



Analyse du risque incendie dans un local mécaniquement ventilé : influence de la ventilation et de la nature du combustible sur le développement du feu

Yessica Masiel Montero Valoy

► To cite this version:

Yessica Masiel Montero Valoy. Analyse du risque incendie dans un local mécaniquement ventilé : influence de la ventilation et de la nature du combustible sur le développement du feu. Chimie-Physique [physics.chem-ph]. Normandie Université, 2023. Français. ⟨NNT : 2023NORMIR07⟩. ⟨tel-04231498⟩

HAL Id: tel-04231498

<https://theses.hal.science/tel-04231498v1>

Submitted on 6 Oct 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

THÈSE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

Spécialité MECANIQUE DES FLUIDES, ENERGETIQUE, THERMIQUE, COMBUSTION,
ACOUSTIQUE

Préparée au sein de l'INSA Rouen Normandie

Analyse du risque incendie dans un local mécaniquement ventilé : Influence de la ventilation et de la nature du combustible sur le développement du feu

Présentée et soutenue par
YESSICA MASIEL MONTERO VALOY

**Thèse soutenue le 07/06/2023
devant le jury composé de**

M. BART MERCI	PROFESSEUR, Université de Gant, Belgique	Rapporteur
M. THOMAS ROGAUME	PROFESSEUR DES UNIVERSITÉS, Université de Poitiers	Rapporteur
MME VIRGINIE DREAN	CHARGE DE RECHERCHE, EFECTIS France	Membre
M. HUGUES PRETREL	CHARGE DE RECHERCHE, Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN)	Membre
M. VAREA EMILIEN	MAITRE DE CONFERENCES, CORIA, Saint-Etienne-du-Rouvray	Membre
M. ANTHONY COLLIN	PROFESSEUR DES UNIVERSITÉS, Université de Lorraine	Président du jury
M. ALEXIS COPPALLE	PROFESSEUR DES UNIVERSITÉS, Institut national des sciences appliquées de Rouen	Directeur de thèse
M. JEAN-CHARLES SAUTET	PROFESSEUR DES UNIVERSITÉS, Université de Rouen Normandie	Co-directeur de thèse

**Thèse dirigée par ALEXIS COPPALLE (COMPLEXE DE RECHERCHE
INTERPROFESSIONNEL EN AEROTHERMOCHIMIE) et JEAN-CHARLES SAUTET
(COMPLEXE DE RECHERCHE INTERPROFESSIONNEL EN AEROTHERMOCHIMIE)**



Normandie Université

THESE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

Spécialité Mécanique Des Fluides, Énergétique, Thermique, Combustion, Acoustique

Préparée au sein de « l'Institut National des Sciences Appliquées de Rouen »

Analyse du risque incendie dans un local mécaniquement ventilé : Influence de la ventilation et de la nature du combustible sur le développement du feu

**Présentée et soutenue par
Yessica Masiel MONTERO VALOY**

Thèse soutenue publiquement le (07/06/2023) devant le jury composé de		
M. Bart MERCI	Professeur, Université de Gent (Belgique)	Rapporteur
M. Thomas ROGAUME	Professeur, Institut P', Université de Poitiers	Rapporteur
M. Anthony COLLIN	Professeur, Laboratoire LEMTA, Université de Lorraine	Examineur
M. Hugues PRÉTREL	Chargé de recherche, CNRS	Examineur
M. Emilien VAREA	Maître de Conférences, Laboratoire CORIA Université de Rouen	Examineur
Mme. Virginie DREAN	Ingénieure de Recherche, EFECTIS France	Examinatrice
M. Alexis COPPALLE	Professeur, Laboratoire CORIA, Université INSA de Rouen	Directeur de thèse
M. Jean-Charles SAUTET	Professeur, Laboratoire CORIA, Université de Rouen	Co-directeur de thèse

Thèse dirigée par Alexis COPPALLE et Jean-Charles SAUTET, Laboratoire CORIA, Saint-Étienne-du-Rouvray

Remerciements

Je tiens à adresser mes sincères remerciements aux membres du jury, M. Bart Merci, M. Thomas Rogaume, M. Anthony Collin, M. Hugues Prétrel, M. Emilien Varea, Mme. Virginie Drean, qui ont accepté d'évaluer le manuscrit de cette thèse. Je souhaite ensuite remercier mes directeurs de thèse, M. Alexis Coppalle et M. Jean-Charles Sautet pour leurs encadrement durant mon travail au cours de ces années, pour leurs conseils, leur intérêt, leur soutien et leur disponibilité.

Merci à Mme. Corine Lacour pour son accueil chaleureux, sa prise en charge dès mon arrivée en France et les bons moments passés ensemble. Merci à Angel Martinez et Dickson Mosira pour leur aide inconditionnelle. Je remercie également l'institution MESCYT de la République Dominicaine de m'avoir donné l'opportunité de participer au programme CALIOPE. Ce travail n'aurait pas été possible sans le soutien de l'INSA de Rouen et du CORIA. Je tiens à remercier plus que chaleureusement à Fabian Tello pour son encouragement dans ce projet de vie.

Cette thèse n'aurait pas pu être possible sans l'aide précieuse et la disponibilité de tout le personnel de l'atelier et du département électronique. Leur accueil chaleureux et leur bonne volonté ont été déterminants dans l'assemblage des appareils nécessaires à mes manipulations. Je tiens donc à les remercier pour leur aide tout au long de cette aventure scientifique.

Je suis reconnaissant envers ma mère, Germania Valoy, pour son soutien inconditionnel, son aide matérielle et morale et sa confiance en mes choix tout au long de ma vie. Je voudrais également exprimer ma gratitude envers les autres membres de ma famille, notamment mon père Nestor Montero, mon mari Santos Carrasco, mes frères et sœurs, Maria Montero, Franyeri Alvarado, Claribel Valoy, Glenly Montero, Freed Valoy, Francisco Alvarado, et cousins, Lilian Brito, Manuel Brito, pour leur amour, leur soutien et leur encouragement constants. Je tiens également à remercier à mes amis du groupe Caliope II, qui sont plus qu'une simple bande d'amis, mais une seconde famille. Je suis particulièrement reconnaissant à Rosy Valdez, Pahola Acevedo, Balkydia Campusano, Katia Pérez Clara Herazme, Leandro Germes, José Delgado et Juan Rodríguez. Vous êtes les meilleurs amis que l'on puisse souhaiter avoir.

Si je suis ici, c'est grâce à mon Dieu et la famille de mon église. Merci à ma pasteure Teolista Medina, pour leurs conseils et leur soutien dans les moments difficiles. Merci mes amis de la République Dominicaine, Katherine Jiménez, Roosevelt Jiménez, Vianny Escalante, Ana Peña, Isabel Presinal, Rosmery Frías, Emely Martire, Ana Hernandez, Paula Javier, Selenny Campusano, Pablo Frías, Juan Pérez, José German et Brandon de Jésus.

*À la mémoire de mon pasteur,
Au Révérend Pedro Jiménez avec amour.*

Résumé

Dans un espace confiné, la ventilation influence le développement du feu et l'émission de substances toxiques. En cas d'incendie, les niveaux d'oxygène à proximité du foyer peuvent diminuer et entraîner l'accumulation de polluants. Les fumées chaudes peuvent être stockées sous plafond et aggraver le risque incendie, soit en augmentant les transferts de rayonnement, soit en générant des gaz imbrulés susceptibles de se renflammer. La fumée dégagée par tout type d'incendie (forêt, broussailles, culture, structure, pneus, déchets ou bois) est un mélange de particules et de substances chimiques produites par la combustion incomplète de matériaux contenant du carbone. Toute fumée contient du monoxyde de carbone, du dioxyde de carbone, des particules de suie, etc. Étudier les émissions de polluants lors d'incendie confiné à l'échelle du laboratoire permettra de mieux les maîtriser en cas d'accident dans une installation réelle.

Le développement du feu dans un compartiment de 1 m³ confiné et mécaniquement ventilé est étudié expérimentalement. L'objectif de cette thèse consiste à étudier la combustion de combustibles liquides afin de déterminer comment les flammes sont entretenues, ainsi que d'analyser les émissions de monoxyde de carbone et de particules de suie en fonction des conditions de combustion (dimensions et type de combustibles) et des conditions de ventilation (intensité de la ventilation). Les essais ont été réalisés avec de l'heptane, du dodécane, du kérosène et de l'huile Mobil DTE comme combustible. Différentes tailles du bac de combustible ainsi que différents taux de ventilation ont été pris en compte. Les résultats montrent que l'augmentation du taux de ventilation ou la diminution de la taille de bac augmente le taux de perte de masse (g/sm²) et les émissions des particules de suie. Cependant, les émissions de monoxyde de carbone diminuent. Les combustibles plus légers présentent des taux de perte de masse et des émissions de monoxyde de carbone plus élevés que les combustibles plus lourds. Les températures de fumée sont plus élevées lorsque les taux de ventilation sont élevés et que le diamètre du bac est important. Cependant, les niveaux d'émission des particules de suie diminuent dans l'ordre suivant : kérosène > dodécane > huile Mobil DTE > heptane. Lors des incendies bien ventilés, les émissions de suie sont élevées, mais les émissions de monoxyde de carbone sont faibles. L'effet inverse est observé dans les incendies sous-ventilés.

Mots-clés :

Incendie mécaniquement ventilé, compartiment confiné, monoxyde de carbone, particules de suie, rendement des espèces chimiques.

Abstract

In a confined space, ventilation influences the development of fire and the emission of toxic substances. In the event of a fire, the oxygen levels in the vicinity of the fire may reduce, and the buildup of pollutants increases. Hot smoke can be accumulated under the roof and increase the fire risk by increased radiation transfer or by generating unburned gases that can re-ignite. Smoke from any fire (forest, brush, crops, structures, tires, debris, or biomass) is a mixture of particles and chemical substances produced by the incomplete combustion of carbonaceous materials. All smoke contains carbon monoxide, carbon dioxide, soot particles, etc. Studying the emissions of pollutants during a confined fire on a laboratory scale will allow us to better control them in case of an accident in a real facility.

Fire development in a mechanically ventilated confined compartment of 1 m³ is experimentally studied. This thesis aims to investigate the combustion of liquid materials to determine how flames are maintained and to analyze the emissions of carbon monoxide and soot particles as a function of combustion conditions (size and type of fuel) and ventilation (ventilation intensity). Tests were conducted with heptane, dodecane, kerosene, and Mobil DTE oil as fuels. Different fuel pan sizes, as well as different ventilation rates, were considered. The results show that increasing the ventilation flow rate or decreasing the pan size increases the mass loss rate (g/sm²) and the soot particle emissions. However, carbon monoxide emissions decreased. Lighter fuels show higher mass loss rates and carbon monoxide emissions than heavier fuels. Higher ventilation flow rates and large pan diameters produce the highest smoke temperatures. Meanwhile, soot particle emission levels decrease in the following order: kerosene > dodecane > Mobil DTE oil > heptane. High soot levels but low carbon monoxide emissions are present in well-ventilated fires. The opposite effect is observed in under-ventilated fires.

Keywords:

Mechanically-ventilated fire, confined compartment, carbon monoxide, soot particles, chemical species yield.

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre 1 - État de l'art	5
1.1. Introduction	6
1.2. Généralités sur la notion d'incendie	6
1.3. Phénomènes physiques liés à l'incendie	7
1.3.1. Combustion.....	7
1.3.2. Pyrolyse.....	8
1.3.3. Propagation des fumées.....	9
1.4. L'inflammation.....	10
1.4.1. Domaine d'inflammation des gaz	11
1.4.2. Grandeurs affectant le domaine d'inflammabilité des gaz et des liquides	12
1.5. Évolution du feu dans un environnement ouvert	15
1.6. Incendies en compartiment confiné	18
1.6.1. Évolution du feu dans un compartiment fermé.....	19
1.6.2. Phénomènes particuliers d'incendies en régime sous-ventilé.....	22
1.6.3. Incendies en compartiment fermé avec ventilation naturelle	26
1.6.4. Incendie dans un compartiment confiné avec une ventilation mécaniquement contrôlée	31
1.7. Puissance dégagée lors d'un incendie	38
1.8. Émissions polluantes lors des incendies sous-ventilés.....	43
1.8.1. Formation de Monoxyde de Carbone	44
1.8.2. Formation de particules de suie	51
1.9. Conclusions	54
Chapitre 2 - Matériels et méthodes	56
2.1. Introduction	57
2.2. Dispositif expérimental.....	57
2.2.1. Chambre de combustion.....	57
2.2.2. Matériaux de construction de la chambre de combustion	59
2.2.3. Source de combustion.....	60

2.2.4.	Caractéristiques du combustible	60
2.3.	Mesure de la perte de masse du combustible	62
2.4.	Mesure de la température dans le compartiment	64
2.5.	Mesure des pressions	66
2.6.	Débit de ventilation.....	66
2.7.	Débit des gaz de combustion.....	68
2.8.	Mesure de la concentration des espèces chimiques.....	69
2.9.	Mesure des émissions des particules dans les fumées.....	70
2.9.1.	Système de prélèvement des particules	70
2.9.2.	Concentration massique des particules de suie.....	71
2.9.3.	Granulométrie des particules de suie	74
2.10.	Système d'acquisition de données.....	76
2.11.	Récapitulatif des configurations et plan d'expériences	77
Chapitre 3 - Analyse de l'effet de ventilation sur le développement du Feu.....		79
3.1.	Introduction	80
3.2.	Conditions initiales	80
3.3.	Répétabilité des mesures	81
3.4.	Effet de la ventilation sur la perte de masse, la richesse globale et la température .	87
3.4.1.	Perte de masse du combustible et richesse globale	87
3.4.2.	Relation entre la perte de masse du combustible et le taux de ventilation	92
3.4.3.	Évolution de la température en fonction du taux de ventilation.....	93
3.5.	Analyse de la concentration d'oxygène et de dioxyde de carbone en fonction de la ventilation	100
3.5.1.	Concentration d'oxygène au niveau de la flamme	100
3.5.2.	Effet de la concentration d'oxygène au niveau de la flamme sur la perte de masse	102
3.5.3.	Concentration d'oxygène dans les fumées.....	104
3.5.4.	Relation entre les concentrations de dioxyde de carbone et d'oxygène dans des fumées	105
3.6.	Émissions de monoxyde de carbone en fonction de la ventilation	108

3.6.1.	Concentration de monoxyde de carbone en fonction de la ventilation	108
3.6.2.	Relation entre la concentration de monoxyde de carbone et la concentration d'oxygène	112
3.6.3.	Rapport $[CO]/[CO_2]$ comme indicateur de l'efficacité de la combustion.....	116
3.6.4.	Émission et rendement de monoxyde de carbone.....	119
3.7.	Émission des particules de suie	125
3.7.1.	Concentration massique des particules de suie dans les fumées en fonction de la ventilation.....	125
3.7.2.	Relation entre la concentration de suie et la concentration d'oxygène résiduel	127
3.7.3.	Effets de la concentration de CO sur la concentration des particules de suie.	129
3.7.4.	Émission et rendement de suie en fonction de la ventilation.....	130
3.7.5.	Influence du taux de ventilation sur la distribution de la taille des particules de suie	136
3.8.	Comparaison des différentes méthodes pour déterminer le taux de dégagement de chaleur.....	138
3.9.	Conclusions	140
Chapitre 4 - Analyse des incendies confinés et mécaniquement ventilés en fonction du bac et de la nature du combustible.....		142
4.1.	Introduction	143
4.2.	Conditions expérimentales	143
4.3.	Influence du diamètre du bac sur la perte de masse, la richesse globale et la température.....	144
4.3.1.	Perte de masse du combustible et richesse globale en fonction de la taille du bac	144
4.3.2.	Relation entre la perte de masse du combustible lors des incendies non-confinés et le diamètre de la nappe	149
4.3.3.	Température de la fumée en fonction de la taille du bac du combustible.....	151
4.4.	Analyse de la concentration d'oxygène et de dioxyde de carbone en fonction de la taille du bac	154
4.4.1.	Effet du diamètre de la nappe sur la concentration d'oxygène à la base de la flamme	155

4.4.2.	Relation entre la concentration d'oxygène à la base de la flamme et la perte de masse	157
4.4.3.	Concentration d'oxygène dans le système d'évacuation des fumées.....	158
4.4.4.	Relation entre la concentration de dioxyde de carbone et d'oxygène dans les fumées pour différentes tailles du bac.....	160
4.5.	Émissions de monoxyde de carbone en fonction de la taille du bac de combustible	162
4.5.1.	Influence de la taille de la nappe sur la concentration de monoxyde de carbone.	162
4.5.2.	Relation entre la concentration de monoxyde de carbone et la concentration d'oxygène	166
4.5.3.	Rapport $[CO]/[CO_2]$ comme indicateur de l'efficacité de la combustion en fonction de la taille de la nappe.....	169
4.5.4.	Effet de la taille du bac de combustible sur le rendement de monoxyde de carbone	173
4.6.	Émissions des particules de suie en fonction de la taille du bac de combustible ...	178
4.6.1.	Effet de la taille du bac combustible sur la concentration massique des particules de suie dans les fumées.....	178
4.6.2.	Relation entre la concentration de suie et la concentration d'oxygène dans les fumées	180
4.6.3.	Concentration de monoxyde de carbone en fonction de la concentration de suie pour différentes tailles de bacs.....	181
4.6.4.	Émissions et rendement de suie en fonction de la taille de la nappe	182
4.6.5.	Effet de la taille du bac de combustible sur la distribution de particules de suies	188
4.7.	Effet de la nature du bac de combustible.....	191
4.7.1.	Influence de la nature du bac sur la perte de masse (MLR) et la richesse globale (GER)	192
4.7.2.	Influence de la nature du bac sur la concentration d'oxygène et monoxyde de carbone	194
4.8.	Effet de la nature du combustible	195
4.8.1.	Effet du type de combustible sur le MLR et le GER	195

4.8.2.	Effet de la nature du combustible sur la température dans le compartiment.	196
4.8.3.	Influence de la nature du combustible la concentration d'oxygène et les émissions de monoxyde de carbone et de suie.....	197
4.9.	Concluions.....	199
Chapitre 5 - Synthèse des résultats et comparaison avec ceux de la littérature		
.....		201
5.1.	Introduction	202
5.2.	Perte de masse du combustible.....	202
5.2.1.	Effet de la richesse globale sur la perte de masse du combustible	202
5.2.2.	Effet de la concentration d'oxygène sur la perte de masse du combustible ...	204
5.3.	Monoxyde de carbone	206
5.3.1.	Quelques points importants sur la production de CO dans un foyer sous-ventilé	206
5.3.2.	Rendement de CO et sa corrélation avec la richesse globale (GER).....	208
5.3.3.	Rendement de CO et corrélation avec l'oxygène à la base de la flamme	210
5.3.4.	Rapport [CO]/[CO ₂] et sa corrélation avec la richesse globale (GER)	211
5.4.	Particules de suie.....	212
5.4.1.	Rendement en suie et sa corrélation avec la richesse globale (GER)	212
5.4.2.	Rendement en suie et sa corrélation avec l'oxygène à la base de la flamme ...	215
5.5.	Conclusions	216
Conclusions générales et perspectives.....		218
Annexes.....		222
Annexe A. Protocole expérimental.....		222
Annexe B. Effet de la hauteur du bac sur des incendies d'heptane		225
Annexe C. Calcul du flux rayonné par les parois verticales et le plafond sur une cible au sol		228
Annexe D. Influence de la discrétisation spatiale dans les intégrations.....		231
Annexe E. Mesure du DMA sur la distribution de la taille des particules en fonction de la ventilation		232
Annexe F. Taux d'évaporation du combustible et le débit volumique de l'air entrant à 9.67 ACPH.....		236

Annexe G. Mesure du DMA sur la distribution de la taille des particules en fonction de la taille de la nappe	238
Références	241

