. 7'49", 10' vs. 9'20", et 28'11" vs. 29', respectivement).

Le cas 7 correspond à la salle d'archives et de lecture. Malgré la grande surface d'ouvertures, la forte charge de combustible explique que le flashover se produise, mais son occurrence est plus tardive que pour les autres types de locaux, après 18'46" de feu.

En raison de l'isolation thermique et de l'épaisseur des cloisonnements, aucune transmission du feu par les parois verticales ou horizontales n'a été observée.

Cas	Local	Nombre de portes ouvertes	Etat initial de la fenêtre	Temps (mm'ss")		
				Flashover	Décroissance	Fin
1	Bureau indépendant	1	Fermée	7'49"	9'20"	29'
2			Ouverte	Nf		
3	Espace de cotravail	4	-	9'20"	10'	28'11"
4			Fermée	9'20"		
5			Ouverte	Nf		
6		6	-	Nf		
7	Salle d'archives et de lecture	6	-	18'46"	19'40"	30'10"

Tableau 6 : Résultats des simulations réalisées avec le modèle à zones pour les différents locaux de l'immeuble. Nf indique que le flashover n'a pas eu lieu.

Pour chacun des cas étudiés, le modèle à zones renseigne sur l'évolution des fumées au cours du temps. On rappelle que ces données sont utilisées par le modèle de réseau pour le calcul du transport des fumées dans toute la structure.

A titre d'exemple, on présente sur la Figure 37 les résultats obtenus pour la salle d'archives et de lecture. Le débit de fumées (Figure 37a) correspond à la somme des débits sortants par les ouvertures. Après 20', le débit est maximal, à 3,5 kg/s, puis il diminue ensuite progressivement dans la phase de décroissance du feu.

L'évolution temporelle de la température des fumées, qui correspond à la température du gaz dans la couche chaude, est donnée sur le diagramme (b) de la Figure 37. La température à laquelle se produit le flashover (ici, 550°C) est atteinte 18'46" après le début du feu. La température des fumées continue ensuite à augmenter pour atteindre 578°C, au bout de 20', avant de décroître.

L'évolution au cours du temps de la masse volumique des fumées (Figure 37c) suit quasiment celle de la température du gaz. Au moment où la température du gaz est maximale, la masse volumique atteint un minimum à environ 0,4 kg/m³. Elle augmente ensuite dans la phase décroissance du feu en raison de l'apport d'air frais et de la diminution de la température du gaz.

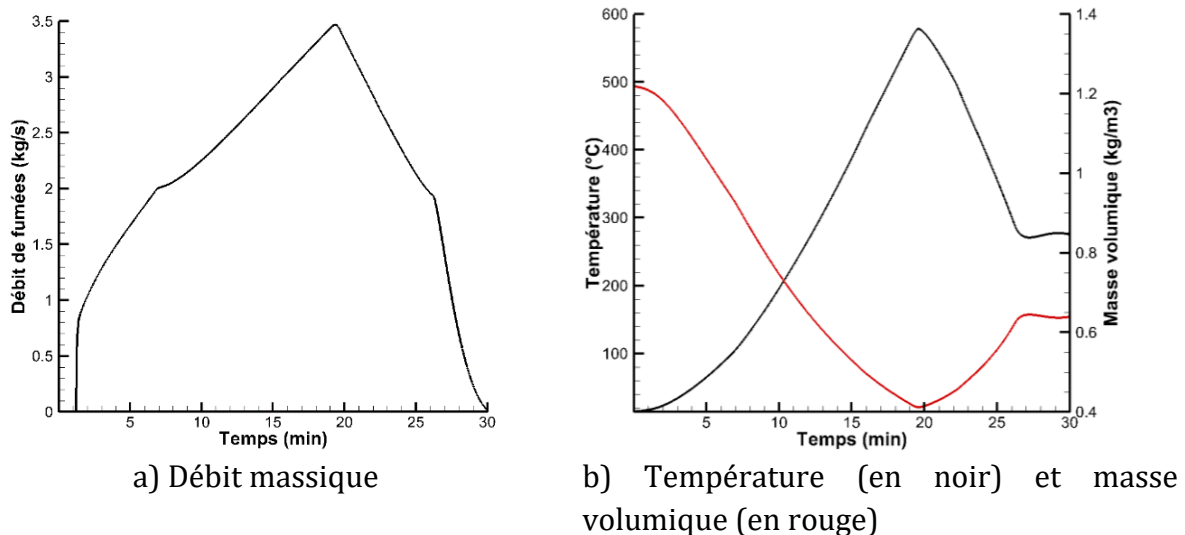


Figure 37 : Evolution temporelle des fumées sortant du local d'archives et de lecture.

7.3 Résultats de simulations

Dans le cas test de démonstration présenté, on s'intéresse à la propagation du feu et des fumées dans l'immeuble dont les issues de secours ont été maintenue fermées (Figure 35). Dans cette configuration, le feu, qui a pris naissance dans le local A08, peut se propager à l'intérieur de l'immeuble, mais aussi en façade.

Le pas de temps utilisé pour calculer la propagation du feu et le transport des fumées est fixé à 1 s. Le temps de calcul pour simuler statistiquement (100 tirages) cette propagation est de 2 secondes pour 1 heure de temps réel.

Chronologie du feu

Le Tableau 7 et la Figure 38 donnent la chronologie du feu et renseigne sur le mode de transmission du feu entre locaux. L'origine du temps correspond à l'inflammation du local A08.

On constate tout d'abord que la propagation du feu se fait aussi bien par les ouvertures (e.g., du local A08 au local A04) que par les fenêtres (e.g., du local A01 au local B01).

Le local source A08 atteint le flashover après 18' de feu. Les locaux A04, A07 et A09, qui lui sont connectés par une porte ouverte, s'enflamment à leur tour dans la minute qui suit. Après avoir atteint le flashover, ces locaux propagent le feu aux locaux restants du premier étage (A01, A02, A11, A14 et A15).

Après 27' de feu, tous les locaux sensibles de l'étage A sont enflammés. En moins de 33', l'ensemble de ces locaux sont touchés par le flashover.

Après 27', toutes les conditions sont réunies pour propager l'incendie au second étage par la façade de l'immeuble (i.e., flashover et feu sous-ventilé dans le local A09), du local A09 au local B09. Sept minutes plus tard, ce même phénomène permet la transmission du feu

en façade vers les locaux B01, B02, B11, B14 et B15. Sur les 6 locaux touchés de l'étage B, aucun n'atteint le flashover.

En 34', le feu s'est propagé dans 15 locaux, sur deux étages de l'immeuble. Sur ces 15 locaux, 9 ont atteint le flashover. Au bout de 63 minutes, le feu s'éteint.

Local	Etage	Mode de transmission	Temps (min)		
			Inflammation	Flashover	Fin
A08	1	-	0	18'	25'
A04	1	Ouverture : A08	19'	25'	28'
A07	1	Ouverture : A08	19'	26'	29''
A09	1	Ouverture : A08	19'	27'	29
A01	1	Ouverture : A07	27'	33'	36'
A02	1	Ouverture : A07	27'	33'	36'
A11	1	Ouverture : A07	27'	33'	36'
A14	1	Ouverture : A09	27'	33'	36'
A15	1	Ouverture : A09	27'	33'	36'
B09	2	Fenêtre : A09	27'	-	55'
B01	2	Fenêtre : A01	34'	-	63'
B02	2	Fenêtre : A02	34'	-	63'
B11	2	Fenêtre : A11	34'	-	63'
B14	2	Fenêtre : A14	34'	-	63'
B15	2	Fenêtre : A15	34'	-	63'

Tableau 7 : Chronologie du feu et modes de transmission entre locaux.

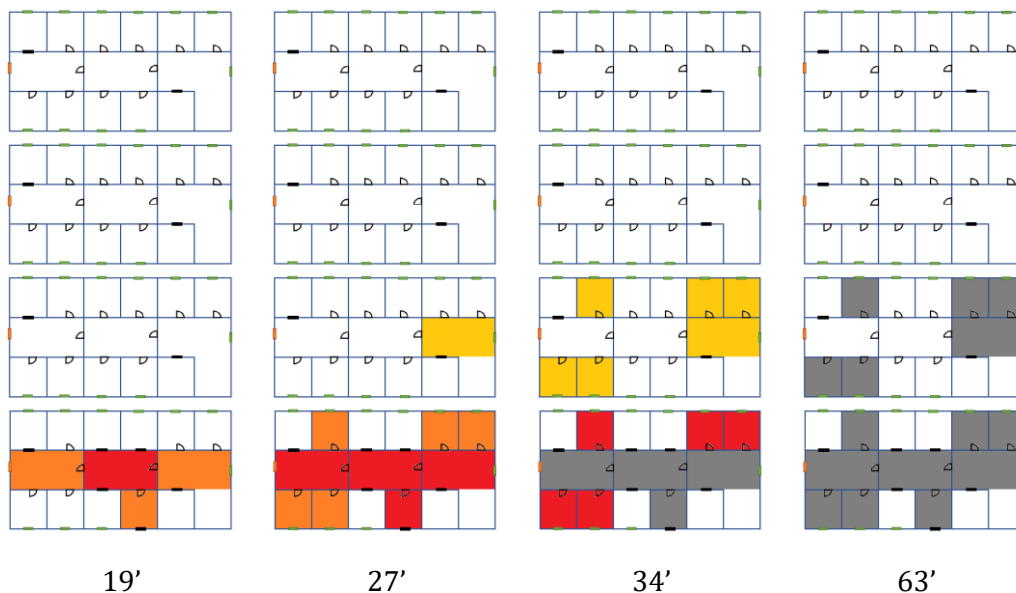


Figure 38 : Cartographies du feu calculées par le modèle de réseau après 19', 27', 34' et 63' de feu. En orange, les locaux enflammés ; en rouge, ceux qui ont atteint le flashover ; en jaune, les locaux où la transmission du feu s'est faite par une fenêtre ; en gris les locaux où le feu s'est éteint.

Chronologie de remplissage

La Figure 39 donne la chronologie des fumées. On rappelle que les fumées se propagent uniquement par les ouvertures entre locaux et que leur propagation vers les étages supérieurs se fait par la cage d'escalier.

Dans un premier temps, les fumées se propagent horizontalement dans l'étage A et remplissent les locaux adjacents au local source du feu (A07, A09 et A04), puis leurs locaux voisins (A01, A02, A14 et A15), après respectivement 6' et 10' de feu. Les fumées accèdent ensuite aux étages supérieurs par la cage d'escalier et envahissent de façon simultanée les locaux 09 en 15', puis les locaux 13 et 14 en 17'. A partir de 21', les locaux A04, A07 et A08 s'enflamment et leurs débits de fumées s'ajoutent à celui du local A08, on remarque que le remplissage des locaux s'accélère. En effet, les fumées remplissent les locaux 03, 04, 11 et 12 (25'), puis les espaces de cotravail 08 (32') et enfin les bureaux indépendants 01, 02 et 11 (36'). En 36 minutes, les fumées ont envahi tout l'espace disponible, à savoir 49 locaux sur les 4 étages.

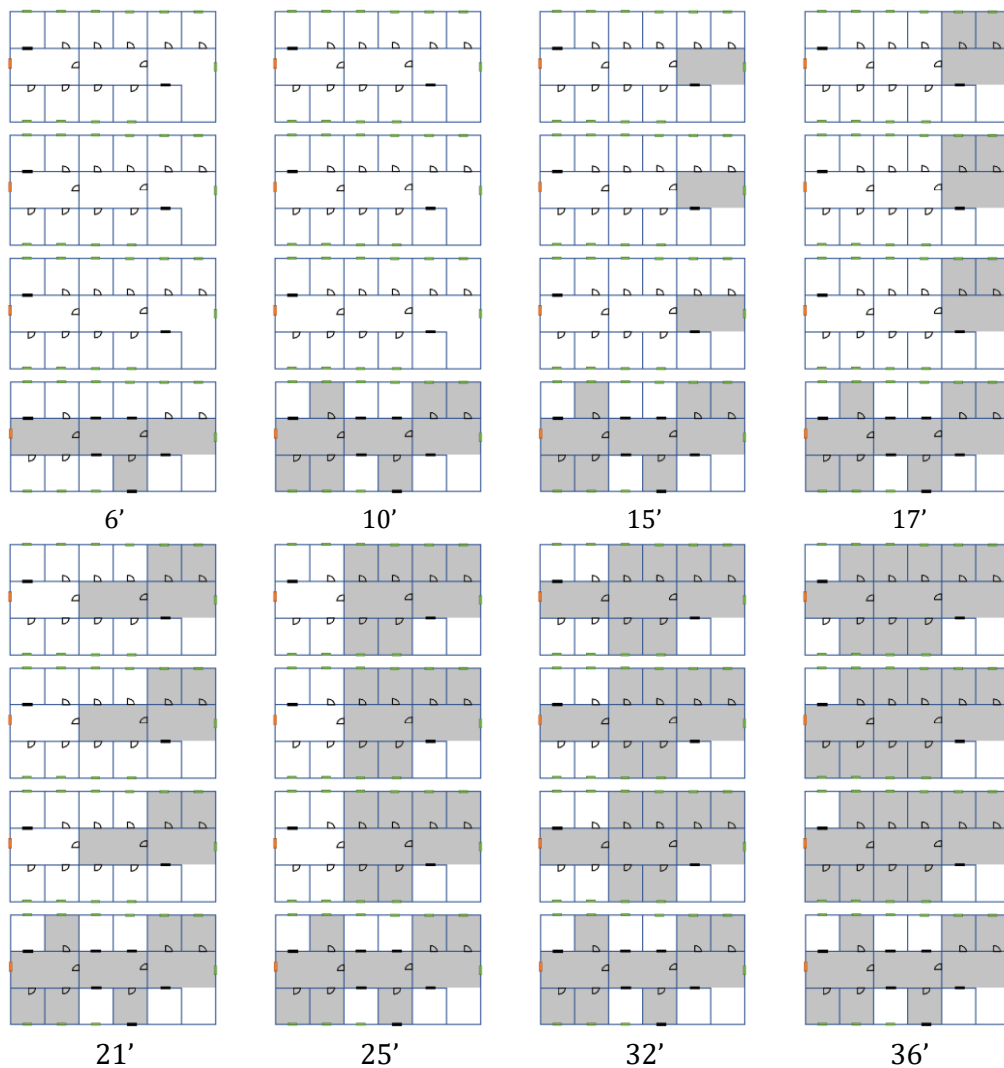


Figure 39 : Cartographies des fumées calculées par le modèle de réseau après 6', 10', 15', 17', 21', 25', 32' et 36' de feu. Les zones grisées correspondent aux locaux où la hauteur libre de fumées est inférieure à 1,80 m.

7.4 Comparaison avec le code SAFIR

Afin d'évaluer la capacité du modèle de remplissage à simuler la propagation des fumées, nous avons simulé le cas test de démonstration avec le code SAFIR, sur les 20 premières minutes du feu, avant la transmission de l'incendie aux locaux adjacents du compartiment A08. Deux configurations ont été étudiées selon que les issues de secours, situées dans les locaux 07 (voir Figure 35), sont fermées ou ouvertes.

7.4.1 Issues de secours fermées

A titre d'illustration, la Figure 40 montre le champ de concentration des fumées calculé par le code SAFIR après 15 minutes de feu.

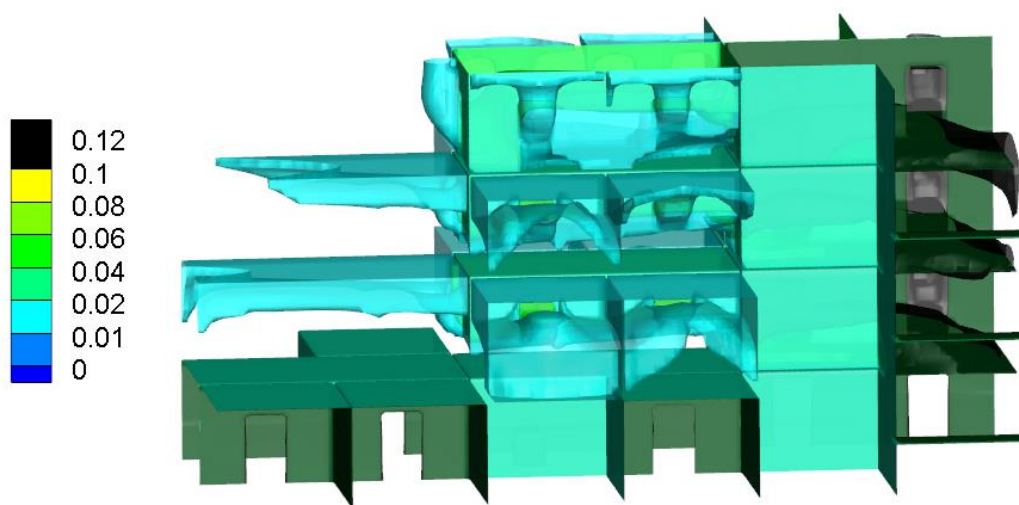


Figure 40 : Champ de concentration des fumées (en ppm) calculé par le code SAFIR après 15' de feu.

La chronologie de remplissage des locaux obtenue avec le code SAFIR est donnée sur la Figure 41.

On remarque que cette chronologie est relativement proche de celle déterminée par le modèle de réseau (Figure 39). Les fumées remplissent d'abord l'étage A, en moins de 15' puis se déplacent vers la cage d'escalier (A06).

Le remplissage des étages supérieurs (B, C et D) commence par le local D15 en 15' puis se fait en simultané pour les locaux 09 (17'). Avant l'inflammation des locaux A04, A07 et A08, 18 locaux sont envahis de fumées jusqu'à 1,80 m au-dessus du plancher.

On remarque également que l'hypothèse de remplissage de « proche en proche » est validée dans cette configuration : les locaux se remplissent les uns après les autres jusqu'à la hauteur des soffites, puis propagent les fumées aux compartiments adjacents. Lorsqu'un local est connecté à plusieurs locaux par une porte (e.g., B08), les fumées sont équiréparties, et dans le cas d'une connexion par une trappe (connexion verticale), tous les locaux supérieurs connectés se remplissent simultanément.

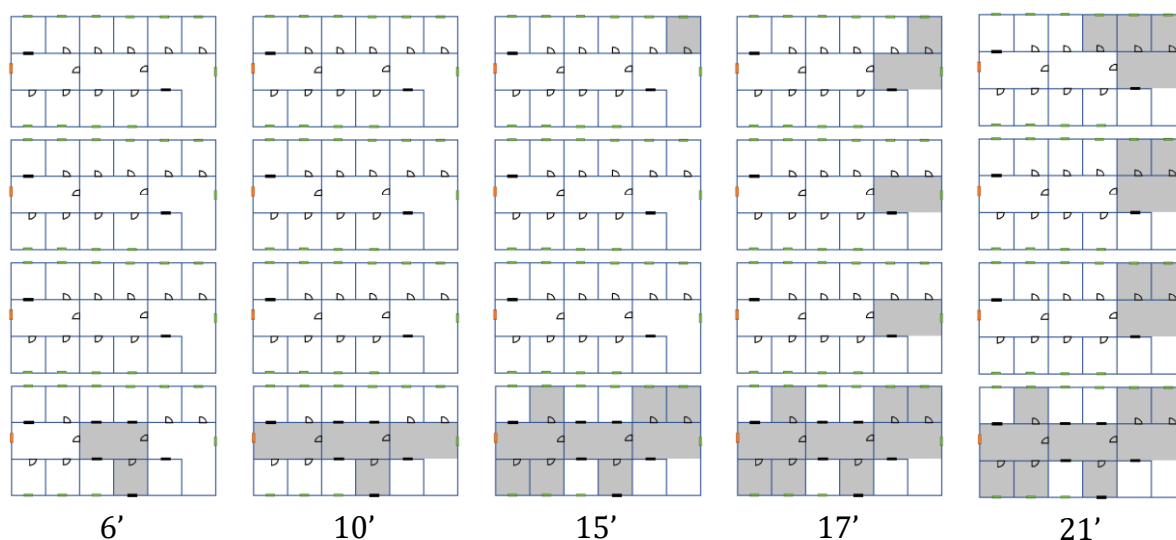


Figure 41 : Cartographies des fumées données par le code SAFIR après 6', 10', 15', 17', 21' de feu.

L'histogramme de la Figure 42 compare les temps de remplissage obtenus avec le modèle de réseau et le code SAFIR. On observe que le modèle de réseau sous-estime les temps de remplissage ; i.e., les locaux se remplissent plus vite. Dans la simulation réalisée avec le code SAFIR, la fumée a tendance à s'accumuler au premier étage, au détriment des étages supérieurs. Ces écarts peuvent s'expliquer notamment par le fait que la corrélation de Bailey et al. [104], validée sur des feux de corridor, n'est pas totalement adaptée à la configuration de l'immeuble. Avec le modèle de réseau, les fumées ne se refroidissent pas assez vite, ce qui accélère le remplissage successif des locaux.

Néanmoins, l'analyse comparative montre un accord satisfaisant, en termes de locaux touchés et de chronologie, avec un écart moyen de 3'.

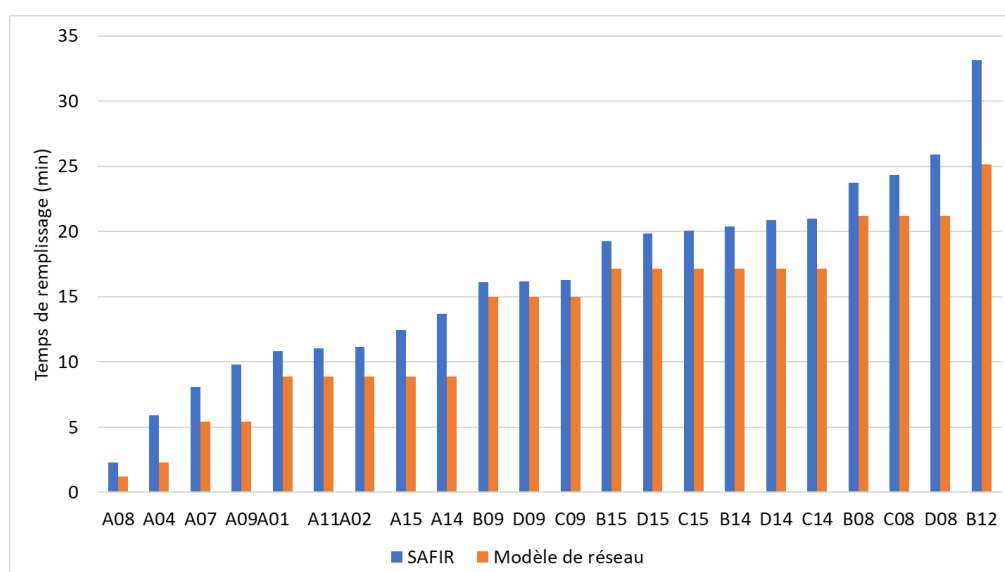


Figure 42 : Comparaison des temps de remplissage des locaux calculés par le modèle de réseau (en orange) et le code SAFIR (en bleu).

7.4.2 Issues de secours ouvertes

On étudie ici la propagation des fumées dans la structure pour laquelle les issues de secours sont maintenues ouvertes, ce qui modifie les conditions de ventilation. A titre d'illustration, la Figure 43 montre le champ de concentration des fumées calculé par le code SAFIR après 15 minutes de feu.

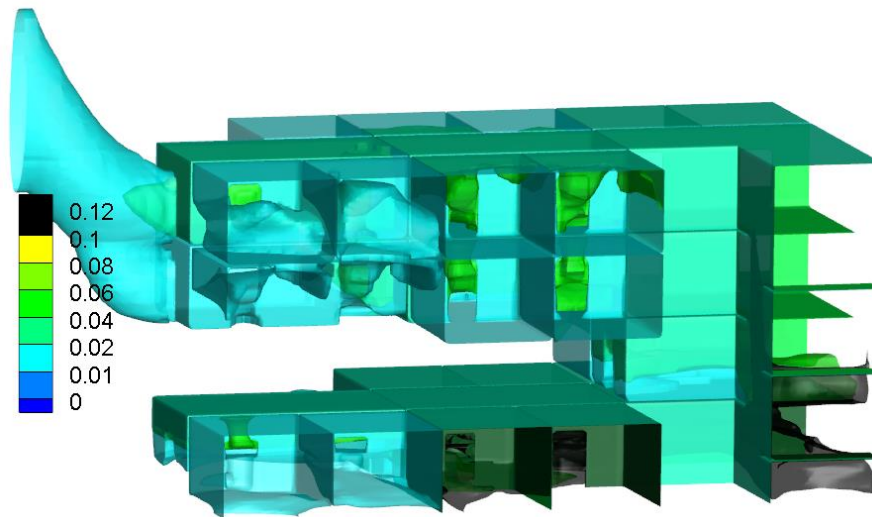


Figure 43 : Champ de concentration des fumées (en ppm) calculé par le code SAFIR après 15' de feu.

Influence de la ventilation sur la dynamique des fumées

La chronologie de remplissage des locaux obtenue avec le code SAFIR dans cette configuration est représentée sur la Figure 44. Elle diffère sensiblement de celle obtenue lorsque les issues de secours sont maintenues fermées (Figure 41).

Les premiers locaux à être remplis sont la salle d'archives A08 et l'entrée principale A04, après 6' de feu. L'état de remplissage de l'immeuble reste le même durant 4'. Après 15', les fumées remplissent les bureaux A14 et A15, circulent vers les étages supérieurs et envahissent les espaces de cotravail C09 et D09.

A partir de 17', on peut remarquer une différence de remplissage entre les quatre étages de l'immeuble. Les fumées envahissent en priorité les locaux des étages C et D (D08, C14, C15, D14 et D15), alors que le remplissage de l'étage B commence à peine (B09). Les espaces de cotravail A07 et A09 sont envahis de fumées.

Après 21', la différence de remplissage entre les différents étages est évidente. Les étages A et D ont quasiment fini de se remplir, avec respectivement 6 et 7 locaux remplis sur 12, 4 pour l'étage C et seulement 2 à l'étage B.

On constate donc que l'interaction avec la ventilation modifie le transport des fumées et donc la chronologie de remplissage des locaux. Les fumées sont transportées en priorité vers les étages C et D, ce qui ralentit le remplissage des autres étages et notamment de

l'étage B. De plus, les ouvertures vers l'extérieur provoquent une perte de débit de fumées qui s'échappent par les issues de secours.

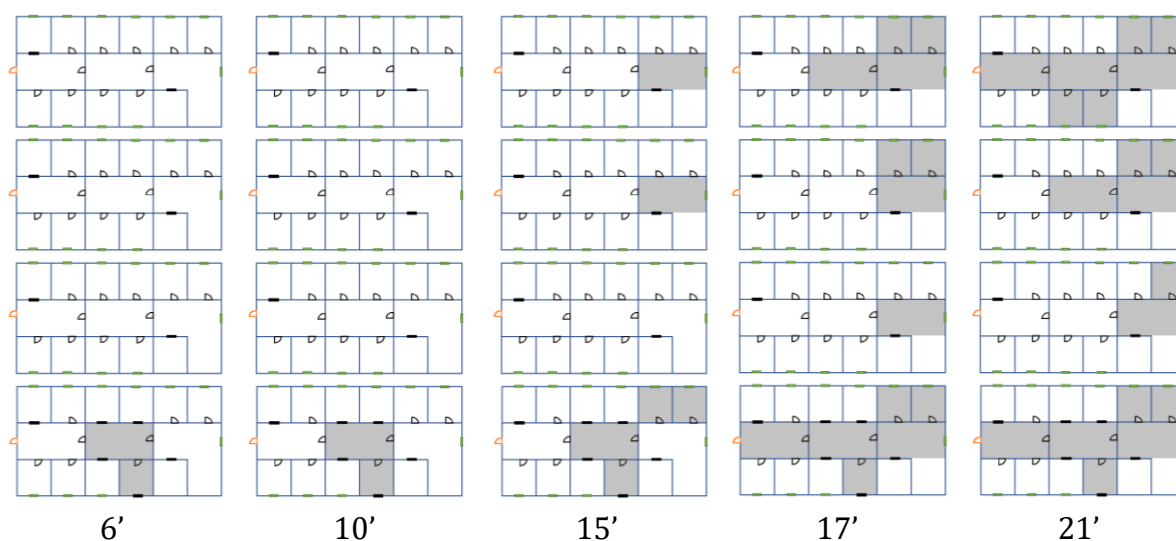


Figure 44 : Cartographie des fumées calculées par le code SAFIR après 6', 10', 15', 17' et 21' de feu.

Comparaison modèle de réseau/ code SAFIR

L'histogramme de la Figure 45 permet de comparer les résultats obtenus avec le modèle de réseau et le code SAFIR. Les écarts entre les deux modèles sont ici plus marqués que pour le cas 1. L'ouverture des issues de secours modifie le chemin emprunté par les fumées qui circulent prioritairement vers les étages C et D, ce que le modèle de réseau ne peut pas prendre en compte. Il sous-estime les temps de remplissage en particulier ceux des locaux A09 et A07 de l'étage B.

En d'autres termes, le simple modèle de remplissage montre ses limites lorsque les conditions de ventilation créent une interaction forte entre le feu et le système complet [15].