Liste des Figures

Figure 1.1 - Schéma de la représentation du triangle de feu.....	7
Figure 1.2 - Représentation du processus typique de pyrolyse du bois (Venderbosch & Prins, 2010).....	9
Figure 1.3 - Effet de la température sur les limites d'inflammabilité d'une vapeur combustible dans l'air à pression initiale constante (Beyler C. L., 2002).....	13
Figure 1.4 - Feu de nappe à grande échelle. Surface du bac de combustible de 25 m ² (Tao, et al., 2020).....	15
Figure 1.5 - Taux de perte de masse du combustible en fonction du temps. Feu de nappe d'essence, surface du bac de combustible de 12.57 m ² (Chatris, et al., 2001).....	16
Figure 1.6 - Feu de nappe à grande échelle. Surface du bac de combustible de 25 m ² (Tao, et al., 2020).....	17
Figure 1.7 - Évolutions possibles d'un incendie dans un espace confiné. (Debray, Gobeau, & Waymel, 2007).....	20
Figure 1.8 - Development d'un back-draft (Gottuk, Peatross, Farley, & Williams, 1999).....	25
Figure 1.9 - Explosion des fumées dans un incendie confiné (Fleischmann & Chen, 2013)...	26
Figure 1.10 - Évolution de la puissance dégagée par le feu d'huile de jatropha. Identification des phases de l'incendie (Chaudhary, Gupta, Kumar, & Kumar, 2016).	29
Figure 1.11 - Relation entre la perte de masse du combustible (sans dimension) en fonction de la concentration d'oxygène (fraction massique sans dimension) pendant le période stationnaire de l'incendie (Prétel, Bouaza, & Suard, 2021).	37
Figure 1.12 - Schéma des différentes méthodes de calcul du HRR du feu.....	38
Figure 1.13 - Schéma de la hotte et du système d'évacuation utilisés par Beyler pour étudier la formation de produits de combustion des incendies en milieu à deux couches (Beyler C. L., 1986). Figure récupérée de (Pitts, 1995).....	45
Figure 1.14 - Schéma du dispositif expérimental de la hotte utilisés par Zukoski (Zukoski, Morehart, Kubota, & Toner, 1991) pour étudier la production d'espèces chimiques dans des incendies gaz naturel à deux couches. Figure récupérée de (Cetegen, Zukoski, & Kubota, 1984).	47
Figure 1.15 - Schéma du dispositif expérimental développé par Mulholland et, al (Mulholland, Janssens, Yusa, Twilley, & Babrauskas, 1991).	47
Figure 1.16 - Schéma de la hotte utilisés par Morehart pour étudier la production des espèces chimiques dans des incendies proches de la limite d'inflammabilité (Morehart, Zukoski, & Kubota, 1992).....	48
Figure 1.17 - Rendement du CO en fonction du GER pendant des incendies d'hexane. Comparaison entre les données expérimentales dans un compartiment de Gottuk (courbe 1a)	

et les données expérimentales en hotte de Beyler (courbe 1b). Figure récupérée de (Gottuk, Roby, & Beyler, 1995).....	50
Figure 1.18 - Formation de particules de suies à partir d'un mélange combustible et comburant (Bockhorn, 1994).	52
Figure 2.1 - Chambre de combustion ventilée mécaniquement du laboratoire CORIA. (a) la porte avec le hublot ; (b) l'intérieur.	58
Figure 2.2 - Dispositifs de mesure.	59
Figure 2.3 - Vue détaillée du système de mesure de la perte de masse.	63
Figure 2.4 - Exemple de la perte de masse d'un feu de l'huile Mobil DTE à 9.67 ACPH et un diamètre du bac de combustible de $D = 0.14$ m. Puissance du feu ≈ 3.6 kW.	64
Figure 2.5 - Localisation des trois arbres de thermocouples dans le compartiment.	65
Figure 2.6 - Étalonnage du diaphragme IRIS-80.	68
Figure 2.7 - Schéma du système de dilution FPS 4000 – DEKATI (Ouf, 2006).	71
Figure 2.8 - Schéma du principe de mesure du TEOM (Ganesan, 2020).	73
Figure 2.9 - Mesures fournies par le TEOM pour un feu de l'huile Mobil DTE à 9.67 ACPH et $D = 0.14$ m. (a) Masse des particules sur le filtre ; (b) Dérivée de la masse.	74
Figure 2.10 - Photo du Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS).	75
Figure 2.11 - Comparaison entre la distribution normalisée du SMPS et le modèle de l'équation 2.11, mesure dans l'air ambiant.	76
Figure 3.1 - Évolution temporelle du taux de perte de masse lors des incendies ventilé mécaniquement à 9.67 ACPH et $D = 0.19$ m. (a) n-heptane pure ; (b) dodécane technique..	82
Figure 3.2 - Évolution temporelle de la pression différentielle dans le diaphragme lors des incendies ventilé mécaniquement à 9.67 ACPH et $D = 0.19$ m. (a) n-heptane pure ; (b) dodécane technique.	83
Figure 3.3 - Évolution temporelle de la température dans la zone de flamme lors des incendies ventilé mécaniquement à 9.67 ACPH et $D = 0.19$ m. (a) n-heptane pure ; (b) dodécane technique.....	84
Figure 3.4 - Évolution temporelle de la température dans la zone des fumées lors des incendies ventilé mécaniquement à 9.67 ACPH et $D = 0.19$ m. (a) n-heptane pure ; (b) dodécane technique.....	84
Figure 3.5 - Évolution temporelle de la concentration d'oxygène dans le conduit d'évacuation du gaz lors des incendies ventilé mécaniquement à 9.67 ACPH et $D = 0.19$ m. (a) n-heptane pure ; (b) dodécane technique.	85
Figure 3.6 - Évolution temporelle de la concentration de monoxyde de carbone dans le conduit d'évacuation du gaz lors des incendies ventilé mécaniquement à 9.67 ACPH et $D = 0.19$ m. (a) n-heptane pure ; (b) dodécane technique.....	86

Figure 3.7 - Influence du taux de ventilation sur l'évolution de la perte de masse du combustible au cours du temps. (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m.	89
Figure 3.8 - Effet du taux de ventilation sur la richesse globale. (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m.	92
Figure 3.9 - Relation entre le débit de pyrolyse du combustible par unité de surface et le taux de ventilation à D = 0.19 m, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.	93
Figure 3.10 - Variation de la température selon l'axe vertical de la flamme dans un compartiment ventilé mécaniquement. (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m. *1 est la zone continue ; *2 est la zone intermittente ; *3 est la zone de panache.....	94
Figure 3.11 - Influence du taux de ventilation sur l'évolution de température du gaz dans le compartiment. (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m.	96
Figure 3.12 - Profil de température dans le coin gauche du compartiment à D = 0.19 m et 9.67 ACPH. (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.....	98
Figure 3.13 - Profils verticaux de température à 600 s en fonction du taux de ventilation. (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m.	99
Figure 3.14 - Influence de la ventilation sur la concentration d'oxygène autour de la flamme, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m.	101
Figure 3.15 - Relation entre la concentration d'oxygène au pied de la flamme et la perte de masse du combustible, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m.	103
Figure 3.16 - Influence de la ventilation sur la concentration d'oxygène dans les fumées, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m.	105
Figure 3.17 - Concentration de dioxyde de carbone en fonction de la concentration d'oxygène, mesure dans le conduit d'évacuation des gaz, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m.....	107

Figure 3.18 - Influence de la ventilation sur l'évolution de la concentration de monoxyde de carbone autour de la flamme, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m.	110
Figure 3.19 - Influence de la ventilation sur l'évolution de la concentration de monoxyde de carbone dans le conduit d'évacuation des gaz, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m.	112
Figure 3.20 - Concentration de monoxyde de carbone en fonction de la concentration d'oxygène à la base de la flamme, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m.	113
Figure 3.21 - Concentration de monoxyde de carbone en fonction de la concentration d'oxygène, mesure dans le conduit d'évacuation de fumée, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m.	114
Figure 3.22 - Influence de la ventilation sur l'évolution du rapport $[CO]/[CO_2]$ en fonction du temps, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m.	116
Figure 3.23 - Rapport $[CO]/[CO_2]$ en fonction de la richesse globale, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m.	118
Figure 3.24 - Rapport $[CO]/[CO_2]$ en fonction de la concentration d'oxygène résiduel, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m.	119
Figure 3.25 - Influence de la ventilation sur l'évolution du rendement de monoxyde de carbone, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m.	121
Figure 3.26 - Rendement de CO en fonction de la richesse globale pour, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m.	122
Figure 3.27 - Rendement en CO en fonction de la concentration d'oxygène autour de la flamme pour, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m.	124
Figure 3.28 - Rendement en CO en fonction de la concentration d'oxygène à l'extraction pour, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible 0.19 m.	125

Figure 3.29 - Effet de la ventilation sur la concentration massique des particules de suie dans les fumées, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m.....	126
Figure 3.30 - Concentration des particules de suie en fonction de la concentration d'oxygène, mesure dans le conduit d'évacuation des gaz, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m.....	128
Figure 3.31 - Effets de la concentration monoxyde de carbone sur la concentration des particules de suie, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.	130
Figure 3.32 - Influence de la ventilation sur l'évolution du rendement de suie pour, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.	131
Figure 3.33 - Relation entre le rendement de suie et la richesse globale pour, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.	133
Figure 3.34 - Relation entre le rendement de suie et la concentration d'oxygène autour de la flamme pour les incendies de, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.....	134
Figure 3.35 - Relation entre le rendement de suie et la concentration d'oxygène à l'extraction pour les incendies de, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.	135
Figure 3.36 - Influence de la ventilation sur la distribution de la taille moyenne des particules, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m	136
Figure 4.1 - Effets du diamètre du bac sur l'évolution de la perte de masse du combustible à 9.67 ACPH, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.	146
Figure 4.2 - Effets du diamètre du bac sur l'évolution de la richesse globale à 9.67 ACPH, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.	148
Figure 4.3 - Taux de combustion par unité de surface en fonction du diamètre du bac de combustible dans une atmosphère ouverte, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.....	150
Figure 4.4 - Impact du diamètre de la nappe sur l'évolution de température du gaz dans la fumée à 9.67 ACPH, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.	152

Figure 4.5 - Profils des températures des fumées à 600 m lors de incendies mécaniquement ventilé à 9.67 ACPH, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Temps 600 secondes.....	153
Figure 4.6 - Effet de la taille du bac sur la concentration d'oxygène autour de la flamme à 9.67 ACPH, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.....	156
Figure 4.7 - Relation entre la concentration d'oxygène au pied de la flamme et le MLR à 9.67 ACPH, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.....	158
Figure 4.8 - Évolution temporelle de la concentration d'oxygène dans le conduit d'évacuation des fumées à 9.67 ACPH, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.	159
Figure 4.9 - Concentration de dioxyde de carbone en fonction de la concentration d'oxygène consommé par la combustion ($O_2 \text{ (ambient)} - O_2 \text{ (résiduel)}$) à 9.67 ACPH, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.	161
Figure 4.10 - Concentration de monoxyde de carbone autour de la flamme à 9.67 ACPH, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.....	163
Figure 4.11 - Concentration de monoxyde de carbone dans la conduite d'évacuation à 9.67 ACPH, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.....	164
Figure 4.12 - Concentration de monoxyde de carbone à l'extraction en fonction de la concentration d'oxygène à la base de la flamme à 9.67 ACPH, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.	166
Figure 4.13 - Concentration de monoxyde de carbone en fonction de la concentration à l'extraction à 9.67 ACPH, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.	168
Figure 4.14 - Influence de la taille du bac sur l'évolution temporelle du rapport $[CO]/[CO_2]$, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.	170
Figure 4.15 - Effet de la taille du bac sur rapport $[CO]/[CO_2]$ en fonction de la richesse globale, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.....	171
Figure 4.16 - Rapport $[CO]/[CO_2]$ en fonction de la concentration d'oxygène résiduel dans les fumées, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.	172

Figure 4.17 - Influence de la taille du bac sur l'évolution du rendement de monoxyde de carbone, RH de 9.67 ACPH, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.	173
Figure 4.18 - Impact de la richesse globale sur le rendement de monoxyde de carbone pour (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. La ligne pointillée noire représente la tendance de Beyler et Gottuk.	175
Figure 4.19 - Relation entre le rendement de monoxyde de carbone et la concentration d'oxygène à la base de la flamme, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.	176
Figure 4.20 - Relation entre le rendement de monoxyde de carbone et la concentration d'oxygène à l'extraction, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.	177
Figure 4.21 - Effet de la taille de la nappe sur la concentration massique des particules de suie dans les fumées à 9.67 ACPH. (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.	179
Figure 4.22 - Influence de la concentration d'oxygène à l'extraction sur la concentration de suie pour différentes tailles de nappe et combustibles, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.	180
Figure 4.23 - Influence de la concentration monoxyde de carbone sur la concentration des particules de suie pour différentes tailles de nappe, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.	182
Figure 4.24 - Effet de la taille de nappe sur le rendement de suie pour, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium, à 9.67 ACPH.	183
Figure 4.25 - Relation entre le rendement de suie et la richesse globale en fonction de la taille de la nappe pour (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.	185
Figure 4.26 - Relation entre le rendement de suie et la concentration d'oxygène à la base de la flamme en fonction de la taille de la nappe pour (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.	186
Figure 4.27 - Relation entre le rendement de suie et la concentration d'oxygène à l'extraction en fonction de la taille de la nappe pour (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.	187
Figure 4.28 - Influence du diamètre bac de combustible sur la distribution de la taille moyenne des particules à 9.67 ACPH, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.	189

Figure 4.29 - Clichés obtenus par microscopie électronique à transmission de particules de suie de l'huile minérale pour différents grossissements, (a) 10 nm ; (b) 50 nm ; (c) 100 nm ; (d) 200 nm.	191
Figure 4.30 - Influence de la nature du bac de combustible sur l'évolution de la perte de masse du combustible au cours du temps, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique. Diamètre du bac de 0.19 m et 9.67 ACPH.....	192
Figure 4.31 - Influence de la nature du bac de combustible sur l'évolution de la perte de masse du combustible au cours du temps. (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique. Diamètre du bac de 0.19 m et RH de 9.67 ACPH.....	193
Figure 4.32 - Influence de la nature du bac sur l'évolution de la concentration d'oxygène résiduel. (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique. Diamètre du bac de 0.19 m et RH de 9.67 ACPH.	194
Figure 4.33 - Influence de la nature du bac de combustible sur l'évolution de la concentration CO. (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique. Diamètre du bac de 0.19 m et RH de 9.67 ACPH.	195
Figure 4.34 - Effet de la nature du combustible sur l'évolution de (a) la perte de masse ; (b) la richesse globale. Diamètre du bac en verre de 0.19 m à 9.67 ACPH.	196
Figure 4.35 - Effet de la nature du combustible sur l'évolution de la température, (a) zone de flamme ; (b) dans les fumées. Diamètre du bac en verre de 0.19 m à 9.67 ACPH.	196
Figure 4.36 - Effet de la nature du combustible sur l'évolution de la concentration (a) oxygène résiduel ; (b) monoxyde de carbone à l'extraction. Diamètre du bac en verre de 0.19 m à 9.67 ACPH.	198
Figure 4.37 - Effet de la nature du combustible sur les particules de suie, (a) concentration massique des particules de suie ; (b) distribution moyenne de la taille des particules de suie. Diamètre du bac en verre de 0.19 m à 9.67 ACPH.....	198
Figure 5.1 - Taux de perte de masse du combustible pendant la période de feu établi en fonction de la richesse globale (GER). ▲ ▲ heptane, ● ● dodécane, ■ □ kérosène, ★ ★ huile Mobil DTE.	203
Figure 5.2 - Taux de perte de masse normalisé par la valeur donnée par le foyer libre MLR_{ouvert} en fonction de la concentration d'oxygène à la base de la flamme. ▲ ▲ heptane, ● ● dodécane, ■ □ kérosène, ★ ★ huile Mobil DTE. Littérature : ✕ Diesel, D = 0.6 m (Peatross & Beyler, 1997) ; ◆ PMMA, D = 0.3 m (Santo & Tamanini, 1981) ; ► Heptane, D = 0.1 m (Tewarson A., 2002) ; ▼ Heptane, D = 0.2 m (Alibert, Coutin, Mense, Pizzo, & Porterie, 2019) ; + Dodécane, D = 0.19 m (Prétrel, Chaaraoui, Lafdal, & Suard, 2022).....	205
Figure 5.3 - Comparaison entre dispositifs expérimentaux. (a) bruleur et hotte (Beyler C. L., 1986) ; (b) compartiment naturellement ventilé compartiment naturellement ventilé (Gottuk	

D. T., Roby, Peatross, & Beyler, 1992) ; (c) compartiment mécaniquement ventilé (actuel).	207
Figure 5.4 - Rendement en monoxyde de carbone (Y_{CO}) en fonction de la richesse globale (GER). ▲ △ heptane, ● ○ dodécane, ■ □ kérosène, ★ ☆ huile Mobil DTE. Comparaison avec les données de Beyler (Beyler C. L., 1986) (×) et Gottuk et al. (Gottuk D. T., Roby, Peatross, & Beyler, 1992) (▽) avec l'hexane.	209
Figure 5.5 - Rendement en CO en fonction de la concentration d'oxygène à la base de la flamme. ▲ △ heptane, ● ○ dodécane, ■ □ kérosène, ★ ☆ huile Mobil DTE.	211
Figure 5.6 - Relation entre le rapport $[CO]/[CO_2]$ et la richesse globale (GER). ▲ △ heptane, ● ○ dodécane, ■ □ kérosène, ★ ☆ huile Mobil DTE. Les données *1 ont été récupérés de (Gottuk D. T., Roby, Peatross, & Beyler, 1992).	212
Figure 5.7 - Rendement en suie (Y_s) en fonction de la richesse globale (GER). ▲ △ heptane, ● ○ dodécane, ■ □ kérosène, ★ ☆ huile Mobil DTE.....	213
Figure 5.8 - Rapport Y_{CO}/Y_s en fonction de la richesse globale (GER). ▲ △ heptane, ● ○ dodécane, ■ □ kérosène, ★ ☆ huile Mobil DTE.....	215
Figure 5.9 - Rendement en suie (Y_s) en fonction de la concentration d'oxygène à la base de la flamme. ▲ △ heptane, ● ○ dodécane ; ■ □ kérosène, ★ ☆ huile Mobil DTE.....	216

Liste des tableaux

Tableau 1.1 - Valeurs de la LII, LSI et température d'auto-inflammation (TAI) pour différents combustibles. Combustion avec de l'air.....	12
Tableau 1.2 - Valeur des constantes η et k , pour les trois régimes de combustion proposés par McCaffrey.....	18
Tableau 1.3 - Résultats de Beyler pour la formation de CO dans des conditions de combustion riche (Beyler C. L., 1986).	46
Tableau 2.1 - Types des bacs de combustible et dimensions.	60
Tableau 2.2 - Propriétés physico-chimiques des combustibles.....	61
Tableau 2.3 - Caractéristiques des thermocouples de type K utilisés.	65
Tableau 2.4 - Caractéristiques des différents types de transducteurs de pression.	66
Tableau 2.5 - Paramètres obtenus à partir des distributions reportées sur la Figure 2.11.....	76
Tableau 2.6 - Récapitulatif de la campagne expérimentale.....	78
Tableau 3.1 - Quantités et hauteurs initiales des combustibles.....	81
Tableau 3.2 - Essais de qualification du compartiment d'incendie.....	81
Tableau 3.3 - Identification de la période de feu établi pour chaque combustible.	102
Tableau 3.4 - Synthèse des résultats des rendements de CO et de suie en fonction de la ventilation, pendant le période de feu établi.	132
Tableau 3.5 - Synthèse issues des distributions obtenues par loi log-normale loi en fonction de la ventilation.	137
Tableau 3.6 - Puissance dégagée par les incendies. Comparaison entre les trois méthodes de calcul.	139
Tableau 4.1 - Taille des bacs et hauteur initiale du combustible.	144
Tableau 4.2 – Valeurs des paramètres de la corrélation de Zabetakis et Burgess pour les combustibles étudiés.....	151
Tableau 4.3 - Gradients de température dans la couche de fumée fumante. Hauteur des thermocouples de 0.2 m à 0.8 m.	154
Tableau 4.4 - Identification de la phase de feu établi pour chaque combustible en fonction de la taille du bac.	157
Tableau 4.5 - Synthèse des rendements de CO et de suie en fonction de la taille de la nappe.	184
Tableau 4.6 - Synthèse issues des distributions obtenues par loi log-normale loi en fonction de la taille de la nappe.	190

Nomenclature

A

A	Surface	m^2
----------	---------	--------------

C

CMO	Concentration minimale en oxygène	% vol.
CO	Monoxyde de carbone	-
CO₂	Dioxyde de carbone	-
C_p	Capacité calorifique	$\text{kJ.kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
C_{Suie}	Concentration massique de suie	mg.m^{-3}

D

D	Diamètre du bac de combustible	m
D_{modal}	Diamètre modal des particules	m

E

E_{O₂}	Chaleur de combustion dégagée par kilogramme de consommé	J.kg^{-1}
E_i	Chaleur de combustion dégagée par kilogramme de consommé pour l'espèce i (CO, CO ₂ , suie)	J.kg^{-1}

F

f_c	Facteur de correction	-
f	Fréquence	Hz

G

g	Accélération gravitationnelle	m.s^{-2}
----------	-------------------------------	-------------------

H

H	Hauteur	m
h	Coefficient d'échange convectif	$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$
HRR	Puissance dégagée	kW

K

K₀	Constante d'étalonnage	-
----------------------	------------------------	---

L

LII	Limite inférieure d'inflammabilité	% vol
LSI	Limite supérieure d'inflammabilité	% vol
L_v	Chaleur de vaporisation	kJ.kg^{-1}

M

\dot{m}_{air}	Débit massique d'air	g.s^{-1}
$\dot{m}_{\text{Combustible}}$	Taux d'évaporation du combustible	g.s^{-1}
MLR	Perte de masse du combustible	$\text{g.s}^{-1} \text{m}^{-2}$

MW_i	Masse molaire de l'espèce i	g.mol ⁻¹
N		
n	Nombre de mole	mol
N_T	Nombre total des particules	nombre.cm ⁻³
O		
O₂	Oxygène	-
P		
p	Pression	Pa
Q		
q_{air}	Débit volumique	l.s ⁻¹
Q_{gaz}	Débit volumique du gaz	m ³ s ⁻¹
Q_s	Débit de prélèvement	l.min ⁻¹
R		
R	Constante universelle des gaz parfaits (R ≈ 8.314)	J.mol ⁻¹ K ⁻¹
Ref	Référence	-
RH	Renouvellement horaire	h ⁻¹
S		
s	Rapport stœchiométrique	-
T		
t	Temps	s
T	Température	°C ou K
V		
v	Vitesse du gaz	m.s ⁻¹
V	Volumen	m ³
X_i	Fraction molaire de l'espèce i	-
Y_i	Rendement de l'espèce i	g.g ⁻¹

Lettres grecques

ΔH_c	Chaleur de combustion	kJ.kg ⁻¹
ε	Émissivité	
λ	Conductivité é thermique	W.m ⁻¹ K ⁻¹
σ	Constante de Stefan Boltzmann (5.67x10 ⁻⁸)	W.m ⁻² K ⁻⁴
ρ	Masse volumique	kg.m ⁻³
Φ	Facteur de déplétion d'oxygène	
Φ_g	Symbole de la richesse globale	

Acronymes

ABS	Acrylonitrile-Butadiène-styrène
ACPH	Air change per heure
CFD	Computational Fluid Dynamics
CPC	Compteur de particules à condensation
DMA	Analyseur de Mobilité différentielle
FPS	Fire dynamics simulator de la terminologie anglo-saxonne
GDC	Méthode de la génération de dioxyde de carbone
GER	Richesse globale (terminologie anglo-saxonne Global equivalence ratio)
HAP	Hydrocarbures aromatiques polycycliques
HRR	Puissance du feu (terminologie anglo-saxonne Heat release rate)
kW	Kilowatt
LMH	Largeur à mi-hauteur
MLR	Perte de masse (terminologie anglo-saxonne Mass loss rate)
MW	Méga watt
OC	Méthode de la consommation d'oxygène
PMMA	Poly-méthacrylate de méthyle
PVI	Vélocimétrie par imagerie de particules
TAI	Température d'auto-inflammation (°C ou K)
TEOM	Tapered Element Oscillating Microbalance de la terminologie anglo-saxonne
TL	Température du point d'éclair (°C ou K)
TPH	Tetra-propylène d'hydrogène
SMPS	Scanning Mobility particle sizer

Introduction générale

Certaines activités industrielles requièrent des espaces confinés où la ventilation doit être minutieusement contrôlée pour des raisons de sécurité. Cela concerne notamment les installations nucléaires, ainsi que les installations qui produisent des polluants gazeux ou des aérosols toxiques. L'étude des incendies confinés et mécaniquement ventilés est d'une importance considérable dans le domaine de la sécurité incendie. Les incendies dans les locaux confinés sont particulièrement dangereux, car ils peuvent rapidement provoquer une accumulation de fumée et de gaz toxiques et se propager aux locaux voisins. En général, ces accidents peuvent entraîner la mort des occupants, réduire la visibilité, limiter l'accès des pompiers aux lieux de l'incendie et avoir des conséquences très polluantes pour l'environnement. Dans le cadre d'une installation nucléaire, un incendie peut entraîner une perte de confinement des locaux contenant des matières radioactives due à l'augmentation de la pression. Il est donc essentiel de mieux comprendre les caractéristiques des sources de feux confinés, tels que la perte de masse du combustible, le taux de dégagement de chaleur, ainsi que la production de monoxyde de carbone et de particules de suie. Une meilleure compréhension de ces caractéristiques permet de développer des stratégies efficaces pour la prévention, la maîtrise et l'extinction des incendies confinés. Cette connaissance est également cruciale pour la conception et l'optimisation des systèmes de ventilation, qui jouent un rôle clé dans la prévention des incendies. La mesure de ces paramètres apporte des données utiles pour valider les simulations numériques (par exemple avec la CFD) des incendies dans des compartiments mal ventilés.

Les premières études sur les incendies ont été menées dans des environnements ouverts, où les produits de combustion ont été collectés dans une hotte (Beyler C. L., 1986; Zukoski, Tone, Morehart, & Kubota, 1989; Zukoski, Morehart, Kubota, & Toner, 1991). Beyler (Beyler C. L., 1986) et Zukoski et al. (Zukoski, Tone, Morehart, & Kubota, 1989; Zukoski, Morehart, Kubota, & Toner, 1991) ont mesuré le rendement en monoxyde de carbone dans les gaz chauds de la couche supérieure de la hotte, générés par les flammes de diffusion situées en dessous de la hotte. Ils ont constaté que le rendement en monoxyde de carbone est corrélé avec la richesse globale. Des feux bien ventilés ont donné lieu à des faibles émissions en monoxyde de carbone, tandis que les feux sous-ventilés ont permis d'obtenir des rendements élevés en monoxyde de carbone. De plus, ces auteurs ont montré que la température de la couche chaude peut également influencer les rendements en monoxyde de carbone. Certains chercheurs (Gottuk D. T., Roby, Peatross, & Beyler, 1992; Pitts, Johnsson, & Bryner, 1994; Lattimer, Vandsburger, & Roby, 1998; Ko, et al., 2009) ont effectué des essais en utilisant des

compartiments à échelle réduite pour reproduire des incendies réalistes dans des enceintes. Gottuk et al. (Gottuk D. T., Roby, Peatross, & Beyler, 1992) ont mesuré le rendement en monoxyde de carbone de combustibles liquides et solides dans un compartiment. Ils ont montré que les températures de la couche supérieure et la richesse globale ont une influence sur les rendements en monoxyde de carbone. Bryner et al. (Bryner, Johnsson, & Pitts, 1995) ont comparé les émissions en monoxyde de carbone dans des enceintes à grande et petites échelles. Les niveaux de monoxyde de carbone dans les enceintes à grande échelle ont été trouvés deux fois plus élevés que dans les enceintes à échelle réduite.

Motivés par la sécurité dans les installations nucléaires, plusieurs chercheurs ont étudié les incendies dans des compartiments mécaniquement ventilés (Ko, et al., 2009; Lassus, et al., 2010; Loo, Coppalle, Yon, & Aîné, 2016; Acherar, Wang, Garo, & Coudour, 2020; Prétrel, Bouaza, & Suard, 2021; Manescau, Wang, Garo, Coudour, & Acherar, 2022). Les installations nucléaires sont conçues pour créer des pressions négatives à l'intérieur du compartiment afin de prévenir les fuites des éléments radioactifs vers l'environnement extérieur. Loo et al. (Loo, Coppalle, Yon, & Aîné, 2016) ont mesuré les émissions de monoxyde de carbone et de suie lors d'incendies d'heptane et de dodécane dans un compartiment mécaniquement ventilé de 1 m³. Ils ont trouvé que le monoxyde de carbone diminue avec l'augmentation du taux de ventilation, alors que la concentration de suie augmente. D'autres études (Peatross & Beyler, 1997; Melis & Audouin, 2008; Beji & Merci, 2016) ont examiné les effets de la réduction de l'oxygène sur les conditions de combustion des feux mécaniquement ventilés. Il a été montré que la diminution de l'oxygène à la base de la flamme diminue le taux de perte de masse. Bien que plusieurs études aient été menées sur les incendies dans des espaces confinés, la caractérisation des émissions de monoxyde de carbone et de suie, en particulier dans les compartiments dotés d'une ventilation mécanique, nécessite encore une attention soutenue.

Lorsque le monoxyde de carbone est inhalé, il se lie à l'oxygène du sang pour former un composé stable appelé carboxyhémoglobine (COHb). Cela réduit la quantité d'oxygène disponible pour les organes vitaux et détériore leur fonctionnement. De même, l'inhalation de suie peut entraîner des maladies respiratoires et cardiovasculaires. Des études antérieures ont montré que plus de 50 % des décès dans les scénarios d'incendie sont dus à l'inhalation de ces polluants (Anderson, Watson, & Harland, 1981; Alarie, 2002).

Cependant, il a été constaté que la caractérisation des émissions de monoxyde de carbone et des particules de suie provenant d'incendies confinés et mécaniquement ventilés n'a pas été bien développée dans la littérature. Cela s'explique par le manque d'informations concernant ces types d'incendies. Bien qu'il y ait des difficultés pour caractériser de manière

précise les émissions polluantes et les risques associés aux incendies dans des environnements sous-ventilés, en particulier dans des configurations confinées, comme des locaux dans l'industrie nucléaire. Du point de vue scientifique, il reste encore beaucoup de travail à faire. Ce domaine de recherche est ouvert aux opportunités de collecter des données expérimentales, valider des codes de calcul ou de développer des modèles avancés qui permettent d'expliquer la production de monoxyde de carbone et de suie. Par conséquent, cette thèse se concentre sur la quantification des émissions de monoxyde de carbone et de particules de suie générées lors d'incendies confinés impliquant des combustibles liquides et une ventilation contrôlée mécaniquement.

Il est considéré essentiel de comprendre le rôle de la ventilation, de la taille de la nappe et du type de combustible sur les émissions de monoxyde de carbone et de particules de suie lors d'incendies mécaniquement ventilés. L'étude est menée avec quatre combustibles liquides, le n-heptane pur, le dodécane technique, le kérosène Jet A-1 et l'huile Mobil DTE heavy medium. Les expériences sont réalisées dans un compartiment de 1 m³ mécaniquement ventilé à échelle réduite. Les taux de ventilation sont de 4.83, 9.67 et 17.8 ACPH. Les diamètres des bacs de combustible sont 0.115, 0.14, 0.19 et 0.23 m. Le taux de perte de masse du combustible, la température, les émissions d'espèces chimiques et la granulométrie des particules de suie sont mesurés.

Le manuscrit est organisé de la manière suivante :

Après l'introduction générale, le manuscrit est divisé en six chapitres.

Le Chapitre 1 présente une étude bibliographique sur les incendies. Le concept de feu, ses principaux éléments et les phénomènes physiques liés au feu sont introduits. Le chapitre explore également les étapes du développement d'un incendie, qu'il soit à l'air libre, dans des compartiments ventilés naturellement ou mécaniquement. Un résumé de l'état de l'art sur les incendies de compartiments ventilés mécaniquement est fourni. Les différentes méthodes de calcul de la puissance dégagée par le feu, ainsi que la formation du monoxyde de carbone et des particules de suie sont également présentées.

Le Chapitre 2 décrit en détail le banc de test qui a été utilisé pour développer cette thèse, ainsi que la métrologie mise en place pour mesurer et collecter les données expérimentales. Les différents dispositifs des mesures et les paramètres expérimentaux sont présentés. Le système de mesure et de caractérisation des particules de suie est ensuite détaillé. Un dernier paragraphe est consacré au récapitulatif de l'ensemble de la campagne expérimentale.

On a proposé d'aborder les résultats expérimentaux dans trois chapitres.

Le Chapitre 3 présente une étude sur l'influence du taux de ventilation sur les incendies d'heptane, de dodécane, de kérosène, et d'huile Mobil DTE. Les combustibles sont brûlés dans un bac de 0.19 m de diamètre à différents taux de ventilation. Des comparaisons avec des résultats de la littérature sont également présentées.

Le Chapitre 4 a pour objectif de mieux comprendre l'influence du diamètre du bac, de la nature du bac et de la nature du combustible sur les incendies en milieu confiné. Les incendies ont été menés à un taux de ventilation fixe de 9.67 ACPH avec différentes tailles et types de bacs. Les résultats expérimentaux sont également comparés à ceux de la littérature.

Le Chapitre 5 porte sur une analyse comparative entre certains résultats présentés dans les chapitres précédents avec ceux de la littérature. Les principaux paramètres analysés sont la perte de masse, les émissions de monoxyde de carbone et de particules de suie. On déterminera si l'oxygène au niveau de la flamme ou la richesse globale sont les paramètres les plus susceptibles d'expliquer ces résultats.

Finalement, les conclusions et les perspectives de ce manuscrit constituent le dernier Chapitre.

Chapitre 1

État de l'art

1.1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif de montrer et comprendre le phénomène du feu, de présenter des travaux réalisés sur les incendies en milieu confiné, pour caractériser et identifier leur évolution et d'autres phénomènes qui se produisent pendant un incendie. Bien que cette thèse se concentre sur les incendies confinés mécaniquement ventilés issus de la combustion d'hydrocarbures liquides, avec un intérêt particulier pour les émissions polluantes (monoxyde de carbone et suie), ainsi que les caractéristiques des particules de suie, les travaux sur les incendies à l'air libre et dans des compartiments ventilés naturellement sont dignes d'intérêt. Ces recherches constituent la base pour l'analyse des incendies dans les enceintes ventilées mécaniquement.

1.2. Généralités sur la notion d'incendie

De manière générale, un incendie se caractérise par la chaleur et le rayonnement générés par la combustion en présence de flammes. Le phénomène du feu fait intervenir la chimie, la thermodynamique, le transfert de chaleur et l'aérodynamique avec des intensités spécifiques dépendant de l'endroit où l'incendie se produit (Emmons, 1980). Il est aussi possible de décrire l'incendie comme un phénomène global destructif qui peut être naturel ou provoqué (Bento-Gonçalves, Vieira, Úbeda, & Martin, 2012), autrement dit un feu non maîtrisé, ni dans le temps, ni dans l'espace.

Un incendie commence avec la combustion qui requiert un mélange combustible, oxygène dans les bonnes proportions et un apport de chaleur. Il est donc important de souligner que la caractéristique intrinsèque de l'incendie est la chaleur libérée pendant le processus de combustion. Il faut aussi prendre en considération des phénomènes tels que la distillation, la pyrolyse, la propagation de la fumée, l'inflammation et la combustion avec ou sans flammes (Greenberg, et al., 2006).

Selon Tewarson (Tewarson A. , 1994), la propagation du feu est un processus au cours duquel le front de pyrolyse, qui alimente la flamme, se déplace sur la surface. La propagation du feu dépend des conditions dans lesquelles il se produit, par exemple la vitesse de convection, la température ambiante et la proximité de matériaux combustibles par rapport au point d'origine de l'incendie (Tewarson A. , 1994; Lyon & Quintiere, 2007).

Dans les paragraphes précédents, nous avons vu qu'un incendie met en jeu des phénomènes physiques tels que la combustion, la pyrolyse et la propagation de la fumée.

1.3. Phénomènes physiques liés à l'incendie

1.3.1. Combustion

La combustion est une réaction exothermique rapide qui se caractérise par la libération d'une quantité d'énergie importante, du rayonnement et de la chaleur, et par des produits de combustion (fumées, CO₂, H₂O, CO). La combustion est la rupture et la reformation des liaisons chimiques, c'est-à-dire qu'il y a une transformation de l'énergie stockée dans les liaisons chimiques en chaleur (Turns, 2000; Mahallawy, 2002). La combustion peut être le résultat de la pyrolyse des matières solides ou de l'évaporation des liquides grâce au retour de chaleur du volume de combustion à leur échauffement, ou de la libération sous pression de gaz inflammables (Beyler C. L., 2002; Babrauskas, 2003). La combustion se développe dans une phase gazeuse et est activée lorsque les trois éléments du feu sont réunis : combustible, comburant et une source de chaleur d'ignition (Figure 1.1).

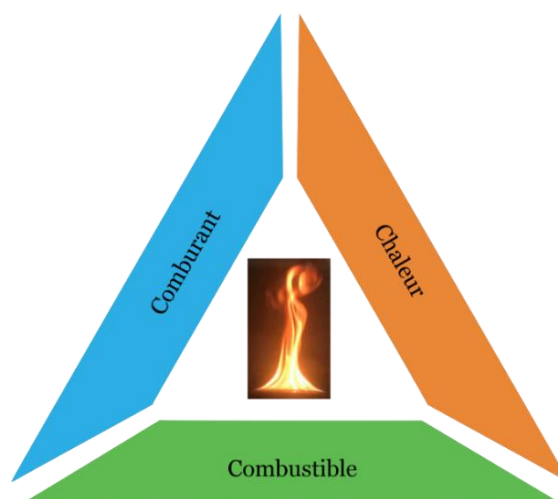
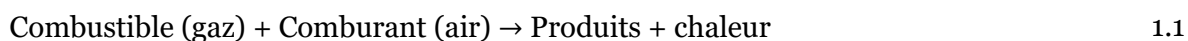


Figure 1.1 - Schéma de la représentation du triangle de feu.

La réaction globale de combustion peut s'écrire :



Dans certains cas, une combustion hétérogène à la surface d'un solide est possible, comme c'est le cas de l'oxydation des résidus de charbon (combustion des braises). La Figure 1.1 présente les trois éléments qui composent le triangle du feu, dont la conséquence est la réaction de combustion (équation 1.1) avec le dégagement de chaleur associé. À la base du triangle se trouve le combustible, qui représente l'élément principal de la combustion.

Le comburant ou oxydant est la substance chimique qui associée au combustible à l'état gazeux, forment un mélange capable de s'enflammer dans certaines conditions. Le comburant le plus fréquemment rencontré est l'air ou l'oxygène pur (O_2). Toutefois, dans certains cas, des composés chimiques de l'oxygène tels que de l'ozone (O_3), la vapeur d'eau, nitrate de potassium (KNO_3) ou salpêtre, les peroxydes, les oxydes métalliques peuvent être utilisés comme oxydants.

L'énergie d'ignition représente l'énergie minimale nécessaire pour qu'une réaction chimique ait lieu. Cette énergie peut provenir d'une flamme, d'une source externe comme une étincelle, un arc électrique ou un fil incandescent.