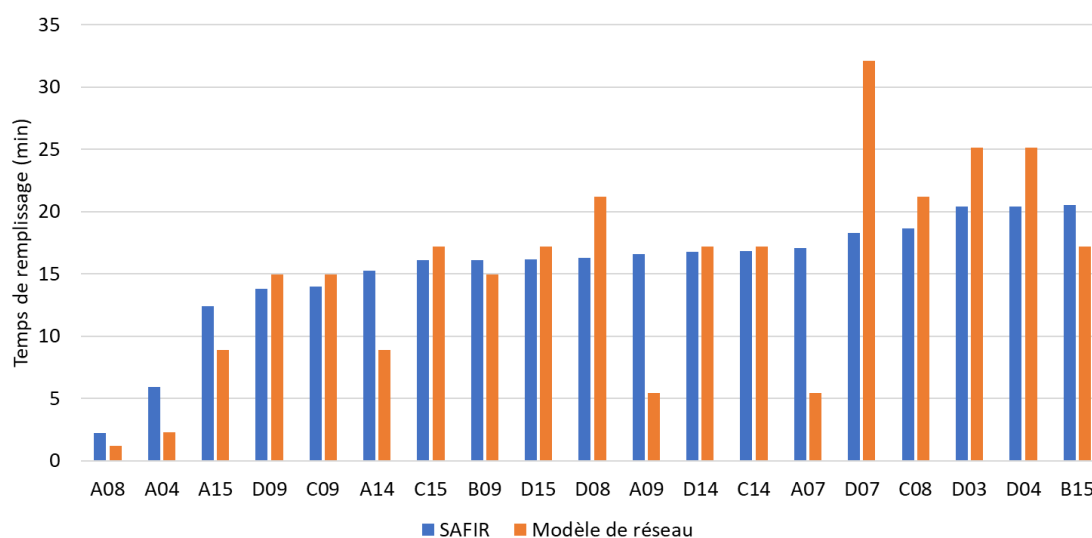


Figure 45 : Comparaison des temps de remplissage des locaux calculés par le modèle de réseau (en orange) et par le code SAFIR (en bleu).

Chapitre 8 Application du modèle de réseau à une corvette militaire

La démonstration en environnement militaire du projet MARINER DECM a consisté à appliquer le modèle de réseau à une corvette générique, représentative des corvettes de la Marine Nationale, la corvette SURVIVE de QinetiC (Figure 46). Cette corvette est composée de sept ponts et de 115 locaux, dont 96, dits sensibles, sont susceptibles de propager le feu.

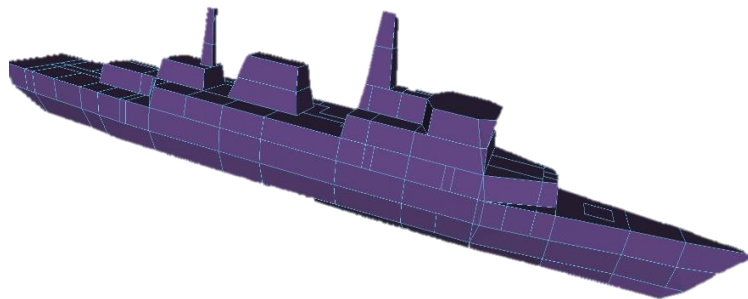


Figure 46 : Vue 3D de la corvette générique SURVIVE de QinetiC.

Comme pour l'immeuble de grande hauteur, la simulation du feu dans une structure se fait en deux étapes. Dans un premier temps, le modèle à zones est utilisé dans chaque local contenant du combustible pour estimer les durées des différentes phases de feu et de transmission par les barrières, ainsi que l'évolution de l'état des fumées. Dans un second temps, le modèle de réseau est utilisé pour calculer la propagation du feu et des fumées dans la structure.

8.1 Agencement général et contexte

Locaux type

Les locaux sensibles ont été classés par DGA TN selon leur fonction en dix types différents. Dans chaque type de local sensible, un ou plusieurs éléments combustibles peuvent être présents. Les locaux qui ne contiennent pas de combustible sont qualifiés de « vide ».

Le Tableau 8 décrit, pour chaque type de local sensible, la nature des éléments combustibles présents, les combustibles équivalents utilisés, leur charge (en kg/m^2) respective, ainsi que le pourcentage de surface au sol qu'ils occupent. Par exemple, dans un local de type « logement », les éléments combustibles peuvent être assimilés à un mélange de mousse polyuréthane (PU) et de PMMA, avec des charges respectives de 7,7 et 4,3 kg/m^2 . Chaque combustible équivalent occupe 7,5% de la surface au sol.

Type de local	Eléments combustibles	Combustible(s) équivalent(s)	Charge(s) (kg/m ²)	Surface au sol (%)
Coursive	Câbles électriques	PMMA	45	20
Electricité	Câbles électriques	PMMA	75	10
Logement	Mobilier, couchage, textiles, ...	Mousse PU PMMA	7,7 4,3	7,5 7,5
Munition	Matière pyrotechnique			
Opérationnel	Equipements électroniques et informatiques, nappes de câbles électriques	Mousse PU PMMA	2,7 4,5	7,5 7,5
Propulsion	Hydrocarbures	Heptane Gazole	12,1 11,4	5 5
Réservoir	Hydrocarbures et huiles	Gazole	Totalité du local	10
Restauration	Chaises, banquettes, meubles en bois ...	Mousse PU PMMA Bois	1,1 3,6 16	3,33 3,33 3,33
Stockage hydrocarbure	Hydrocarbures	Heptane	71	10
Stockage mixte	Local dans lequel sont stockés des produits autres que les hydrocarbures	Heptane PMMA Bois	91,6 264 5	3,33 3,33 3,33

Tableau 8 : Type de locaux sensibles, combustible équivalent, charge et surface au sol associée.

Les propriétés de combustion des combustibles équivalents sont regroupées dans le Tableau 9 et sont issues des travaux de Tewarson [61] et de l'Institut PPRIME [108]. La méthode présentée dans le §4.1.1 est utilisée pour déterminer la courbe de puissance pour chaque local de la corvette. Les paramètres de la courbe de puissance du feu sont donnés dans le Tableau 9.

Combustible équivalent	Formule chimique	Facteur d'émission			Δh_{eff} (MJ/kg)	χ	HRR_{max} (MW)	α (W/s ²)	p (%)
		Suies	CO	HCN					
Heptane	C_7H_{16}	0,037	0,01	0,0	41,2	0,33	1,40	49	85
PMMA	$C_5H_8O_2$	0,022	0,01	0,0	24,2	0,314	0,45	3	80
Mousse PU (GM 23)	$CH_{1,8}O_{0,35}N_{0,06}$	0,227	0,031	0,0	19,0	0,458	0,65	49	85
Bois	$CH_{1,7}O_{0,83}$	0,015	0,004	0,0	12,4	0,298	0,39	3	65
Gazole	$C_{12}H_{24}$	0,059	0,01	0,0	36,9	0,336	1,56	49	85

Tableau 9 : Propriétés de combustion des combustibles équivalents de la corvette.

HRR_{max} représente ici le débit calorifique maximal pour 1m² de combustible.

Cloisonnement

Les cloisonnements peuvent être constitués d'acier nu ou recouvert d'un isolant. L'isolation thermique du local dépend de son type et de son emplacement dans le navire. Les propriétés thermiques des matériaux isolants utilisés sont rassemblées dans le Tableau 10. La dépendance en température de la conductivité thermique de l'isolant est prise en compte sous la forme d'un polynôme de degré 2, dont les coefficients ont été déduits des données « constructeur ».

Matériau	Conductivité thermique ($W/m/K$)	Masse volumique (kg/m^3)	Chaleur spécifique ($J/K/kg$)	Emissivité
Acier	54	7850	470	0,95
Laine de roche UMPA 24	$6,026 \times 10^{-7}T^2 - 2,245 \times 10^{-4}T + 4,840 \times 10^{-2}$	24	1000	0,9
Laine de roche UMPA 36	$3,358 \times 10^{-7}T^2 - 5,595 \times 10^{-5}T + 2,107 \times 10^{-2}$	36	1000	0,9
Laine de roche UMPA 66	$1,856 \times 10^{-7}T^2 - 6,636 \times 10^{-6}T + 1,345 \times 10^{-2}$	66	1000	0,9
Laine de verre PI 662	0,037	16	1000	0,9
Laine de roche SEAROX	$5,0 \times 10^{-7}T^2 - 1,332 \times 10^{-4}T + 3,254 \times 10^{-2}$	100	1000	0,9

Tableau 10 : Propriétés thermiques des matériaux constitutifs des cloisonnements de la corvette.

Situation d'étanchéité

Les bâtiments de la Marine Nationale sont généralement cloisonnés en zones de sécurité, elles-mêmes décomposées en sous-zones afin d'assurer le confinement de l'incendie et de limiter sa propagation à l'ensemble du navire. Six situations d'étanchéité sont prévues et adoptées selon l'activité du navire et les menaces auxquelles il risque d'être confronté :

- La situation d'étanchéité SE 0 a pour seul objectif la protection NBC (nucléaire, bactériologique, chimique)
- Trois situations d'étanchéité principales (SE 5, 3 et 1) qui renforcent progressivement l'étanchéité du navire, mais limitent d'autant la circulation des personnels à bord.
- Deux situations d'étanchéité dérivées (SE 4 et 2) qui permettent d'assouplir certaines dispositions des situations principales.

Sur un bâtiment de la Marine Nationale, les portes possèdent une signalétique, nommée arlequin, qui indique l'état de la porte en fonction de la situation d'étanchéité du navire. L'arlequin associe, sur une grille de six cases (une pour chaque situation d'étanchéité), la situation d'étanchéité à une couleur :



- En rouge : l'ouverture de la porte est strictement interdite ;
- En jaune : l'ouverture de la porte est autorisée pour le passage mais doit être refermée aussitôt après ;
- En vert : l'ouverture de la porte est autorisée et peut rester ouverte.

Pour l'application à la corvette générique SURVIVE, la situation d'étanchéité SE 5 a été choisie car elle est la plus favorable à la propagation du feu et des fumées puisque toutes les issues intérieures sont ouvertes (arlequins de couleur verte). Elle autorise la circulation à bord sans restriction.

Répartition

Les figures ci-dessous (Figure 47 à Figure 50) montre la répartition des locaux type et les positions des issues (i.e., les portes, les escaliers et les trappes d'accès aux ponts) dans la situation d'étanchéité SE 5, ainsi que le système d'isolation.

La corvette est divisée en tranches séparées par des cofferdams¹, une lettre étant attribuée à chaque tranche (ici, de A à L) en commençant par l'avant. Chaque local est repéré par son gisement comprenant une lettre, correspondant à la tranche où il se situe, suivie de trois ou quatre chiffres.

Le premier chiffre, ou la paire de chiffres commençant par un zéro s'il y a quatre chiffres après la lettre, donne la position en altitude, par rapport au pont principal, noté 00. On aura donc pour les ponts situés au-dessus du pont principal, le premier pont 01, le deuxième pont 02, etc., alors que ceux situés en-dessous du pont principal, on aura : le premier faux-pont 1, le deuxième faux-pont 2, etc.

Le dernier chiffre donne sa position par rapport à l'axe : 0 dans l'axe ; chiffre impair à tribord, le chiffre étant d'autant plus important que le local est en abord et séparé de l'axe par d'autres locaux ; chiffre pair à bâbord. L'avant dernier chiffre donne la position par rapport à l'avant de la tranche. Il peut être 1, 2, 3, 4, ... selon que le local est séparé de la cloison avant par 0, 1, 2, 3, ... locaux.

¹ Un cofferdam ou maille sèche est un espace de séparation entre deux parties de la coque d'un navire ; il est délimité par deux cloisons étanches de part et d'autre.

Par exemple, le local D122 est situé dans la tranche D, au premier faux-pont, et il est à bâbord, séparé de l'axe du navire par la coursive D110.

Pour les locaux de géométrie complexe (e.g., coursive longue), un découpage en locaux virtuels a été effectué, de façon à rester dans le domaine de validité du modèle à zones, en termes de rapport d'aspect des locaux. Il a été alors nécessaire de référencer ces locaux « virtuels » et de modifier le graphe des connectivités du réseau en conséquence. Le gisement d'origine du local initial est conservé, mais il est suivi du suffixe #n où n correspond au numéro du local virtuel.

En ce qui concerne la corvette, seule la coursive F0010 a été découpée en 3 locaux virtuels, dont les gisements s'écrivent F0010#1, F0010#2 et F0010#3.

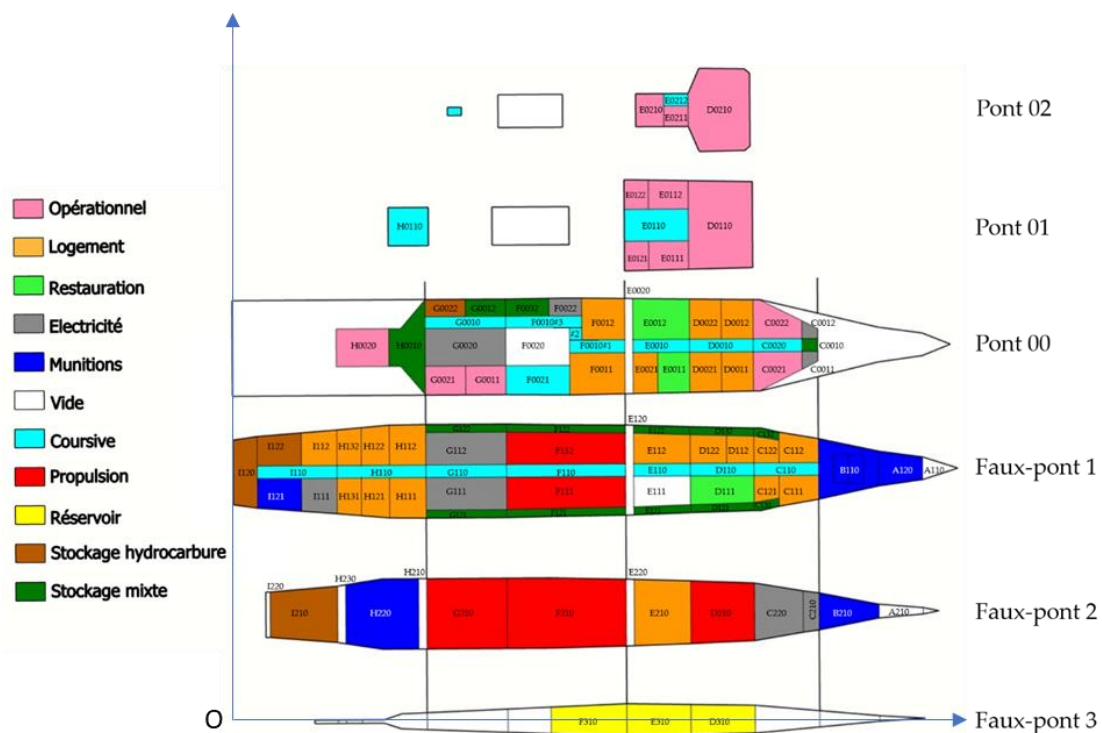


Figure 47 : Plan de la corvette, montrant le référencement des locaux.

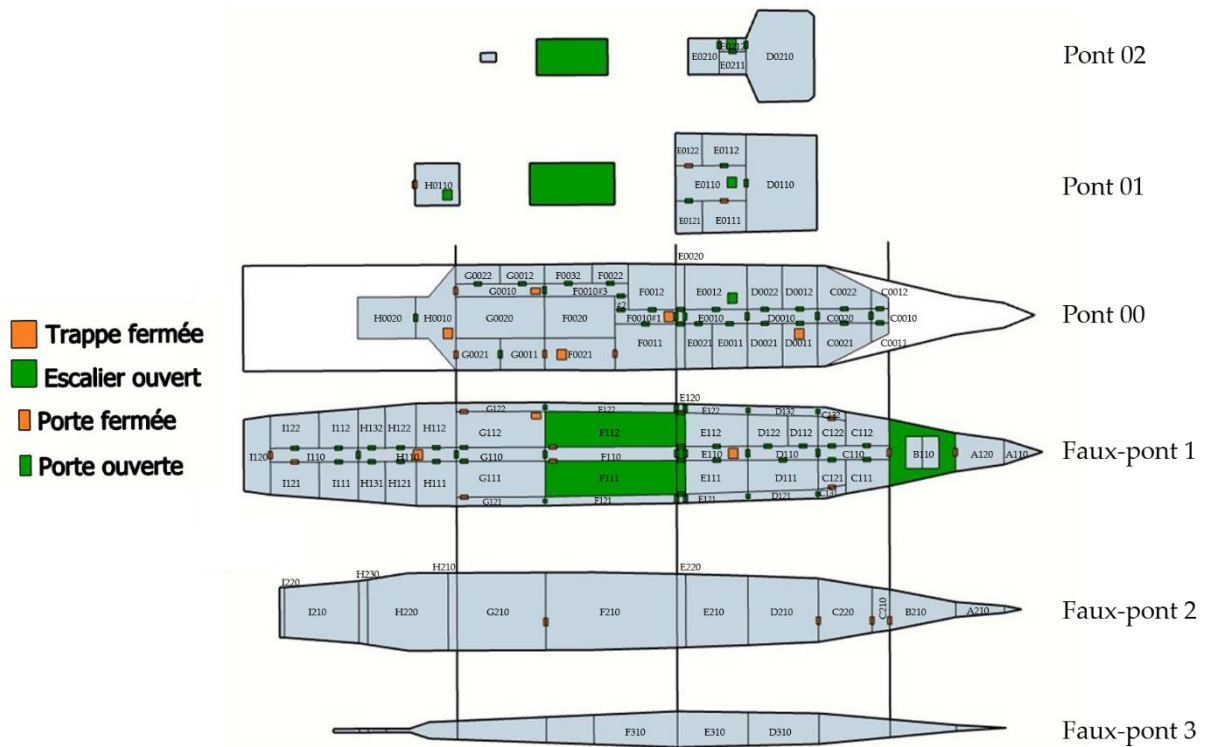


Figure 48 : Plan de la corvette, montrant les positions des issues dans la situation d'étanchéité SE 5.

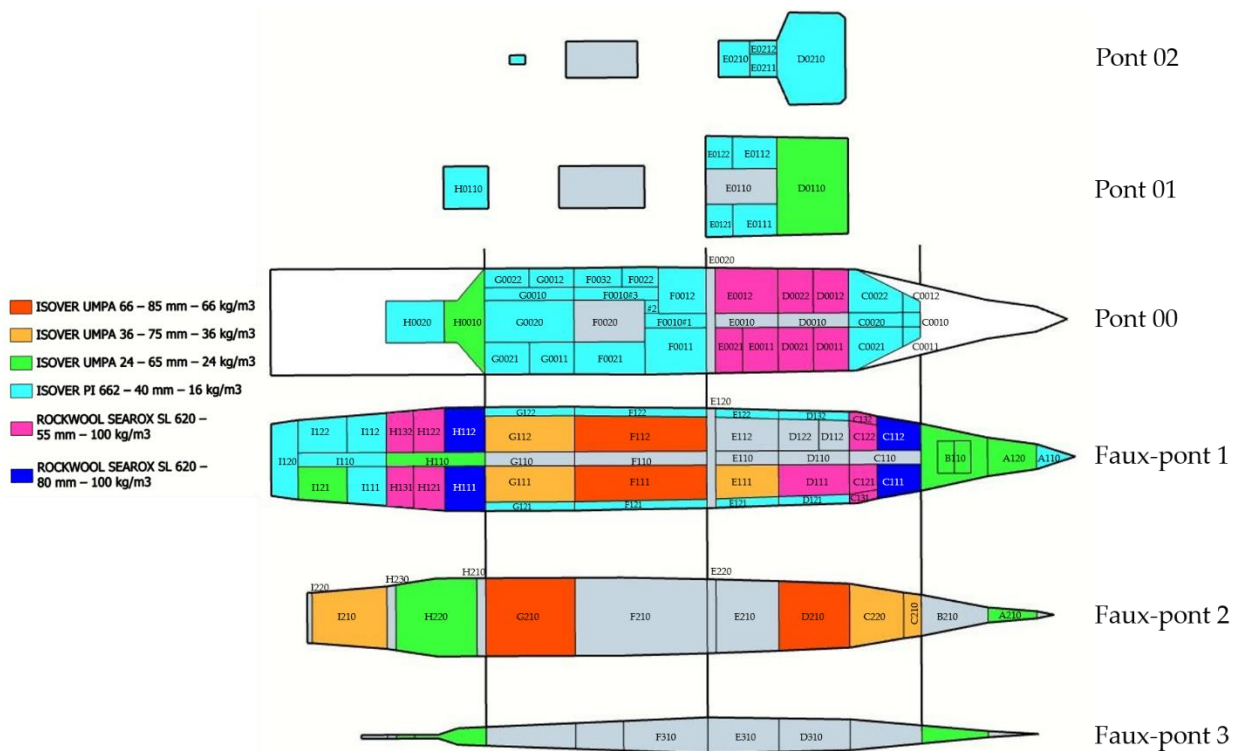


Figure 49 : Plan de la corvette, montrant le système d'isolation en plafond.

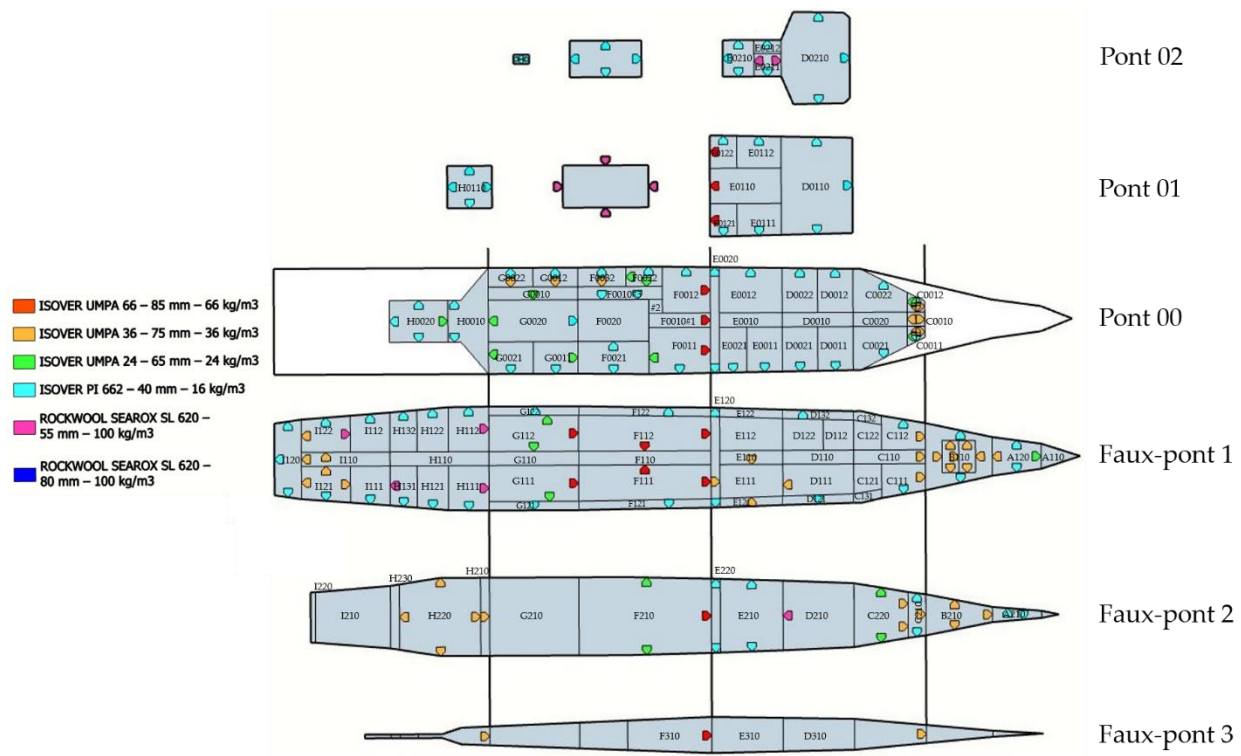


Figure 50 : Plan de la corvette, montrant le système d'isolation en parois.

8.2 Données d'entrées du modèle de réseau

Les données d'entrées du modèle de réseau sont les mêmes que pour l'immeuble de grande hauteur à savoir :

- Localisation des locaux : tous les locaux de la corvette sont géoréférencés par rapport à un repère fixe R dont l'origine est indiquée sur la Figure 47;
- Réseau de connectivité par les barrières et par les ouvertures ;
- Résultats du modèle à zones (durées des phases du feu, temps de transmission par les barrières et évolution des fumées).

Dans les simulations de propagation du feu et des fumées, le feu se déclenche dans le local E112, situé sur le faux pont 1. On présente ci-après les résultats obtenus dans ce local avec le modèle à zones. Le temps de calcul pour cette simulation est de 90 s pour 50 minutes de temps réel.

Développement du feu dans le compartiment E112

Le compartiment E112 est un local de type logement de dimension 7 m × 3,7 m et de 3 m de haut. Il est constitué de parois en acier nu de 1 cm d'épaisseur. Il possède une ouverture vers le haut de 0,81 m² donnant sur le local E0012 et une porte de dimensions 2 m × 1 m donnant sur la coursive E110.

La charge et la surface de combustible au sol, ainsi que les paramètres de la courbe de puissance associée aux éléments combustibles présents dans le local, à savoir la mousse PU et le PMMA, sont donnés dans le Tableau 11. La courbe de puissance obtenue par la méthode présentée dans le §4.1.1 est représentée sur la Figure 51.

Local	Combustible(s)	m_0 (kg)	α (W/s ²)	p (%)	HRR_{max} (MW)	Surface au sol (m ²)
E112	Mousse PU	165,8	49	0,85	2,05	1,94
	PMMA	95,8	3	0,80	1,88	1,94

Tableau 11 : Charge, nature et surface au sol des éléments combustibles présents dans le compartiment E112 et paramètres de la courbe de puissance associée.

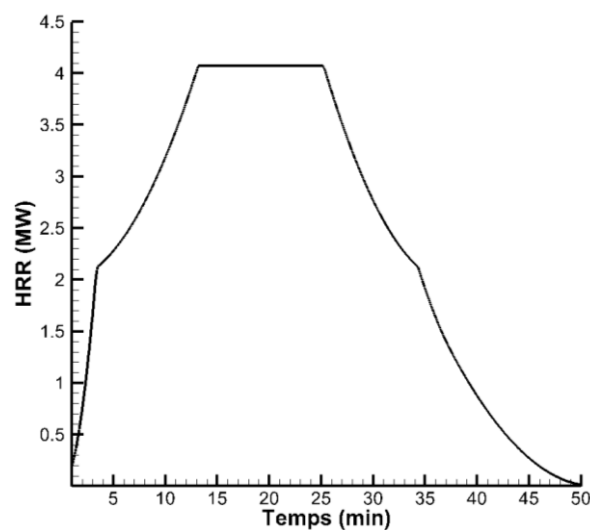


Figure 51 : Courbe de puissance du feu dans le local E112.

Le développement du feu dans le local E112 est calculé à l'aide du modèle à zones, qui fournit les durées des phases du feu et de transmission par les barrières (Tableau 12), ainsi que les évolutions temporelles du débit, de la température et de la masse volumique des fumées sortant du local (Figure 52). Le flashover dans le local se produit lorsque la température du gaz en couche chaude excède 550°C, soit après 12'57" de feu. Compte tenu de la forte diffusivité thermique de l'acier nu, les durées de tenue au feu des parois sont relativement courtes (Tableau 12).

Temps (mm'ss")			Temps de transmission (mm'ss")		
Flashover	Décroissance	Fin	Parois latérales	Plafond	Plancher
12'57"	16'	21'21"	14'30"	15'60"	19'44"

Tableau 12 : Durées des phases du feu et de transmission par les barrières obtenues à l'aide du modèle à zones pour le local E112.

En ce qui concerne le débit des fumées sortantes (Figure 52a), celui-ci atteint en 15' sa valeur maximale, soit 2,8 kg/s; il reste ensuite constant durant 10' avec de décroître progressivement. Les évolutions de la température et de la masse volumique des fumées sont représentées sur la Figure 52b. La température des gaz atteint 550°C en 13', ce qui correspond au flashover. Elle continue ensuite d'augmenter jusqu'à atteindre 610°C en 25'. A cet instant, la masse volumique passe par un minimum à 0,4 kg/m³.

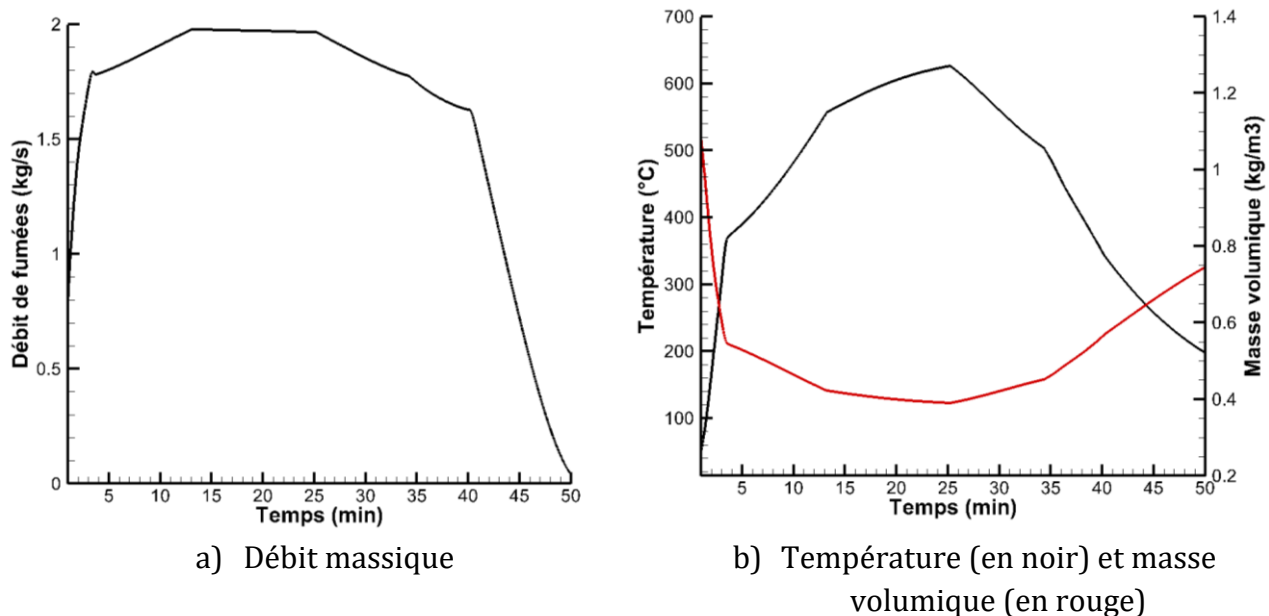


Figure 52 : Evolution temporelle des fumées sortant du local E112.