La combustion peut être complète ou incomplète. Dans la combustion complète, l'oxygène est en quantité suffisante pour entretenir la flamme. Le combustible est totalement brûlé, en formant du CO_2 et H_2O . La combustion complète est également caractérisée par la présence d'une flamme bleue et un faible dégagement de fumées. La combustion incomplète se développe dans un environnement sous-oxygéné, les produits de la combustion contiennent des composés partiellement oxydés, par exemple du monoxyde de carbone. Le quenching (refroidissement de la combustion à cause de l'air qui alimente la flamme) est un précurseur de la combustion incomplète. La combustion incomplète peut également résulter d'un mauvais mélange du combustible et de l'air, ce qui entraîne des régions localement riches ou pauvres en combustible (Bowman, 1975). La combustion incomplète dégage alors beaucoup de fumée et la flamme est de couleur orange.

1.3.2. *Pyrolyse*

Pour qu'un solide soit capable de produire un incendie (s'enflammer), il doit réagir à la chaleur en se décomposant et en libérant des vapeurs combustibles. Le chauffage des solides entraîne généralement une dégradation thermochimique ou pyrolyse (Beyler C. L., 2002). Ce processus a lieu en exposant la surface d'un matériau combustible à un flux de chaleur provenant de sa propre flamme ou de sources de chaleur externes, ce qui produit des vapeurs combustibles. Le flux de chaleur fait augmenter la température du solide à un seuil spécifique, introduisant la sublimation ou la décomposition et l'évaporation d'un matériau combustible en vapeur qui, au contact avec de l'air, forment un mélange inflammable (Tewarson A. , 1994; Babrauskas, 2003). La vitesse de déplacement du front de pyrolyse à la surface est définie comme la vitesse de propagation du feu.

Pour mieux comprendre le processus de pyrolyse, nous allons prendre le cas du bois (Figure 1.2). Cette figure montre en détails les processus chimiques et physiques qui résultent

de la pyrolyse. Le bois représente un matériau courant dans la construction et il est donc susceptible d'être souvent impliqué dans les incendies. Le processus se décompose en deux phases : décomposition primaire, décomposition secondaire (Venderbosch & Prins, 2010). La décomposition primaire consiste en la décomposition thermique du matériel combustible (bois) à des températures supérieures à 500 °C, ce qui entraîne la production de carbone, des vapeurs condensables (précurseurs de la bio-huile) et des vapeurs incondensables (CO_2 , CO , H_2 , CH_4 , etc.). L'étape secondaire est composée par le craquage des molécules plus complexes (gaz condensables) en charbon (appelé charbon secondaire) et en gaz non condensables entre 400 – 500 °C, suivi d'une condensation, goudron ou bio-huile (Ogemdi, 2019).

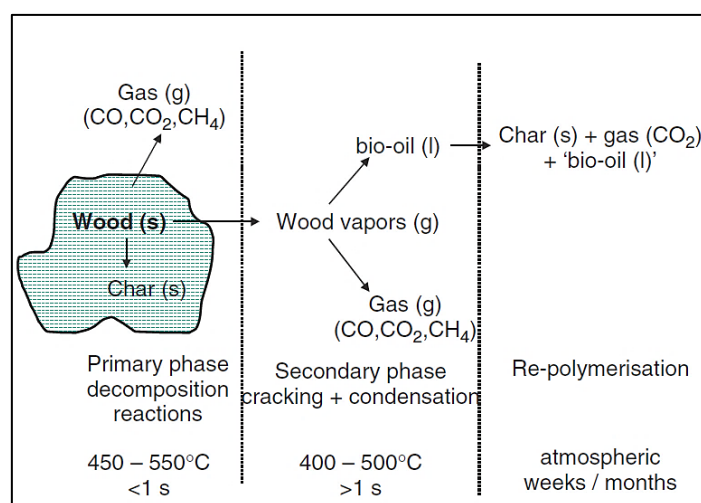


Figure 1.2 - Représentation du processus typique de pyrolyse du bois (Venderbosch & Prins, 2010).

1.3.3. Propagation des fumées

Le mouvement de la fumée est responsable du transport de la chaleur, des gaz non brûlés et des particules de suie. Lors d'un incendie dans un compartiment fermé, la fumée peut s'accumuler, entraînant une perte de visibilité, un échauffement des parois, qui rayonnent et augmentent la température de la fumée, provoquant l'inflammation des matériaux combustibles voisins, et même d'autres compartiments, ce qui augmente le risque d'incendie. Liu et. al (Liu, et al., 2020) ont trouvé que la vitesse de propagation du front de fumée dans différents scénarios d'incendie, varie entre 0.58 à 0.88 m/s et dépend de la taille du compartiment et de la taille du bac de combustible.

1.4. L'inflammation

L'inflammation est produite grâce d'une part à l'augmentation de la température de surface d'un matériau combustible jusqu'à ce que des vapeurs se dégagent et d'autre part au mélange des vapeurs avec l'air (début de la combustion) (Tewarson A. , 1994). La rapidité fait souvent du phénomène d'inflammation un événement brutal, qui se caractérise par l'apparition d'une flamme, par l'augmentation de la libération d'énergie ou par l'élévation de température (Babrauskas, 2003). Les caractéristiques de l'inflammabilité d'un mélange de gaz combustible sont importantes car elles aident à l'évaluation et à l'analyse des risques d'incendie dans des compartiments confinés (Lassus, et al., 2010; Magnognou, Garo, Coudour, & Wang, 2017; Dong, 2013).

Pour que l'inflammation ait lieu, trois conditions doivent être réunies : (i) une quantité suffisante de vapeur de combustibles doit être émise du matériau liquide ou solide ; (ii) les vapeurs et les gaz doivent être mélangés avec le comburant en phase gazeuse ; (iii) le mélange doit se trouver à une température assez élevée pour provoquer une oxydation auto-accélérée.

Le déclenchement et l'intensité de l'inflammation est fonction de l'état dans lequel se trouve la matière combustible (solide, liquide ou gaz).

Inflammation de gaz

Les mélanges de gaz peuvent s'enflammer de deux manières principales : (i) l'auto-inflammation : produit par l'augmentation de la température de tout le volume de gaz ; (ii) l'inflammation pilotée : en introduisant une source externe d'énergie. La température minimale qu'un mélange de gaz doit atteindre pour s'enflammer est appelée température d'auto-inflammation (TAI), parfois aussi appelée température d'allumage spontanée (Bodurtha, 1980; Babrauskas, 2003). Elle est assez élevée pour la plupart des gaz combustibles et c'est souvent l'inflammation pilotée qui est responsable du démarrage d'un incendie.

Inflammation des liquides

L'inflammation commence par la vaporisation du liquide, mais la structure chimique de la vapeur reste la même que celle du liquide, ce qui peut être vu comme un phénomène de transfert de masse à la surface (Kanury, 2002; Babrauskas, 2003).

Attention, dans le cas des mélanges de liquides combustibles, une distillation est possible. Elle fera apparaître en premier au-dessus de bac les hydrocarbures les plus légers pour finir ensuite avec la vaporisation des plus lourds.

Inflammation des solides

L'inflammation d'un solide dépend de la capacité avec laquelle sa température de surface augmente jusqu'au point d'inflammation, du fait de l'exposition à une chaleur rayonnante ou à un flux de gaz chauds. Le chauffage des solides se traduit par une dégradation thermochimique ou pyrolyse qui produit un mélange complexe de gaz et de vapeurs (Kanury, 2002). Il s'agit du processus de pyrolyse dont il a été discuté dans la section précédente. Ce processus dépend des caractéristiques de la décomposition chimique et des propriétés physiques du solide, telles que la conductivité thermique, la masse volumique et la capacité thermique (Babrauskas, 2003). Pour la plupart des solides, l'inflammation par chauffage externe se produit en phase gazeuse. Lorsque la surface du solide est chauffée, des substances volatiles se détachent, se mélangent avec l'air et s'enflamment.

Donc, potentiellement tous les mélanges hétérogènes de gaz combustibles et d'air sont inflammables, c'est-à-dire qu'ils peuvent propager une flamme librement, mais il faut que ces mélanges soient dans des proportions, correspondant à la limite inférieure d'inflammabilité (LII) et à la limite supérieure d'inflammabilité (LSI).

1.4.1. Domaine d'inflammation des gaz

L'inflammation des gaz combustibles dans l'air n'a lieu que dans une plage de concentration spécifique, appelées limites d'inflammabilité (Zabetakis M. G., 1965; Babrauskas, 2003; Kondo, Takizawa, Takahashi, Tokuhashi, & Sekiya, 2008). La concentration minimale en dessous de laquelle la propagation de la flamme ne se produit pas au contact d'une source d'ignition est la limite inférieure d'inflammabilité (LII). L'autre paramètre du domaine est la limite supérieure d'inflammabilité (LSI), qui représente la concentration maximale de gaz dans l'air au-dessus de laquelle aucune propagation de la flamme ne se produit au contact d'un apport d'énergie (Bodurtha, 1980; Van den Schoor & Verplaetsen, 2007).

Les valeurs de la LII et LSI sont généralement exprimées en pourcentage du volume de gaz inflammable dans le volume total du mélange. Par exemple, le Tableau 1.1 présente les LII et les LSI dans l'air de certaines substances. Les deux paramètres du domaine dépendent de différentes variables, telles que : la nature du combustible (Zabetakis M. G., 1965; Babrauskas,

2003) ; la température du gaz pour une auto-inflammation (Burgess & Wheeler, 1911) ; la pression (Babrauskas, 2003) et la concentration en oxygène (Lewis & Von Elbe, 1948). Lassus et al. (Lassus, et al., 2010) ont montré que, dans le cas d'un incendie dans un compartiment sous-ventilé, ces critères sont à leur tour influencés par d'autres paramètres : le taux de dégagement de chaleur, les conditions de ventilation et la géométrie du compartiment.

Tableau 1.1 - Valeurs de la LII, LSI et température d'auto-inflammation (TAI) pour différents combustibles. Combustion avec de l'air.

Combustibles / Paramètres	LII (T = 25 °C) %	LSI (T = 25 °C) %	TAI (°C)
CO	12.5	74	588
H ₂	4.0	75	520
Heptane	1.05	6.7	223
Dodécane	0.6	4.7	204
Kérosène	0.7	5.0	210
Huile Mobil DTE	0.9	7.0	-

1.4.2. Grandeurs affectant le domaine d'inflammabilité des gaz et des liquides

La température

La loi de Burgess et Wheeler (Burgess & Wheeler, 1911) décrit la limite inférieure et supérieure d'inflammabilité pour des hydrocarbures en fonction de la température (équation 1.2 et équation 1.3).

$$LII(T) = LII(T_0) \left(1 - \frac{T - T_0}{1300 - T_0} \right) \quad 1.2$$

$$LSI(T) = LSI(T_0) \left(1 + \frac{T - T_0}{1412 - T_0} \right) \quad 1.3$$

où, $LII(T_0)$ et $LSI(T_0)$ sont la limite inférieure et supérieure d'inflammabilité du combustible à la température de référence en degré Celsius (normalement 25 °C, $LII(T)$ et $LSI(T)$ sont la limite inférieure et supérieure d'inflammabilité du combustible à la température souhaitée.

La Figure 1.3 montre l'effet de la température du mélange sur le domaine d'inflammabilité. En bas et en haut du graphique, le domaine est limité par la LII et la LSI. La

LSI augmente avec la température du système alors que la LII diminue, de sorte que le domaine d'inflammabilité du mélange augmente avec la température. Les limites d'inflammabilité sont également bornées par la courbe de vapeur saturante et la température d'auto-inflammation (TAI).

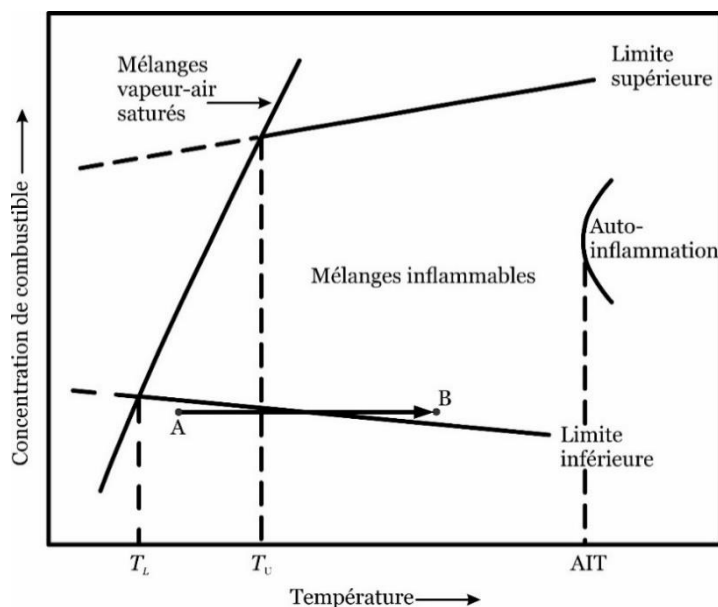


Figure 1.3 - Effet de la température sur les limites d'inflammabilité d'une vapeur combustible dans l'air à pression initiale constante (Beyler C. L., 2002).

Le point d'éclair d'un liquide, indiqué sur la figure par T_L représente la température à laquelle la pression de vapeur à la surface du liquide est à la limite inférieure d'inflammabilité (Lucassen, Beyer, & Zakel, 2019). Autrement dit, c'est la température minimale à laquelle un liquide dégage assez de vapeur pour former avec l'air ambiant un mélange susceptible de s'enflammer en présence d'une source de chaleur. Cependant, si la surface du liquide est chauffée pendant une période prolongée, la température atteinte est appelée point de feu. Ce point de feu est nécessaire pour maintenir la combustion du mélange combustible/air. (Ljubas, Krpan, & Matanović, 2010). La mesure des points éclair (ou feu) dépend du confinement du bac de liquide combustible. Lorsque celui-ci est contenue dans un récipient fermé, les vapeurs atteignent des concentrations inflammables à des températures plus basses par rapport au cas où le bac est non confiné (Beyler C. L., 2002).

La pression

Les limites LII et LSI dépendent également de la pression du mélange. Babrauskas (Babrauskas, 2003) a montré que l'augmentation de la pression initiale du mélange de gaz

entraîne une augmentation à la fois de la limite inférieure et de la limite supérieure d'inflammabilité. Cependant, la LSI est plus influencée aux changements de pression que la LII. Les relations montrées ci-dessous permettent de calculer ces limites :

$$LII(P) = LII(P_a) - 0.31 \ln(P) \quad 1.4$$

$$LSI(P) = LSI(P_a) + 8.9 \ln(P) \quad 1.5$$

où, $LII(P_a)$ et $LSI(P_a)$ sont la limite inférieure et la limite supérieure d'inflammabilité du combustible à la pression ambiante.

La concentration en oxygène

Lewis et al. (Lewis & Von Elbe, 1948) ont étudié l'influence de la concentration d'oxygène sur le domaine de l'inflammabilité. Ils ont trouvé que la concentration en oxygène a peu d'influence sur la limite inférieure d'inflammabilité. Mais la limite supérieure d'inflammabilité augmente avec la concentration d'oxygène. Il a été proposé l'équation 1.6 pour déterminer la concentration minimale en oxygène (CMO), à l'aide de la limite inférieure d'inflammabilité (Bodurtha, 1980). La CMO (en % molaire) correspond à la concentration en oxygène sous laquelle le mélange combustible-oxygène n'est plus inflammable.

$$CMO = LII \cdot n_{(O_2)} \quad 1.6$$

où $n_{(O_2)}$ représente le nombre de moles d'oxygène réagissant avec une mole de combustible, LII est la limite inférieure d'inflammabilité du combustible dans l'air.

Le combustible

Dans le cas d'un mélange de gaz combustible, Le Chatelier et Boudouard (Le Chatelier & Boudouard, 1898) ont proposé une loi empirique, qui permet d'estimer la limite inférieure d'inflammabilité. La formule développée par Le Chatelier et Boudouard (équation 1.7) est basée sur l'hypothèse que la chaleur de combustion par mole est la même pour tous les combustibles constituant le mélange, ainsi que pour le mélange résultant. Selon cette formule, la limite inférieure d'inflammabilité d'un mélange de n types de gaz combustibles (i), est donnée par l'équation ci-dessous :

$$LII(T) = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{X_i}{LII_i}} \right) 100 \quad 1.7$$

où X_i représente la fraction molaire de l'espèce i dans le mélange de combustible, sans air et sans inerte, LII_i est la limite inférieure d'inflammabilité dans l'air de l'espèce i . Si la somme $\left(\sum_{i=1}^n \frac{X_i}{LII_i} \right)$ est supérieure à 1, cela signifie que le mélange excède la limite inférieure d'inflammabilité. En accord avec Grabarczyk et al. (Grabarczyk, Ciesińska, & Porowski, 2016) l'hypothèse qui sous-tend l'équation 1.7 est que, lorsque plusieurs substances chimiques sont mélangées à des concentrations égales à leurs valeurs spécifiques de la LII, il en résulte un mélange dont la concentration est égale à LII obtenu par l'équation 1.7.

1.5. Évolution du feu dans un environnement ouvert

Pour mieux comprendre les incendies dans les compartiments confinés, et étudier les effets du confinement et de la ventilation contrôlée mécaniquement sur le développement du feu, il est nécessaire, dans un premier temps, de connaître l'évolution du feu en milieu ouvert, plus spécifiquement dans l'air libre. La Figure 1.4 présente une flamme typique de 36.4 MW provenant d'un feu de nappe à grande échelle dans un espace ouvert en utilisant comme carburant le kérosène RP-5 d'aviation (Tao, et al., 2020).



Figure 1.4 - Feu de nappe à grande échelle. Surface du bac de combustible de 25 m² (Tao, et al., 2020).

De nombreux chercheurs ont réalisé des expériences sur ces incendies libres, afin d'étudier les périodes transitoires au cours desquelles un incendie pourrait se développer. Il s'agit de déterminer l'effet de la vitesse du vent sur la vitesse consommation du combustible

et de montrer comment se développent les incendies dans des espaces ouverts. Chatris et al. (Chatris, et al., 2001) ont réalisé des expériences sur des incendies de nappe d'essence et diesel avec différents diamètres du bac de combustible (1.5, 3 et 4 m). D'après les résultats obtenus, il a été trouvé que l'incendie peut être divisé en trois phases (Figure 1.5). La phase de transition, représentée dans la courbe (I), correspond au développement de l'incendie. La phase de transition peut être subdivisée en deux phases : la phase (Ia) qui correspond à la propagation de la flamme sur la surface du bac, et la phase (Ib) dans laquelle la flamme couvre totalement la surface du bac et augmente progressivement de taille. La phase stationnaire (II), correspond au feu pleinement développé. La phase d'extinction (III), la taille de la flamme et la vitesse de combustion diminuent séquentiellement jusqu'à l'extinction du feu. L'influence de la vitesse du vent sur le taux de combustion a été négligeable jusqu'à 2 m/s. Toutefois, cette vitesse a un certain effet sur les feux de bacs plus grands. Jiang et al. (Jiang & Lu, 2016) ont également étudié les incendies dans un espace ouvert. Il a été analysé l'influence du vent latéral sur le taux de perte de masse des feux de nappe dans un bac circulaire et les angles d'inclinaison de la flamme. Ces auteurs ont observé qu'à différentes vitesses de vent latéral, la variation des taux de perte de masse pouvait être divisée en trois étapes distinctes. À chaque étape, un type spécifique de transfert de chaleur est dominant. Le transfert de chaleur radiatif domine lors de la première étape, tandis que la combinaison du rayonnement et de la convection domine dans la deuxième étape. Enfin, la convection est dominante à la dernière étape.

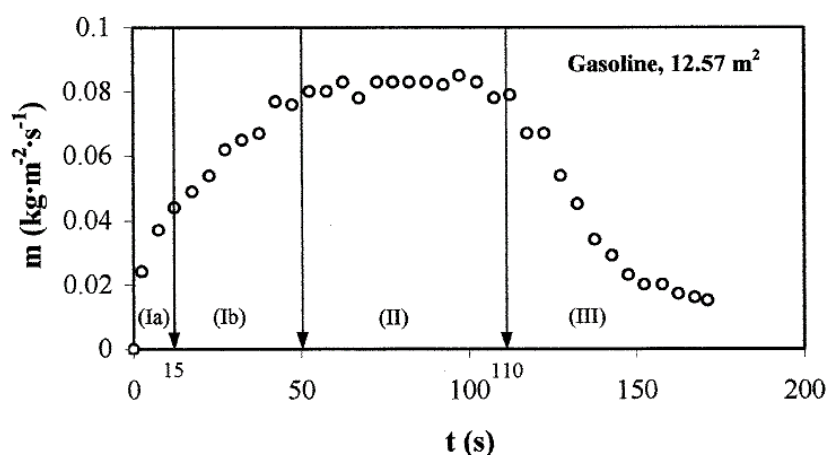


Figure 1.5 - Taux de perte de masse du combustible en fonction du temps. Feu de nappe d'essence, surface du bac de combustible de 12.57 m² (Chatris, et al., 2001).

Plus récemment d'autres auteurs tels que Tao et al. (Tao, et al., 2020) ont confirmé le même développement de feu à l'aide d'un feu de nappe de Kérosène RP-5 d'aviation. Pendant les tests, il a été mesuré la température au niveau de la flamme. La Figure 1.6 montre à gauche

la température au-dessus du foyer et à droite les trois zones de flamme telles que définie par McCaffrey (McCaffrey B. J., 1979). Comme précédemment, on retrouve les mêmes étapes : croissance rapide du feu (étape 1), combustion stable ou quasi-période stable (étape 2) et réduction et extinction du feu (étape 3). Il a été trouvé que la plupart du combustible réagit dans la zone de flamme continue, qui se situe généralement près de la base de la flamme. Ensuite, la pulsation de la flamme aspire de l'air frais dans la zone de flamme intermittente. Cependant, une quantité importante de gaz non brûlé et de fumées, forment la zone du panache. Cette zone n'est pas propice à la réaction chimique du combustible et contribue plutôt à l'émission de polluants. L'inclinaison de la flamme (Figure 1.6) résulte de la concurrence entre la force d'inertie du vent et la flottabilité vers le haut (zone de panache), due à la chaleur de la combustion. Les résultats ont montré que l'augmentation de la hauteur verticale a un impact significatif sur le champ de température, même lorsque la vitesse du vent est inférieure à 2 m/s.

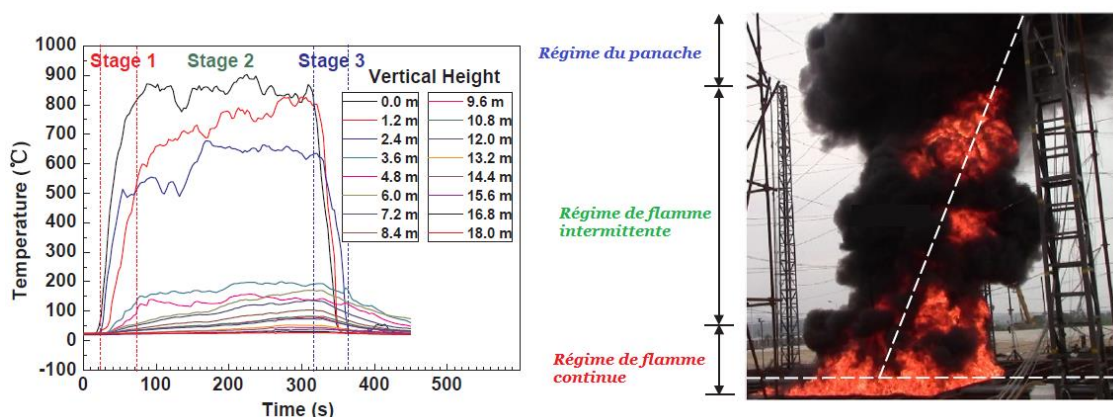


Figure 1.6 - Feu de nappe à grande échelle. Surface du bac de combustible de 25 m² (Tao, et al., 2020).

Régime de combustion du modèle McCaffrey

En 1979, McCaffrey (McCaffrey B. J., 1979) a établi une corrélation qui permet d'estimer la température de la flamme au niveau de l'axe central pour des feux ouverts. Il a été trouvé que la flamme est divisée en trois zones (déjà montrées sur la Figure 1.6). La relation pour déterminer la température ($\Delta T = T - T_0$) est donnée par l'équation 1.8 ; les valeurs des constantes η et k , en fonction des trois régimes sont indiquées dans le Tableau 1.2.

$$\Delta T = \left(\frac{k}{0.9\sqrt{2g}} \right)^2 \left(\frac{z}{\dot{Q}^{2/5}} \right)^{2\eta-1} T_0 \quad 1.8$$

où, \dot{Q} est le taux de dégagement de chaleur du feu (kW), g est l'accélération gravitationnelle 9.81 m/s^2 , z est la hauteur au-dessus du brûleur (m) et T_o est la température ambiante.

Tableau 1.2 - Valeur des constantes η et k , pour les trois régimes de combustion proposés par McCaffrey.

Régime	$z\dot{Q}^{-2/5} (\text{mkW}^{-2/5})$	η	k
Continu	< 0.08	$1/2$	$6.8 (\text{m}^{1/2}\text{s}^{-1})$
Intermittent	$0.08 - 0.2$	0	$1.9 (\text{mkW}^{-1/5}\text{s}^{-1})$
Panache	> 0.2	$-1/3$	$1.1 (\text{m}^{4/3}\text{kW}^{-1/3}\text{s}^{-1})$

Dans le sous-chapitre suivant, nous allons présenter des différents travaux réalisés dans des compartiments ventilés naturellement et ventilés mécaniquement, afin de connaître les caractéristiques et le développement de ces incendies en fonction du type de ventilation.

1.6. Incendies en compartiment confiné

Aujourd'hui, la communauté des sciences du feu s'intéresse fortement à l'étude des incendies dans les compartiments fermés ou confinés. En réponse aux nouveaux défis liés à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et aux exigences en matière de faible consommation d'énergie, les caractéristiques de construction des bâtiments ou des installations industrielles ont évolué au cours du temps vers des enceintes étanches et isolées, équipées de systèmes de ventilation.

Dans le cas d'un incendie en compartiment fermé, le type de ventilation utilisé lors de la construction, joue un rôle important dans le développement du feu. Les incendies en compartiment fermés peuvent être classifiés en deux catégories : incendies ventilés naturellement, soit pour des ouvertures, portes ou événements libres (Utiskul, et al., 2005; Hwang, Lock, Bundy, Johnsson, & Ko, 2010; Chaudhary, Gupta, Kumar, & Kumar, 2016), et incendie avec ventilation forcée ou mécanique (Pretrel, Querre, & Forestier, 2005; Saux, Pretrel, Lucchesi, & Guillou, 2008; Lassus J. , et al., 2016; Loo, Coppalle, Yon, & Aîné, 2016; Prétrel, Bouaza, & Suard, 2021). Les compartiments confinés et ventilés mécaniquement sont souvent utilisés dans les installations industrielles, en particulier pour les substances dangereuses. Par exemple, les matières radioactives dans une installation nucléaire (Audouin, Rigollet, Prétrel, Saux, & Röwekamp, 2013). De plus, pour assurer le confinement, ces enceintes sont équipées d'un système de ventilation de traitement de l'air, qui permet de créer une pression négative

dans les compartiments. Ce système permet d'éviter que des matières radioactives ou des produits nocifs ne s'échappent du compartiment (Jiang, Ye, & Yang, 2002). C'est l'une des raisons qui conduit à étudier les configurations qui impliquent un incendie dans une enceinte ventilée mécaniquement, dans le cadre des recherches sur la sécurité incendie nucléaire.

Il est donc impératif d'avoir une bonne maîtrise du confinement de ces substances dans toutes les situations. Les incendies confinés créent des problèmes spécifiques. Par exemple, les gaz imbrûlés et les particules émises en quantités plus ou moins importantes sont susceptibles de se réenflammer. Ces produits issus de la combustion peuvent également être stockés sous plafond et aggraver le risque incendie (Loo, Coppalle, Yon, & Aîné, 2016). Il est très important de mieux comprendre ces incendies et leurs caractéristiques, telles que les taux de dégagement de chaleur, les taux de perte de masse de combustible, la production de monoxyde de carbone et de suie et les phénomènes physiques qui pourraient se produire lors de l'incendie.

Les incendies de compartiment présentent des caractéristiques particulières qui les distinguent des incendies à l'air libre. En effet, dans un compartiment fermé, le retour de chaleur de la couche de fumée chaude augmente le taux de consommation de combustible. De plus, la recirculation des fumées et le rayonnement des parois de l'enceinte contribuent également à la propagation et à l'intensification du feu. L'ouverture de la ventilation (apport d'air frais) contrôle la disponibilité de l'oxygène pour le feu.

1.6.1. Évolution du feu dans un compartiment fermé

L'évolution d'un incendie en milieu confiné est un processus complexe, car de multiples facteurs et phénomènes interviennent dans le processus de combustion. Les incendies confinés sont souvent caractérisés en termes de taux de dégagement de chaleur, de températures et de la composition de la fumée. Cependant, en fonction du type d'infrastructure, de combustible, de ventilation et de produits de combustion, il est possible d'observer différentes évolutions et phénomènes qui pourraient avoir lieu lors de l'incendie (Lock, et al., 2008).

Un incendie de compartiment complètement développé peut être classifié en fonction des conditions de ventilation en sur-ventilé ou sous-ventilé, à l'aide du concept de la richesse globale (GER^a). La richesse globale, symbolisée par Φ_g , est définie comme le rapport entre le taux de perte de masse du combustible à l'intérieur du compartiment et le débit d'air dans le

^a GER pour Global Equivalence Ratio dans la terminologie anglo-saxonne. Symbolisée par Φ_g .

compartiment, normalisé par le rapport stœchiométrique du combustible (Wieczorek, Vandsburger, & Floyd, 2004). $GER < 1$ représente la condition ou régime de combustion sur-ventilé. Dans ces conditions, la quantité d'oxygène présente dans le compartiment est suffisante pour entretenir le feu. La combustion presque complète, la production de CO et d'hydrocarbures imbrûlés est très faible. $GER = 1$ représente la condition stœchiométrique (dans ce travail de thèse, $GER = 1$ n'a pas été considéré comme la vraie limite ventilé/sous-ventilé). $GER > 1$ représente la condition sous-ventilée, pendant laquelle les émissions de CO et de particules de suies sont importantes. C'est-à-dire que le type de combustion prédominant pendant l'incendie est la combustion incomplète (Hwang, Lock, Bundy, Johnsson, & Ko, 2010; Fleischmann & Chen, 2013; Magnognou, Garo, Coudour, & Wang, 2017).

$$\Phi_g = \frac{(\dot{m}_{\text{Combustible}}/\dot{m}_{\text{air}})}{(\dot{m}_{\text{Combustible}}/\dot{m}_{\text{air}})_{\text{st}}} \quad 1.9$$

La Figure 1.7 montre le développement typique d'un incendie dans un compartiment en feu en fonction de la température moyenne des fumées. Cette figure est utilisée pour décrire et analyser l'évolution d'un incendie en compartiment fermé (Debray, Gobeau, & Waymel, 2007; Dong, 2013). En général, un incendie de compartiment peut se développer en cinq étapes principales : ignition, croissance, feu pleinement développé, décroissance et extinction. Il y a aussi d'autres phénomènes tels que la pulsation, le flash-over, le back-draft et la reprise du développement du feu. Ils sont des phénomènes caractéristiques non seulement des incendies dans des compartiments confinés, mais aussi des régimes de combustion sous-ventilée (Utiskul, et al., 2005; Rasoulipour, Delichatsios, Fleischmann, & Chen, 2020).

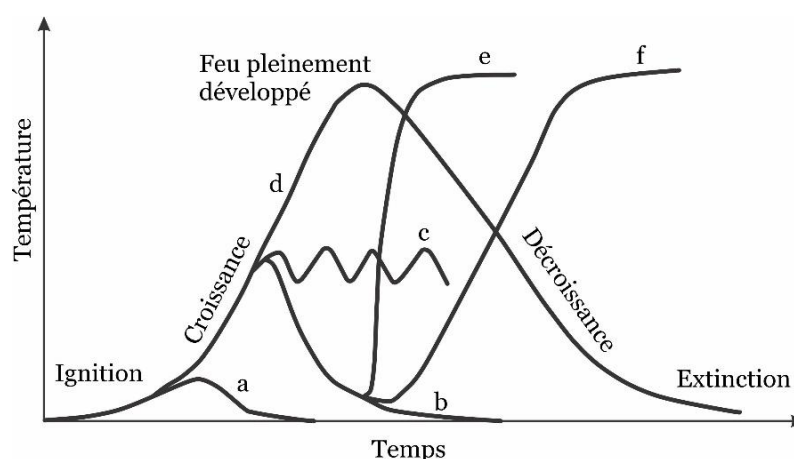


Figure 1.7 - Évolutions possibles d'un incendie dans un espace confiné. (Debray, Gobeau, & Waymel, 2007).

Légende

- | | |
|---|-------------------------------------|
| a - Extinction par manque du combustible | d - Phénomène de flash-over |
| b - Extinction par manque d'oxygène | e - Phénomène de back-draft |
| c - Phénomène de pulsation | f - Reprise du développement |

1. Phase d'ignition du feu

L'ignition, la cause de l'incendie, permet de comprendre les mécanismes à l'origine du départ du feu. Le combustible est chauffé par une source de chaleur externe jusqu'à une température critique de surface du combustible, qui permet d'activer la réaction de combustion avec une flamme, toujours entre le combustible à état gazeux et l'oxygène de l'air. Une initiation d'une combustion sans flamme peut exister, comme par exemple sur des braises dans le cas du bois, mais le dégagement de chaleur est faible et sa croissance très lente. Si la quantité de combustible initiateur du feu est faible, le feu s'éteint par manque de combustible, représenté par la courbe a sur la Figure 1.7.

2. Phase de croissance

Cette phase est également connue comme la propagation du feu, correspond à l'augmentation de la puissance du feu liée à la combustion des matériaux inflammables contenus dans le local en feu. La croissance de l'incendie et sa vitesse de propagation dépendent de nombreux facteurs, tels que la géométrie de l'enceinte, les ouvertures dans le compartiment, le type de combustible, sa taille et son emplacement (Sahu, Jain, Gupta, & Kumar, 2019). L'incendie peut se propager de deux façons différentes : soit par transfert de chaleur entre une source et une cible (conduction, convection et rayonnement), soit par déplacement et projection des substances en combustion. Dans ce dernier cas, il peut s'agir des gouttes ou des brindilles solides enflammées. Si la quantité de combustible initiateur du feu est faible et la base du feu est suffisamment éloignée des autres matériaux combustibles, le flux thermique dégagé par le feu pourrait être insuffisant pour élever la température des autres combustibles et initier leur combustion. Dans ce cas, le feu s'éteint par manque d'oxygène. Cette phase est suivie d'une baisse de la température dans le local, représentée par la courbe (b) sur la Figure 1.7. L'émission de gaz combustible non brûlés et des substances dangereuses est importante.

3. Feu pleinement développé

Le feu pleinement développé correspond à la puissance maximale dégagée par le feu. Cette phase suit la phase d'embrasement généralisé « *flash-over* », donc le feu pleinement développé est appelé phase de post flash-over (Stern-Gottfried, Rein, Bisby, & Torero, 2010). Pendant flash-over, le dégagement de chaleur est si important que tout le contenu du compartiment est en flamme. La fumée chaude et les parois de l'enceinte rayonnent la chaleur vers les sources combustibles, la température dans la pièce est élevée (environ 700 – 950 °C) (Dong, 2013; Zhang, et al., 2022). Le feu pleinement développé est généralement caractérisé par un profil stable ou quasi-stationnaire. Dans la plupart des cas, on observe un palier sur la courbe du paramètre utilisé pour représenter le comportement du feu (perte de masse du combustible, température, puissance dégagée, etc.), qu'est maintenu tant qu'il y a un potentiel combustible disponible dans le local (Chaudhary, Gupta, Kumar, & Kumar, 2016; Rasoulipour, Delichatsios, Fleischmann, & Chen, 2020; Rasoulipour, Delichatsios, Fleischmann, & Chen, 2020).

4. Phase de décroissance

Elle se caractérise par la diminution du taux de combustion et de la chaleur dégagée, c'est-à-dire que le feu est contrôlé par le combustible disponible qui n'a pas encore brûlé. Une fois que ce combustible est épuisé, il va se produire l'extinction de l'incendie.

5. Phase d'extinction

Correspond à la fin du processus de combustion. La vitesse de combustion et le taux de dégagement de chaleur diminuent jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de flamme visible. L'extinction se produit par manque de combustible ou d'oxygène en cas d'incendie mécaniquement ventilé.

1.6.2. Phénomènes particuliers d'incendies en régime sous-ventilé

Dans le paragraphe 1.6.1, nous avons identifié deux régimes de combustion en fonction de la condition de ventilation (sur-ventilé et sous-ventilé). Lorsque le feu est très mal ventilé, l'incendie ne suivra pas la croissance classique (Figure 1.7). Donc on retrouve les quatre phénomènes du régime sous-ventilé qui peuvent se produire. Ces phénomènes, tel que la pulsation, le flash-over, le back-draft et la reprise lente du développement du feu, augmentent le risque d'incendie.

Phénomène de pulsation

Le phénomène de pulsation se manifeste par de fortes oscillations de la température dans le compartiment en feu, suite à une diminution de la puissance de feu due au manque d'oxygène (similaires à celles représentées sur la Figure 1.7 par la courbe c). Il peut se produire une poursuite de la dégradation des matériaux du fait des inerties thermiques des solides. Ce qui se traduira par l'accumulation de gaz imbrulés. Lorsque de l'air frais entre dans le compartiment, la combustion de gaz non brûlés peut reprendre, ce qui augmente à nouveau la puissance du feu et par conséquent la température et la pression. Par conséquent, l'entrée d'air par les ouvertures sera limitée. Le processus se répétera en suite en suivant le même schéma (Debray, Gobeau, & Waymel, 2007). Les pulsations dans la flamme sont induites par les forces de gravités et sont susceptibles d'influencer la hauteur de la flamme, le taux de perte de masse du combustible, la production des substances toxiques et la température (Chen & Lu, 2018; Lei, Chen, Xu, Jiao, & Zhang, 2021).

Chen et al. (Chen & Lu, 2018) ont constaté, lors d'un incendie de nappe de 0.14 m dans un compartiment de 1 m³, que la fréquence de pulsation de la flamme était de 4.1 Hz. La fréquence de pulsation a tendance à diminuer pendant la phase initiale de la combustion, puis reste stable pendant la phase de combustion stable.

Phénomène de flash-over

Le phénomène de flash-over (cf. la courbe d sur la Figure 1.7) se situe entre la phase de croissance et celui du feu pleinement développé. Le flash-over est donc le point où l'énergie thermique rayonnée par le feu et les gaz chauds accumulés sous le plafond sur les combustibles contenus dans le compartiment est si importante que tout s'enflamme et brûle (Graham, Makhviladze, & Roberts, 1995). Cela signifie l'implication totale des flammes dans le local. La transition (qui est généralement très rapide à cause de la chaleur intense) vers un incendie pleinement développé est appelée flash-over. Après un flash-over l'incendie est contrôlé par la ventilation (Rasoulipour, Delichatsios, Fleischmann, & Chen, 2020; Zhang, et al., 2022).

Selon Babrauskas (Babrauskas, 2003), l'événement du flash-over pourrait être considéré expérimentalement comme la chute de la couche de gaz chauds enflammés en dessous de la hauteur moyenne du local. La valeur moyenne nécessaire de l'énergie dégagée pour que le flash-over se produise dans un compartiment ayant les dimensions de la norme

ISO^b 9705 (L : 3.6 m \pm 0.05 m ; H : 2.4 m \pm 0.05 m ; W : 2.4 m \pm 0.05 m) est de \pm 10.7 MW. Zhang et al (Zhang, et al., 2022) ont trouvé que, pendant un incendie de combustible liquide, la température du compartiment au moment du flash-over varie entre 600 – 900 °C, et dans le cas de combustibles solides (bois), elle varie entre 500 et 700 °C.