8.3 Exemples d'applications

Nous présentons ci-dessous deux cas de démonstration. Dans le premier cas, on suppose que le feu se développe dans la corvette où la ventilation mécanique a été coupée ; le second correspond à un scénario accidentel où la ventilation mécanique n'a pas été interrompue, favorisant la propagation des fumées par les gaines de ventilation.

Le pas de temps utilisé pour le calcul de la propagation du feu et des fumées est fixé à 1s. Le temps de calcul pour simuler statistiquement (100 tirages) la propagation du feu puis le remplissage de la structure est de 7 s pour les deux cas étudiés pour 2 h 46 min de temps réel.

Dans la mesure où les issues donnant vers l'extérieur sont maintenues fermées, le modèle de remplissage simplifié, présenté au §6.4, a été utilisé pour simuler le transport des fumées dans la corvette par le modèle de réseau.

8.3.1 Cas 1 : corvette non ventilée mécaniquement

Chronologie du feu

Le Tableau 13 et la Figure 53 donnent la chronologie du feu dans la corvette. La propagation du feu s'est faite par les ouvertures (e.g., du local E112 au local E0012), les parois latérales (e.g., du local E112 au local D122), le plafond (e.g., du local D122 au local D0022) et le plancher (e.g., du local E112 au local E210).

Le phénomène de flashover dans le local d'éclosion à $t = 9'$ permet la propagation du feu vers les locaux adjacents connectés par une ouverture, i.e., par une trappe vers le haut pour le local E0012 et par une porte ouverte pour le local E110. Le feu se transmet ensuite par les parois latérales du local source vers les locaux E122, D122 en 18', puis par le plancher vers le local E210 au bout de 22'. L'incendie va alors se propager progressivement à la tranche D, d'abord au faux pont 1 par le local D110 puis par les locaux D112 et D132 au bout de respectivement 34' et 43'. Le feu atteint enfin le pont 00 par l'inflammation des locaux D0012, D0022 (45') et D0010 (54'). Le feu se transmet finalement dans la tranche C au pont 00, 63' après le départ du feu par le local C0022 suivie des locaux C0020, C0012 et C0010 au bout de 72', 81' et 148'.

En 148', le feu s'est propagé dans 16 locaux sur 3 ponts (faux ponts 1 et 2, et pont 00). Sur les 16 locaux touchés, 6 ont atteint le flashover.

On remarque que les coursives permettent de stopper la propagation du feu d'un bord à l'autre du navire. Les cofferdams, placés entre chaque tranche, limitent également la propagation du feu d'une tranche à l'autre et, dans notre cas, ont confiné l'incendie dans les tranches C à E.

Local	Pont	Type	Temps (min)	
			Inflammation	Flashover
E112	1	Logement	0'	9'
E0012	00	Restauration	9'	-
E110	1	Coursive	10'	-
E122	1	Stockage mixte	18'	-
D122	1	Logement	18'	33'
E210	2	Logement	22'	-
D110	1	Coursive	34'	-
D112	1	Logement	43'	-
D132	1	Stockage mixte	43'	-
D0012	00	Logement	45'	54'
D0022	00	Logement	45'	55'
D0010	00	Coursive	54'	-
C0022	00	Opérationnel	63'	72'
C0020	00	Coursive	72'	-
C0012	00	Electricité	81'	144'
C0010	00	Stockage mixte	148'	-

Tableau 13 : Chronologie du feu dans la corvette.

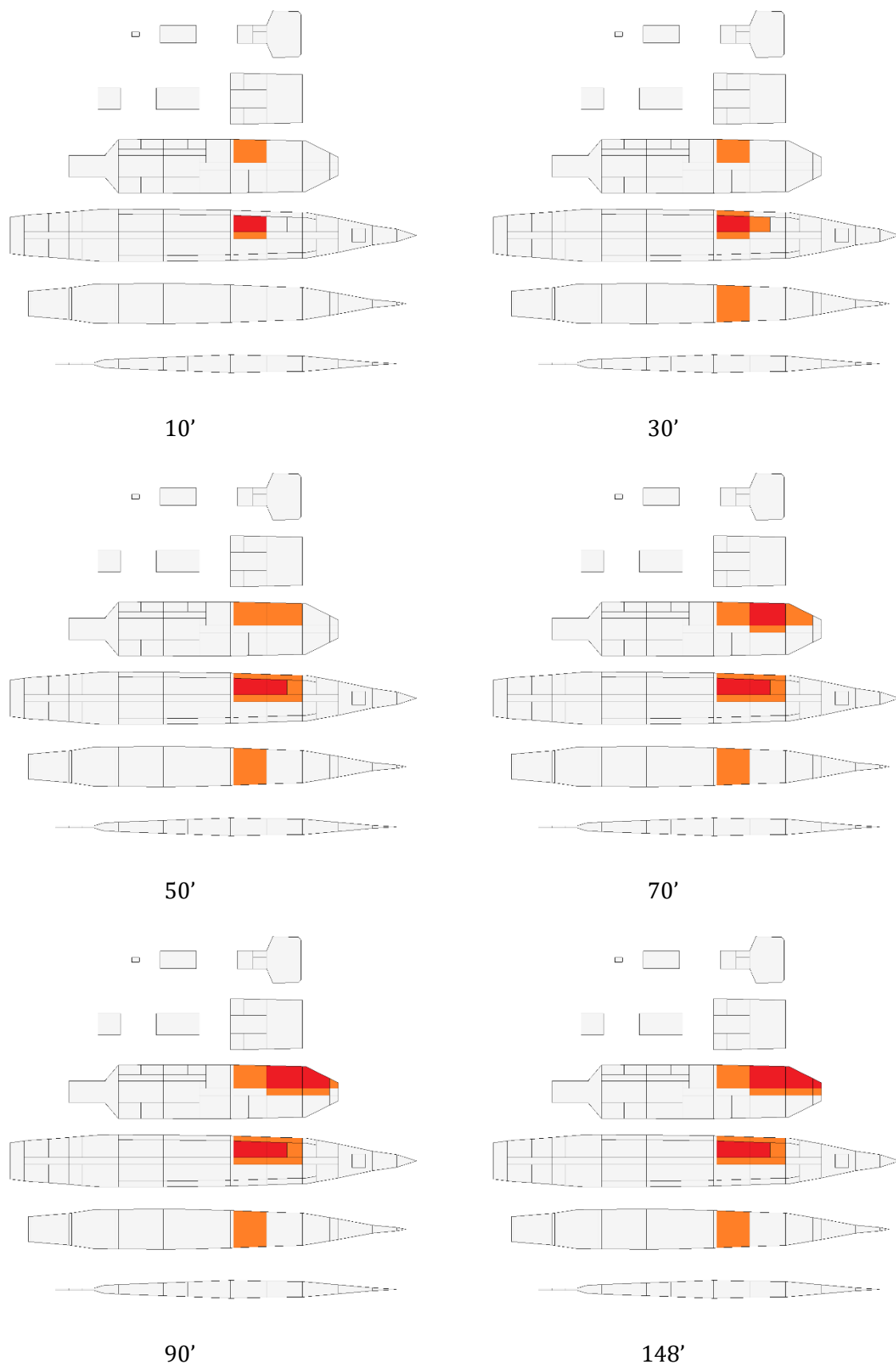


Figure 53 : Cartographies du feu après 10', 30', 50', 70', 90' et 148' de feu : en rouge, les locaux ayant atteint le flashover ; en orange, les locaux en feu où le flashover n'a pas eu lieu.

Chronologie de remplissage par les fumées

Comme attendu, les fumées touchent un plus grand nombre de locaux que le feu, comme le montre la cartographie des fumées à différents instants de la Figure 54.

Durant les premières minutes de l'incendie, le transport des fumées s'effectue verticalement. Le local source E112 étant connecté par une trappe aux locaux E0012, E0110 et E0212, les fumées se propagent logiquement vers les ponts supérieurs qui se remplissent de fumées en 10' seulement.

Après 15' de feu, les tranches D et E sont complètement envahies de fumées sur 4 ponts différents (pont 00, 01 et 02 et faux pont 1). La propagation se fait alors latéralement dans les deux ponts restants (faux pont 1 et pont 00). La tranche C finit d'être remplie au bout de 20', suivie des tranches F et H, 5' plus tard.

Il faut attendre 30', après que les locaux des ponts supérieurs soient remplis, pour que le local F210 du faux pont 2, soit touché par les fumées.

Après 30', les fumées ont envahi tout l'espace disponible, soit 76 locaux dans lesquels la hauteur libre de fumée est inférieure à 1,80 m. Cinq des six ponts sont touchés, à savoir les faux ponts 1 et 2, et les ponts 00, 01 et 02.

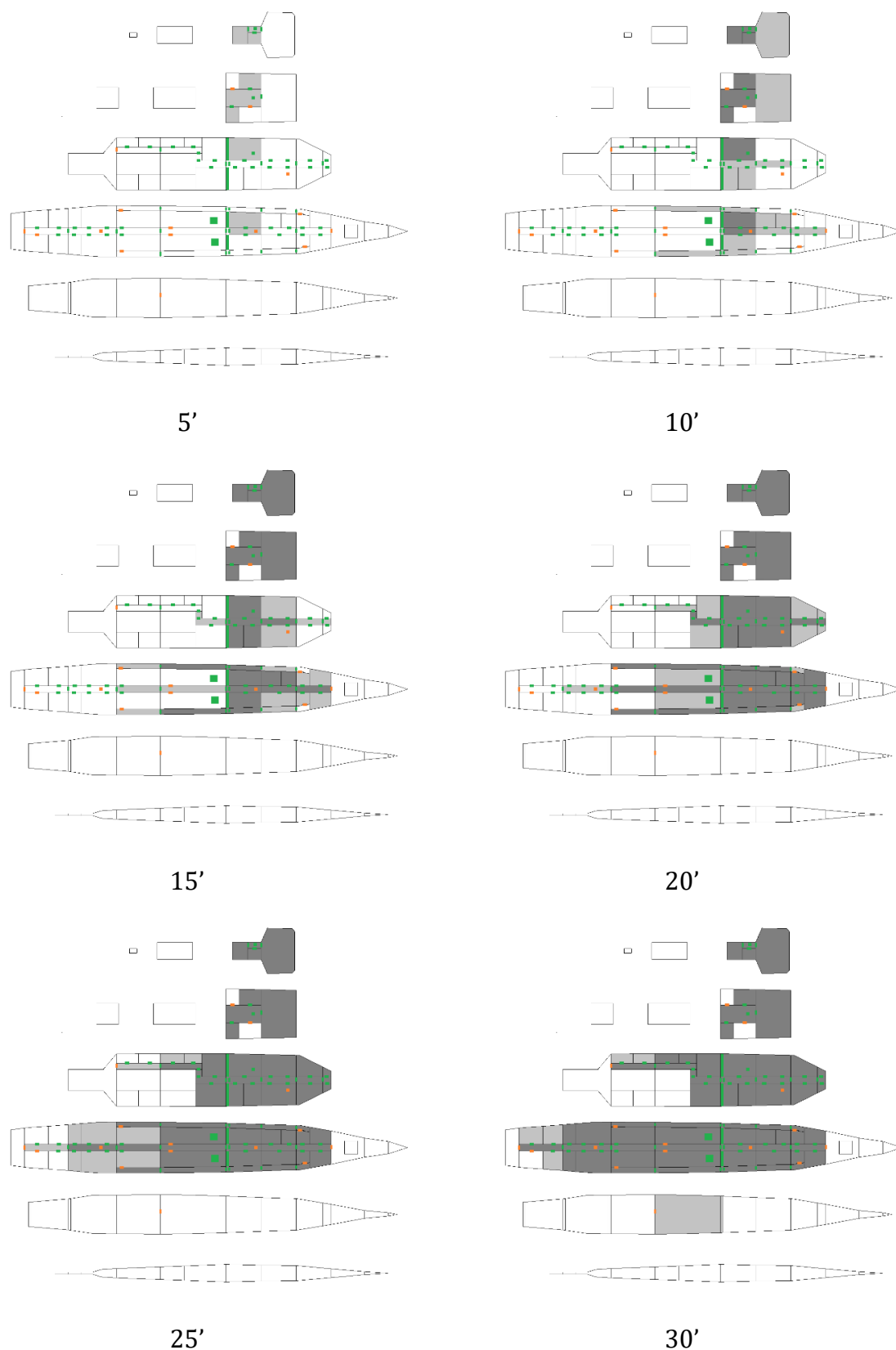


Figure 54 : Cartographies des fumées après 5', 10', 15', 20', 25' et 30' de feu. Les zones grisées correspondent aux locaux où la hauteur libre de fumée est inférieure à 1,80 m ; en gris clair, les locaux touchés au temps courant ; en gris foncé, ceux touchés aux temps précédents.

8.3.2 Cas 2 : corvette ventilée mécaniquement

Cette section a pour but de mettre en évidence l'influence du mode de transmission par les gaines de ventilation sur la propagation du feu dans la corvette. Pour cela, nous avons rajouté une gaine allant du local source E112, traversant les locaux D122 et D112 et débouchant dans le local C112. Le modèle de réseau requiert alors, comme données d'entrée supplémentaires, les temps de transmission par cette gaine de ventilation qu'elle soit traversante ou débouchante dans les locaux connectés au local source. Le code SAFIR 1D, présenté et validé dans le Chapitre 5, permet d'accéder à ces données.

Durées de tenue au feu de la gaine de ventilation calculées par le code SAFIR 1D

Dans cette configuration, les fumées générées par le feu dans le local E112 pénètrent dans la gaine de ventilation, l'échauffe au passage des locaux D122 et D112, puis débouchent dans le local C112. Appliqué à cette configuration, le code SAFIR 1D fournit les durées au bout desquelles le feu a été transmis par la gaine de ventilation. On rappelle les critères de transmission retenus dans cette étude : la transmission a lieu si la température de peau de la gaine traversante excède 350°C et si la température des fumées qui débouchent dans le local cible dépasse 550°C .

Les résultats obtenus montrent que la température maximale des fumées dans le local C112 est de 489°C , ce qui ne permet pas à celles-ci d'enflammer les combustibles présents dans ce local.

En revanche, la transmission vers les locaux D122 et D112, situés au contact et à une distance de 4,5 m du local source, se produit après respectivement 11'30" et 23'50", comme le montre la Figure 55 donnant la position de l'isotherme 350°C en fonction du temps dans la conduite.

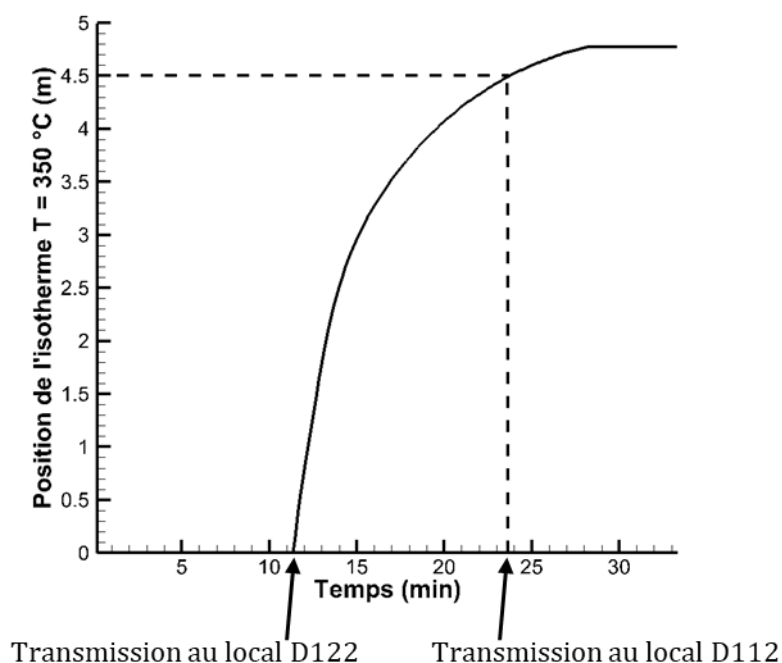


Figure 55 : Position de l'isotherme 350°C dans la gaine de ventilation.

Chronologie du feu

Si l'on compare les résultats de simulation obtenus dans la corvette ventilée mécaniquement ou non (Tableau 14 et Tableau 13), on constate que la ventilation mécanique conduit à une inflammation plus précoce des locaux qui sont connectés au local source par la gaine de ventilation, en particulier le local D112 qui s'enflamme 19' plus tôt. En revanche, elle ne modifie que peu les temps d'inflammation et de flashover des autres locaux, la différence ne dépassant pas 2', ni la durée du feu, qui passe de 147' à 148'.

Local	Pont	Type	Temps (min)	
			Inflammation	Flashover
E112	1	Logement	0' (0')	9' (9')
E0012	00	Restauration	9' (9')	- (-)
E110	1	Coursive	9' (10')	- (-)
D122	1	Logement	17' (18')	31' (33')
E122	1	Stockage mixte	18' (18')	- (-)
E210	2	Logement	21' (22')	- (-)
D112	1	Logement	24' (43')	- (-)
D110	1	Coursive	32' (34')	- (-)
D132	1	Stockage mixte	41' (43')	- (-)
D0012	00	Logement	43' (45')	52' (54')
D0022	00	Logement	43' (45')	53' (55')
D0010	00	Coursive	52' (54')	- (-)
C0022	00	Opérationnel	62' (63')	70' (72')
C0020	00	Coursive	71' (72')	- (-)
C0012	00	Electricité	79' (81')	143' (144')
C0010	00	Stockage mixte	147' (148')	- (-)

Tableau 14 : Départ de feu dans le local E112 avec ventilation mécanique : temps d'inflammation et de flashover. Pour faciliter l'analyse comparative, nous avons reporté, entre parenthèses, les temps obtenus en absence de ventilation mécanique.

Chronologie de remplissage par les fumées

La ventilation mécanique modifie légèrement la chronologie de remplissage des locaux par les fumées issues du local source, comme on peut l'observer en comparant la Figure 54 et la Figure 56. La gaine étant débouchante dans le local C112, celui-ci va commencer à se remplir de fumées en même temps que le local source E112.

La gaine connectant les locaux E112 et C112 transporte les fumées vers le local C112 qui se remplit jusqu'à 1,80 m du plancher au bout de 5' seulement, contre 15' dans le cas sans ventilation. Les fumées sont partagées entre le remplissage des ponts supérieurs (tranche E) par les trappes et le remplissage de la tranche C par la gaine de ventilation.

Dix minutes après le départ du feu, le remplissage des locaux a pris un peu de retard par rapport au cas sans ventilation (18 vs. 25). Les fumées dans la gaine de ventilation se ralentissent plus rapidement et mettent donc plus de temps pour remplir les mêmes locaux.

Après 15' de feu, les étages supérieurs sont complètement remplis et la propagation se fait latéralement sur le faux pont 1 et le pont 00. Il faut attendre 27' pour que tous les ponts soient remplis. Les fumées rattrapent leur retard grâce à l'inflammation du local D112 qui survient 19' plus tôt par une transmission du feu via la gaine de ventilation le connectant au local E112.

L'intégralité de l'espace disponible, soit 76 locaux, est rempli de fumées en 27' au lieu de 30' dans le cas sans ventilation mécanique.

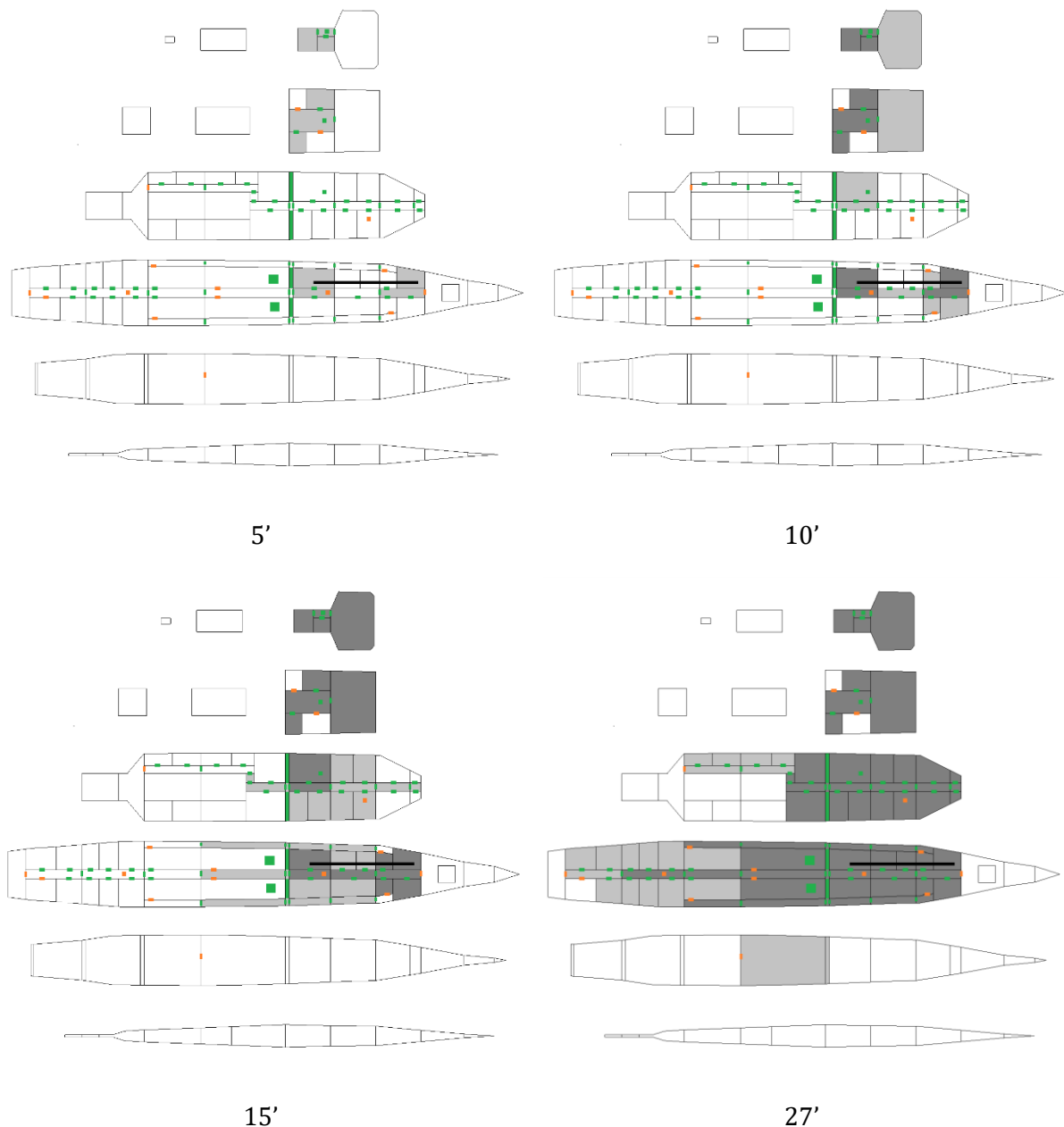


Figure 56 : Départ de feu dans le local E112 avec ventilation mécanique : cartographies des fumées après 5', 10', 15', et 27' de feu.

8.4 Cartographie du risque feu

Un incendie peut démarrer dans n'importe quel local contenant du combustible et, selon la configuration du navire, peut se propager de façon plus ou moins rapide et envahissante. Il apparaît donc judicieux d'établir une cartographie du risque incendie à bord du navire permettant de classer les locaux selon leur propension à brûler (i.e., à s'enflammer) ou à propager le feu (i.e., à atteindre la phase de feu pleinement développé, après le flashover), et par là-même de définir des stratégies de prévention ou de lutte efficaces.

La procédure d'élaboration d'une cartographie du risque est la suivante :

- Etape 1 : On déclenche le feu dans un local sensible du navire, et, à l'issue des 100 tirages statistiques, on comptabilise le nombre moyen de fois où les autres locaux ont été touchés par le feu.
- Etape 2 : on reproduit l'étape 1 pour chacun des locaux sensibles, à l'exception des locaux munitions, soit 91 locaux au total.
- Etape 3 : on effectue la moyenne sur l'ensemble des 91 scénarios de feu.

L'histogramme de la Figure 57 donne une représentation graphique du nombre moyen de fois où un local, parmi les 91 locaux sensibles, a été touché par le feu. Elle permet d'évaluer rapidement la vulnérabilité d'un local et sa propension à propager le feu, selon que le flashover y a eu lieu ou non.

Le local le plus vulnérable est le local C0010, touchés 10 fois par le feu. En revanche, il n'a subi aucun flashover, ce qui le rend inapte à propager le feu. Il en est de même des locaux C0020 et D0010, légèrement moins vulnérables puisqu'ils n'ont été touchés que 8 fois.

Près d'un tiers des locaux, majoritairement sur le faux-pont 1 et le pont 00, ont subi un ou plusieurs flashovers (en rouge sur l'histogramme de la Figure 57).

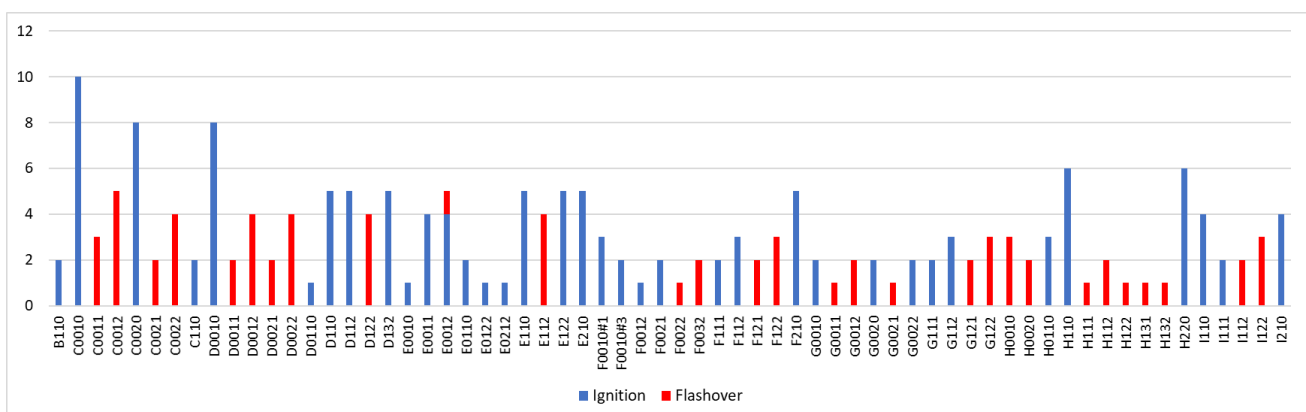


Figure 57 : Représentation graphique du nombre moyen de fois où un local, parmi les 91 locaux sensibles, a été touché par le feu, suivi (en rouge) ou non (en bleu) d'un flashover.

Une autre manière d'aborder le problème du risque incendie dans un navire est de classer les locaux en fonction de leur propension à générer des feux plus ou moins sévères. On utilise la cartographie élaborée précédemment pour déterminer le nombre moyen de locaux touchés par le feu en fonction du local d'éclosion.

L'examen de la Figure 58 montre que certains locaux ont une plus grande capacité à générer des embrasements généralisés dans d'autres locaux. C'est le cas des locaux D122, E112, H122, H132, C0022, D0012 et D0022. En fait, il s'agit de locaux ayant un haut degré de connectivité et dont la charge et les conditions de ventilation conduisent à un feu suffisamment puissant et oxygéné.