Phénomène de back-draft

Un back-draft (cf. la courbe e sur la Figure 1.7) est un phénomène complexe qui se produit lors des incendies en milieu confiné et sous ventilé. Il peut se développer à partir de feux de combustibles ordinaires, de liquides inflammables ou de gaz qui s'appauvrissent en oxygène, ce qui génère un environnement riche en combustible. Si de l'air entre dans l'espace vicié, par exemple en ouvrant une porte ou en brisant une fenêtre, un flux gravitaire d'air plus frais entrera dans le compartiment, tandis que les gaz chauds riches en combustible sortent, formant un mélange inflammable. Ce mélange, au contact d'une source de chaleur, provoque une explosion ou une déflagration avec des caractéristiques d'apparition brusque (Gottuk, Peatross, Farley, & Williams, 1999).

Weng et al. (Weng & Fan, 2003) ont montré que le paramètre clé qui détermine l'apparition d'un back-draft est la fraction massique de combustible non brûlé. Lorsque la fraction massique de combustible non brûlé dans un compartiment dépasse une valeur critique de 9.8 % ou 9.3 % (Chen, Zhou, Liu, & Chen, 2011), le back-draft peut avoir lieu et former une boule de feu violente, si la fraction est supérieure à 15 % (Mao, Xi, Bai, Fan, & Ji, 2011). L'accumulation de ces produits de combustion incomplète dans le compartiment crée une condition extrêmement dangereuse et peut conduire à un événement catastrophique. Le phénomène du back-draft est donc dû aux processus suivants (Figure 1.8) : l'accumulation de combustible gazeux non brûlé, la propagation à l'intérieur d'un courant gravitationnel riche en oxygène, qui crée une région de mélange. Après l'allumage, l'ensemble de l'air et des fumées est rapidement mélangé et brûle rapidement, ce qui pousse le mélange enflammé à l'extérieur (Fleischmann & Chen, 2013). C'est-à-dire que pour qu'un back-draft ait lieu, il doit y avoir un changement dans la condition de ventilation.

Tsai et al. (Tsai & Chiu, 2013) ont trouvé que le back-draft provoque deux pics de température. Le premier pic se produit à environ 600 °C, avant l'ouverture soudaine d'une fenêtre ou d'une porte, ce qui entraînera l'addition d'une grande quantité d'air frais, suivie par

^b La norme ISO 9705 décrit le comportement du feu d'un produit dans des conditions de laboratoire contrôlées. La norme précise les méthodes d'évaluation de l'incendie, la source d'inflammation, les dimensions du compartiment.

une brusque augmentation de la température. En conséquence, le deuxième pic de température apparaît à environ 850 °C. Il a également été constaté que la température de l'incendie tend à diminuer lorsque la concentration d'oxygène est inférieure à environ 18 %, et qu'au moment où un back-draft a lieu, la concentration en oxygène dans le compartiment se situe entre 12 % à environ 14.3 %.

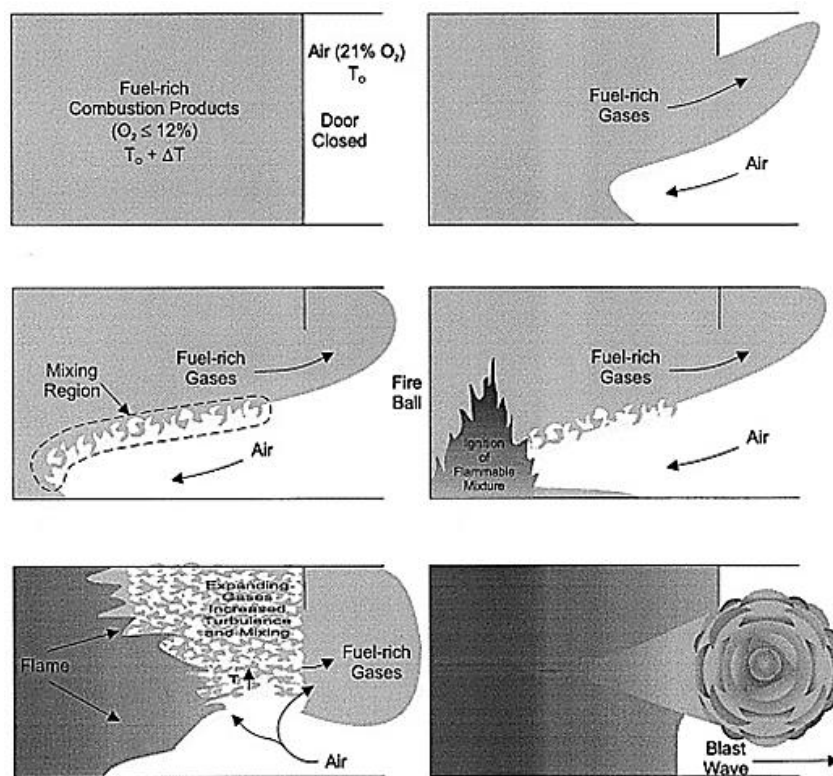


Figure 1.8 - Development d'un back-draft (Gottuk, Peatross, Farley, & Williams, 1999).

Donc, le phénomène de back-draft se manifeste par une déflagration rapide produite après l'introduction d'oxygène dans un compartiment rempli de gaz chauds riches en vapeurs combustibles non brûlées (Vondou, Abbe, Zaida, Mvogo, & Mouangue, 2021). Cette manifestation est liée à plusieurs facteurs tels que la fraction massique des gaz non brûlés libérés par l'incendie, la température des gaz chauds dans l'enceinte, les dimensions de la pièce, les caractéristiques du combustible et la vitesse du courant de gravité dans le compartiment.

Phénomène d'explosion des fumées

Il a été constaté que lors des incendies sous-ventilés dans des compartiments fermés, de grandes quantités de CO et de gaz de pyrolyse en excès sont libérées à cause du manque

d'oxygène. Une fois consommée la majeure partie d'oxygène disponible, le feu passe à une combustion lente ou fumante. À mesure que le feu continu, le compartiment atteindra un état presque stable avec une forte concentration de CO de combustibles non brûlés. Une petite quantité d'oxygène provenant des fuites pourrait alors produire une combustion rapide (explosion) des fumées. Exemple du phénomène d'explosion de fumée présenté sur la Figure 1.9. L'apparition d'une explosion des fumées est un phénomène imprévisible qui ne nécessite aucun changement dans la ventilation du compartiment, contrairement aux back-drafts (Fleischmann & Chen, 2013; Rasoulipour, Delichatsios, Fleischmann, & Chen, 2020).



Figure 1.9 - Explosion des fumées dans un incendie confiné (Fleischmann & Chen, 2013).

Reprise du développement du feu

Ce phénomène (représentée sur la Figure 1.7 par la courbe f) se caractérise par l'inflammation rapide des gaz imbrulés au contact de l'air. Cependant, le mélange de gaz doit être à une température supérieure à sa température d'auto-inflammation. Une inflammation pilote est également possible, par exemple, lorsqu'une surface chaude est présente. Donc, la reprise du développement du feu a lieu dans les mêmes conditions que le back-draft, par contre, lors de l'étape de mélange combustible/aire, un nuage explosif sans produire le back-draft (Debray, Gobeau, & Waymel, 2007).

1.6.3. Incendies en compartiment fermé avec ventilation naturelle

Bien que le dispositif expérimental de ce travail utilise un caisson mécaniquement ventilé, les incendies dans un compartiment naturellement ventilé sont intéressants car ils peuvent aider dans l'interprétation et la compréhension des feux mécaniquement ventilé. Entre 1948 à 1958, K. Kawagoe a mené des expériences à petite échelle dans des compartiments ventilés

naturellement afin d'étudier le comportement du feu dans un local. Les résultats expérimentaux ont permis de développer la formule de Kawagoe sur le taux de ventilation ou facteur de ventilation proportionnel à $A\sqrt{H}$. Où, A (m^2) correspond à la surface de l'ouverture de ventilation et H (m) à la hauteur (Thomas, 2004). Cette formule a été largement utilisée pour étudier l'influence de la ventilation sur le développement du feu dans les compartiments fermés avec ventilation naturelle. Takeda et al. (Takeda & Akita, 1981) ont montré un comportement instable du taux de combustion dans les régions où le facteur de ventilation ($A\sqrt{H}$) est inférieur à $0.009 m^{5/2}$. Néanmoins, au-delà de cette région ($A\sqrt{H} \approx 0.0305 m^{5/2}$), le taux de combustion a montré une augmentation constante. Sahu et al. (Sahu, Kumar, Jain, & Gupta, 2016) ont mené des expériences dans un compartiment de $64 m^3$ pour différents taux de ventilation ($A\sqrt{H}$ de 0.1414 à environ $2.828 m^{5/2}$), les résultats ont montré que les incendies dans les compartiments sont affectés par la condition de ventilation, ainsi par le retour de la chaleur à la surface du combustible. Faible taux de ventilation ($A\sqrt{H} \approx 0.1414$ à $0.566 m^{5/2}$) diminue la quantité d'oxygène disponible pour la combustion, ce qui entraîne une diminution du taux de perte de masse. En cas de taux de ventilation élevés ($A\sqrt{H} > 0.566 m^{5/2}$), il a été observé un taux de combustion et une puissance dégagée élevés, respectivement.

Utiskul et al. (Utiskul, et al., 2005) ont mené des expériences sur des incendies dans un compartiment à petite échelle ($40 \times 40 \times 40 cm^3$) ventilé naturellement. Ces auteurs ont étudié le comportement des feux de nappe d'heptane sous des régimes de ventilation limitée, les conditions d'extinction et l'influence de la concentration d'oxygène. Au cours des essais des phénomènes de flamme fantôme et des oscillations sont apparus. Le taux de perte de masse est une variable importante, car c'est un indicateur du couplage entre l'effet thermique (retour de chaleur à la surface du combustible) et l'effet de la viciation (la concentration d'oxygène autour de la flamme est inférieure à 21 %). Il a également été trouvé que l'extinction se produit lorsque la concentration d'oxygène est inférieure à environ 16 %. La concentration d'oxygène au moment de l'extinction diminue avec l'augmentation de la température dans la chambre.

Pearson et al. (Pearson, Most, & Drysdale, 2007) ont évalué le comportement d'un incendie dans une enceinte à échelle du laboratoire de $0.21 m^3$. Les mesures réalisées lors des essais comprennent la perte de masse du combustible, la température, la concentration des espèces chimiques et *Vélocimétrie par Imagerie des Particules* (PIV). La structure et le domaine de stabilité de la zone de réaction ont été identifiées. Les objectifs de cette recherche étaient de fournir une description de la structure de la flamme. Établir les limites entre les différents régimes de combustion et déterminer des mécanismes aérothermochimiques qui contrôlent le régime de combustion. Les résultats montrent que la zone de réaction se trouve

à l'interface horizontale entre les couches d'air chaud et d'air frais. Dans la couche supérieure, les forces de flottaison induisent un champ de vitesses de recirculation, dont la taille du vortex dépend de la hauteur du plafond de l'enceinte. La structure de la flamme a été interprétée comme une flamme triple avec un bord brillant de flamme pré-mélangée, qui se propage vers l'arrière du compartiment contre la direction du mouvement convectif naturel, et une flamme de diffusion flottante oblique dans son sillage, qui consomme la majeure partie du combustible.

Hwang et al. (Hwang, Lock, Bundy, Johnsson, & Ko, 2010) ont mis au point une étude expérimentale pour étudier les incendies d'heptane dans des conditions de feu sur-ventilé et sous-ventilé dans un compartiment à grande échelle ISO 9705 de 20.736 m³. Les résultats ont été exprimés en termes de la puissance dégagée par le feu, des distributions de températures et de la concentration des espèces chimiques mesurées localement sur la couche supérieure. Une comparaison des simulations numériques effectuée au moyen du logiciel *Fire Dynamics Simulator (FDS)* est également donnée. Il a été observé que le design de la source d'incendie (forme et dimension) peut entraîner de grandes fluctuations dans la puissance du feu et des instabilités dans le taux de combustion. Il a également été constaté que le taux de dégagement de chaleur augmente linéairement jusqu'à atteindre une période pseudo stationnaire jusqu'à la consommation du combustible suivie de l'extinction.

Chaudhary et al. (Chaudhary, Gupta, Kumar, & Kumar, 2016) ont conduit des expériences d'incendie dans un compartiment en briques de 64 m³ ventile naturellement. L'huile de jatropha a été utilisée comme source de combustion. Les résultats expérimentaux ont montré que le processus de combustion de l'huile de jatropha peut être divisé en quatre phases (Figure 1.10). La phase 1 correspond à l'ignition du feu. La phase 2 représente la croissance rapide du feu. La phase 3 est la combustion stable et la phase 4 est la diminution et l'extinction de l'incendie. De la Figure 1.10 il est possible conclure que la puissance du feu augment avec l'augmentation de taille du bac de combustible. Chaudhary et al. (Chaudhary, Gupta, Kumar, & Kumar, 2019) ont étudié les caractéristiques de la combustion du biodiesel de jatropha et de son mélange au diesel dans un feu de nappe. Les essais ont été réalisés dans le compartiment mentionné ci-dessus. Le diesel, l'huile jatropha méthyle ester (JME) et différents mélanges des deux ont été utilisés. B20-JME (concentration de biodiesel de 20 %), B50-JME (concentration de biodiesel de 50 %) et B80-JME (concentration de biodiesel de 80 %). Le taux de perte de masse, la puissance dégagée, les émissions de CO et la température au centre de la flamme ont été mesurées. Ils ont constaté que les mélanges B80-JME et B50-JME génèrent plus de chaleur que le JME à 100 % et le diesel. Si le taux de dégagement de chaleur est important, cela signifie que plus d'oxygène est consommé. Il a été conclu que

l'augmentation de la concentration de biodiesel réduit l'efficacité de la combustion, ce qui entraîne une augmentation de la concentration de monoxyde de carbone.

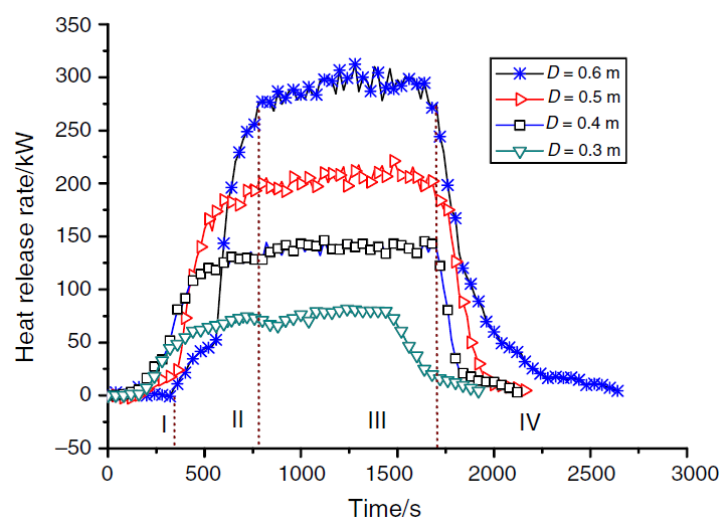


Figure 1.10 - Évolution de la puissance dégagée par le feu d'huile de jatropha. Identification des phases de l'incendie (Chaudhary, Gupta, Kumar, & Kumar, 2016).

Sahu et al. (Sahu, Jain, Gupta, & Kumar, 2019) ont étudié les effets de la nature du combustible sur les incendies naturellement ventilés. Différents types de combustibles liquides ont été utilisés, diesel, isopropanol et méthanol. En effet, la combustion du diesel peut générer une quantité importante de suies, et les molécules d'isopropanol et de méthanol contiennent des tomes d'oxygène. Ils ont mesuré la perte de masse du combustible, le développement de l'environnement thermique (en utilisant des thermocouples et des fluxmètres) à différentes positions à l'intérieur du compartiment, ainsi que la puissance de l'incendie, le rendement en CO et CO₂. Il a été trouvé que la perte de masse du diesel était plus élevée que celle de l'isopropanol et du méthanol. Les auteurs expliquent que cela est dû au fait que la perte de masse est proportionnelle au rapport entre la chaleur de combustion et la chaleur de vaporisation, qui est plus élevé pour le diesel. La variation de la puissance dégagée dépend des propriétés des combustibles, c'est-à-dire de la chaleur de combustion, du taux de vaporisation, vitesse de combustion, qui jouent un rôle très important dans la croissance du feu de compartiment. Les concentrations en CO du diesel ont été trouvées plus importantes par rapport aux feux d'isopropanol et méthanol. Par conséquent, le rendement en CO et CO₂ du diesel était plus élevé. Sous condition pauvre en combustible (sur-ventilé), le rendement de CO est plus élevé dans les incendies de combustibles contenant des aromatiques que dans les incendies de combustibles oxygénés (méthanol et isopropanol).

Kumar et al. (Kumar Tiwari, Gupta, Kumar, & Kumar Sharma, 2021) ont effectué des expériences dans un compartiment de 64 m³ ventilé naturellement. Les caractéristiques de combustion du diesel ont été évaluées. Ce combustible est utilisé dans la marine. Les paramètres analysés comprennent le taux de perte de masse, le rapport CO/CO₂, la richesse globale (GER), la hauteur de la flamme, la fréquence de pulsation de la flamme et le flux thermique total dans le compartiment pour différents diamètres du bac de combustible. Il a été trouvé que la perte de masse du combustible augmente en fonction de l'augmentation de la surface de la source d'incendie. La variation de la taille du bac (0.2 m à 1 m) augmente la température de la flamme. Par conséquent, le flux de chaleur augmente également. Il a aussi été observé que dans le cas du petit feu (petits bacs de combustible), la pulsation dans la flamme a été plus élevée. Sur la base des résultats de la richesse globale, les auteurs ont conclu que l'écart entre les données expérimentales et théoriques, diminue à mesure que la taille du bac augmente.

Wang et al. (Wang, et al., 2021) ont simulé des incendies de nappe dans un milieu bien confiné à l'aide d'une cabine de navire de 31.5 m³ qui représente un modèle réduit à l'échelle 1: 3 d'une cabine de navire réel. L'objectif principal de cette investigation a été de comparer le taux de perte de masse des différents types de combustibles dans un environnement sous oxygéné. C'est-à-dire un incendie avec un carburant léger (n-heptane) et un carburant lourd (diesel). Ils ont trouvé que le feu de n-heptane se développe en cinq étapes de combustion : croissance initiale, combustion stable, transition, ébullition, décroissance et extinction, tandis que le diesel n'a montré que trois étapes : croissance initiale, combustion stable et extinction. Les auteurs remarquent que le comportement d'ébullition n'a été observé que pour les bacs de combustible de taille supérieure à 30 cm. Il a été conclu que les combustibles légers ont un taux de perte de masse plus élevé.

De nombreux autres auteurs ont contribué à l'étude des incendies de compartiments confinés avec une ventilation naturelle et ont confirmé que la taille de l'enceinte, la taille du feu, le type de combustible, la température, la concentration d'oxygène peuvent affecter les processus de combustion de ces incendies. Conforme aux travaux décrits au section 1.5 et dans le paragraphe 1.6.3, les incendies de compartiments naturellement ventilés présentent un comportement ou tendance similaire aux incendies en milieu ouvert. En accord avec notre sujet d'études, on s'intéresse aux travaux expérimentaux qui caractérisent les phénomènes liés aux incendies en milieux confinés et ventilés mécaniquement, plus spécifiquement aux incendies sous-ventilés.

1.6.4. *Incendie dans un compartiment confiné avec une ventilation mécaniquement contrôlée*

Comme pour les feux ventilés naturellement, le confinement et le rôle de la ventilation mécanique ont deux effets importants susceptibles d'influencer la vitesse de combustion. Le premier consiste à modifier la composition chimique du gaz combustible (réduction de la concentration d'oxygène et viciation de l'air par les produits de combustion). Le second correspond à l'apparition d'un flux de chaleur induit en plus de celui de la flamme, en particulier lorsque le volume du compartiment est suffisamment faible par rapport au taux de dégagement de chaleur de l'incendie (Pretrel, Querre, & Forestier, 2005).

Lors d'un incendie de compartiment, le confinement peut produire différents phénomènes tels que des variations de pression importantes (Prétrel, Saux, & Audouin, 2012; Li, Liu, Zhang, Chen, & Wang, 2020), des régimes de combustion sous-ventilés et des situations de combustion instable (Prétrel, Bouaza, & Suard, 2021). Magnognou, et al (Magnognou, Garo, Coudour, & Wang, 2017) ont utilisé la richesse globale (GER) pour classer les régimes de combustion pendant les expériences. Régime bien ventilé ($GER < 0.7$), où la formation de CO est négligeable. Sous-ventilé ($0.7 \leq GER < 1.5$) et très sous-ventilé ($GER \geq 1.5$) avec une formation importante de gaz imbrûlés, de CO et d'hydrogène. Si la ventilation est suffisante, le feu peut se développer librement. Par contre, si la ventilation est inadéquate, la concentration d'oxygène peut devenir insuffisante, et une grande quantité de gaz imbrûlés est produite.

Le comportement d'un incendie confiné est influencé par différents facteurs, parmi lesquels la taille du compartiment, les matériaux de construction de l'enceinte (béton, acier, etc.), les dimensions de l'enceinte, le type de combustibles et les conditions de ventilation (naturel ou mécanique), l'intensité de la ventilation (taux de ventilation) et la position de l'admission d'air et de l'extraction des fumées (en bas et en haut de l'enceinte). Par la suite, nous allons analyser quelques travaux sur l'étude des incendies confinés ventilés mécaniquement, afin de comprendre ces facteurs et leurs influences sur le développement du feu.

Saux et al. (Saux, Pretrel, Lucchesi, & Guillou, 2008) ont fourni des informations sur le comportement du feu en fonction de la mesure de la perte de masse du combustible et de la concentration d'oxygène pour deux types des scénarios d'incendie. La première configuration consiste en un seul compartiment et la seconde en deux compartiments avec une porte ouverte entre les deux. Le combustible utilisé est le Tétra-Propylène d'Hydrogène (TPH), dont la composition chimique et les propriétés physiques sont similaires à celle du dodécane ($C_{12}H_{26}$).

Dans les deux configurations, il a été observé l'effet de soufflage vers la nappe. Le feu se développe en trois phases successives, une phase initiale et transitoire, une phase stationnaire et une phase d'extinction par manque d'oxygène dans des conditions de ventilation basses et par manque de combustible pour des conditions de ventilation élevées, c'est-à-dire que la ventilation était suffisante pour maintenir un niveau adéquat de la concentration d'oxygène pour la combustion. Il a également été constaté que plus le taux de renouvellement de l'air (taux de ventilation) est élevé, plus la perte de masse du combustible est élevée. La perte de masse varie linéairement en fonction de la concentration d'oxygène près de la source de l'incendie.

Melis et al. (Melis & Audouin, 2008) ont étudié les effets de l'environnement vicié sur le taux de dégagement de chaleur lors d'incendie dans différents compartiments. Deux compartiments mécaniquement ventilé à grande échelle (120 m³ et 400 m³). Le taux de dégagement de chaleur de l'incendie dans les compartiments, la position de l'admission d'air (basse et haute) a été étudiée. Le Tétra-Propylène d'Hydrogène et l'huile Mobil DTE heavy medium ont été utilisés comme combustibles. En ce qui concerne l'effet de la viciation (la flamme reçoit une concentration d'oxygène inférieure à 21 %) sur la durée du feu, les résultats ont montré deux comportements différents : (i) Dans des conditions sur-ventilées ($0.3 < GER < 1$), la vitesse de pyrolyse du combustible diminue, ce qui induit un incendie établi pendant une période plus longue par rapport à un incendie en atmosphère ouverte. (ii) Dans des conditions sous-ventilées ($1.73 < GER < 2.66$), le taux de pyrolyse est si faible qu'il est impossible de maintenir la combustion et l'extinction a lieu. Les auteurs ont appelé ce comportement comme « *phénomène d'extinction précoce* ». De plus, les résultats expérimentaux sur le changement de l'admission d'air ont montré que lorsque l'entrée d'air est en position haute (près du plafond), le compartiment se comporte comme un réacteur bien agité, avec un taux de perte d'environ 0.4 kg/s. Lorsque la position de l'entrée a été en basse (à proximité du sol), le taux de perte de masse et, par conséquent, la puissance dégagée par l'incendie étaient plus importantes par rapport à la position haute. La concentration d'oxygène dans le compartiment a montré une tendance à la stratification très similaire à celle des feux ventilés naturellement.

Lassus et al. (Lassus, et al., 2010) ont étudié l'influence de la ventilation sur le risque d'inflammation de gaz imbrûlés dans le système d'évacuation d'un feu d'heptane dans un compartiment mécaniquement ventilé de 8 m³. Le conduit d'admission a été situé dans la partie basse du compartiment. Différents diamètres de bac de combustible ainsi que différents taux de ventilation ont été utilisés. Pendant la phase initiale, le feu se développe librement et le c'est combustible qui contrôle le feu. Les résultats ont aussi montré qu'à faible taux de

ventilation (ou RH^c de renouvellement horaire), $RH \leq 3$ ACPH, le taux de dégagement de chaleur atteint un plateau similaire à celui d'un feu ouvert (pas d'effet de confinement). En revanche, lorsque le taux de ventilation augmente ($RH > 3$ ACPH), un effet de soufflage apparaît et les flammes deviennent plus inclinées. Il a été trouvé que le taux de dégagement de chaleur augmente avec le diamètre du bac. Ceci est dû au fait que le taux de vaporisation du combustible augmentant, les températures dans le compartiment et dans le système d'extraction sont plus importantes. Les incendies dans ce genre d'environnements produisent des rendements élevés de monoxyde de carbone et de suie à cause de l'admission d'air insuffisante pour entretenir la combustion. Il a été conclu que dans ces conditions il existe un risque important d'inflammation au niveau de l'extraction.

Lassus et al. (Lassus J. , et al., 2014) ont montré que la concentration de dioxyde de carbone dans les incendies d'heptane et de dodécane augmente linéairement lorsque la concentration d'oxygène diminue. Le taux de dégagement de chaleur dépend des conductions de ventilation dans le compartiment (suffisamment ventilés, sous-ventilés et très sous-ventilés). Les incendies suffisamment ventilés génèrent un dégagement de chaleur important similaire à celui des feux ouverts. Dans les incendies sous-ventilés, le dégagement de chaleur est plus faible que celle d'un feu ouvert et la production de monoxyde de carbone est proportionnelle à la concentration résiduelle d'oxygène, mesurée dans le conduit d'évacuation des fumées. En cas des incendies très sous-ventilés, le taux de dégagement de chaleur est faible la concentration de monoxyde de carbone augmente considérablement avec la diminution de la concentration d'oxygène dans le conduit d'évacuation. Des flammes fantômes peuvent se produire autour de la source de combustible et l'extinction a lieu par manque d'oxygène.

Lassus et al. (Lassus J. , et al., 2016) ont établi des relations empiriques qui permettent de déterminer la concentration du dioxyde de carbone (équation 1.10 et équation 1.11), et du monoxyde de carbone dans les fumées (équation 1.12), en fonction de la concentration d'oxygène dans la fumée lors d'incendies ventilés mécaniquement.

$$[CO_2] = -\frac{n_{CO_2}}{n_{O_2}} [O_2] + b \quad 1.10$$

$$[CO_2] = -\frac{n_{CO_2}}{n_{O_2}} [CMO_{CO}] + b \quad 1.11$$

$$[CO] = \frac{-c}{CMO} [O_2] + c \quad 1.12$$

^c RH (Renouvellement Horaire), défini comme le rapport entre le débit d'air entrant dans le compartiment avant l'ignition du feu par le volume du compartiment (Saux, Pretrel, Lucchesi, & Guillou, 2008).

où les coefficients b et c dépendent respectivement du type de combustible : b est égal à 13.9 pour l'heptane et 14.5 pour le dodécane ; c est égal à 1.96 pour l'heptane et 1.98 pour le dodécane. n_{CO_2} et n_{O_2} sont les moles de dioxyde de carbone et d'oxygène requis pour une réaction complète de 1 mole de combustible. L'équation 1.11 est utilisée lorsque la concentration en oxygène est inférieure au CMO du monoxyde de carbone (6.25 %), donc le monoxyde de carbone n'est plus oxydé en dioxyde de carbone.

Magnognou et al. (Magnognou, Garo, Coudour, & Wang, 2017) ont réalisé des expériences similaires à celles de Lassus et al. (Lassus, et al., 2010), mais en ajoutant des feux dans des conditions très sous-ventilées. Il a été constaté que le développement du feu à l'intérieur du compartiment dépend du type de combustible (heptane ou dodécane), de la taille du bac et de la ventilation. Les incendies très sous-ventilés ont montré de fortes oscillations au cours du temps à cause de l'extinction et de l'inflammation des gaz non brûlés près de la surface du liquide de manière aléatoire. Dans les cas des incendies d'heptane, le taux de dégagement de chaleur atteint rapidement un plateau avec une valeur d'environ 55 kW. En revanche, les incendies de dodécane ont montré une augmentation progressive de la puissance dégagée, jusqu'à environ 70 kW. Les auteurs ont trouvé que, lors d'incendies très sous-ventilés, la concentration d'oxygène résiduel mesurée dans le conduit d'extraction était d'environ 10 % et que le combustible vaporisé ne contribuait pas complètement à la puissance dégagée. Une fois que la fumée s'est propagée dans l'enceinte, l'air vicié affecte le taux de dégagement de la chaleur dû au manque d'oxygène causé par l'accumulation de gaz non brûlés. Le fait d'augmenter la quantité d'oxygène qui entre dans le compartiment augmente la puissance dégagée et le risque d'inflammation de gaz combustibles non brûlés peut se produire dans le système d'extraction.

Pour comprendre le comportement du feu dans un compartiment ventilé mécaniquement, Matsuyama et al. (Matsuyama, Okinaga, Hattori, & Suto, 2016) ont mené des expériences dans un compartiment de 20.736 m³. L'effet de la position de l'admission d'air (en bas et en haut) de l'enceinte a été étudié. Lors d'incendies d'éthanol, il a été mesuré la température, la concentration de gaz (O₂, CO₂ et CO) et la perte de masse du combustible. Il a été trouvé que le taux de combustion dans le cas de l'entrée d'air en bas était instable et la durée de l'incendie inférieure à celle de l'entrée d'air en haut. Il a également été constaté que la surface de combustion décroît avec la quantité d'oxygène qui alimente la source de feu. Il est possible de réduire le temps d'extinction du feu ou changer le régime de ventilation (bien ventilé à sous ventilé pour une même condition de ventilation) en changeant la position de l'entrée d'air. D'autres études ont également montré que lorsque l'entrée d'air est en position

en haute, le compartiment où se produit l'incendie pourrait se comporter comme un réacteur bien agité (Melis & Audouin, 2008; Beji & Merci, 2016; Prétrel, Bouaza, & Suard, 2021).

Loo et al. (Loo, Coppalle, Yon, & Aîné, 2016) ont étudié les incendies mécaniquement ventilés dans un compartiment à échelle réduite de 1 m³. Des mesures telles que les taux de perte de masse du combustible, la concentration des espèces chimiques, la concentration massique de particule de suies, les distributions de taille de suies, et les températures dans le compartiment ont été réalisées. L'heptane et le dodécane ont été brûlés à différents taux de ventilation (5 et 8 ACPH). Il a été trouvé que pour un taux de dégagement de chaleur spécifique et un taux ventilation donnée, les incendies se sont développés en deux phases. La première phase correspond à la croissance de la source d'incendie, ce qui entraîne la diminution de la concentration d'oxygène et une augmentation de la concentration de monoxyde de carbone. La deuxième phase correspond à un incendie développé dans un milieu sous-ventilé. Il a également été observé des variations lentes de la composition des fumées et du taux de perte de masse. Finalement, il a été conclu que les incendies mal ventilés dans des espaces confinés génèrent des rendements en monoxyde de carbone très élevés et de suies à cause d'une admission d'air insuffisante pour entretenir la combustion.

Manescau et al. (Manescau, Wang, Coudour, & Garo, 2019) ont étudié l'influence de l'isolation thermique du compartiment du feu ventilé mécaniquement. Le risque d'inflammation dans le conduit d'évacuation des gaz de combustion a été évalué. Deux scénarios d'incendie ont été analysés, avec ou sans isolement de l'enceinte. Différents taux de ventilation (3 et 5 ACPH) ont été analysés pour des incendies de dodécane. Il a été trouvé que l'étanchéité thermique de l'enceinte conduit à une croissance plus rapide du feu, ce qui implique un pic plus important dans le taux de dégagement de chaleur. En conséquence, l'incendie a été considéré comme plus dangereux en termes de risque d'inflammation au niveau de l'extraction. Néanmoins, la concentration du mélange gazeux doit être à la limite inférieure d'inflammabilité (LII). Les auteurs ont également trouvé qu'avec l'étanchéité thermique (isolement), le feu devient très sous-ventilé, en comparaison au feu sans isolement, et le combustible vaporisé ne contribue pas complètement au dégagement de chaleur à cause de la formation significative de gaz imbrûlés (CO et le H₂). Il a été conclu que l'inflammation de gaz non brûlés dans le voisinage du système d'échappement est plus probable lorsque le compartiment est bien fermé. Si la puissance émise par le feu est supérieure à 1.2 MW, l'inflammation de gaz imbrûlés peut également se produire dans un système d'échappement.

Acherar et al. (Acherar, Wang, Garo, & Coudour, 2020) ont également étudié l'effet de changer la position de l'entrée d'air (en haut et en bas) à un compartiment ventilé mécaniquement de 8 m³. Le comportement du feu de nappa d'heptane a été analysé pour

différents taux de ventilation (1 à 4 ACPH) et différents diamètres du bac de combustible. Lorsque l'admission d'air est placée dans la partie basse du compartiment, il a été observé que les incendies se caractérisent par une croissance rapide du feu. Cette configuration a été identifiée comme générant des incendies très dangereux en raison du taux élevé de dégagement de chaleur. La température de la couche de fumée chaude a été d'environ 350 °C, ce qui indique que le retour de la chaleur à la surface du combustible liquide a également une importance. En revanche, lorsque l'entrée d'air est placée dans la partie haute du compartiment, la température de la couche supérieure (couche de fumée chaude) diminue. En effet, il a été observé que la température de cette couche est inférieure à 350 °C. Ce phénomène de refroidissement de la couche de fumée chaude entraîne à son tour une diminution du retour de chaleur vers la surface du combustible liquide. En conséquence, une réduction de la perte de masse du combustible. De plus, l'extinction de la flamme se produit très tôt par rapport à la configuration avec une entrée d'air placée dans la partie basse. Il a été conclu que la position de l'entrée d'air n'influe de manière significative sur la dynamique du feu que dans des conditions sous-ventilées.

Manescau et al. (Manescau, et al., 2020) ont étudié les conséquences et le risque liés à l'inflammation des gaz non brûlés dans le conduit d'évacuation des fumées. Il a été analysé l'impact de la fermeture de l'entrée d'air pendant les incendies confinés. Les incendies ont été effectués avec de l'heptane et du dodécane, dans des bacs des différents diamètres (0.3 et 0.4 m), et à des taux de ventilation variés (3 et 5 ACPH). Il a été constaté que pendant les incendies d'heptane, la puissance dégagée diminue très rapidement et les flammes s'éteignent encore plus rapidement lorsque le conduit d'admission d'air est fermé. En revanche, les feux de dodécane ont été établis plus longtemps lorsque l'entrée le conduit d'admission d'air était fermée. Les auteurs considèrent que ce comportement dans les incendies d'heptane peut être attribué à leur faible point d'ébullition par rapport à celui du dodécane. De plus, il a été constaté que la fermeture du conduit d'admission d'air n'a pas eu un effet significatif sur plusieurs paramètres, tels que le taux de dégagement thermique, la pression, la température des gaz et la concentration d'oxygène dans le conduit d'évacuation. Cependant, il convient de noter qu'en cas d'incendie prolongé, il existe un risque significatif d'inflammation de gaz non brûlés à l'intérieur du conduit d'évacuation, en particulier dans le cas du dodécane.

Prétrel et al. (Prétrel, Bouaza, & Suard, 2021) ont été observé expérimentalement que la réduction du taux de renouvellement d'air contribue à une réduction de la concentration en oxygène à l'intérieur de l'enceinte (près de la source du feu). Par conséquent la perte de masse du combustible et la température du gaz dans la couche de fumée chaude diminue. Les auteurs ont également réalisé une comparaison entre des expériences à petite échelle et à grande

échelle. Les expériences ont été menées dans des compartiments confinés mécaniquement ventilés, de 1.875 m³ et 120 m³. Le dodécane et du Tétra-Propylène Hydrogéné (HTP) ont été utilisés comme source de combustion. Les résultats ont montré le même comportement dans les deux scénarios. Il a également été trouvé que le taux de combustion diminue avec le taux de ventilation. Il a été observé que dans des conditions sous-ventilées, il existe une relation linéaire entre la perte de masse du combustible et la concentration en oxygène autour de la flamme (Figure 1.11). Cette tendance a été observée dans les deux compartiments. Le taux de combustion est donc influencé par la viciation du milieu.

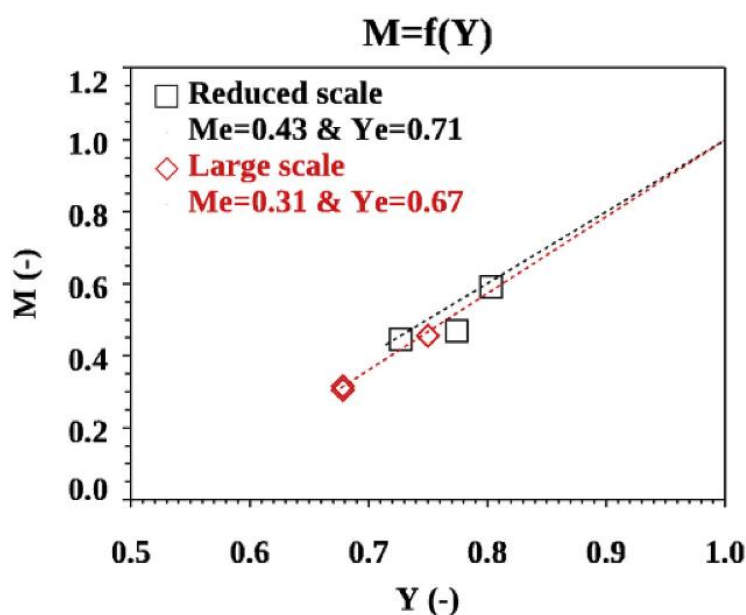


Figure 1.11 - Relation entre la perte de masse du combustible (sans dimension) en fonction de la concentration d'oxygène (fraction massique sans dimension) pendant le période stationnaire de l'incendie (Prétrel, Bouaza, & Suard, 2021).

Afin de mieux connaître les incendies dans les compartiments ventilés mécaniquement dans des conditions de combustion sous-ventilé, Prétrel et al. (Prétrel, Chaaraoui, Lafdal, & Suard, 2022) ont mené des expériences dans un compartiment de 1.875 m³ au moyen du feu de nappe de dodécane. Deux paramètres ont été considérés : la variation du diamètre du bac du combustible et la variation du taux de ventilation configuré avant l'allumage. Il a été trouvé que, pour un diamètre donné, la réduction du taux ventilation entraîne une diminution des niveaux de concentration d'oxygène et du taux de combustion dans le régime stationnaire. À haut taux de ventilation, la température au moment de l'extinction est très élevée. Des comportements similaires ont été trouvés en fonction du diamètre du bac (0.11 et 0.2 m). Toutefois, pour un diamètre du bac plus élevé, d'environ 0.24 m, un comportement oscillatoire à basse fréquence du taux de combustion a été observé. L'effet de la concentration d'oxygène

a montré qu'une diminution de la concentration en oxygène au niveau de la flamme entraîne une diminution du taux de combustion.