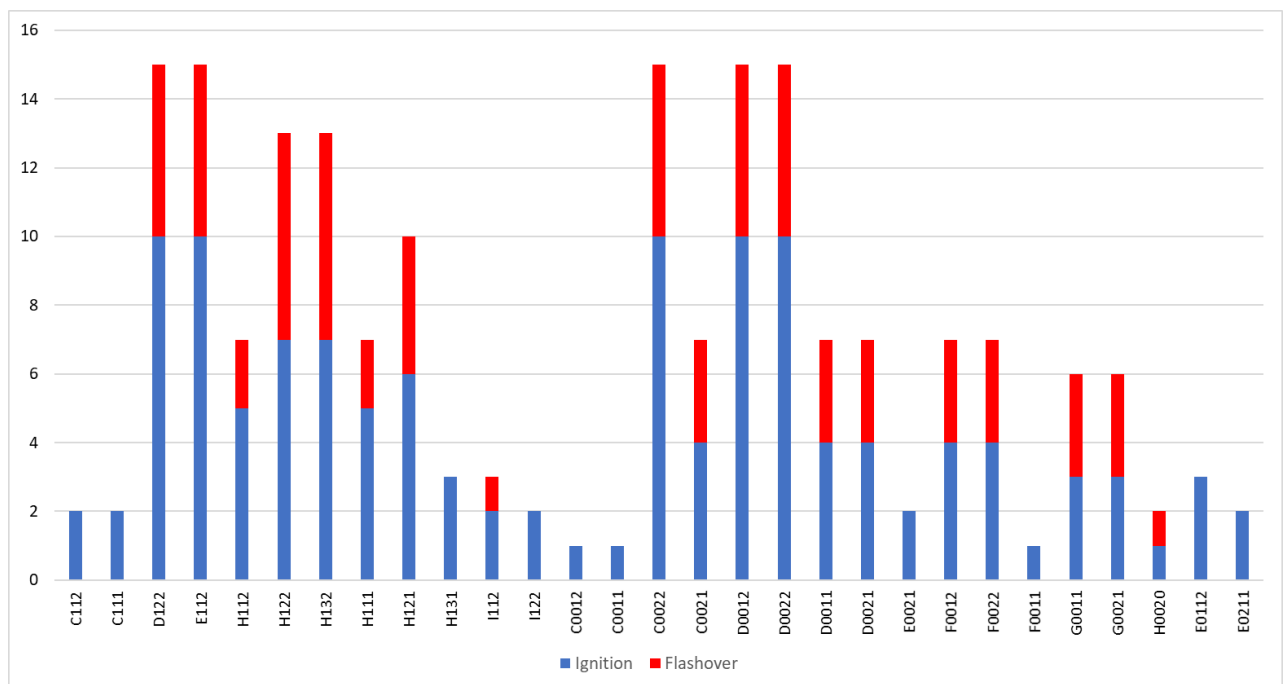


Figure 58 : Représentation graphique du nombre moyen de locaux touchés par le feu en fonction du numéro du local d'éclosion, avec (en rouge) ou sans (en bleu) flashover. Par exemple, un feu éclos dans le local D122 a conduit à l'inflammation de 15 locaux, dont 5 ont atteint le flashover.

Chapitre 9 Application du modèle de réseau à un navire roulier

Les travaux réalisés dans le cadre du projet LASHFIRE ont consisté à réaliser une étude du risque incendie dans un navire roulier (*tas* : ro-ro ship) dans le but d'estimer, pour des scénarios de feux critiques, les conséquences d'un incendie sur les personnes, la cargaison et le navire.

L'étude FIRESAFE I [117] a recueilli des données statistiques sur les incendies de navires rouliers à partir de plusieurs études différentes. D'après leurs conclusions, le feu est, dans la très grande majorité des cas, consécutif à l'inflammation d'un camion de transport de marchandises sur un des ponts garages du navire. Ce scénario d'incendie étant le plus probable, il a donc été retenu pour la suite de l'étude.

L'étude du risque incendie dans le navire par l'approche hybride se déroule en deux étapes :

- Dans un premier temps, on simule le développement d'un feu dans un pont garage où sont stockés un grand nombre de véhicules, en l'occurrence des camions de transport de marchandises, ainsi que ses conséquences sur le navire. Compte tenu des dimensions d'un pont garage et de son grand rapport d'aspect, mais aussi de la propagation du feu d'un véhicule à l'autre, le modèle à zones ne peut s'appliquer. Pour pallier ce problème, on a recours au code SAFIR.
- Le modèle de réseau est ensuite utilisé lorsque le feu ou les fumées se propagent dans les espaces vie (restauration, cabines, magasins, etc.) afin d'évaluer les conditions ambiantes dans ces espaces, mais aussi dans les zones de rassemblement et le long des chemins d'évacuation des personnes à bord, en lien avec leur évacuation. Dans cette approche, l'évolution du feu et des fumées dans chacun des locaux des espaces vie est calculé par le modèle à zones.

Les résultats obtenus pour le Magnolia Seaways étant encore en cours de traitement, nous présentons ci-après les résultats post-traités relatifs au Stena Flavia (Figure 2).

9.1 Agencement général

Le Stena Flavia est composé de huit ponts, comme le montre le plan d'agencement général du navire (Figure 59). Les ponts 1 et 8 peuvent être considérés comme « vides ». Les véhicules peuvent être stockés sur les ponts 2 à 4 et sur la moitié arrière du pont 5. ; Les espaces vie se situent aux ponts 5 à 7. Nous avons indiqué sur la Figure 59 où sont situés l'espace vie, les zones de rassemblement (AS, *tas* : Assembly Stations) et les stations

d'embarquement où se trouvent les moyens de sauvetage (LSA, *tas* : Life-Saving Appliances).

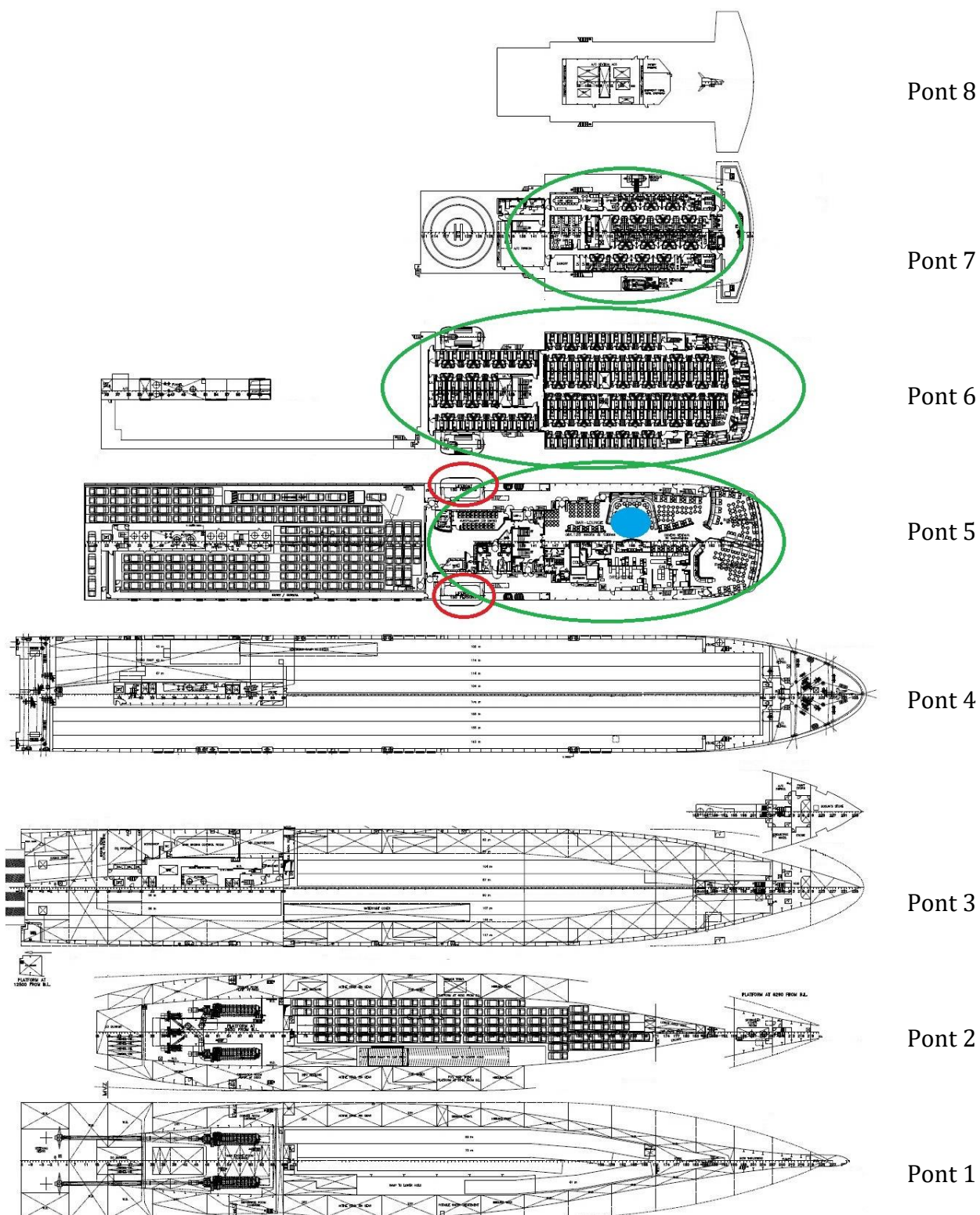


Figure 59 : Plan d'agencement général du Stena Flavia, montrant l'espace vie (entouré en vert), les zones de rassemblement (AS) (entourées en bleu) et les stations d'embarquement (LSA) (entourées en rouge).

Courbe de feu et paramètres de combustion

Feu de camion

Pour déterminer la puissance maximale du feu, ou HRR_{max} , générée par la combustion d'un camion transportant des marchandises, les recommandations préconisées par les normes NFPA 502 [109], BD78/99 [110] et le rapport du comité technique de l'AIPCR [111] sont souvent utilisées comme référence. Selon ces recommandations, le HRR maximal peut varier de 20 à 30 MW [109, 111] ou de 30 à 100 MW [110] selon le type de camions. En concertation avec les partenaires du projet, une valeur de 40 MW a été retenue.

La détermination de la courbe de puissance du feu nécessite de connaître un certain nombre d'informations liées à la phase de croissance, au pic de dégagement de chaleur, à la phase de décroissance, à la chaleur totale dégagée, ou encore à la charge de combustible. Des méthodes simplifiées de caractérisation de la courbe de puissance ont été proposées (voir par exemple [112, 115]), sous la forme d'une loi de puissance ou d'exponentielle où les paramètres sont calibrés à partir d'expériences.

Une alternative consiste à utiliser directement les courbes expérimentales donnant le HRR en fonction du temps et à les mettre à l'échelle pour une valeur maximale de HRR donnée. C'est l'approche que nous avons retenue en déduisant la courbe de puissance de la courbe expérimentale d'un feu de camion de 72 MW donnée dans [116]. La courbe de puissance ainsi obtenue à 40 MW est présentée sur la Figure 60.

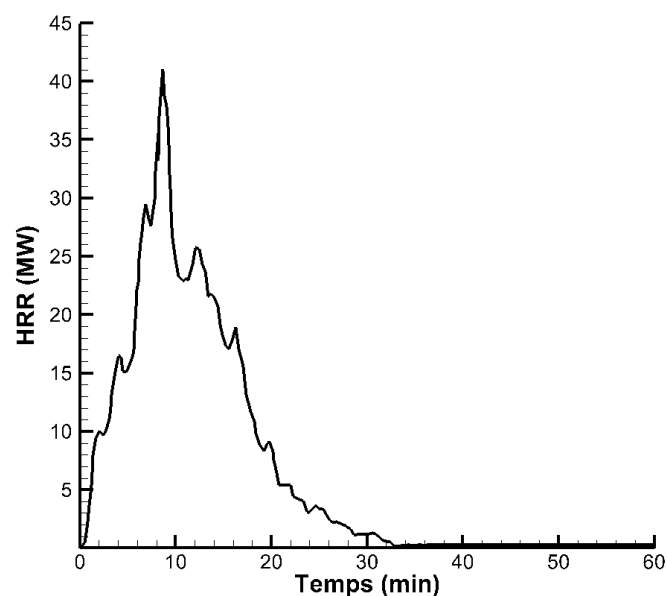


Figure 60 : Courbe de puissance d'un camion de 40 MW (dédit de [116]).

Combustible équivalent

Sur la base des études menées dans FIRESAFE I [117] et II [87], on suppose que la molécule de combustible est de la forme $C_{6,3}H_{7,1}O_{0,8}$. Elle correspond à la combustion d'un mélange de polymères (polystyrène ou polyuréthane) et de matériaux cellulosiques, représentatif d'un chargement de poids lourd, dont les propriétés de combustion sont données dans le Tableau 15.

Formule chimique	Facteur d'émission			Δh_{eff} (MJ/kg)	χ
	Suies	CO	HCN		
$C_{6,3}H_{7,1}O_{0,8}$	0,06	0,1	0,0	27,98	0,162

Tableau 15 : Propriétés de combustion du combustible représentatif d'un chargement de camion à bord d'un navire roulier.

Inflammation des matériaux combustibles

La méthode Flux-Time Product (FTP), présentée dans §4.2.2, est utilisée pour obtenir les temps d'inflammation des véhicules et pour calculer la transmission du feu d'un véhicule à l'autre. Dans [84], les paramètres FTP sont donnés pour les composants les plus sensibles d'un véhicule (Tableau 16). On suppose, par la suite, que les composants en caoutchouc sont susceptibles de s'enflammer en premier.

Composant	n	FTP_{cr} (kW.s ⁿ .m ⁻²)	$\dot{q}''_{cr}$ (kW.m ⁻²)
Bavette	1,5	3258	5,7
Pneu en caoutchouc	1,5	9828	8,0
Pare-chocs	2,0	21862	3,1
Passage de roue	2,0	50234	0,0

Tableau 16 : Paramètres de la méthode FTP pour les composants sélectionnés (extrait de [84])

On s'intéresse également à la dégradation de cibles potentielles situées en plafond du pont garage, comme des matériels électriques ou des chemins de câbles, susceptible de perturber, voire d'interrompre, le maintien en conditions opérationnelles du navire.

En première approximation, la méthode FTP, pour laquelle les paramètres FTP sont connus pour une large gamme de matériaux solides [85], est là encore retenue. Les calculs ont été réalisés pour des cibles en poly(chlorure de vinyle) (PVC), mais l'endommagement de cibles constituées d'un autre matériau peut se faire a posteriori, l'évolution des flux reçus étant enregistrée au cours du temps.

Les paramètres FTP relatifs au PVC sont donnés dans le Tableau 17.

Composant	n	FTP_{cr} (kW.s ⁿ .m ⁻²)	$\dot{q}''_{cr}$ (kW.m ⁻²)
PVC	1,5	5130	15

Tableau 17 : Paramètres de la méthode FTP pour les cibles en PVC [85].

Locaux type de l'espace vie

Plusieurs types de locaux composent l'espace vie du Stena Flavia. On y trouve, entre autres, des cabines, des halls, des salons fauteuils (*tas* : Auto-pullman), des restaurants, des magasins, des sanitaires ou encore des cuisines. Pour chacun d'eux, il a été nécessaire d'estimer les éléments combustibles qu'il contient, leur nature, leur charge et leur répartition au sol.

De façon à rester dans le domaine de validité du modèle à zones, en limitant au mieux le rapport d'aspect des locaux, un découpage en locaux virtuels a été effectué. Comme pour le navire militaire, les locaux virtuels ont été référencer en conservant le gisement du local initial et en y ajoutant un suffixe #n, où n correspond au numéro du local virtuel.

C'est notamment le cas du compartiment « Hall d'entrée » qui a été divisé en six locaux virtuels (voir Figure 61) dont les gisements s'écrivent « Hall d'entrée #1 », « Hall d'entrée #2 », ..., « Hall d'entrée #6 ».

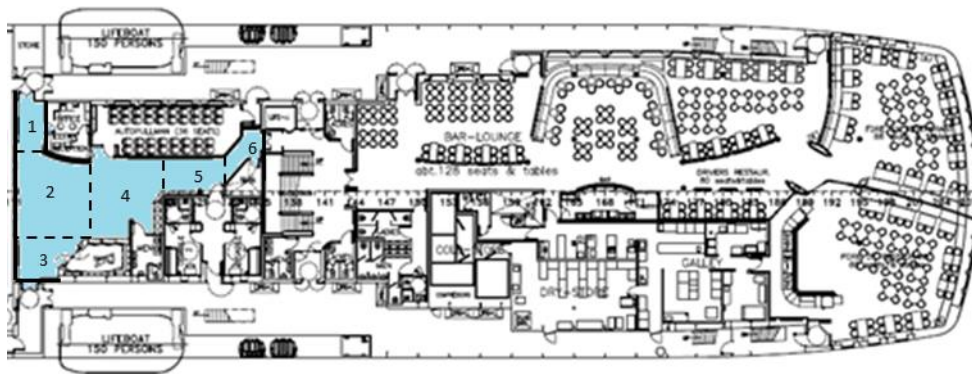


Figure 61 : Découpage du local « Hall d'entrée », en six locaux virtuels.

A titre d'exemple, le Tableau 18 rassemble les données relatives aux locaux type « Auto-pullman » et « Hall d'entrée #4 ». Les propriétés de combustion des combustibles équivalents sont celles du Tableau 9. Les courbes de puissance pour chacun des types de local ont été établies grâce à la méthode présentée dans le §4.1.1, et sont présentées sur la Figure 62.

Type de local	Éléments combustibles	Combustible(s) équivalent(s)	m_0 (kg)	HRR_{max} (MW)	Surface au sol estimée (m ²)
Auto-pullman	Fauteuils, moquette, peinture, vinyle ...	Mousse PU	128	2,2	2,4
		PMMA	143	1,9	2,4
Hall d'entrée #4	Moquette, vinyle, peinture ...	PMMA	66,8	3,6	4,5

Tableau 18 : Données relatives aux éléments combustibles des locaux type « Auto-pullman » et « Hall d'entrée #4 » du Stena Flavia.

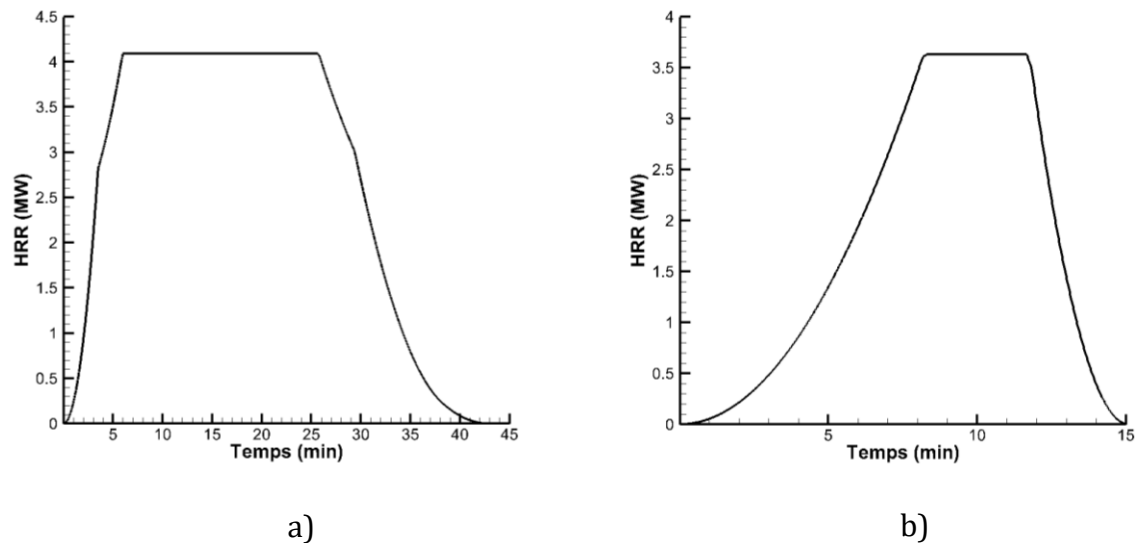


Figure 62 : Courbes de puissance du feu dans les locaux type « Auto-pullman » (a) et « Hall d'entrée #4 » (b).

Cloisonnements

Les cloisonnements sont constitués d'acier nu ou recouverts d'un isolant. L'isolation thermique du local dépend de son type et de son emplacement dans le navire. La nature de l'isolant et sa classe (e.g., A60 pour un isolant qui résiste à 60 minutes) sont extraites des plans d'agencement général du navire, fourni par l'armateur.

La Figure 63 illustre l'isolation A60 du pont 4 du Stena Flavia. Les propriétés thermiques de l'isolant sont celles de la laine de roche UMPA 66 (Tableau 10).

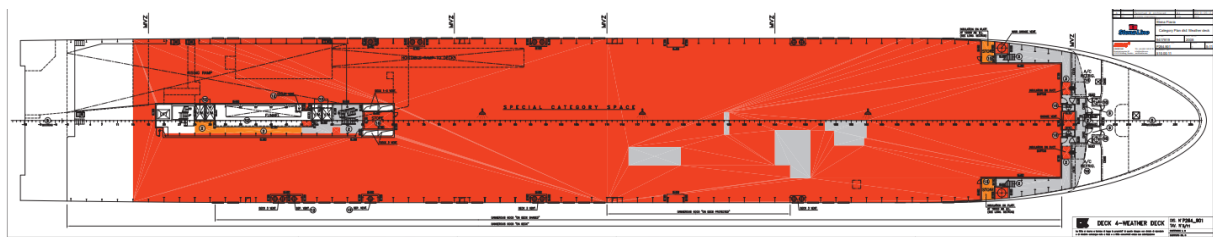


Figure 63 : isolation du plafond du pont 4 du Stena Flavia.

9.2 Définition des critères de sécurité

L'analyse de la tenabilité est un outil essentiel pour évaluer la capacité de survie des individus en cas d'incendie. Elle évalue l'altération de la capacité d'un individu à évacuer par ses propres moyens, principalement en raison d'une incapacité (due à l'exposition à des substances toxiques ou irritantes et à la chaleur) et/ou d'une réduction de la visibilité (due à l'obscurcissement par la fumée). L'OMI a établi des critères de sécurité par le biais

de la circulaire MSC/Circ. 1552 [118] afin de quantifier l'impact de l'incendie sur la capacité de survie des personnes :

- La température maximale des gaz ne doit pas dépasser 60°C ;
- Le flux radiatif reçu maximal ne doit pas dépasser 2,5 kW/m² ;
- La visibilité minimale ne doit pas être inférieure à 10 m dans les espaces de plus de 100 m², et à 5 m pour les espaces plus petits ;
- La fraction volumique maximale de monoxyde de carbone (CO) ne doit pas dépasser 1200 ppm pour une exposition instantanée, et 500 ppm pour un temps d'exposition cumulée de 20 minutes ;

Dans la présente étude, l'évaluation de la tenabilité est effectuée à une hauteur au-dessus du pont comprise entre 0 et 1,8 m dans l'espace vie.

Pour la cargaison, les dommages sont estimés en fonction de l'état de dégradation des camions exposés au feu. Cinq niveaux de dégradation sont considérés selon l'accumulation du FTP, le dernier niveau correspondant à l'inflammation du camion.

On suppose en outre que la coque du navire est endommagée lorsque sa température excède une valeur critique à partir de laquelle une déformation peut se produire, fixée ici à 500°C [119].

9.3 Résultats de simulations

9.3.1 Méthodologie

Le code SAFIR est tout d'abord utilisé pour simuler la propagation du feu et des fumées dans le pont garage où le feu a pris naissance, en prenant en compte la transmission du feu d'un véhicule à l'autre. Il fournit les durées de détection de chaleur et de fumées, ainsi que toutes les données utiles à l'évaluation des conséquences sur les personnes, la cargaison et le navire, en lien avec les critères prédéfinis.

Lorsque le feu se propage dans l'espace vie des ponts supérieurs, en raison d'un défaut d'isolation ou de confinement du pont garage, le modèle de réseau permet d'établir une cartographie du feu et des fumées ainsi que la position de l'interface de fumées dans chaque local à intervalle de temps régulier, toutes les minutes par exemple. Ces informations sont des données d'entrée du modèle d'évacuation développé par l'Université de Lorraine pour évaluer les risques encourus par les personnes à bord et définir des stratégies d'évacuation alternatives.

9.3.2 Scénarios de feu

En concertation avec l'ensemble des partenaires du projet LASHFIRE, plusieurs scénarios de feu à bord du Stena Flavia (SF) ont été retenus. Ils sont synthétisés dans le Tableau 19 et correspondent à différentes localisations du départ de feu (Figure 65) et à différentes conditions de vent.

Cette étude inclut également des scénarios spécifiques supplémentaires influençant la transmission du feu et de la fumée des ponts garages vers l'espace vie, les zones de rassemblement et d'évacuation :

- Cas 3.1 : les ouvertures autour du LSA des deux côtés du navire (Figure 64) ont été condamnées afin de limiter l'influence des flammes extérieures et l'impact des fumées aux ponts supérieurs.
- Cas 3.2 : le feu et/ou la fumée se sont propagées dans l'espace vie du pont 5 en raison d'un défaut de confinement (e.g., porte défectueuse ou laissée ouverte).
- Cas 3.3 : l'isolant du plafond du pont 4 a été endommagé en raison de l'exposition au feu et à la chaleur, favorisant la propagation du feu du pont 4 à l'espace vie des ponts supérieurs.
- Cas 3.4 : le feu et/ou la fumée se sont propagées à l'espace vie du pont 5 par la cage d'escalier (défaut de confinement).

Ces scénarios ont été ajoutés pour étudier l'influence sur les conséquences du feu de situations accidentelles telles qu'une perte d'intégrité de l'isolation ou une perte de confinement des ponts garages. La Figure 66 montre les zones de l'espace vie du pont 5 touchés en premier par le feu et/ou la fumée dans les cas 3.2 à 3.4.

Pour l'ensemble des scénarios, on suppose que la capacité de charge est maximale, avec un espacement d'environ 50 cm dans les deux directions horizontales, comme nous l'avons constaté lors de visites de navires rouliers. Les dimensions des camions sont de 16 m de long, 2,5 m de large et 4 m de haut, avec une garde au sol de 1 m, ce qui permet, à pleine capacité, de charger 53 camions sur le pont 3 et 70 sur le pont 4. Par exemple, la Figure 67 illustre la répartition des camions sur le pont 4.

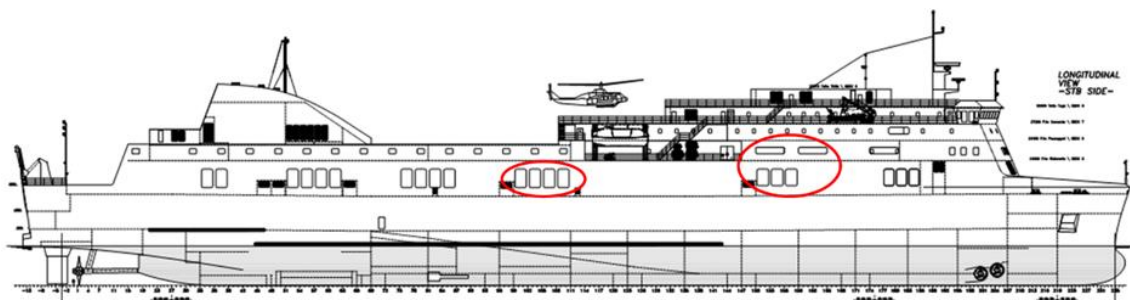
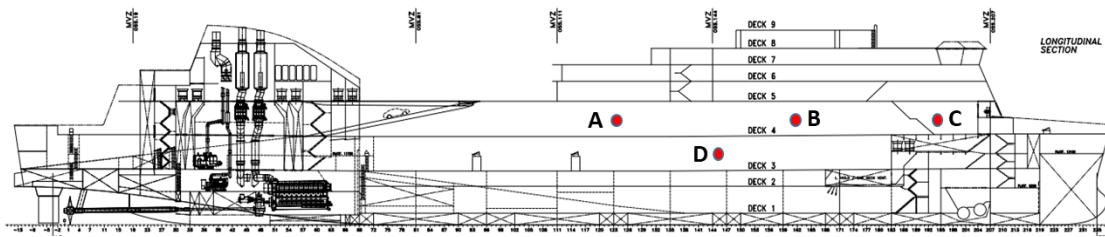
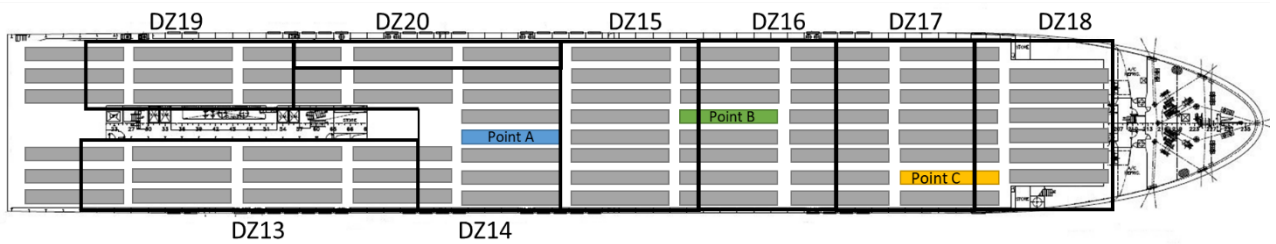


Figure 64 : Localisation des ouvertures autour des LSA maintenues fermées pour le cas 3.1.



Pont 4



Pont 3

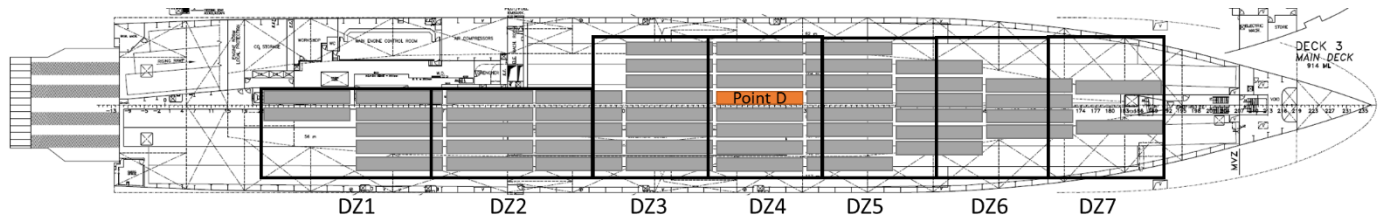


Figure 65 : Localisation des départs de feu sur le Stena Flavia.

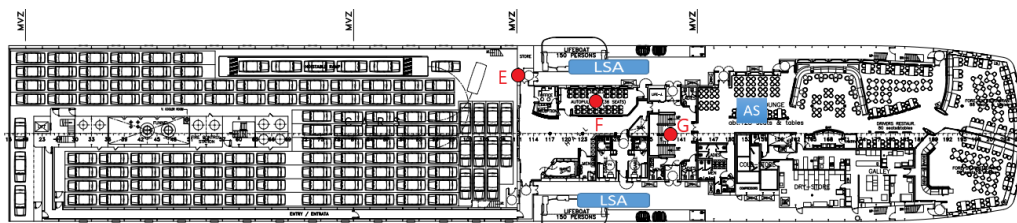


Figure 66 : Localisation des zones de l'espace vie du pont 5 touchées en premier par le feu et/ou les fumées pour les cas 3.2 (point E), 3.3 (point F), et 3.4 (point G), et emplacement des zones de rassemblement (AS) et des embarcations de sauvetage (LSA).

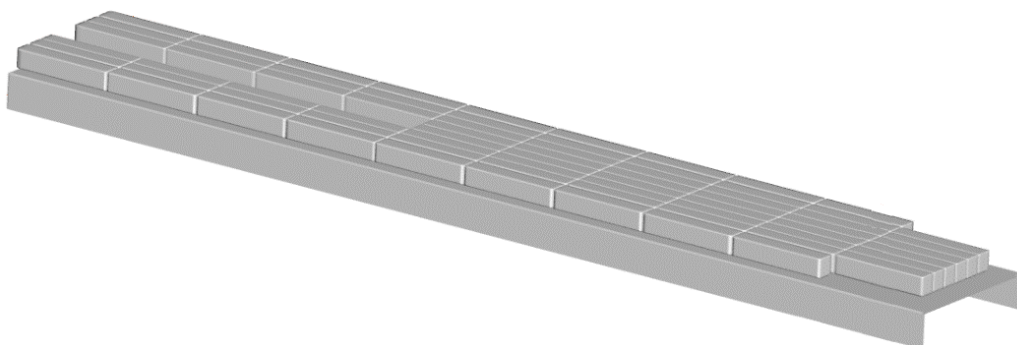


Figure 67 : Répartition des camions sur le pont 4 du Stena Flavia.

Cas	Localisation du départ de feu	Vent	Commentaires
1	Point A au centre du pont garage ouvert 4	-	-
2		Vent de face (18 nœuds)	-
3	Point B au centre du pont garage ouvert 4	-	-
3.1			Les ouvertures autour des LSA ont été condamnées
3.2			Le feu et/ou les fumées pénètrent dans l'espace vie du pont 5 au point E (défaut de confinement)
3.3			Le feu se propage du pont 4 au pont 5 au point F (défaut d'isolation)
3.4			Le feu et les fumées se propagent par la cage d'escalier entre les ponts 4 et 5 au point G (défaut de confinement)
4		Vent de face (18 nœuds)	-
5	Point C à tribord du pont garage ouvert 4	-	-
6	Point D au centre du pont garage fermé 3	-	-

Tableau 19 : Scénarios de feu modélisés pour le Stena Flavia.

Par souci de concision, on ne détaille ci-dessous que les résultats obtenus pour un des cas, en l'occurrence le cas 3.3. Les résultats relatifs à l'ensemble des scénarios modélisés sont donnés dans l'Annexe 2.

9.3.3 Cas 3.3 : résultats de simulation

Pour ce scénario, le feu démarre au centre du pont garage ouvert 4 (point B de la Figure 65), en absence de vent, et se propage aux ponts supérieurs à cause d'un défaut d'isolation du plafond du pont 4 (point F de la Figure 66).

Pour faciliter l'analyse, nous avons respecté le découpage en zones d'aspersion (DZ, *tas* : Drencher zones), du Stena Flavia, et des détecteurs et des capteurs ont été répartis dans les ponts 4 et 5. La localisation des huit DZ du pont 4, numérotées de 13 à 20, et les emplacements des détecteurs et des capteurs sont donnés sur la Figure 68. Dans le cas 3.3, le feu prend naissance dans la DZ16.

Dans chaque DZ du pont 4 ont été placés :

- Des détecteurs combinés de fumées et de température de gaz, à 0,80 m du plafond, au niveau des raidisseurs du pont 4 (en orange sur la Figure 68) ;
- Des capteurs de température de la coque, en partie haute du pont, pour évaluer les dommages causés à la structure par le feu (en bleu sur la Figure 68) ;
- Des capteurs de fumées, de température, de flux radiatif et de concentration en monoxyde de carbone à 1,80 m du plancher du pont 4 (en orange sur la Figure 68) ;
- Des cibles en PVC, à 0,80 m du plafond (en orange sur la Figure 68).

Pour évaluer les conditions ambiantes dans les LSA et le long des chemins d'évacuation, des capteurs de fumées, de température de gaz, de flux radiatif et de concentration en monoxyde de carbone ont été positionnés à 1,80 m du plancher du pont 5 (en vert sur la Figure 68).

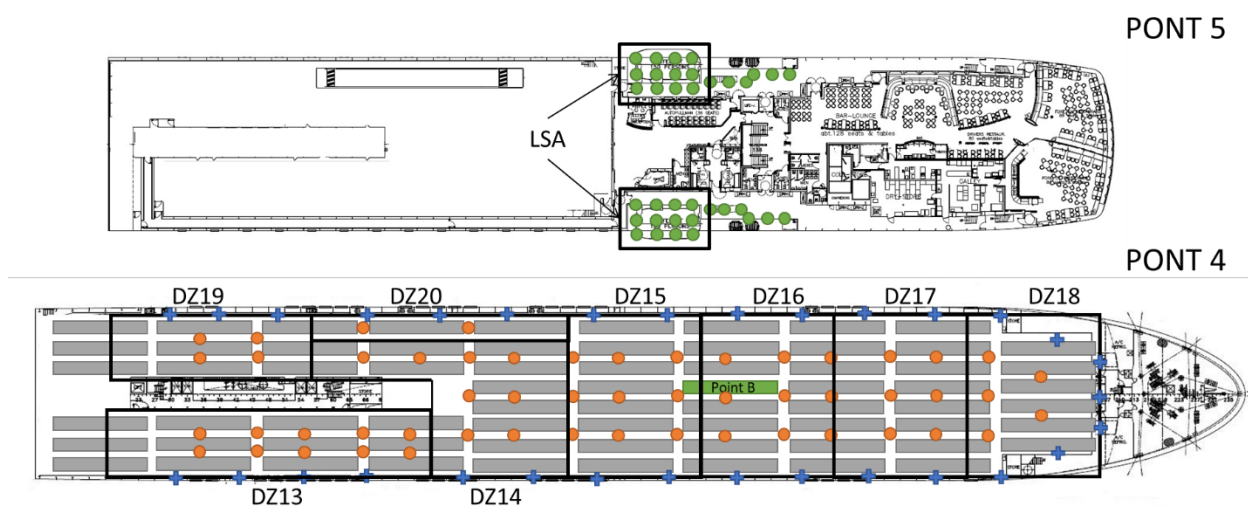


Figure 68 : Vue de dessus des ponts 4 et 5, montrant la localisation des DZ et l'emplacement des détecteurs et des capteurs.

Chronologie du feu dans le pont garage 4

La Figure 69 donne le nombre de camions enflammés en fonction du temps.

Le feu met environ 6' pour se propager à un deuxième camion, puis le nombre de véhicules enflammés augmente rapidement pour atteindre 58 camions après 26' de feu. La propagation se ralentit ensuite durant 9' pendant lesquelles seulement 3 camions ont été touchés, puis s'accélère à nouveau. Le dernier camion s'enflamme après 43' de feu.

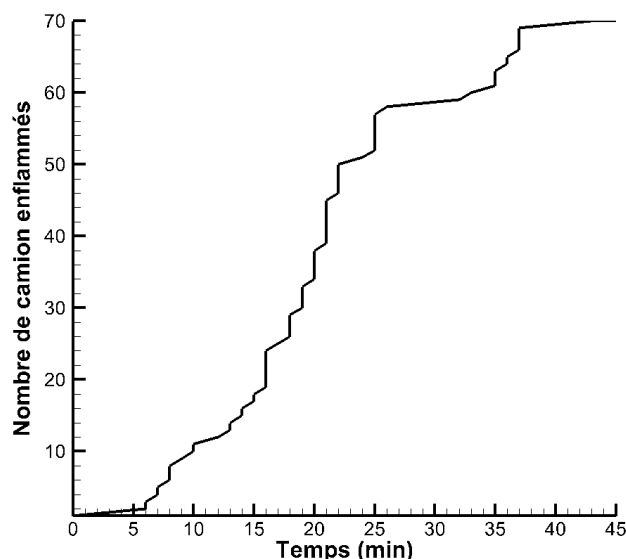


Figure 69 : Nombre de camions enflammés en fonction du temps sur le pont garage 4.

Comparaison des puissances théorique et calculée

La ventilation naturelle par les ouvertures, parce qu'elle pilote l'apport d'air frais vers le foyer, affecte le comportement du feu, en particulier pour un feu d'une telle puissance. L'influence de la sous-oxygénation peut être évaluée en comparant le *HRR* théorique (i.e., le produit du débit de pyrolyse par la chaleur de combustion effective), à celui calculé par le code SAFIR.

La Figure 70, qui illustre cette comparaison, montre une première phase où le feu est suffisamment oxygéné, jusqu'à environ 23', suivie par une phase où l'apport d'air frais n'est pas suffisant pour brûler tout le combustible. Cela a pour conséquence de retarder la combustion et d'allonger la durée du feu. Après une heure de feu, on observe un changement de comportement, la courbe du *HRR* calculé passant au-dessus de la courbe du *HRR* théorique.

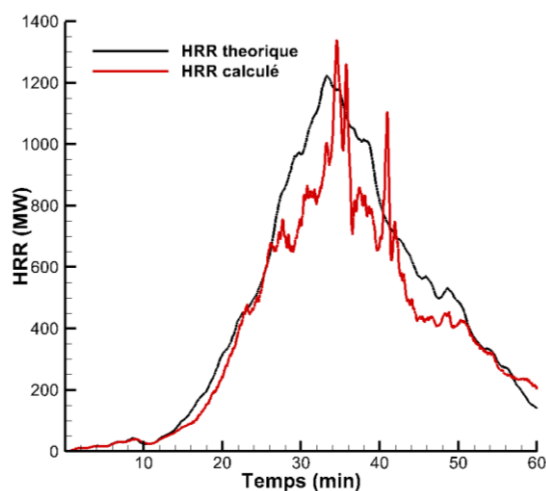


Figure 70 : Comparaison entre les courbes de puissance théorique (en noir) et calculée (en rouge).

Comparaison qualitative avec des accidents réels

Compte tenu de la rapidité de la propagation, une analyse d'accidents réels sur des navires rouliers a été réalisée par l'un des partenaires du projet. Malheureusement, le niveau de détail des conséquences de l'incendie, rapportées par les enquêteurs, et les données collectées exploitables se sont avérées le plus souvent insuffisantes. Nous avons pu néanmoins extraire quelques données du rapport de l'incendie du Norman Atlantic en 2014, qui s'est déclaré sur un des ponts garages et qui est rapidement devenu "hors de contrôle"².

Bien que les configurations des navires soient différentes, les résultats numériques obtenus pour un feu prenant naissance dans un pont garage ouvert semblent conformes aux observations des enquêteurs (Tableau 20). Les ordres de grandeur des délais relatifs à l'apparition de flammes extérieures et du temps au bout duquel l'incendie est "hors de contrôle" sont comparables.

Chronologie du feu sur le Norman Atlantic	Résultats de simulation
$t_0 + 15'$: Flammes sortant des ouvertures latérales	$t_0 + [15' - 20']$
$t_0 + 23'$: Incendie "hors de contrôle"	$t_0 + [16' - 22']$

Tableau 20 : Comparaison qualitative des résultats de simulation et certaines observations rapportées sur l'incendie du Norman Atlantic.

Détection et conséquences du feu

Les données issues des détecteurs et des capteurs placés dans chaque DZ du pont 4 et dans les zones d'intérêt (LSA et chemins d'évacuation) du pont 5, aux emplacements donnés sur la Figure 68, sont présentées dans le Tableau 21.

Zone d'intérêt	DZ13	DZ14	DZ15	DZ16	DZ17	DZ18	DZ19	DZ20	LSA Tribord	LSA Bâbord
Détection de chaleur à 54°C	4'46"	4'09"	2'39"	2'08"	3'35"	4'	5'27"	4'32"	-	-
Détection de chaleur à 78°C	5'48"	4'50"	3'30"	2'38"	4'49"	5'04"	7'01"	5'23"	-	-
Détection de fumées à 12,5%/m d'obscurcissement	2'26"	1'51"	1'15"	41"	1'26"	2'05"	2'59"	1'45"	-	-
Tenabilité des personnes	19' RHF	14' RHF	6' RHF	6' RHF	20'40" T60	18'04" CO1200	19' RHF	16' RHF	19'08" T60	22' RHF
Dégradation de la coque à 500°C	30'26"	28'16"	23'35"	31'51"	26'50"	43'53"	34'29"	30'54"	-	-
Inflammation des cibles en PVC	20'58"	16'46"	12'42"	5'51"	23'15"	42'22"	22'06"	18'53"	-	-

² On considère que l'incendie est « hors de contrôle » lorsque la lutte contre l'incendie a été abandonnée ou que l'abandon du navire a été ordonné. Pour les simulations, nous avons supposé que le feu est « hors de contrôle » dès lors que l'ensemble des véhicules d'une DZ se sont enflammés.

Tableau 21 : Délais d'activation des détecteurs et temps au bout desquels les seuils de tenabilité des personnes à bord, de dégradation de la coque et d'inflammation des cibles ont été atteints. En ce qui concerne la tenabilité des personnes, le critère le plus restrictif est reporté, par exemple la concentration volumique en CO à 1200 ppm dans la DZ18 après 18'04" de feu. Pour les autres zones, RHF indique que le seuil à 2,5 kW/m² pour le flux thermique radiatif a été atteint, T60 celui à 60°C pour la température du gaz.

Comme on pouvait s'y attendre, les détecteurs de fumée détectent le feu plus rapidement que les détecteurs de chaleur. La détection de fumées dans la DZ16, zone d'origine du feu, se fait après 41" de feu, contre 2'08" pour une détection à 54°C.

Comme le montre également la Figure 71 qui compare les délais de détection, les détecteurs de fumées permettent d'anticiper la détection du feu dans les DZ les plus éloignées de la source originelle du feu, comme la DZ13 ou la DZ19, de plus de 2' par rapport à une détection de chaleur à 54°C.

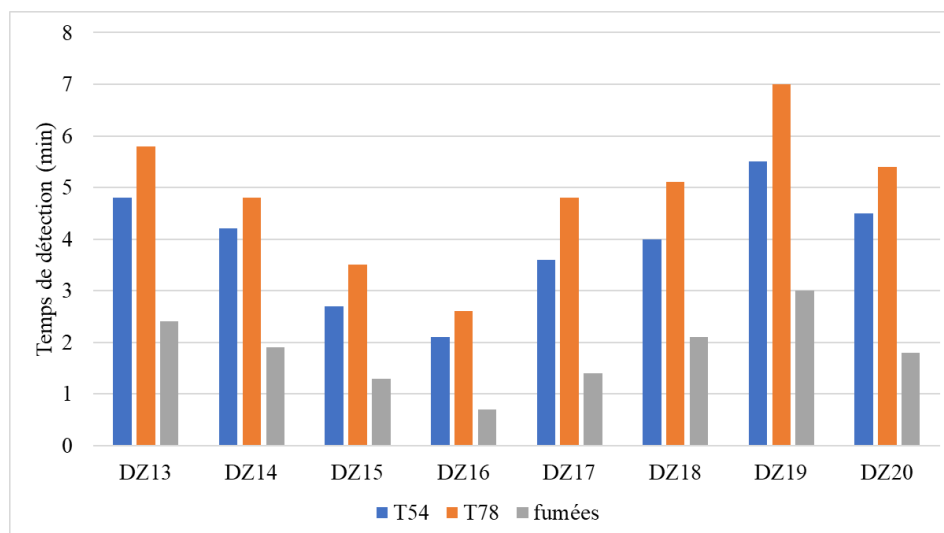


Figure 71 : Délais de détection des détecteurs de fumées et de chaleur, à 54 (T54) et 78°C (T78), dans chaque DZ.

L'analyse du Tableau 21 montre que toutes les DZ sont impactées par le feu.

Les premiers dégâts structurels se produisent dans les DZ15 et DZ17, situées de part et d'autre de la DZ16 où le feu a pris naissance, après respectivement 23'35" et 26'50" de feu. Dans ces zones, les ouvertures latérales du pont favorisent l'oxygénation du foyer et l'évacuation des fumées vers l'extérieur, ce qui explique qu'elles soient les premières impactées par l'incendie.

Les cibles en PVC placées en plafond du pont 4 s'enflamment toutes, mais avec des délais plus ou moins longs, compris entre 5'51" pour la DZ16 et 42'22" pour la DZ18. Dans cette dernière, la combustion est faiblement oxygénée et la teneur en suies très élevée, ce qui limite le flux thermique reçu par les cibles.

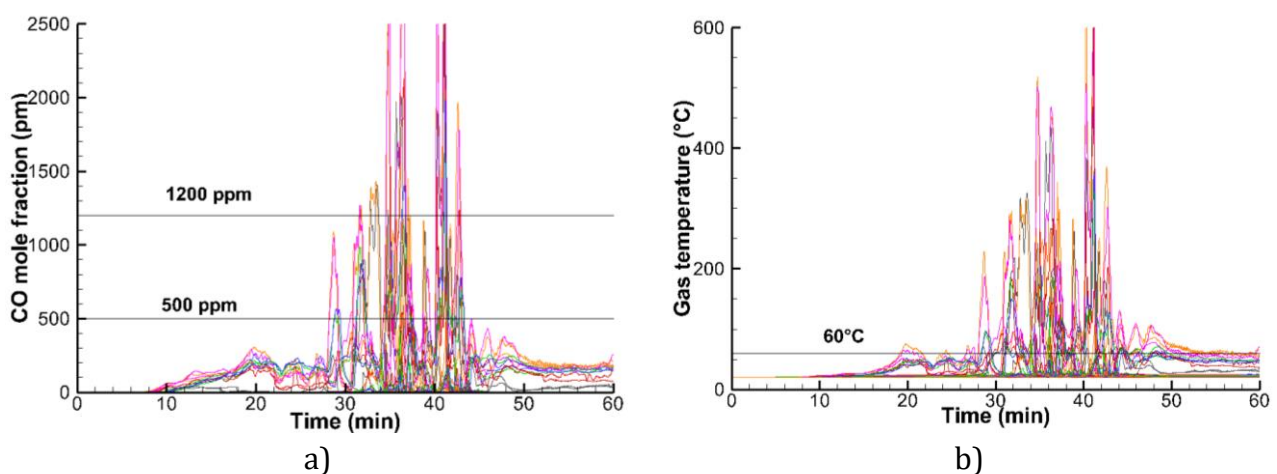
En ce qui concerne les conséquences du feu sur les personnes, les dommages peuvent être causés, selon la zone, par une exposition excessive au flux radiatif (RHF), à la température du gaz (T60) ou au monoxyde de carbone (CO). Après 22' de feu, on observe que les seuils critiques de tenabilité sont atteints dans toutes les DZ, mais aussi dans les LSA du pont 5. Le critère lié au flux radiatif est le plus contraignant dans les zones où le feu est relativement bien oxygéné (DZ13 à DZ16, DZ19, DZ20) ou dans les zones d'impact des flammes extérieures qui sortent par les ouvertures latérales du pont 4 (LSA bâbord). En revanche, la tenabilité est compromise dans les zones plus faiblement ventilées en raison de la toxicité au monoxyde de carbone.

La Figure 72 représente les évolutions temporelles des grandeurs calculées au niveau des différents capteurs placés dans les LSA et le long des chemins d'évacuation du pont 5. Les valeurs seuils de tenabilité des personnes potentiellement exposées y sont représentées.

Comme on peut le constater, la forte intensité de la combustion et son intermittence font que les valeurs seuils sont fréquemment dépassés et de façon plus ou moins durable. Les personnes peuvent être soumise à une température qui dépasse légèrement 60°C dès 19' de feu, puis à un flux radiatif excessif après 24' de feu et ce, jusqu'à environ 43' de feu. Au-delà de 50', seule la visibilité à 10 m et la température ambiante compromettent les conditions de tenabilité, mais les niveaux atteints sont proches des seuils critiques.

On peut donc conclure, que les chemins d'évacuation et les LSA deviennent praticables après 50' de feu. A cet instant, la totalité des camions se sont enflammés et la puissance du feu a significativement diminué (Figure 70).

Ces données conditionnent bien évidemment la stratégie d'évacuation. Une des options pourrait être de confiner les personnes dans les zones de rassemblement (AS), suffisamment de temps pour que le feu baisse d'intensité, avant qu'ils ne rejoignent les zones de débarquement (LSA).



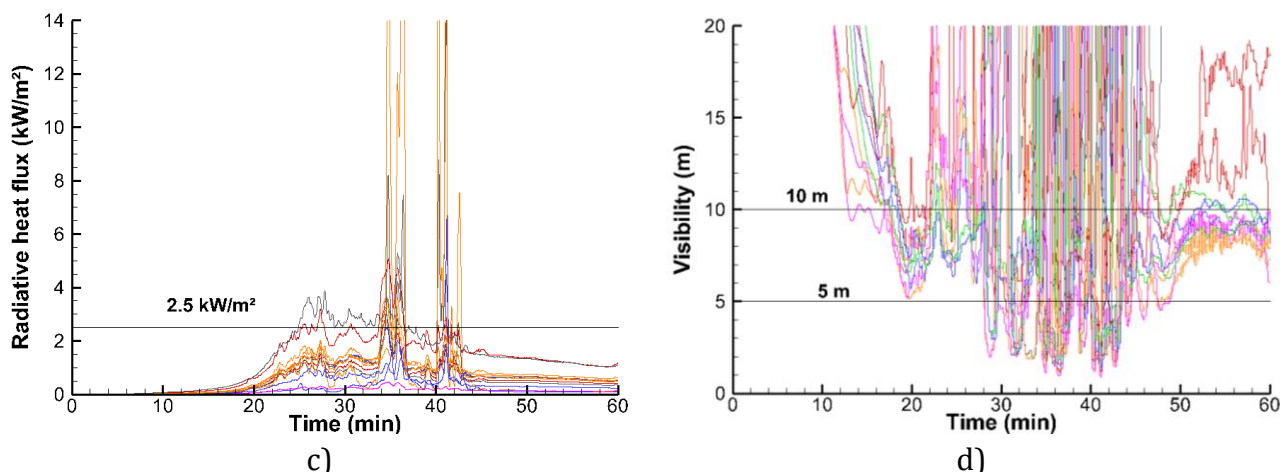


Figure 72 : Evolutions au cours du temps de la fraction volumique de CO (a), de la température du gaz (b), du flux radiatif (c) et de la visibilité (d) dans les LSA et les chemins d'évacuation.

Les capteurs mis en place aux ponts 4 et 5 fournissent des informations locales. Le développement du feu dans le pont garage 4 peut être observé plus en détail à partir des champs 2D fournis par le code SAFIR à différents instants, comme les champs de température du gaz (Figure 73), de suies (Figure 74) et de flux radiatif (Figure 75) calculés à 1,80 m du plancher du pont 4. Néanmoins, cette option n'a pas été retenue car le traitement des données doit se faire alors manuellement, ce qui constitue un travail fastidieux, et nécessite un stockage mémoire important.

L'analyse des figures ci-dessous (Figure 73 à Figure 75) apporte des informations plus précises sur le développement du feu.

Au début du feu (10'), la zone touchée à 1,80 m de hauteur par des gaz chauds, à plus de 60°C, se limite au voisinage du premier camion en feu. Après 30' de feu, la majeure partie du pont 4 est impliquée, à l'exception de la partie avant, sous oxygénée, et de la partie arrière découverte, ce qui permet aux fumées de s'évacuer. Lorsque toute la cargaison est en feu, l'intégralité du pont est à une température supérieure à 60°C.

Les zones où la concentration de suies à 1,80 m du plancher au pont 4 dépasse le seuil correspondant à une obscurité à $12.5\% m^{-1}$, soit 0,319 ppm, est indiquée en noir sur la Figure 74. Après 10' de feu, la concentration en suies reste inférieure à 0,1 ppm (Figure 74a). Elle augmente ensuite dans la zone moins bien ventilée située à l'avant du navire (Figure 74b). Les ouvertures latérales favorisent l'évacuation des fumées qui ne s'accumulent que sur une moitié du pont (Figure 74c et d).

Quant au flux radiatif incident à 1,80 m de hauteur (Figure 75), il n'excède 2,5 kW/m² qu'au voisinage du premier camion en feu après 10' de feu, mais 10' plus tard, la zone s'étend à la moitié du pont. On distingue clairement le flux radiatif induit par les flammes qui s'échappent par les ouvertures latérales du navire. A partir de 30' de feu, les conditions de tenabilité en termes de rayonnement sont dépassées sur la presque totalité du pont.

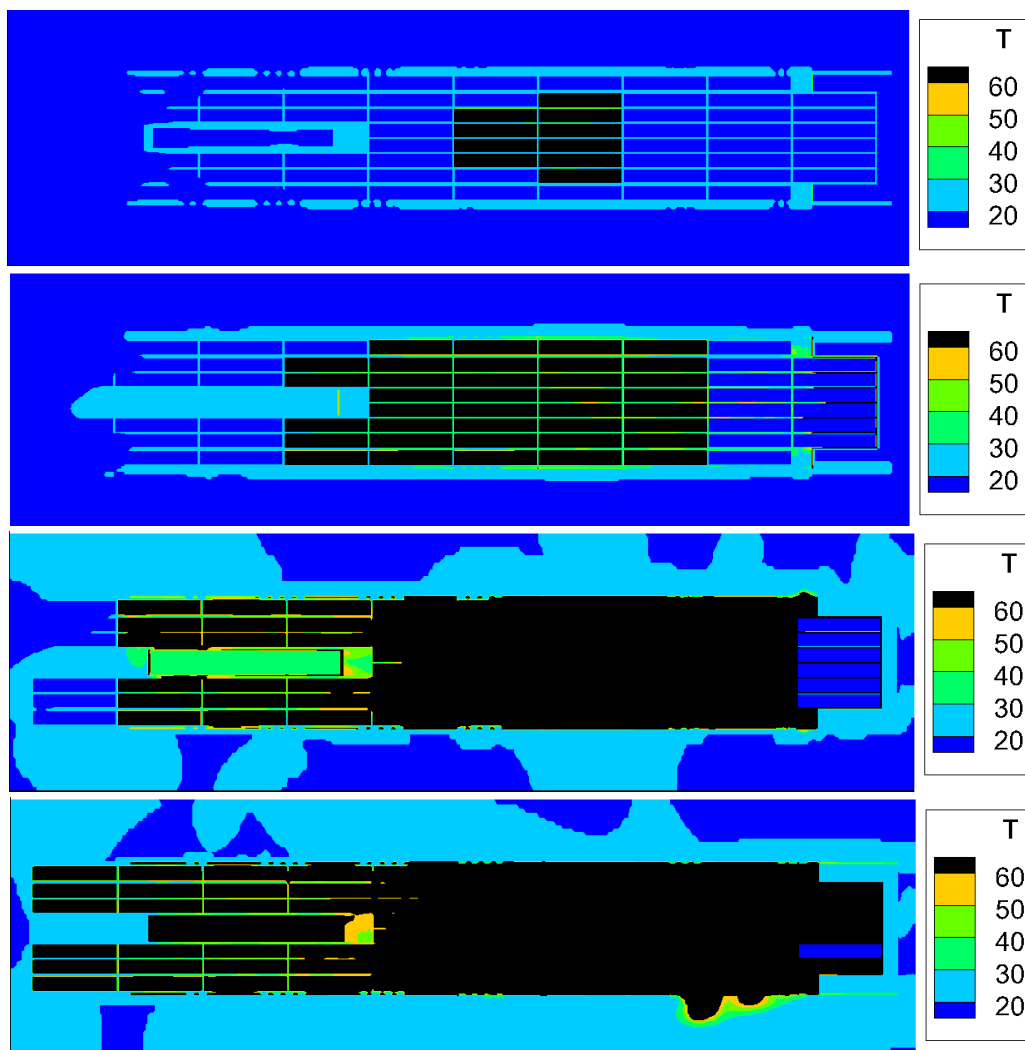
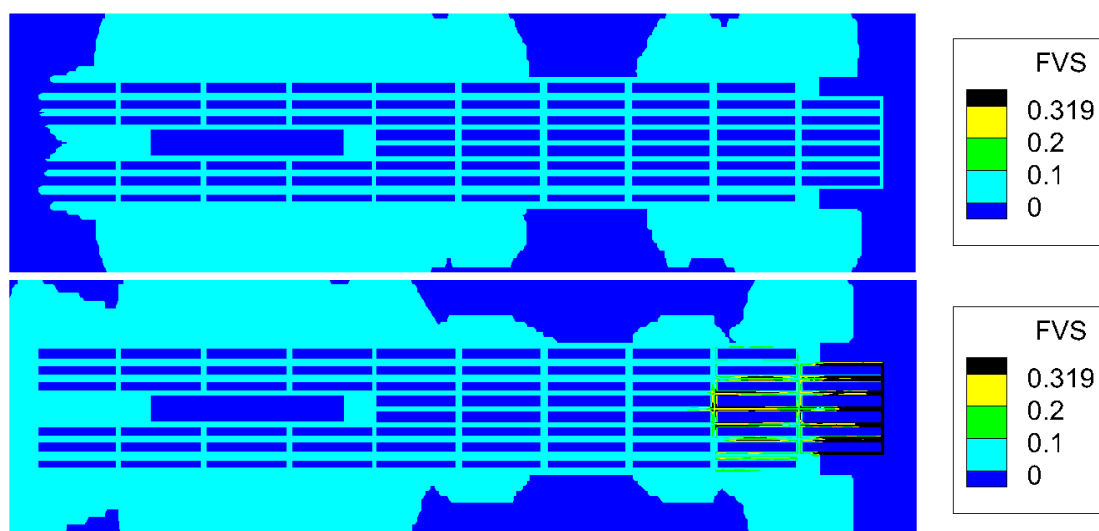


Figure 73 : Champ 2D de la température du gaz à 1,80 m du plancher du pont 4 après 10', 20', 30' et 40' de feu.



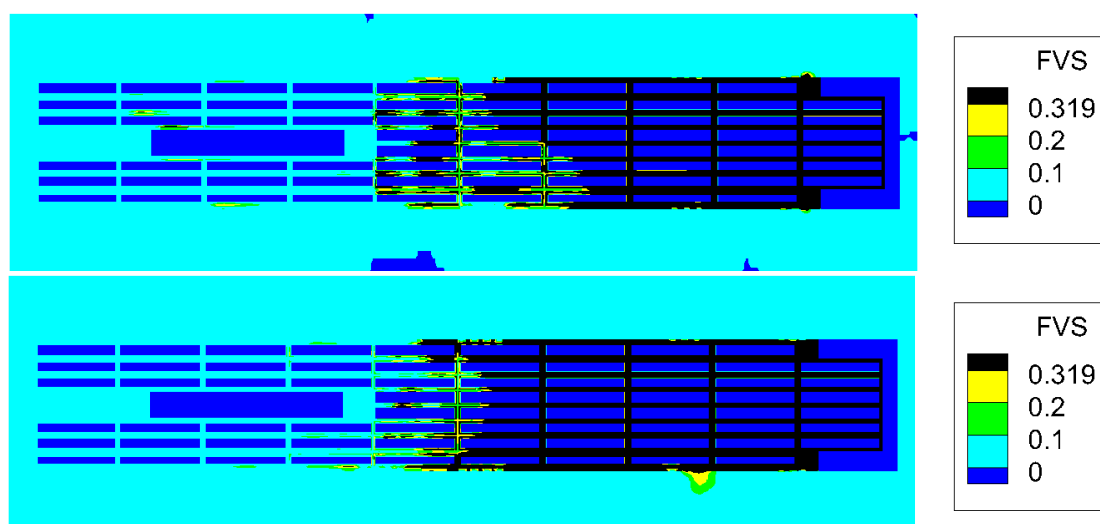


Figure 74 : Champ 2D de la concentration en suies à 1,80 m du plancher du pont 4 après 10', 20', 30' et 40' de feu.

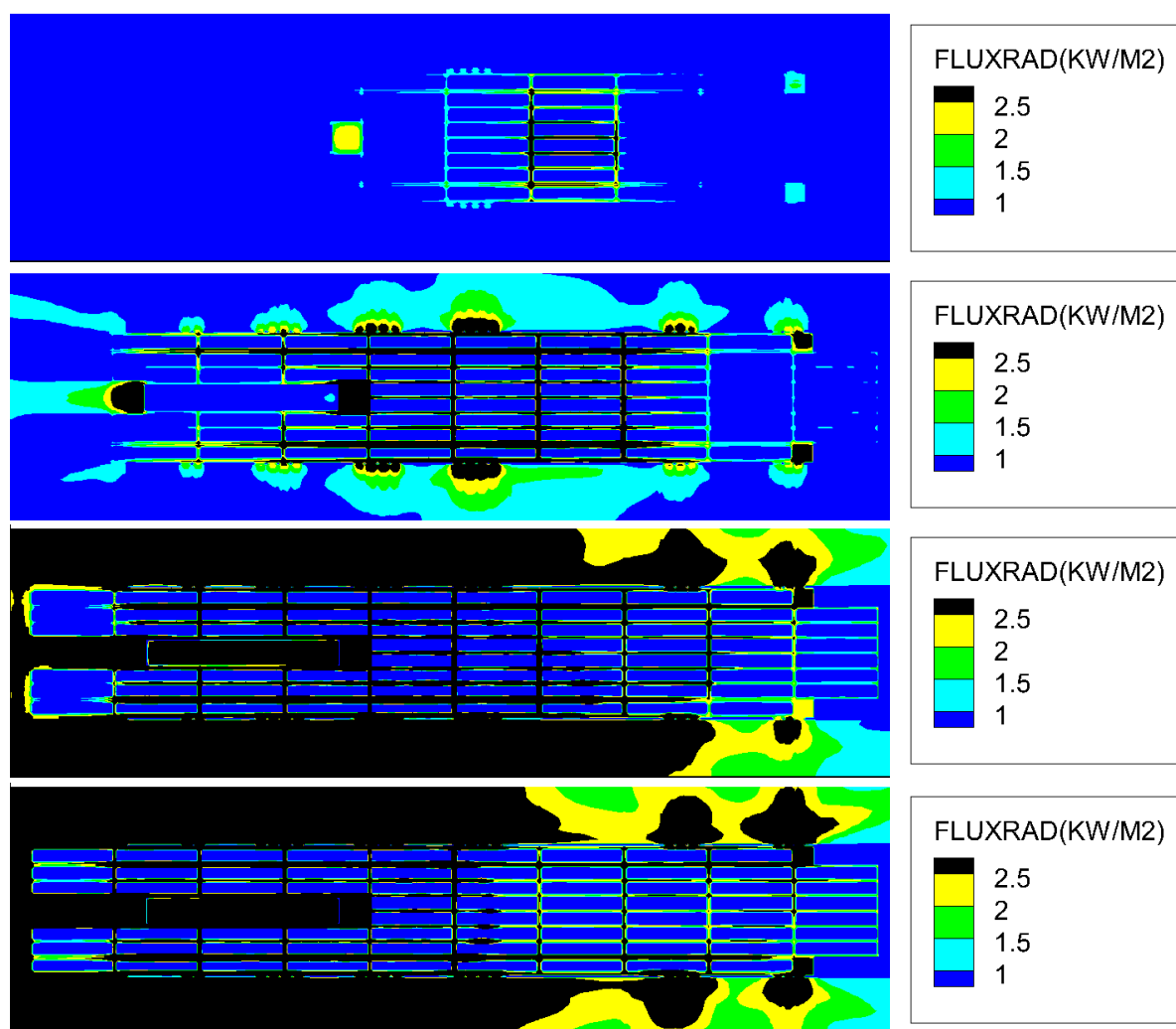


Figure 75 : Champ 2D du flux radiatif à 1,80 m du plancher du pont 4 après 10', 20', 30' et 40' de feu.

Propagation du feu et des fumées dans l'espace vie

La propagation du feu et des fumées dans les ponts 5 à 7 du Stena Flavia est calculée par le modèle de réseau. Comme pour les deux démonstrateurs précédents, ses données d'entrées sont les suivantes :

- Localisation des locaux ;
- Réseau de connectivité par les barrières et par les ouvertures ;
- Résultats du modèle à zones appliqué à chaque local.

Résultats du modèle à zones

Le modèle à zones est utilisé pour calculer les durées des phases du feu, les temps de transmission par les barrières et l'évolution au cours du temps des fumées. A titre d'exemple, nous présentons les résultats du modèle à zones pour les locaux « Auto-pullman » et « Hall d'entrée #4 ». Pour le local « Auto-pullman », le temps de calcul est de 60 s pour 45 minutes de temps réel. Pour le compartiment « Hall d'entrée #4 », le temps de calcul est de 40 s pour 20 minutes de temps réel.

Le local « Auto-pull man » a pour dimensions : 11,60 m de long, 4,40 m de large et 2,90 m de haut. Ses parois, y compris le plafond et le plancher, sont isolées. Ce local possède une seule ouverture donnant sur le « Hall d'entrée #4 » de dimensions 2 m × 1 m.

Les dimensions du « Hall d'entrée #4 » sont 8,10 m × 5,50 m × 2,90 m. Il possède deux ouvertures de dimensions 2 m × 1 m et une ouverture plus grande, de dimensions 2 m × 2 m. Il n'est isolé qu'en plafond et au plancher.

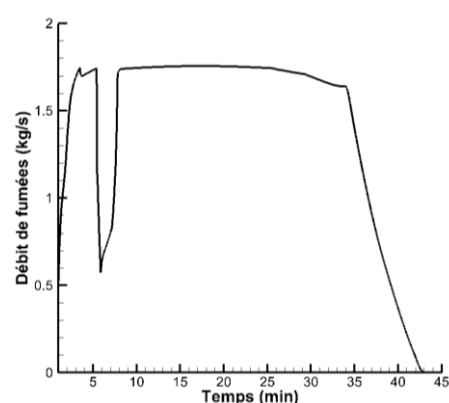
La charge et la surface de combustible au sol, ainsi que les paramètres de la courbe de puissance associée aux éléments combustibles présents dans les deux locaux sont donnés dans le Tableau 18. Les courbes de puissance ont été obtenues par la méthode présentée dans le §4.1.1 et sont représentées sur la Figure 62.

Le développement du feu dans les locaux est caractérisé grâce au modèle à zones qui fournit les durées de phases du feu et de transmission par les barrières (Tableau 22), ainsi que l'évolution du débit, de la température et de la masse volumique des fumées sortant du local (Figure 76).

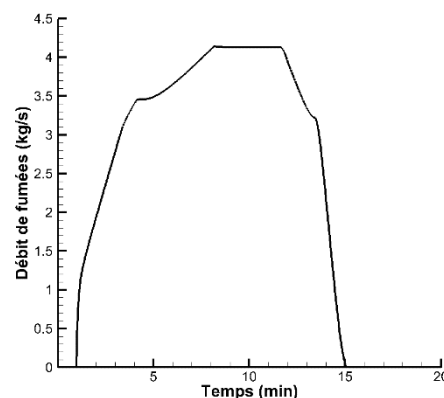
Les résultats obtenus sont donnés dans le Tableau 22. En raison de l'isolation du local « Auto-pullman », aucune transmission du feu par les barrières n'est observée. Le local atteint cependant la phase d'embrasement généralisé au bout de 6'52" de feu. Quant au « Hall d'entrée #4 », la puissance du feu est trop faible pour atteindre le flashover et transmettre le feu par les barrières.

Local	Temps (s)			Temps de transmission (s)		
	Flashover	Décroissance	Fin	Parois latérales	Plafond	Plancher
Auto-pullman	6'52"	25'42"	41'40"	-	-	-
Hall d'entrée #4	-	11'41"	15'	-	-	-

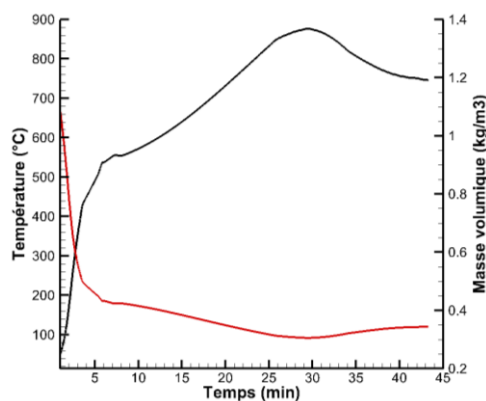
Tableau 22 : Durées des phases du feu et de transmission par les barrières obtenues à l'aide du modèle à zones pour les locaux "Auto-pullman" et "Hall d'entrée #4".



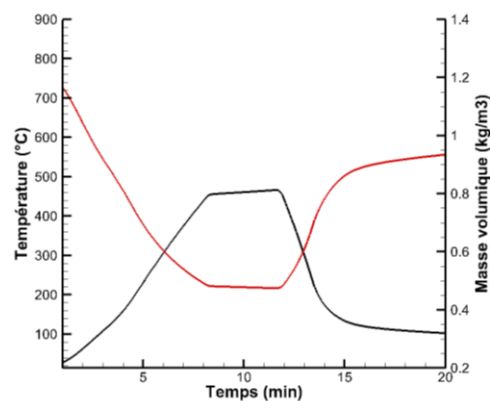
a) Débit de fumées sortant du local « Auto-pullman »



c) Débit de fumées sortant du « Hall d'entrée #4 »



b) Température des gaz en zone chaude (en noir) et masse volumique (en rouge) dans le local « Auto-pullman »



c) Température des gaz en zone chaude (en noir) et masse volumique (en rouge) dans le « Hall d'entrée #4 »

Figure 76 : Evolution temporelle des fumées sortant des locaux « Auto-pullman » (a et b) et « Hall d'entrée #4 » (c et d).

Chronologie du feu

La Figure 77 représente la chronologie de propagation du feu calculée par le modèle de réseau. Le pas de temps pour le calcul de la propagation du feu et des fumées est fixé à 1s. Le temps de calcul pour simuler statistiquement (100 tirages) la propagation du feu puis le remplissage de la structure par les fumées est de 1 s pour 25 minutes de temps réel.

La propagation du feu se limite aux locaux « Auto-pullman » et « Hall d'entrée #4 ». Compte tenu des résultats obtenus par le modèle à zones, l'embrasement généralisé du local « Auto-pullman » se produit après 5'. Le feu se propage ensuite au « Hall d'entrée #4 » qui s'enflamme, mais sans atteindre le flashover.

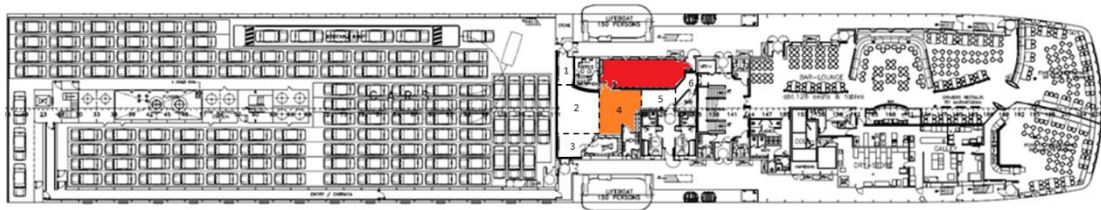
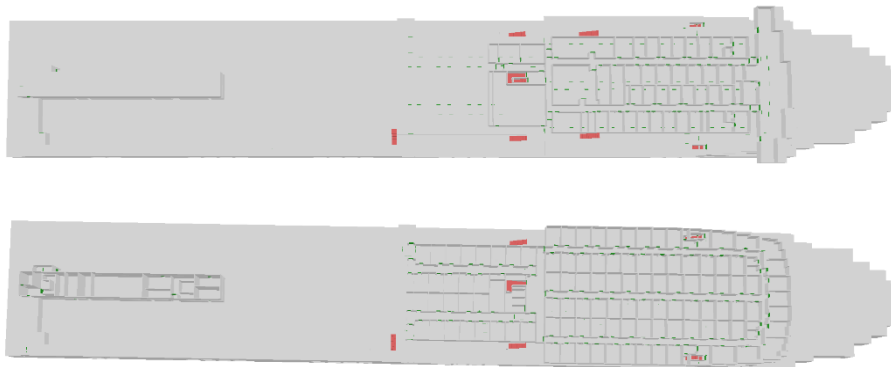


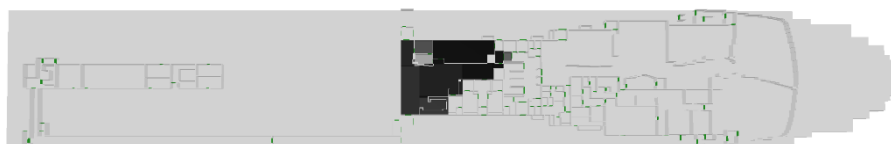
Figure 77 : Vue 2D du pont 5 du Stena Flavia, montrant en rouge le local « Auto-pullman » touché par le flashover et en orange, le « Hall d'entrée #4 » enflammé, mais où le flashover n'a pas eu lieu.

Chronologie de remplissage par les fumées

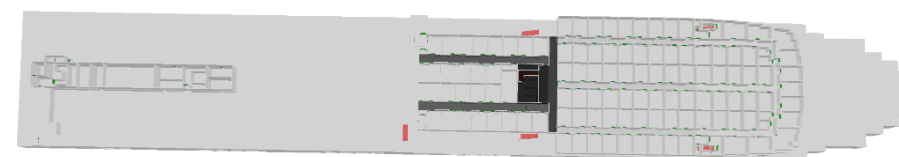
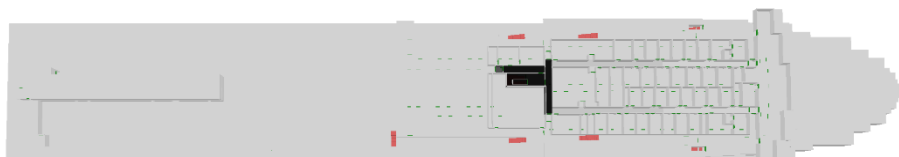
La Figure 78 montre la chronologie de remplissage du bateau par les fumées. Le logiciel SMOKEVIEW du NIST a été utilisé pour le post-traitement des résultats.

Les fumées issues du local "Auto-pullman" se propagent d'abord latéralement (Figure 78a) jusqu'à atteindre la cage d'escalier puis les étages supérieurs du navire au bout de 10' (Figure 78b). Les trois ponts supérieurs se remplissent en parallèle car ils sont tous connectés par la cage d'escalier (Figure 78c). Néanmoins, le pont 6 se remplit très rapidement car il est composé presque exclusivement de cabines dont les portes sont fermées (Figure 78d). Les fumées mettent 28' à remplir l'intégralité des locaux sur les trois ponts (Figure 78e).

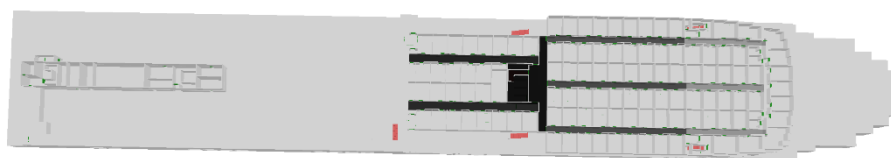
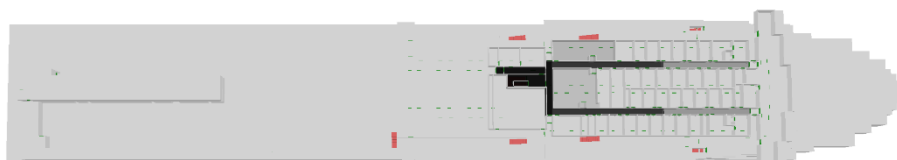




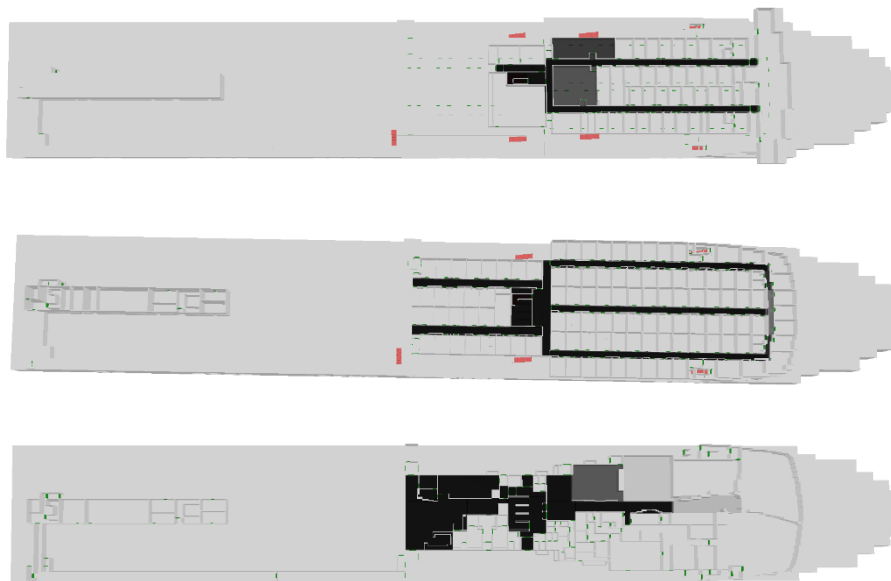
(a) 5'



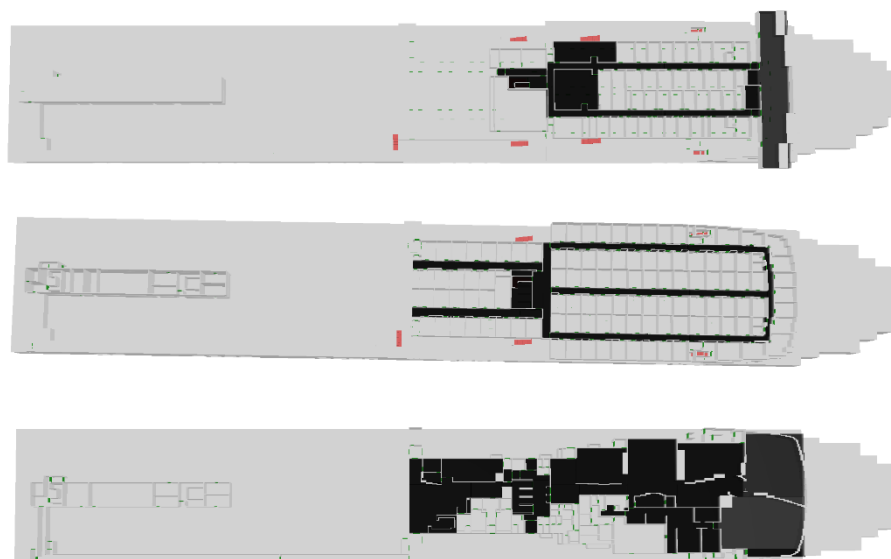
(b) 10'



(c) 15'



(d) 20'



(e) 28'

Figure 78 : Propagation des fumées dans l'espace vie après 5', 10', 15', 20' et 28' après le départ du feu dans le local « Auto-pullman ».

Conclusion et perspectives

Cette thèse a été menée dans le cadre de deux projets de recherche : le projet ANR ASTRID Maturation MARINER-DECM et le projet H2020 LASHFIRE. Elle a été consacrée au développement d'un outil permettant d'évaluer en temps réel le risque incendie dans une structure multi-compartmentée et à la réalisation de démonstrateurs dans les domaines civil et militaire.

L'outil proposé repose sur une approche hybride multi-échelle à couplage faible (unilatéral), combinant à l'échelle du local, un modèle à zones ou CFD permettant de décrire le comportement du feu et ses conséquences sur l'ambiance et un modèle de réseau pour simuler la propagation du feu et des fumées dans toute la structure.

Un modèle à zones a été spécifiquement développé en remplacement du code ŒIL de DGA TN, dont les limites ont été clairement identifiées dans le projet initial MARINER. Outre le fait qu'il ne nécessite aucune calibration de paramètres, une des originalités de ce nouveau modèle est qu'il permet la simulation d'un feu impliquant plusieurs combustibles dans un même local, ce qui a été rendu possible par la création d'une molécule de combustible fictive, dont la formule chimique varie au cours du temps en fonction des débits de combustion des combustibles impliqués. Le modèle a ensuite été validé grâce à des essais réalisées dans le caisson DIAMAN pour des foyers mono- et multi-combustibles. Une méthode d'évaluation de la chaleur de combustion, basée sur la corrélation de Babrauskas, un profil de feu en αt^2 et des résultats d'essais, a également été mise au point afin d'évaluer le profil de feux plus puissants que ceux réalisés dans le dispositif DIAMAN. Dans le cadre de l'approche hybride, le modèle à zones a été utilisé pour évaluer les durées des phases d'un feu de compartiment (embrasement généralisé, feu pleinement développé et décroissance) et l'évolution temporelle de l'écoulement des fumées (masse volumique, température et débit) sortant du compartiment. Lorsque le scénario de feu sort du domaine de validité du modèle à zones (e.g., local de grandes dimensions ou à fort rapport d'aspect), le recours au code CFD SAFIR 3D s'impose. Pour les besoins de l'étude, le code SAFIR 3D a été étendu pour traiter la propagation du feu vers des cibles inflammables présentes dans le local, par la méthode Flux-Time Product, et la détection de chaleur et de fumée en y implémentant deux modèles de détecteurs.

Dans le projet initial MARINER, une version unidimensionnelle du code SAFIR avait été développée afin de simuler la propagation du feu dans une gaine de ventilation différentiellement chauffée où circule de l'air. Des modifications ont été apportées pour étendre SAFIR 1D à des gaines de ventilation contenant des fumées chaudes issues d'un local en feu. Les fumées contenues dans la gaine, constituées d'air et des produits de combustion, ne pouvant plus être considérées comme transparentes, un sous-modèle de rayonnement a été implémenté afin de résoudre l'équation de transfert radiatif pour un milieu gris émettant, absorbant, mais non diffusant. Le modèle a ensuite été testé par

confrontation avec des résultats d'essais réalisés dans le réseau de ventilation du dispositif DIAMAN pour des configurations de gaines débouchantes et traversantes contenant des fumées. L'accord s'est révélé satisfaisant.

Dans le cadre de l'approche hybride, nous avons utilisé le code SAFIR 1D dans le cas de connexion entre locaux par des gaines de ventilation, en utilisant des données issues du modèle à zones, notamment le débit, la température et la masse volumique des gaz extraits, pour évaluer les délais de transmission du feu par les gaines.

A l'échelle de la structure, la propagation du feu et des fumées a été simulée par un modèle de réseau polydisperse et amorphe. Ce modèle, développé dans le projet MARINER initial, est basé sur un calcul de probabilité d'occurrence des étapes du feu (embrasement généralisé, feu pleinement développé et décroissance) et de transmission d'un compartiment à l'autre. Il a été étendu pour prendre en compte le transport des fumées, grâce à un simple-modèle de remplissage, et la transmission du feu par les façades, par une approche empirique consistant à évaluer la hauteur des flammes extérieures.

Les résultats des simulations réalisées à l'échelle du compartiment et dans les gaines de ventilation ont permis de « nourrir » le modèle de réseau, afin de calculer la transmission du feu et le transport des fumées dans les structures étudiées.

Les démonstrations de l'approche hybride ont consisté à simuler la propagation du feu et des fumées dans des configurations très différentes : dans le domaine civil sur un immeuble de bureaux et un navire roulier, et dans le domaine militaire, sur une corvette générique.

Appliquée à un immeuble de bureaux de quatre étages, l'influence du mode de transmission du feu en façade a été clairement mise en évidence.

Les résultats obtenus à l'aide du simple modèle de remplissage des fumées ont été comparés à ceux issus du code SAFIR 3D pour deux configurations de ventilation selon que les issues de secours sont fermées ou ouvertes. Dans la première configuration, le modèle simplifié de transport des fumées a montré un accord satisfaisant avec le modèle CFD aussi bien au niveau de l'ordre que des temps de remplissage des locaux. En revanche, dans la configuration où les issues de secours restent ouvertes, le modèle simplifié a été mis en défaut en raison de l'interaction entre le feu et la structure ventilée qui modifie le transport des fumées.

Dans le domaine militaire, l'application de l'approche hybride a porté sur une corvette générique composée de sept ponts et de 115 locaux, dont 96 sont susceptibles de propager le feu. L'étude de deux contextes de feu, selon que la corvette est ventilée mécaniquement ou non, a permis de montrer le rôle du mode de transmission par les gaines de ventilation sur la propagation, créant des « courts-circuits » générant l'inflammation de locaux distants.

Une cartographie du risque incendie a également été réalisée pour le premier contexte. Cette cartographie a permis de classer les locaux selon leur propension à brûler (i.e., à s'enflammer) ou à propager le feu (i.e., à atteindre la phase de feu pleinement développé,

après flashover), mais aussi d'identifier les « super-nœuds » du réseau, i.e., les locaux ayant une plus grande capacité à générer des embrasements généralisés dans les autres locaux. Ces « super-nœuds » possèdent un haut degré de connectivité, mais aussi des caractéristiques, en termes de charge de combustible et de ventilation, favorables au développement d'un feu suffisamment puissant et oxygéné.

Dans le cadre du projet LASHFIRE, nous avons également réalisé une étude du risque incendie dans le Stena Flavia, un navire roulier transportant à la fois des passagers et des véhicules, dans le but d'estimer les conséquences d'un incendie dans un pont garage sur les personnes, la cargaison et le navire. Plusieurs scénarios critiques de feux ont été simulés, correspondant à différentes localisations du départ de feu et à différentes conditions de vent, mais aussi à des situations accidentelles favorisant la transmission du feu et des fumées du pont garage vers l'espace vie, les zones de rassemblement et d'évacuation.

Les conditions de feu sortant du domaine d'application du modèle à zones, le développement du feu dans le pont garage a été modélisé par la version étendue du code SAFIR 3D.

Les résultats obtenus par l'approche hybride nous ont permis d'établir une chronologie du feu depuis son éclosion et sa propagation de véhicule en véhicule dans le pont garage jusqu'à son impact dans l'espace vie. Il a été possible d'évaluer les dommages causés à la cargaison, les délais de détection de chaleur et de fumées, ainsi que les temps au bout desquels les seuils de tenabilité des personnes à bord, de dégradation de la coque et d'inflammation des cibles ont été atteints. En lien avec l'évacuation, une attention particulière a été portée aux zones de rassemblement et d'embarquement, et le long des chemins d'évacuation.

A terme, la poursuite de ces travaux permettrait d'aboutir à la création d'un véritable outil d'aide à la décision pour la gestion « temps réel » du sinistre, mais aussi le dimensionnement de systèmes de détection et de lutte incendie, la conception d'architectures moins vulnérables, ou la formation des personnels. Pour y parvenir, un certain nombre d'actions doivent être menées :

- Le couplage de l'approche hybride au modèle d'évacuation et de mise en sécurité développé par le LEMTA est un objectif à court terme du projet LASHFIRE. Le modèle du LEMTA est un modèle macroscopique prenant en compte le déplacement des personnes, les effets de congestion et le comportement humain exposées aux contraintes thermiques, optiques et toxiques du feu évaluées par l'approche hybride.
- L'assimilation de données liées à la détection et à la lutte serait utile afin de corriger, compte tenu de la cartographie réelle du feu, la prévision réalisée par le modèle de réseau. On disposerait pour cela des nombreux essais réalisés dans le cadre du projet MARINER-DECM.

- Le calcul du transport des fumées par un simple modèle de remplissage a montré ses limites lorsque la ventilation a une influence significative sur leur propagation. Il conviendrait de développer un modèle prenant en compte les variations de pression dans la structure, tout en conservant le caractère « temps réel » du modèle de réseau complet ;
- Le navire dispose d'un ensemble de réseaux fonctionnels (eau, électricité, etc.) qui peuvent être endommagés, voire détruits, par le feu. Prévenir un dysfonctionnement consécutif à l'incendie de ces réseaux constituerait une réelle plus-value du modèle.
- L'intégration dans un système complet civil ou militaire nécessiterait d'une part, d'automatiser la saisie des données structurelles (géométrie, type et contenu des locaux, réseaux de détection, de lutte, de ventilation et fonctionnels, etc.) sur la base notamment de fichiers CAO, et, d'autre part, d'assurer l'interopérabilité avec les systèmes existants.
- Dans un contexte défense, la méthodologie proposée pourrait être utilisée pour améliorer le module incendie LUCIFER de DGA TN, qui ne permet d'accéder à ce jour qu'au nombre de locaux susceptibles d'être touchés par l'incendie (sphère statique de feu), mais aussi dans le cadre des études amont de la DGA portant notamment sur les frégates de nouvelle génération ou le futur porte-avions, pour évaluer le risque incendie et optimiser les stratégies de lutte et de mise en sécurité des personnels, notamment en raison de l'intégration de nouvelles armes (e.g., les drones) à bord.

Bibliographie

1. Eurocode 1, partie 2.2. – Actions en cas d’incendie. ENV 1991 – 2.2 + DAN, indice de classement AFNOR PrP 06-102 (1997). Eurocode 1, partie 1.2. – Actions en cas d’incendie. EN 1991 – 1.2 (2002).
2. Porterie B., Loraud J.-C., Lallemand C., Fournier A., Analyse du risque thermique dans une structure multicompartiment, *Revue Française de Génie Civil* 4 (2000) 929-964.
3. Ramachanandran G., “Stochastic models of fire growth” Chapter 15, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, fourth edition, 2008.
4. Albini F.A., Rand S., Statistical consideration on the spread of fire, IDA research and engineering support division, Washington D.C., 1964.
5. Thomas P.H., Some possible statistic processes to the spread of fire, Internal Note No. 223, Fire research station, Borehamwood, Herts, UK, 1965.
6. Benckert L.G., Sternberg I., An attempt to find an expression for the distribution of fire damage amount, *Transactions of the Fifteenth International Congress of Actuaries* 11 (1957), 288-294.
7. Mandelbrot B., Random walks, fire damage amount and other Paretian risk phenomena, *Operation Research* 12 (1964) 582-585.
8. Aoki Y., Studies on probabilistic spread of fire, Research Paper No. 80, Building Research Institute, Japan, 1978.
9. Berlin G.N., Managing the variability of fire behavior, *Fire Technology* 16 (1980) 287-302.
10. Ramachanandran G., Stochastic modeling of fire growth, *Fire Safety: Science and Engineering*, ASTM STP 882, In: Harmathy, T.Z., editor. American Society for Testing and Materials (1985) 122-144.
11. Hori M., Theory of percolation and its applications, *Nippon Tokeigakkai-shi* 3(19) (1972).
12. Beer T., Enting I.G., Fire spread and percolation modeling, *Mathematical and Computer Modeling* 13 (1990) 77-96.
13. Ling W.C.T., Williamson R.B., Modeling of fire spread through probabilistic Network, *Fire Safety Journal* 9 (1986) 287-300.
14. Platt D.G., Elms D.G., Buchanan A.H., A probabilistic model of fire spread with time effects, *Fire Safety Journal* 22 (1994) 367-98.
15. Ralph B., Carvel R., Coupled hybrid modelling in fire safety engineering; a literature review, *Fire Safety Journal* 100 (2018) 157-170.
16. Projet ANR ASTRID MARINER, Maîtrise du risque incendie et lutte anti-feu dans des grands ensembles polydisperses multi-locaux sur réseau, n° ANR-12-ASTR-0002 (2012-2015), Rapport final.

17. Giraud N., Un modèle de réseau pour la propagation d'un incendie dans une structure massivement multi-compartmentée, Université d'Aix Marseille, 2016.
18. Kacem A., Lallemand C., Giraud N., Mense M., de Gennaro M., Pizzo Y., Loraud J-C., Boulet P., Porterie B., A Small-World Network Model for the Simulation of Fire Spread Onboard Naval Vessels, IAFSS 2017, Lund, Suède.
19. Kacem A., Lallemand C., Giraud N., Mense M., de Gennaro M., Pizzo Y., Loraud J-C., Boulet P., Porterie B., A Small-World Network Model for the Simulation of Fire Spread Onboard Naval Vessels, Fire Safety Journal 91 (2017) 441-450.
20. Lallemand C., Présentation du code de calcul ŒIL, Rapport DGA n° 2009-278840 CTSN/SDP/PFN/DR du 14/09/09, 2009.
21. Mense M., Pizzo Y., Prétrel H., Lallemand C., Porterie B., Experimental and numerical study on low-frequency oscillating behaviour of liquid pool fires in a small-scale mechanically-ventilated compartment, Fire Safety Journal 108 (2019) 102824.
22. Babrauskas V., Ignition Handbook, Fire Science Publishers, 2003, Issaquah, WA.
23. Graf S.H., Ignition temperatures of various papers, woods, and fabrics, Bulletin n° 26, 1949, Engineering Experiment Station, Oregon State College, Corvallis.
24. STM Standard D777, Standard Test Methods for Flammability of Treated Paper and Paperboard, 1997 (Reapproved 2002), ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
25. White K.A., Ignition of Cellulosic Paper at Low Radiant Fluxes, NASA Technical Memorandum 107311, Lewis Research Center, Cleveland, Ohio, August 1996.
26. Caractérisation de l'inflammation de cibles combustibles, Rapport Interne DGA TN, Marché 2015-86-0049, mars 2017.
27. Duny M., Etudes numériques et expérimentales des phénomènes de propagation d'un incendie le long d'une façade, Université de Poitier, 2016.
28. PD 7974-1 : Application of fire safety engineering principles to the design of buildings.
29. Rapport CNNP diffusion restreinte, n°PEQ4.4420.C.P1 et P2 DU 10/02/95.
30. Lie T.T., Characteristic temperature curves for various fire severities, Fire Technology 10 (1974) 315-326.
31. Ma Z., Mäkeläinen P., Parametric Temperature-Time Curves of Medium Compartment Fires for Structural Design, Fire Safety Journal 34(4) (2000) 361-375.
32. Barnett C.R., BFD curve: a new empirical model for fire compartment temperatures, Fire Safety Journal 37(5) (2002) 437-463.
33. Barnett C.R., A new T-equivalent method for fire rated wall constructions using cumulative radiation energy, Journal of Fire Protection engineering 17 (2007) 113-127.
34. Hertz K., Parametric fires for structural design, Fire technology 48 (2012) 807-823.
35. Deshanghere S., Détermination des conditions d'échauffement de structure extérieure à un bâtiment en situation d'incendie, INSA de Rouen, 2006.

36. Guillaume E., Modélisation de l'incendie – Outils de modélisation numériques du développement du feu, ref. SE2064, Techniques de l'Ingénieur, 2012.
37. Peacock R.D., McGrattan K.B., Forney G.P., Reneke P.A., CFAST – Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (version 7) – Technical reference guide, NIST Technical Note 1889v1, Octobre 2015.
38. Haouari Harrak S., Contributions à l'étude des écoulements de fumées dans un bâtiment en situation d'incendie, Thèse, Université de Lorraine, 2019.
39. Gautier B., Lemaître Ch., "Validation file of Software Magic Version 3.4.1". HT-31/99/002/A, 1999.
40. McGrattan K.B., Hostikka S., Floyd J., McDermott R., Vanella M., Fire dynamics simulator –Technical reference guide. NIST Special Publication 1018-1 Sixth Edition, 2021.
41. Trouvé A., Wang Y., Large eddy simulation of compartment fires, International Journal of Computational Fluid Dynamics 24 (2010) 449-466.
42. Suard S., C. Lapuerta, A. Kaiss, B. Porterie, Sensitivity analysis of a fire field model in the case of a large-scale compartment fire scenario, Numerical Heat Transfer 63 (2012) 879-905.
43. Suard S., Lapuerta C., Rigollet L., Lallemand C., Sardoy N., Kaiss A., Porterie B., Sensitivity analysis: a helpful tool for analyzing and optimizing CFD fire models, Eurotherm 2012, Poitiers.
44. Mense M., Pizzo Y., Prétrel H., Porterie B., Experimental study on low-frequency oscillating behavior in mechanically-ventilated compartment fires, Journal of Applied Fluid Mechanics 12 (2019) 49-58.
45. Mense M., Etude des régimes d'instabilités de combustion basse fréquence lors d'un incendie dans une enceinte mécaniquement ventilée, Université d'Aix Marseille, 2018.
46. Yung Y., V.R. Beck, "Building fire safety risk analysis", SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, (1995) 5–95.
47. Yung D., Hadjisophocleous G.V., Proulx G., "Modelling concepts for the risk-cost assessment model FiRECAM and its application to a Canadian government office building", Proceedings of the Fifth International Symposium on Fire Safety Science, Melbourne.
48. Hadjisophocleous G.V., Bénichou N., Torvi D.A., Reid I., "Evaluating compliance of performance-based designs with fire safety objectives", Proceedings of the 3rd International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods, Lund.
49. Bénichou N. et al., FIERAsystem: a fire risk assessment model for light industrial building fire safety evaluation, Research Report #120, NRC-CNRC, novembre 2002.
50. Muller A., Demouge F., Jeguirim M., Fromy P., Brilhac J.F., SCHEMA-SI: a hybrid fire safety engineering tool. MCS-7, Proceedings of the 7th Mediterranean

- Combustion Symposium, Chia Laguna, Cagliari, Sardinia, ITA, September 11-15, 2011.
51. Philips W.G.B., Simulation models for fire risk assessment, *Fire Safety Journal* 23(2) (1994) 159-169.
 52. Fraser-Mitchell J.N., "An object-oriented simulation (CRISP II) for fire risk assessment", *Proceedings of the 4th International Symposium on Fire Science*, Ottawa, Canada (1994) 793.
 53. Hostikka S., Keski-Rahkonen O., Probabilistic simulation of fire scenarios, *Nuclear Engineering and Design* 224 (2003) 301-311.
 54. Beck V., "Performance-based fire engineering design and its application in Australia", *Proceedings of the Fifth International Symposium on Fire Safety Science*, Melbourne, Australia (1997) 23.
 55. Frantzich H., Risk analysis and fire safety engineering, *Fire Safety Journal* 31(4) (1998) 313-329.
 56. Frantzich H., Uncertainty and risk analysis in fire safety engineering, Lund University Report tvbb-1016, Institute of Technology, Department of Fire Safety Engineering, Sweden (1998).
 57. Peacock R.D. et al., A User's Guide for FAST: Engineering Tools for Estimating Fire Growth and Smoke Transport, Special Publication 921, NIST, U.S. Dept. of commerce, Washington, DC, 2000.
 58. Peacock R.D. et al., An Update Guide for HAZARD I Version 1.2, NISTIR 5410, NIST, Gaithersburg, MD, 1994.
 59. Floyd J.E., Hunt S.P., Williams F.W., Tatem P.A., Fire and Smoke Simulator (FSSIM) Version 1 - Theory Manual, NRL/MR/6180—04-8765, Naval Research Laboratory, Washington, DC, 2004.
 60. Cheng H., Hadjisophocleous G.V., Dynamic modeling of fire spread in building, *Fire Safety Journal* 46 (2011) 211-224.
 61. Tewarson A., "Generation of heat and chemical compounds in fires", Chapter 3-4, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, fourth edition, 2008.
 62. Heskestad G., "Fire plumes, flame height, and air entrainment", Chapter 2-1, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, fourth edition, 2008.
 63. Forney G.P., Computing radiative heat transfer occurring in a zone fire model, *Fire Science and Technology* 14(1) (1994) 31-47.
 64. Drysdale D.D., "Thermochemistry", Chapter 1-5, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, fourth edition, 2008.
 65. Patankar S.V., *Numerical Heat Transfer and Fluid, Flow*, McGraw-Hill (1980).
 66. Babrauskas V., Estimating pool fire burning rates, *Fire Technology* 19 (1983) 251-261.

67. Consalvi J-L., Porterie B., Loraud J-C., Method for computing the interaction of fire environment and internal solid regions, *Numerical Heat Transfer-Part A* 43(8) (2003) 777-805.
68. Consalvi J-L., Porterie B., Loraud J-C., A Blocked-Off Region Strategy to Compute Fire Spread Scenarios Involving Internal Flammable Targets, *Numerical Heat Transfer-Part B* 47 (2005) 419-441.
69. Launder B. et D., *Spalding Mathematical Model of Turbulence*, Academic Press (1972).
70. Hu Z., Utiskul Y., Quintiere J.G., Trouvé A., Towards large eddy simulations of flame extinction and carbon monoxide emission in compartment fires, *31st International Symposium on Combustion*, the Combustion Institute (2007) 2537-2545.
71. Magnussen B.F. et Hjertager B.H., On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion, *16th Int. Symposium on Combustion*, the Combustion Institute (1977) 719-729.
72. Modest M.F., *Radiative Heat Transfer*, McGraw-Hill, New York (1996).
73. Kent J.H. et Honnery D. R., A Soot Formation Map for a Laminar Ethylene Diffusion Flame, *Combustion and Flame* 79 (1990) 287-298.
74. Grosshandler W.L., RADCAL: A Narrow-Band Model for Radiation Calculations in a Combustion Environment, *NIST Tech. Note* 1402 (1993).
75. Chieng C.C., B.E. Launder, On the calculation of turbulent heat transport downstream from an abrupt pipe expansion, *Numerical Heat Transfer* 3 (1980) 189-207.
76. Holman J.P., *Heat Transfer*, McGraw-Hill, New York, 7th edition (1990).
77. Issa R.I., Solution of the Implicitly Discretized Fluid Flow Equations by Operator Splitting, *Journal of Computational Physics* 62 (1986) 40-65.
78. Smith E. E., Satija S., Release Rate Model for Developing Fires, *Journal of Heat Transfer* 105(2) (1983) 281-287.
79. Smith E. E., Green, T. J., Release rates for a mathematical model, *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia (1987).
80. Toal B.R., Silcock G.W.H., Shields T.J., An examination of piloted ignition characteristics of cellulosic materials using the ISO ignitability test, *Fire and Materials* 14(3) (1989) 97-106.
81. Shields T.J., Silcock G.W.H., Murray J.J., The effects of geometry and ignition mode on ignition times obtained using a cone calorimeter and ISO ignitability apparatus, *Fire and Materials* 17(1) (1993) 25-32.
82. Shields T.J., Silcock G.W.H., Murray J.J., Evaluating ignition data using the flux time product, *Fire and Materials* 18(4) (1994) 243-254.
83. Silcock G.W.H., Shields T.J., A protocol for analysis of time-to-ignition data from bench scale tests, *Fire Safety Journal* 24(1) (1995) 75-95.
84. Tohir M., PhD thesis, University of Canterbury, NZ, 2015.
85. SFPE Engineering Guide, "Piloted ignition of solid materials under radiant exposure", 2002.

86. Evans D.D., Stroup, D.W., Methods to Calculate the Response Time of Heat and Smoke Detectors Installed Below Large Unobstructed Ceilings, NBSIR 85-3167, National Bureau of Standards, February 1985.
87. FIRESAFE II – Decision and Decision, Final Report, Version 1.1, December 2018.
88. IMO (2002) MSC.1/Circ.1035 – Guidelines for the use and installation of detectors equivalent to smoke. London: International Maritime Organization.
89. Huang Y., Chen X., Zhang C., Numerical simulation of the variation of obscuration ratio at the fire early phase with various soot yield rate, Case Studies in Thermal Engineering 18 (2019) 100572.
90. M.J. Hurley, editor. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Springer, New York, 5th edition.
91. Mulholland G.W., Croarkin C., Specific Extinction Coefficient of Flame Generated Smoke, Fire and Materials 24 (2000) 227–230.
92. Caractérisation de l'inflammation de cibles spécifiques situées dans le local feu ou dans le local cible - Essais de ré-inflammation de cibles combustibles (2 locaux), Poste 10, Marché DGA n°2015-86-0049, juin 2018.
93. Kee R.J., Rupley F.M., Miller J.A., The Chemkin Thermodynamic Data Base, SANDIA National Laboratories Report, SAND87-8215, UC-4, (1987), Reprinted October 1992.
94. Burcat A., Third Millenium Ideal Gas and Condensed Phase Thermochemical Database for Combustion, TAE Report N° 867, 2001.
95. Sazhin S. S., An Approximation for the Absorption Coefficient of Soot in a Radiating Gas. Manuscript, Fluent Europe, Ltd., 1994.
96. Siegel R., Howell J.R., Thermal Radiation Heat Transfer. Hemisphere Publishing Corporation, New York, 2nd edition, 1981.
97. Versteeg H.K. et Malalasekera W., An introduction to computational fluid dynamics, Longman Scientific & Technical (1995).
98. Raithby G.D., Chui E.H., A Finite Volume Method for Predicting a Radiant Heat Transfer in enclosures with Participating Media, J. Heat Transfer 112 (1990) 415-423.
99. SOLAS (2005)-International Convention for the Safety of Life at Sea.
100. Le Garsmeur P., d'Anselme G., Simulating the spread of fire – the LUCIFER® software, INEC 98 - Surviving the War, IMarEST, London, UK (1998) 133-138.
101. Walton W.D., Thomas P.H., “Estimating temperatures in compartment fires”, Chapter 3-6, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, fourth edition, 2008.
102. Ralph B., Carvel R., Coupled hybrid modelling in fire safety engineering; a literature review, Fire Safety Journal 100 (2018) 157-170.
103. Yamaguchi J-I., Tanaka T., Simple equations for predicting smoke filling time in fire rooms with irregular ceilings, Fire Science and Technology 24(4) (2005) 165-178.

104. Bailey J.L., Forney G.P., Tatem P.A., Jones W.W., Development and validation of corridor flow submodel for CFAST, *Journal of Fire Protection Engineering* 12 (2002) 139-161.
105. Hu L.H., Huo R., Li Y.Z., Wang H.B., Chow W.K., Full-scale burning tests on studying smoke temperature and velocity along a corridor, *Tunnelling and Underground Space Technology* 20 (2005) 223-229.
106. Cheng H., Modeling of fire spread in buildings and modeling of fire spread from the fire building to adjacent buildings, PhD Thesis, Carleton University, 2010.
107. Heselden A.J.M., Thomas P.J., Fully developed fires in single compartment, CIB Report No. 20, Fire Research Note 923, Joint Fire Research Organization, Borehamwood (1972).
108. Projet ANR ASTRID MATURATION MARINER DECM, Maitrise du risque incendie et lutte anti-feu dans des grands ensembles sur réseau- Démonstrations en environnements militaire et civil, n° ANR-17-ASMA-0005 (2017-2021), Rapport à mi-parcours.
109. NFPA 502, Standards for road tunnels, bridges and other limited access highways, 2004 Ed., National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts.
110. BD 78/99 - Design manual for roads and bridges, The Highways Agency. August 1999.
111. PIARC, Fire and smoke control in road tunnel, Permanent International Association of Road Congress, 1999.
112. Babrauskas V., Walton W.D., A simplified characterization of upholstered furniture heat release rates, *Fire Safety Journal* 11(3) (1986) 181-192.
113. Mowrer F.W., Williamson R.B., Methods to characterize heat release rate data, *Fire Safety Journal* 16(5) (1990) 367-387.
114. Numajiri F., Furukawa K., Mathematical expression of heat release rate curve and proposal of burning index, *Fire and Materials* 22(1) (1998) 39-42.
115. Ingason H., Design fire curves for tunnels, *Fire Safety Journal* 44(2) (2009) 259-265.
116. Cheong M.K., Spearpoint M.J., Fleischmann C.M., Design fires for vehicles in road tunnels. Proc. 7th International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods, Auckland, New Zealand (2008) 229-240.
117. FIRESAFE I : Study investigating cost effective measures for reducing the risk from fires on ro-ro passenger ships (FIRESAFE), Rapport final, EMSA/OP/01/2016, 2016.
118. IMO. (2016). MSC.1/Circ.1552 - Amendments to the Guidelines on Alternative Design and Arrangements for Fire Safety (MSC/Circ. 1002). London' International Maritime Organization.
119. Rackauskaite E., Kotsovinos P., Rein G., Computational analysis of failure criteria of a multi-storey steel frame exposed to fires' thermal vs. structural, *Engineering Structures* 180 (2019) 524-543.

Liste des figures

Figure 1 : Vue 3D de la maquette de navire après 4 h de feu, montrant les locaux enflammés avant embrasement généralisé (en jaune), les locaux où le feu est pleinement développé (en rouge) et les locaux où le feu est éteint (en noir).	15
Figure 2 : Vues du Stena Flavia (à gauche) et du Magnolia Seaways (à droite).	17
Figure 3 : L'approche hybride multi-échelle et ses applications.	18
Figure 4 : Phases d'un feu de compartiment. μfo et μfd représentent les durées moyennes de flashover et de feu pleinement développé.	19
Figure 5 : Modes de transmission du feu dans une structure multi-compartmentée.	20
Figure 6 : Configurations de gaines de ventilation débouchant dans le local cible m.	21
Figure 7 : Configurations de gaines de ventilation traversant le local cible m.	22
Figure 8 : Courbes de feux nominaux.	25
Figure 9 : Courbe de feu paramétrique issue de l'Eurocode 1 (extrait de [35]).	26
Figure 10 : Schéma du modèle à zones.	34
Figure 11 : Modèles à 4 et 10 éléments de paroi.	38
Figure 12 : Evolution temporelle du HRR (en MW) pour des feux d'heptane et de JP5 de 0,3, 0,5 et 0,7 m de diamètre.	43
Figure 13 : Vues générales du caisson DIAMAN.	45
Figure 14 : Ensemble des vues du caisson (dimensions en mm).	46
Figure 15 : Réseau de ventilation mécanique du caisson feu.	47
Figure 16 : Gainex de ventilation pour l'admission et l'extraction d'air.	47
Figure 17 : Position des thermocouples sur les parois. On note $Tp_{x,y,z}$ la température de la paroi en x , y et z	48
Figure 18 : Position des thermocouples à l'intérieur des locaux. On note $Tg_{x,y,z}$ la température du gaz en x , y et z	48
Figure 19 : Feu d'heptane : vue générale du foyer après 250 s de feu.	49
Figure 20 : Feu d'heptane : débit de combustion (à gauche) et température du gaz à différentes hauteurs dans un coin du local (à droite).	49
Figure 21 : Configuration du dispositif DIAMAN pour les essais de feux multi-combustible.	50
Figure 22 : Feu d'heptane et de PMMA : vue générale du foyer après 540 s de feu.	50
Figure 23 : Feu d'heptane et de PMMA : débits de combustion et température de gaz.	51
Figure 24 : Feu d'heptane : comparaison modèle à zones/essais.	52
Figure 25 : Feu d'heptane et de PMMA : comparaison modèle à zones/essais.	52
Figure 26 : Configurations du réseau de ventilation étudiées.	59
Figure 27 : Vue générale de la gaine d'extraction.	64
Figure 28 : Schéma du dispositif DIAMAN avec gaine d'extraction instrumentée.	64
Figure 29 : Vues de la gaine interne non isolée : (a) réduction de la section d'admission d'air, (b) traversée du local source, (c) traversée du local cible, et (d) sortie du dispositif DIAMAN.	65

Figure 30 : Vues de la gaine interne isolée : (a) traversée du local cible et (b) sortie du dispositif DIAMAN.....	65
Figure 31 : Schéma du dispositif DIAMAN avec gaine interne instrumentée.	66
Figure 32 : Comparaison des essais 7 et 8 : débit de pyrolyse d'heptane (a) et température moyenne du gaz en zone chaude à 2,5 m de hauteur (b).....	67
Figure 33 : Comparaison SAFIR1D/expérience pour les essais 7 (a) et 8 (b) : distances parcourues au cours du temps par les isothermes d'intérêt S180 et S250.	69
Figure 34: Schéma de la structure et graphe de connectivités du réseau.....	71
Figure 35 : Plan de l'immeuble avec référencement des locaux et répartition des ouvertures.....	79
Figure 36 : Courbe de puissance de feu pour les différents types de locaux de l'immeuble.	81
Figure 37 : Evolution temporelle des fumées sortant du local d'archives et de lecture...	85
Figure 38 : Cartographies du feu calculées par le modèle de réseau après 19', 27', 34' et 63' de feu. En orange, les locaux enflammés ; en rouge, ceux qui ont atteint le flashover ; en jaune, les locaux où la transmission du feu s'est faite par une fenêtre ; en gris les locaux où le feu s'est éteint.	86
Figure 39 : Cartographies des fumées calculées par le modèle de réseau après 6', 10', 15', 17', 21', 25', 32' et 36' de feu. Les zones grisées correspondent aux locaux où la hauteur libre de fumées est inférieure à 1,80 m.	87
Figure 40 : Champ de concentration des fumées (en ppm) calculé par le code SAFIR après 15' de feu.....	88
Figure 41 : Cartographies des fumées données par le code SAFIR après 6', 10', 15', 17', 21' de feu.....	89
Figure 42 : Comparaison des temps de remplissage des locaux calculés par le modèle de réseau (en orange) et le code SAFIR (en bleu).....	89
Figure 43 : Champ de concentration des fumées (en ppm) calculé par le code SAFIR après 15' de feu.....	90
Figure 44 : Cartographie des fumées calculées par le code SAFIR après 6', 10', 15', 17' et 21' de feu.....	91
Figure 45 : Comparaison des temps de remplissage des locaux calculés par le modèle de réseau (en orange) et par le code SAFIR (en bleu).....	91
Figure 46 : Vue 3D de la corvette générique SURVIVE de QinetiQ.....	92
Figure 47 : Plan de la corvette, montrant le référencement des locaux.....	96
Figure 48 : Plan de la corvette, montrant les positions des issues dans la situation d'étanchéité SE 5.....	97
Figure 49 : Plan de la corvette, montrant le système d'isolation en plafond.	97
Figure 50 : Plan de la corvette, montrant le système d'isolation en parois.	98
Figure 51 : Courbe de puissance du feu dans le local E112.	99
Figure 52 : Evolution temporelle des fumées sortant du local E112.	100
Figure 53 : Cartographies du feu après 10', 30', 50', 70', 90' et 148' de feu : en rouge, les locaux ayant atteint le flashover ; en orange, les locaux en feu où le flashover n'a pas eu lieu.....	102

Figure 54 : Cartographies des fumées après 5', 10', 15', 20', 25' et 30' de feu. Les zones grisées correspondent aux locaux où la hauteur libre de fumée est inférieure à 1,80 m ; en gris clair, les locaux touchés au temps courant ; en gris foncé, ceux touchés aux temps précédents.....	104
Figure 55 : Position de l'isotherme 350°C dans la gaine de ventilation.....	105
Figure 56 : Départ de feu dans le local E112 avec ventilation mécanique : cartographies des fumées après 5', 10', 15', et 27' de feu.	107
Figure 57 : Représentation graphique du nombre moyen de fois où un local, parmi les 91 locaux sensibles, a été touché par le feu, suivi (en rouge) ou non (en bleu) d'un flashover.	108
Figure 58 : Représentation graphique du nombre moyen de locaux touchés par le feu en fonction du numéro du local d'éclosion, avec (en rouge) ou sans (en bleu) flashover. Par exemple, un feu éclos dans le local D122 a conduit à l'inflammation de 15 locaux, dont 5 ont atteint le flashover.	109
Figure 59 : Plan d'agencement général du Stena Flavia, montrant l'espace vie (entouré en vert), les zones de rassemblement (AS) (entourées en bleu) et les stations d'embarquement (LSA) (entourées en rouge).....	111
Figure 60 : Courbe de puissance d'un camion de 40 MW (déduit de [116])......	112
Figure 61 : Découpage du local « Hall d'entrée », en six locaux virtuels.....	114
Figure 62 : Courbes de puissance du feu dans les locaux type « Auto-pullman » (a) et « Hall d'entrée #4 » (b).	115
Figure 63 : isolation du plafond du pont 4 du Stena Flavia.....	115
Figure 64 : Localisation des ouvertures autour des LSA maintenues fermées pour le cas 3.1.	117
Figure 65 : Localisation des départs de feu sur le Stena Flavia.....	118
Figure 66 : Localisation des zones de l'espace vie du pont 5 touchées en premier par le feu et/ou les fumées pour les cas 3.2 (point E), 3.3 (point F), et 3.4 (point G), et emplacement des zones de rassemblement (AS) et des embarcations de sauvetage (LSA).	118
Figure 67 : Répartition des camions sur le pont 4 du Stena Flavia.....	118
Figure 68 : Vue de dessus des ponts 4 et 5, montrant la localisation des DZ et l'emplacement des détecteurs et des capteurs.	120
Figure 69 : Nombre de camions enflammés en fonction du temps sur le pont garage 4.	121
Figure 70 : Comparaison entre les courbes de puissance théorique (en noir) et calculée (en rouge).	121
Figure 71 : Délais de détection des détecteurs de fumées et de chaleur, à 54 (T54) et 78°C (T78), dans chaque DZ.....	123
Figure 72 : Evolutions au cours du temps de la fraction volumique de CO (a), de la température du gaz (b), du flux radiatif (c) et de la visibilité (d) dans les LSA et les chemins d'évacuation.....	125
Figure 73 : Champ 2D de la température du gaz à 1,80 m du plancher du pont 4 après 10', 20', 30' et 40' de feu.....	126

Figure 74 : Champ 2D de la concentration en suies à 1,80 m du plancher du pont 4 après 10', 20', 30' et 40' de feu.....	127
Figure 75 : Champ 2D du flux radiatif à 1,80 m du plancher du pont 4 après 10', 20', 30' et 40' de feu.....	127
Figure 76 : Evolution temporelle des fumées sortant des locaux « Auto-pullman » (a et b) et « Hall d'entrée #4 » (c et d).	129
Figure 77 : Vue 2D du pont 5 du Stena Flavia, montrant en rouge le local « Auto-pullman » touché par le flashover et en orange, le « Hall d'entrée #4 » enflammé, mais où le flashover n'a pas eu lieu.....	130
Figure 78 : Propagation des fumées dans l'espace vie après 5', 10', 15', 20' et 28' après le départ du feu dans le local « Auto-pullman ».	132
Figure 79 : Volume de contrôle à l'intérieur de la paroi.....	150
Figure 80 : Volume de contrôle sur la face interne de la conduite.....	151
Figure 81 : Volume de contrôle sur la face externe de la conduite.	153
Figure 82: Localisation des détecteurs et des capteurs sur le pont 3. En gris, emplacement des camions ; En bleu, emplacement des capteurs en partie haute de la coque au pont 4 (température de parois) ; En orange, emplacement des capteurs (fumées et de température de gaz) et cibles en PVC à 80 cm du plafond et des capteurs à 1,80 m du plancher du pont 4 (fumées, de température, de flux radiatif et de monoxyde de carbone).	155

Liste des tableaux

Tableau 1 : Coefficients associés aux différents contextes et types de locaux du domaine naval militaire.....	25
Tableau 2 : Matrice d'essais, Q_{ext} représente le débit d'extraction des fumées et Q_{int} le débit d'admission d'air dans la gaine interne aux deux locaux.....	66
Tableau 3 : Propriétés thermiques du placoplâtre, de la laine de roche et du béton.....	80
Tableau 4 : Charge, nature et surface au sol des éléments combustibles présents dans les différents types de locaux et paramètres de la courbe de puissance associée.....	81
Tableau 5 : Propriétés de combustion des combustibles présents dans les différents types de locaux.....	82
Tableau 6 : Résultats des simulations réalisées avec le modèle à zones pour les différents locaux de l'immeuble. Nf indique que le flashover n'a pas eu lieu.....	84
Tableau 7 : Chronologie du feu et modes de transmission entre locaux.....	86
Tableau 8 : Type de locaux sensibles, combustible équivalent, charge et surface au sol associée.....	93
Tableau 9 : Propriétés de combustion des combustibles équivalents de la corvette.....	93
Tableau 10 : Propriétés thermiques des matériaux constitutifs des cloisonnements de la corvette.....	94
Tableau 11 : Charge, nature et surface au sol des éléments combustibles présents dans le compartiment E112 et paramètres de la courbe de puissance associée.....	99
Tableau 12 : Durées des phases du feu et de transmission par les barrières obtenues à l'aide du modèle à zones pour le local E112.....	99
Tableau 13 : Chronologie du feu dans la corvette.....	101
Tableau 14 : Départ de feu dans le local E112 avec ventilation mécanique : temps d'inflammation et de flashover. Pour faciliter l'analyse comparative, nous avons reporté, entre parenthèses, les temps obtenus en absence de ventilation mécanique.....	106
Tableau 15 : Propriétés de combustion du combustible représentatif d'un chargement de camion à bord d'un navire roulier.....	113
Tableau 16 : Paramètres de la méthode FTP pour les composants sélectionnés (extrait de [84]).....	113
Tableau 17 : Paramètres de la méthode FTP pour les cibles en PVC [85].....	113
Tableau 18 : Données relatives aux éléments combustibles des locaux type « Auto-pullman » et « Hall d'entrée #4 » du Stena Flavia.....	114
Tableau 19 : Scénarios de feu modélisés pour le Stena Flavia.....	119
Tableau 20 : Comparaison qualitative des résultats de simulation et certaines observations rapportées sur l'incendie du Norman Atlantic.....	122
Tableau 21 : Délais d'activation des détecteurs et temps au bout desquels les seuils de tenabilité des personnes à bord, de dégradation de la coque et d'inflammation des cibles ont été atteints. En ce qui concerne la tenabilité des personnes, le critère le plus restrictif est reporté, par exemple la concentration volumique en CO à 1200 ppm dans la DZ18	

après 18'04" de feu. Pour les autres zones, RHF indique que le seuil à 2,5 kW/m ² pour le flux thermique radiatif a été atteint, T60 celui à 60°C pour la température du gaz.....	123
Tableau 22 : Durées des phases du feu et de transmission par les barrières obtenues à l'aide du modèle à zones pour les locaux "Auto-pullman" et "Hall d'entrée #4"	129

Annexe 1 Calcul de la conduction dans la paroi de la gaine de ventilation

La conduction sera calculée dans l'épaisseur de la conduite selon r ou selon x , avec :

$$r = R^i + x$$

L'équation de la chaleur pour un milieu solide opaque s'écrit en axisymétrique :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^i} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r^i \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (\text{A1 - 1})$$

Qui se discrétise :

$$\rho c \frac{T_p^{n+1} - T_p^n}{\Delta t} = \frac{1}{r_p^i} \frac{\lambda_e r_e^i \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_e - \lambda_w r_w^i \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_w}{r_e - r_w} \quad (\text{A1 - 2})$$

En posant :

$$r_e - r_w = r_{ew}$$

$$A = \frac{\Delta t}{\rho c r_p^i r_{ew}}$$

L'équation (A1 - 2) devient donc :

$$T_p^{n+1} - T_p^n = A \left(\lambda_e r_e^i \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_e - \lambda_w r_w^i \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_w \right) \quad (\text{A1 - 3})$$

Equation discrétisée sur un volume de contrôle à l'intérieur de la conduite (hors limites)

La discrétisation spatiale s'effectue par la méthode des volumes finis sur grilles décalées (Figure 79). Les grandeurs scalaires sont calculées au centre des cellules, alors que la vitesse est calculée aux centres des faces OUEST (W) et EST (E).

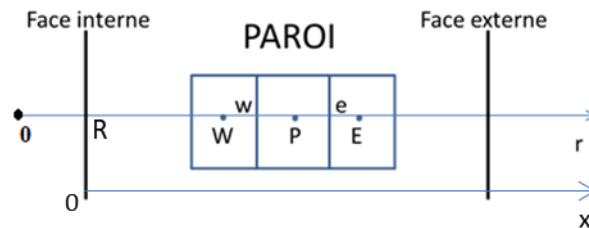


Figure 79 : Volume de contrôle à l'intérieur de la paroi.

En notant $r_E - r_P = r_{EP}$, $r_P - r_W = r_{PW}$, l'équation (A1 - 3) devient :

$$T_p^{n+1} - T_p^n = A \left(\lambda_e r_e^i \frac{T_E^{n+1} - T_P^{n+1}}{r_{EP}} - \lambda_w r_w^i \frac{T_P^{n+1} - T_W^{n+1}}{r_{PW}} \right) \quad (A1 - 4)$$

Soit :

$$T_p^{n+1} - T_p^n = A \frac{\lambda_e r_e^i}{r_{EP}} T_E^{n+1} - A \frac{\lambda_e r_e^i}{r_{EP}} T_P^{n+1} - A \frac{\lambda_w r_w^i}{r_{PW}} T_P^{n+1} + A \frac{\lambda_w r_w^i}{r_{PW}} T_W^{n+1} \quad (A1 - 5)$$

Que l'on écrit sous la forme algébrique suivante :

$$\begin{aligned} & a_P T_P^{n+1} + a_E T_E^{n+1} + a_W T_W^{n+1} + b = 0 \\ & a_E = -A \frac{\lambda_e r_e^i}{r_{EP}} ; \quad a_W = -A \frac{\lambda_w r_w^i}{r_{PW}} ; \quad b = -T_p^n ; \quad a_P = 1 - a_E - a_W \end{aligned} \quad (A1 - 6)$$

Condition à la limite sur la face interne de la conduite

Le volume de contrôle est représenté par la Figure 80.

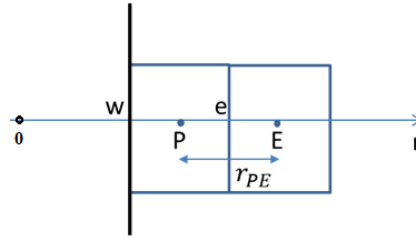


Figure 80 : Volume de contrôle sur la face interne de la conduite.

En ce qui concerne la condition à la limite sur la face interne celle-ci s'écrit :

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_w = h(T_g - T_w^{n+1}) + \varepsilon_{int} (q_w^{inc} - \sigma T_w^{n+1^4}) \quad (A1 - 7)$$

Le terme d'émission radiative ε_{int} est linéarisé de la forme suivante :

$$\varepsilon_{int} \sigma T_w^{n+1^4} = \varepsilon_{int} \sigma T_w^{n^4} + 4\varepsilon_{int} \sigma T_w^{n^3} (T_w^{n+1} - T_w^n) \quad (A1 - 8)$$

La condition à la limite s'écrit sous la forme suivante :

$$-\lambda_w \frac{T_P^{n+1} - T_W^{n+1}}{r_{PW}} = h(T_g - T_w^{n+1}) + \varepsilon_w^{inc} q_w^{inc} - 4\varepsilon_{int} \sigma T_w^{n^3} T_w^{n+1} + 3\varepsilon_{int} \sigma T_w^{n^4} \quad (A1 - 9)$$

$$-\lambda_w \frac{T_p^{n+1} - T_w^{n+1}}{r_{pw}} = \underbrace{hT_g + \varepsilon_w^{inc} q_w^{inc} + 3\varepsilon_{int}\sigma T_w^{n4}}_{GG} - \underbrace{(h + 4\varepsilon_{int}\sigma T_w^{n3})}_{FF} \times T_w^{n+1} \quad (A1 - 10)$$

On obtient finalement :

$$T_w^{n+1} = \underbrace{\left(\frac{\frac{\lambda_w}{r_{pw}}}{\frac{\lambda_w}{r_{pw}} + FF} \right)}_{CT} \times T_p + \underbrace{\left(\frac{GG}{\frac{\lambda_w}{r_{pw}} + FF} \right)}_{dd} \quad (A1 - 11)$$

En repartant de l'équation de la chaleur et en y injectant la condition à la limite en w, on obtient la formule suivante :

$$T_p^{n+1} - T_p^n = A \left[\lambda_e r_e^i \frac{T_E^{n+1} - T_p^{n+1}}{r_E - r_p} + r_w^i (GG - FF \cdot T_w^{n+1}) \right] \quad (A1 - 12)$$

Soit,

$$T_p^{n+1} - T_p^n = A \frac{\lambda_e r_e^i}{r_{EP}} T_E^{n+1} - A \frac{\lambda_e r_e^i}{r_{EP}} T_p^{n+1} + Ar_w^i \cdot GG - Ar_w^i \cdot FF \cdot T_w^{n+1} \quad (A1 - 13)$$

Or, T_w^{n+1} a été déterminé dans l'équation (A1 - 9), par conséquent :

$$T_p^{n+1} - T_p^n = A \frac{\lambda_e r_e^i}{r_{EP}} T_E^{n+1} - A \frac{\lambda_e r_e^i}{r_{EP}} T_p^{n+1} + Ar_w^i \cdot GG - Ar_w^i \cdot FF \cdot (CT \cdot T_p^{n+1} + dd) \quad (A1 - 14)$$

Que l'on écrit sous la forme algébrique suivante :

$$a_p T_p^{n+1} + a_E T_E^{n+1} + b = 0$$

$$a_p = 1 + A \frac{\lambda_e r_e^i}{r_{EP}} + Ar_w^i \cdot FF \cdot CT ; \quad a_E = -A \frac{\lambda_e r_e^i}{r_{EP}} ; \quad b = -T_p^n + Ar_w^i (FF \cdot dd - GG) \quad (A1 - 15)$$

Condition à la limite sur la face externe de la conduite

Le volume de contrôle est représenté par la Figure 81.

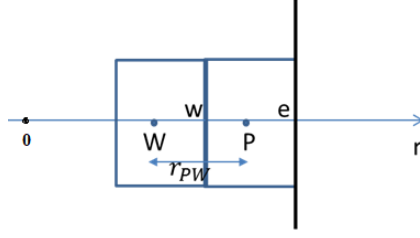


Figure 81 : Volume de contrôle sur la face externe de la conduite.

En ce qui concerne la condition à la limite sur la face externe celle-ci s'écrit :

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_e = h(T_\infty - T_e^{n+1}) + \varepsilon_{ext} (q_\infty - \sigma T_e^{n+1^4}) \quad (A1 - 16)$$

En adoptant la forme linéarisée suivante pour le terme d'émission radiative, il vient :

$$\varepsilon_{ext} \sigma T_e^{n+1^4} = \varepsilon_{ext} \sigma T_e^{n^4} + 4\varepsilon_{ext} \sigma T_e^{n^3} (T_e^{n+1} - T_e^n) \quad (A1 - 17)$$

La condition à la limite s'écrit donc sous la forme :

$$-\lambda_e \frac{T_P^{n+1} - T_e^{n+1}}{r_{Pe}} = h(T_\infty - T_e^{n+1}) + \varepsilon_{ext} q_\infty - 4\varepsilon_{ext} \sigma T_e^{n^3} T_e^{n+1} + 3\varepsilon_{ext} \sigma T_e^{n^4} \quad (A1 - 18)$$

$$-\lambda_e \frac{T_P^{n+1} - T_e^{n+1}}{r_{Pe}} = \underbrace{hT_\infty + \varepsilon_{ext} q_\infty + 3\varepsilon_{ext} \sigma T_e^{n^4}}_{GG} - \underbrace{(h + 4\varepsilon_{ext} \sigma T_e^{n^3})}_{FF} \times T_e^{n+1} \quad (A1 - 19)$$

On obtient finalement :

$$-\lambda_e \frac{T_P^{n+1} - T_e^{n+1}}{r_{Pe}} = GG - FF \cdot T_e^{n+1} \quad (A1 - 20)$$

$$T_e^{n+1} = \underbrace{\left(\frac{\frac{\lambda_e}{r_{Pe}}}{\frac{\lambda_e}{r_{Pe}} + FF} \right)}_{CT} \times T_P + \underbrace{\left(\frac{GG}{\frac{\lambda_e}{r_{Pe}} + FF} \right)}_{dd} \quad (A1 - 21)$$

On repart de l'équation de la chaleur et on injecte la condition à la limite en e :

$$T_p^{n+1} - T_p^n = A \left[-\lambda_w r_w^i \frac{T_P^{n+1} - T_W}{r_{PW}} + r_e^i (GG - FF \cdot T_e^{n+1}) \right] \quad (A1 - 22)$$

Soit,

$$T_p^{n+1} - T_p^n = A \frac{\lambda_w r_w^i}{r_{PW}} T_W - A \frac{\lambda_w r_w^i}{r_{PW}} T_p^{n+1} + Ar_e^i \cdot GG - Ar_e^i \cdot FF \cdot T_e^{n+1} \quad (A1 - 23)$$

Or, T_e^{n+1} a été défini dans l'équation (A1 - 21), par conséquent :

$$T_p^{n+1} - T_p^n = A \frac{\lambda_w r_w^i}{r_{PW}} T_W - A \frac{\lambda_w r_w^i}{r_{PW}} T_p^{n+1} + Ar_e^i \cdot GG - Ar_e^i \cdot FF \cdot (CT \cdot T_p^{n+1} + dd) \quad (A1 - 24)$$

Que l'on écrit sous la forme algébrique suivante :

$$a_p T_p^{n+1} + a_w T_W^{n+1} + b = 0$$

$$a_p = 1 + A \frac{\lambda_w r_w^i}{r_{PW}} + Ar_e^i \cdot FF \cdot CT ; \quad a_w = -A \frac{\lambda_w r_w^i}{r_{PW}} ; \quad b = -T_p^n + Ar_e^i (FF \cdot dd - GG) \quad (A1 - 25)$$

Annexe 2 Synthèse des résultats de simulations de feux à bord du Stena Flavia

La Figure 82 et la Figure 66 montrent respectivement les emplacements des détecteurs et des capteurs placés sur les ponts garages 3 et 4.

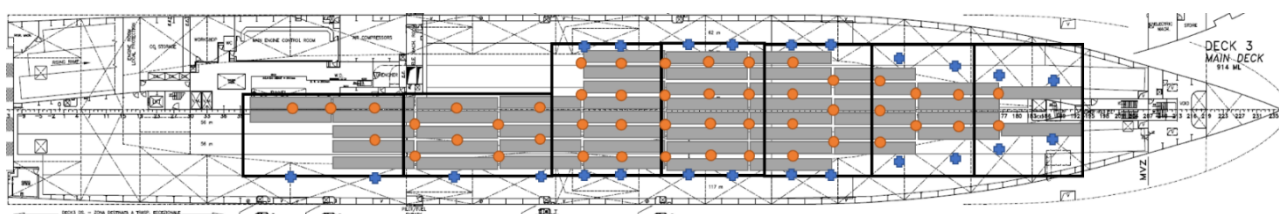


Figure 82: Localisation des détecteurs et des capteurs sur le pont 3. En gris, emplacement des camions ; En bleu, emplacement des capteurs en partie haute de la coque au pont 4 (température de parois) ; En orange, emplacement des capteurs (fumées et de température de gaz) et cibles en PVC à 80 cm du plafond et des capteurs à 1,80 m du plancher du pont 4 (fumées, de température, de flux radiatif et de monoxyde de carbone).

Les données issues des détecteurs et des capteurs placés dans chaque DZ des ponts 3 et 4 et dans les zones d'intérêt (LSA et chemins d'évacuation) du pont 5 pour les scénarios de feu 1 à 6 (voir Tableau 19) sont présentées dans les tableaux ci-dessous.

Ces tableaux renseignent sur :

- Les délais de détection ;
- Les temps au bout desquels les seuils de tenabilité des personnes à bord, de dégradation de la coque et d'inflammation des cibles ont été atteints. En ce qui concerne la tenabilité des personnes, le critère le plus restrictif est reporté : RHF lorsque le flux thermique radiatif dépasse $2,5 \text{ kW/m}^2$, T60 lorsque la température du gaz excède 60°C , CO500 ou CO1200 lorsque la concentration volumique en monoxyde de carbone dépasse 500 ou 1200 ppm ;
- Les temps d'inflammation du premier et du dernier camion, ainsi que le pourcentage de camions enflammés, pour chaque DZ ; et
- Le rapport des débits calorifiques maximaux calculé et théorique.

Cas 1 : Point A au centre du pont garage ouvert 4										
Zone	DZ13	DZ14	DZ15	DZ16	DZ17	DZ18	DZ19	DZ20	LSA Tribord	LSA Bâbord
Détection de chaleur à 54°C	03'28"	02'08"	02'59"	04'15"	05'30"	05'37"	04'28"	02'04"		
Détection de chaleur à 78°C	04'20"	02'34"	03'51"	05'46"	07'31"	07'56"	05'48"	02'31"		
Détection de fumées à 12,5%/m d'obscuration	01'24"	00'43"	01'16"	01'47"	02'26"	03'02"	02'03"	00'51"		
Tenabilité des personnes	14' RHF	04' RHF	13' RHF	16'35" CO1200	18'31" CO1200	17'52" CO1200	17' RHF	09' RHF	25' RHF	22' RHF
Dégradation de la coque à 5°C	25'40"	21'05"	22'30"	47'03"	37'38"	43'58"	34'09"	27'02"		
Inflammation des cibles en PVC	15'38"	06'05"	15'17"	23'51"	33'47"	40'54"	20'16"	14'40"		
Inflammation du 1 ^e camion	07'58"	00'	09'44"	22'41"	26'58"	32'54"	16'21"	15'04"		
Inflammation du dernier camion	32'08"	17'13"	23'58"	29'24"	35'57"	43'10"	32'21"	18'38"		
% de camions enflammés	100	100	100	100	100	100	100	100		
HRR_{max} calculé / théorique	1,41 / 1,60									

Cas 2 : Point A au centre du pont garage ouvert 4 - Vent de face de 18 nœuds										
Zone	DZ13	DZ14	DZ15	DZ16	DZ17	DZ18	DZ19	DZ20	LSA Tribord	LSA Bâbord
Détection de chaleur à 54°C	03'13"	02'13"	02'42"	04'18"	06'12"	06'31"	04'38"	02'07"		
Détection de chaleur à 78°C	04'32"	02'50"	03'45"	06'17"	07'53"	08'41"	06'18"	02'33"		
Détection de fumées à 12,5%/m d'obscuration	01'26"	00'24"	01'05"	01'37"	02'07"	02'46"	01'48"	00'47"		
Tenabilité des personnes	16''' RHF	05''' RHF	08''' RHF	10'08" T60	14'02" T60	13'17" T60	19'06" T60	15' RHF	20'08" T60	21'07" CO500
Dégradation de la coque à 5°C	27'53"	25'26"	00'	32'10"	00'	46'24"	32'50"	30'55"		
Inflammation des cibles en PVC	16'59"	05'36"	12'46"	15'48"	33'26"	38'	24'23"	17'22"		
Inflammation du 1 ^e camion	09'11"	00'	02'04"	14'30"	18'03"	25'32"	21'32"	17'01"		
Inflammation du dernier camion	30'19"	21'47"	21'40"	25'17"	32'48"	42'56"	31'03"	21'35"		
% de camions enflammés	100	100	100	100	100	100	100	100		

HRR_{max} calculé / théorique	1,41 / 1,60
---------------------------------	-------------

Cas 3 : Point B au centre du pont garage ouvert 4										
Zone	DZ13	DZ14	DZ15	DZ16	DZ17	DZ18	DZ19	DZ20	LSA Tribord	LSA Bâbord
Détection de chaleur à 54°C	04'46"	04'09"	02'39"	02'08"	03'35"	04'	05'27"	04'32"		
Détection de chaleur à 78°C	05'48"	04'50"	03'30"	02'38"	04'49"	05'04"	07'01"	05'23"		
Détection de fumées à 12,5%/m d'obscuration	02'26"	01'51"	01'15"	00'41"	01'26"	02'05"	02'59"	01'45"		
Tenabilité des personnes	19' RHF	14' RHF	06' RHF	06' RHF	20'40" T60	18'04" CO1200	19' RHF	16' RHF	<i>Cas 3 et 3.2-3.4</i> 19'08" T60 <i>Cas 3.1</i> Sans danger	<i>Cas 3 et 3.2-3.4</i> 22' RHF <i>Cas 3.1</i> 40'31" T60
Dégradation de la coque à 5°C	30'26"	28'16"	23'35"	31'51"	26'50"	43'53"	34'29"	30'54"		
Inflammation des cibles en PVC	20'58"	16'46"	12'42"	05'51"	23'15"	42'22"	22'06"	18'53"		
Inflammation du 1 ^e camion	19'23"	15'31"	00'	00'	11'54"	23'50"	20'50"	17'38"		
Inflammation du dernier camion	36'39"	20'53"	15'35"	19'48"	25'42"	42'45"	37'19"	21'19"		
% de camions enflammés	100	100	100	100	100	100	100	100		
HRR_{max} calculé / théorique	1,42/1,64									
Commentaires	La fermeture des ouvertures latérales des ponts 4 et 5 au voisinage des LSA allonge la durée pendant laquelle les personnes peuvent évacuer de façon sûre : côté tribord sur la durée du feu ; côté bâbord, pendant 40'31" (vs. 22').									

Cas 4 : Point B au centre du pont garage ouvert 4 - Vent de face de 18 nœuds										
Zone	DZ13	DZ14	DZ15	DZ16	DZ17	DZ18	DZ19	DZ20	LSA Tribord	LSA Bâbord
Détection de chaleur à 54°C	04'33"	04'01"	02'34"	02'10"	04'17"	04'59"	05'30"	03'44"		
Détection de chaleur à 78°C	07'35"	05'34"	03'04"	02'38"	05'05"	06'10"	08'52"	06'02"		
Détection de fumées à 12,5%/m d'obscuration	02'09"	01'56"	01'37"	00'22"	01'04"	01'50"	02'22"	01'55"		
Tenabilité des personnes	16'27" T60	13'24" T60	05' RHF	06' RHF	12'57" T60	13'05" T60	19'07" T60	17'55" T60	Sans danger	36'32" T60
Dégradation de la coque à 5°C	29'33"	28'41"	28'46"	26'39"	27'45"	42'49"	36'42"	28'		

Inflammation des cibles en PVC	25'43"	23'45"	15'17"	05'50"	14'31"	40'30"	25'27"	23'26"		
Inflammation du 1 ^e camion	23'25"	19'33"	00'	00'	07'55"	15'02"	23'54"	20'21"		
Inflammation du dernier camion	35'21"	24'34"	18'40"	17'51"	23'13"	40'39"	33'27"	23'54"		
% de camions enflammés	100	100	100	100	100	100	100	100		
HRR_{max} calculé / théorique	1,30/1,65									

Cas 5 : Point C à tribord du pont garage ouvert 4										
Zone	DZ13	DZ14	DZ15	DZ16	DZ17	DZ18	DZ19	DZ20	LSA Tribord	LSA Bâbord
Détection de chaleur à 54°C	05'15"	04'43"	03'59"	02'50"	01'26"	02'01"	05'44"	04'53"		
Détection de chaleur à 78°C	06'54"	05'51"	04'55"	03'30"	01'35"	02'29"	07'35"	06'15"		
Détection de fumées à 12,5%/m d'obscuration	03'14"	02'41"	02'06"	01'23"	00'20"	00'20"	03'41"	02'38"		
Tenabilité des personnes	21' RHF	15' RHF	15' RHF	13' RHF	03' RHF	03' RHF	20' RHF	19' RHF	20' RHF	16'57" T60
Dégradation de la coque à 5°C	34'23"	32'51"	27'46"	00'	20'28"	18'07"	36'58"	34'40"		
Inflammation des cibles en PVC	23'32"	23'13"	18'18"	14'10"	04'07"	07'25"	22'28"	25'29"		
Inflammation du 1 ^e camion	21'12"	20'17"	14'43"	07'25"	00'	00'	22'08"	22'47"		
Inflammation du dernier camion	38'58"	23'53"	21'23"	20'	19'29"	19'38"	38'29"	24'49"		
% de camions enflammés	100	100	100	100	100	100	100	100		
HRR_{max} calculé / théorique	1,40/1,65									

Cas 6 : Point D au centre du pont garage fermé 3									
Zone	DZ1	DZ2	DZ3	DZ4	DZ5	DZ6	DZ7	LSA Tribord	LSA Bâbord
Détection de chaleur à 54°C	07'13"	04'16"	03'36"	02'04"	03'59"	04'27"	06'24"		
Détection de chaleur à 78°C	09'43"	05'11"	04'25"	02'39"	05'06"	06'08"	08'54"		
Détection de fumées à 12,5%/m d'obscuration	02'56"	01'58"	01'22"	00'24"	01'22"	01'58"	02'42"		
Tenabilité des personnes	10'19" CO1200	11'04" CO1200	11'47" CO1200	07' RHF	12'58" CO1200	11'54" CO1200	11'56" CO1200	Sans danger	Sans danger

Dégradation de la coque à 5°C				12'14"					
Inflammation des cibles en PVC				06'43"					
Inflammation du 1 ^e camion				00'					
Inflammation du dernier camion				20'05"					
% de camions enflammés				25"					
HRR_{max} calculé / théorique	0,043/0,144								
Commentaires	Le faible rapport entre les HRR_{max} calculé et théorique témoigne de la forte sous-ventilation du feu Les LSA et les chemins d'évacuation sont sans danger sur la durée du feu								