En conclusion, la position de l'admission d'air influence significativement la dynamique du feu uniquement dans des conditions sous-ventilées. Le fait d'abaisser le conduit d'admission d'air améliore le mélange combustible/air dans le compartiment, ce qui entraîne l'augmentation de la perte de masse du combustible et donc la puissance dégagée par le feu.

1.7. Puissance dégagée lors d'un incendie

Le taux de dégagement de chaleur d'un incendie ou HRR « *Heat Release Rate dans la terminologie anglo-saxonne* » est le paramètre le plus important pour l'évaluation des risques d'incendie. Il exprime la quantité de chaleur libérée par la combustion par unité de temps (Babrauskas, 2003). Il s'agit également d'un paramètre essentiel qui caractérise et donne une idée des conséquences d'un incendie (Biteau, et al., 2008; Coutin, Plumecocq, Melis, & Audouin, 2012). Les méthodes de calcul du HRR peuvent être classées en trois catégories en fonctions des paramètres pertinents de l'incendie (Figure 1.12). La méthode théorique, basée sur la perte de masse de combustible (Pretrel, Saux, & Audouin, 2013). La méthode chimique, basée sur les produits impliqués dans la réaction de combustion et l'utilisation de principes calorimétriques (Thornton, 1917). La méthode thermique, basée sur la quantité de chaleur transférée de l'incendie à l'environnement (Tsuchiya Y. , 1982).

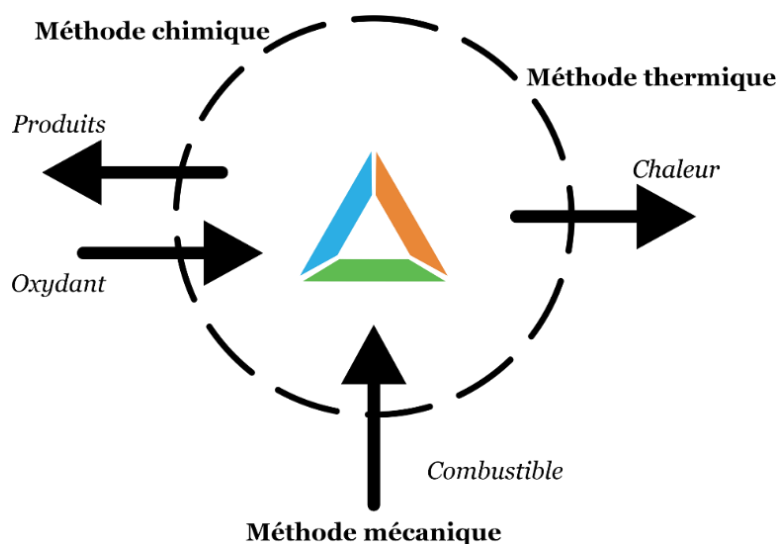


Figure 1.12 - Schéma des différentes méthodes de calcul du HRR du feu.

Méthode théorique

Le HRR est le résultat du produit entre le taux de pyrolyse du combustible et son enthalpie de combustion (équation 1.13). Cette méthode à privilégier en cas d'incendie à l'air libre ou lorsque les conditions de combustion sont relativement proches d'une bonne ventilation. En effet son application n'est appropriée que si une mesure fiable du taux de perte de masse est possible et si les propriétés du combustible sont connues (ce qui est généralement le cas pour les gaz, les hydrocarbures ou les solides simples).

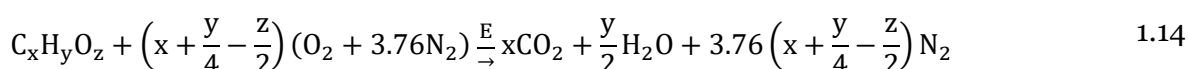
$$\dot{Q} = \dot{m}_{\text{Combustible}} \Delta H_{\text{Combustion}} \quad 1.13$$

où, \dot{Q} est l'énergie dégagée par le feu en kW, $\dot{m}_{\text{Combustible}}$ est la perte de masse du combustible en g/s et $\Delta H_{\text{Combustion}}$ est l'enthalpie de combustion du combustible en kJ/g.

Méthode chimique

Pour déterminer la puissance émise (HRR) à partir de cette méthode, il est nécessaire de mesurer la concentration des espèces, ainsi que décrire le bilan massique d'espèces chimiques. Cette méthode est considérée comme très précise (Biteau, et al., 2008). La méthode chimique se subdivise en deux catégories : la Consommation d'oxygène (OC) (Thornton, 1917; Parker, 1984; Janssens, 1991; Biteau, et al., 2008) et la Génération de Dioxyde de Carbone (GDC) (Biteau, et al., 2008; Pretrel, Saux, & Audouin, 2013). La consommation d'oxygène est plus fréquemment utilisée que la méthode de la génération de dioxyde de carbone (Brohez, Delvosalle, Marlair, & Tewarson, 2000; Chow & Han, 2011).

L'hypothèse pour l'estimation du HRR est basée sur la réaction stœchiométrique de la combustion complète pour un matériau combustible (équation 1.14), dans laquelle chaque mole de combustible brûlé génère une certaine quantité d'énergie, sur la calorimétrie des espèces (enthalpies de combustion de chaque espèce) et la connaissance de l'évolution de la concentration des gaz de combustion.



Consommation d'oxygène (OC)

Le concept de consommation d'oxygène a été proposé par Thornton (Thornton, 1917). Cette loi sous-entend qu'il suffit de mesurer l'oxygène consommé dans un système de combustion

pour déterminer la chaleur nette libérée. D'après ses travaux, le taux de dégagement de chaleur peut être calculé à partir de l'équation suivante :

$$\dot{q}_{OC} = E(\dot{m}^0_{O_2} - \dot{m}_{O_2}) \quad 1.15$$

L'équation 1.15 a été corrigée pour ajouter le concept de combustion incomplète (en ajoutant les concentrations de CO et de suie), selon la loi de Hess (Parker, 1984; Janssens, 1991; Brohez, Delvosalle, Marlair, & Tewarson, 2000). La puissance libérée est alors donnée par :

$$\dot{q}_{OC} = E(\dot{m}^0_{O_2} - \dot{m}_{O_2}) - (E_{CO} - E)\Delta\dot{m}^{CO}_{O_2} - (E_S - E)\Delta\dot{m}^S_{O_2} \quad 1.16$$

où,

- \dot{q}_{OC} : Puissance dégagée par la consommation d'oxygène (kW)
- E : Énergie libérée par unité de masse d' O_2 consommée par la combustion complète. Constante générique 13.1 MJ/kg d' O_2
- E_{CO} : Dégagement d'énergie par unité de masse d' O_2 consommée pour la combustion de CO à CO_2 . Environ 17.7 MJ/kg par kg d' O_2
- E_S : Dégagement d'énergie par unité de masse d' O_2 consommée pour la combustion de suie (C) à CO_2 . Environ 12.3 MJ/kg par kg d' O_2
- $\Delta\dot{m}^{CO}_{O_2}$: Débit massique d' O_2 nécessaire pour oxyder le CO en CO_2 (kg/s)
- $\Delta\dot{m}^S_{O_2}$: Débit massique d' O_2 nécessaire pour oxyder la suie en CO_2 (kg/s)
- $\dot{m}^0_{O_2}$: Débit massique d' O_2 dans l'air entrant (kg/s)
- \dot{m}_{O_2} : Débit massique d' O_2 dans le conduit d'extraction (kg/s)

Chow et al. (Chow & Han, 2011) ont montré le mécanisme détaillé de la transformation de l'équation 1.16 en l'équation 1.17. Ils ont conclu que la méthode chimique, plus précisément la technique de consommation d'oxygène, se réduit à une équation générale qui peut être appliquée à tous les scénarios d'incendie, y compris dans les environnements de combustion fermée et ouverte.

$$\dot{q}_{OC} = \left[E\phi - \left(\frac{1-\phi}{2} \right) \left((E_{CO} - E) \frac{X_{CO}}{X_{O_2}} + 2(E_S - E) \frac{X_S}{X_{O_2}} \right) \right] \frac{\dot{m}_a MW_{O_2}}{MW_a} X^0_{O_2} (1 - X^0_{H_2O}) \quad 1.17$$

$$\phi = \frac{\dot{m}^0_{O_2} - \dot{m}_{O_2}}{\dot{m}^0_{O_2}} = \frac{X^0_{O_2}(1 - X_{CO_2} - X_{CO}) - X_{O_2}(1 - X^0_{CO_2} - X^0_{CO})}{X^0_{O_2}(1 - X_{O_2} - X_{CO_2} - X_{CO})} \quad 1.18$$

Le facteur de diminution d'oxygène (ϕ) a été développé pour trouver une relation entre le débit massique d'air entrant (\dot{m}_a) et le débit de gaz à la sortie (\dot{m}_e). Le facteur de diminution d'oxygène est le rapport entre l'oxygène consommé par la combustion et la quantité d'oxygène entrant. Ce facteur est également exprimé en termes de fraction molaire de chaque espèce (voir l'équation ci-dessous) (Janssens, 1991). La masse molaire du gaz à la sortie est supposée égale à la masse molaire de l'air ($MW_{\text{gaz}} \approx MW_a$).

$$\frac{\dot{m}_a}{MW_a} = \frac{\dot{m}_e}{M_e} \frac{(1 - X_{\text{H}_2\text{O}} - X_{\text{Suie}})(1 - X_{\text{O}_2} - X_{\text{CO}_2} - X_{\text{CO}})}{(1 - X^0_{\text{H}_2\text{O}} - X^0_{\text{Suie}})(1 - X^0_{\text{O}_2} - X^0_{\text{CO}_2} - X^0_{\text{CO}})} \quad 1.19$$

Génération de dioxyde de carbone (GDC)

L'autre principe pour déterminer la puissance de l'incendie par la méthode chimique est basé sur la production de dioxyde de carbone et de monoxyde de carbone au lieu de la consommation d'oxygène. Tewarson (Tewarson A. , 2002) a montré que pour de nombreux composés organiques gazeux, liquides et solides, le taux de dégagement de chaleur par unité de masse de CO_2 produit est relativement constant.

$$q_{\text{GDC}} = E_{\text{CO}_2}(\dot{m}_{\text{CO}_2} - \dot{m}^0_{\text{CO}_2}) + E_{\text{CO}}\dot{m}_{\text{CO}} \quad 1.20$$

Au fil des ans, les conditions de ventilation rencontrées dans les incendies sont devenues plus complexes. Des phénomènes comme la combustion sous-ventilée sont devenus de plus en plus courants, cela a entraîné l'adaptation des équations 1.15 (Consommation d'oxygène) et 1.20 (Génération de dioxyde de carbone) aux besoins existants.

$$q_{\text{GDC}} = \frac{\dot{m}_e}{MW_e} (1 - X_{\text{H}_2\text{O}})(E_{\text{CO}_2}X_{\text{CO}_2}MW_{\text{CO}_2} + E_{\text{CO}}X_{\text{CO}}MW_{\text{CO}}) - \frac{\dot{m}_a M_{\text{CO}_2}}{MW_a} X^0_{\text{CO}_2} E_{\text{CO}_2} (1 - X^0_{\text{H}_2\text{O}}) \quad 1.21$$

où,

- \dot{q}_{GDC} : Puissance dégagée par la génération de dioxyde de carbone (kW)
- Φ : Facteur de diminution d'oxygène (-)
- X^0_i : Fraction molaire de l'espèce i dans l'air frais entrant ($i = \text{O}_2, \text{CO}_2, \text{CO}, \text{H}_2\text{O}$)
- X_i : Fraction molaire de l'espèce i à la sortie (dans l'extraction)
- \dot{m}_a : Débit massique de l'air entrant (kg/s)
- \dot{m}_e : Débit massique du gaz à la sortie (kg/s)
- MW_{CO_2} : Masse molaire du CO_2 (kg/mol)

- MW_{CO} : Masse molaire du CO (kg/mol)
 MW_{O_2} : Masse molaire de l'O₂ (kg/mol)
 MW_e : Masse molaire du gaz à la sortie, supposé égal à l'air (kg/mol), $MW_a = MW_e$
 a : Air entrant
 e : Gaz de sortie

Méthode thermique

La méthode thermique se concentre sur la conservation de l'énergie dans un volume précis (incendie dans un compartiment). Le taux de dégagement de chaleur \dot{q}_f (équation 1.22) est égal à la somme de l'énergie qui chauffe les gaz à l'intérieur du compartiment ou stocké dans les gaz (\dot{q}_g), de l'énergie transférée vers l'environnement aux surfaces du compartiment par convection et rayonnement ($\dot{q}_c + \dot{q}_r$) et de la chaleur perdue par les ouvertures (\dot{q}_l) (Hamins, Johnsson, Donnelly, & Maranghides, 2008; Coutin, Plumecocq, Melis, & Audouin, 2012; Kim, Lee, & Hamins, 2019).

$$\dot{q}_f = \dot{q}_g + \dot{q}_c + \dot{q}_r + \dot{q}_l \quad 1.22$$

La puissance utilisée pour chauffer les gaz dans le volume du compartiment, désignée ici par \dot{q}_g , est liée à la dérivée temporelle de la variation d'enthalpie des gaz (équation 1.23). Il s'agit de la somme des changements d'enthalpie dans les couches de fumée produites lors d'un incendie de compartiment fermé, couche froide (inférieure, $i = 1$) et couche chaude (supérieure, $i = 2$) (Hamins, Johnsson, Donnelly, & Maranghides, 2008). Le terme de convection (\dot{q}_c) est déterminé par l'équation 1.24. Dans le cadre de cette étude, la convection naturelle a été prise en compte, il a été utilisé une constante λ d'environ 15 Wm⁻²K⁻¹. Par conséquent, les parois à l'intérieur n'ont pas été considérées. Le terme de rayonnement est déterminé par l'équation 1.25. les parois du compartiment ont été considérée comme un corps noir, du fait de la suie accumulées sur les parois ($\varepsilon = 1$).

Les différents termes de l'équation 1.22 se calculent de la manière suivante :

$$\dot{q}_g \cong \frac{d}{dt} \sum_{i=1}^2 (\rho_i V_i C_p \Delta T_i), i = 1 \text{ ou } 2 \quad 1.23$$

$$\dot{q}_c = \lambda A (T_p - T_o) \quad 1.24$$

$$\dot{q}_r = \varepsilon \sigma A (T_f^4 - T_p^4) \quad 1.25$$

$$\dot{q}_l \cong -\dot{q}_e + \dot{q}_s + \dot{q}_{\text{fuite}} \cong -\dot{m}_e C_p \Delta T_e + \dot{m}_s C_p \Delta T_s + \sum_i (\rho_i V_i A_i C_p \Delta T_i) \quad 1.26$$

où,

- ρ_i : Masse volumique du gaz de la couche inférieure ($i = 1$) ou supérieure ($i = 2$)
- \dot{q}_{fuite} : Perte de chaleur par des fuites dans le compartiment (kW)
- V_i : Volume (m^3)
- C_p : Capacité calorifique du gaz, prise comme celle de l'air ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
- ΔT_i : Variation de la température par rapport à la température ambiante (K)
- λ : Coefficient de convection thermique ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)
- T_p : Température à la paroi (K)
- T_f : Température de fumée (K)
- T_o : Température ambiante (K)
- ε : Émissivité de la paroi du compartiment (considérée comme un corps noir, du fait de la suie accumulées sur les parois, $\varepsilon = 1$)
- σ : Constante de Stefan–Boltzmann ($5.6703 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$)
- \dot{q}_e et \dot{q}_s : Perte de chaleur par l'entrée d'air et la sortie de gaz (kW)
- \dot{m}_e et \dot{m}_s : Débit massique à l'entrée et sortie (kg/s)

Dans de nombreux incendies en compartiments confinés, le terme \dot{q}_{fuite} de l'équation 1.26 peut être considéré comme négligeable. Dans ce travail, le compartiment est bien isolé, ce qui implique que les pertes de chaleur dues aux fuites ont été considérées négligeables. Par conséquent, lors du calcul de la puissance, le terme $\dot{q}_{\text{fuite}} = 0$.

1.8. Émissions polluantes lors des incendies sous-ventilés

Les incendies dans des compartiments fermés avec ventilation naturelle ou mécanique avec un régime de combustion sous-ventilé ont des rendements importants de monoxyde de carbone et de particules de carbone et de suie. Les espèces produites dans la flamme dépendent essentiellement des propriétés thermochimiques du gaz combustible, des caractéristiques de l'oxydant, de la stœchiométrie des gaz présents dans la couche supérieure (couche chaude) et de la température de celle-ci (Zukoski, Morehart, Kubota, & Toner, 1991).

1.8.1. Formation de Monoxyde de Carbone

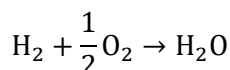
Le monoxyde de carbone (CO) est produit lors d'une combustion incomplète d'un hydrocarbure. Il est un indicateur de la qualité de la combustion et est la cause la plus importante des décès par incendie. Selon Gottuk et al. (Gottuk D. T., Roby, Peatross, & Beyler, 1992), le CO est un produit intermédiaire qui dépend plus de chimie des éléments que de la composition du combustible. Cela permet de déterminer les produits de combustion complète.

Le mécanisme le plus simple de la combustion des hydrocarbures est la réaction globale stœchiométrique. Le mécanisme considère que le processus d'oxydation produit directement du CO₂ et de l'H₂O. Malheureusement, ce mécanisme n'explique pas les caractéristiques, ni les propriétés de l'oxydation des hydrocarbures, la formation des hydrocarbures intermédiaires et du CO. Hautman et al. (Hautman, Dryer, Schug, & Glassman, 1981) ont proposé un mécanisme quasi-global de quatre étapes qui permet d'expliquer l'oxydation d'un hydrocarbure à haute température. Le mécanisme Hautman permet de connaître l'origine de la formation du CO, mais pas les conditions dans lesquelles il est produit. Donc de nombreuses études cinétiques ont été réalisées pour comprendre et caractériser la formation du CO dans les compartiments. La description du processus d'oxydation consiste donc en un mécanisme en quatre étapes qui sépare l'oxydation fortement exothermique du CO en CO₂ de l'oxydation moins exothermique de l'hydrocarbure à CO.

La première étape du mécanisme de Hautman est la décomposition thermique de l'hydrocarbure en un composé plus simple et en hydrogène (équation 1.27). C₂H₄ représente une classe d'intermédiaires oléfiniques, principalement éthène et propène. La formation de CO a lieu dans la deuxième étape (équation 1.28), suite à la première oxydation d'éthène. Les étapes suivantes du mécanisme sont l'oxydation du CO en CO₂ (équation 1.29) et de l'hydrogène en H₂O (équation 1.30). Selon Gottuk et al. (Gottuk, Roby, & Beyler, 1995), la formation de CO augmente à la suite de la première oxydation des hydrocarbures. Ensuite, lorsque la concentration de C₂H₄ diminue, l'O₂ restante est utilisée pour la conversion du CO en CO₂. Celle-ci est une réaction qui se développe dans un intervalle de température élevée (500 – 2000 K).

Mécanisme de Hautman pour la formation du monoxyde de carbone :





1.30

Sur la base de ce mécanisme, nous allons fournir une compréhension qualitative des facteurs qui peuvent influencer la production du CO pendant les incendies de compartiment. La production de CO dans un compartiment mécaniquement ventilé n'a pas été souvent étudiée, nous allons donc analyser certaines études sous hotte (incendie ouvert) ou sur des compartiments ventilés naturellement.

Beyler (Beyler C. L., 1986) a observé la formation du monoxyde de carbone lors de tests sous hottes et équipé d'un système d'extraction forcé (Figure 1.13). Il a montré que la formation du CO dépend de la structure chimique du matériau combustible (

Tableau 1.3). La plus faible concentration de CO a été observée dans le cas du toluène. L'auteur attribue ce résultat à sa stabilité thermique. Les hydrocarbures oxygénés produisent des quantités plus importantes de monoxyde de carbone que les hydrocarbures et beaucoup plus que les hydrocarbures aromatiques dans des conditions de riche en combustible ($\text{GER} \approx 1.7$). Il a également été constaté que la production de CO est plus importante avec des conditions riches en combustible.

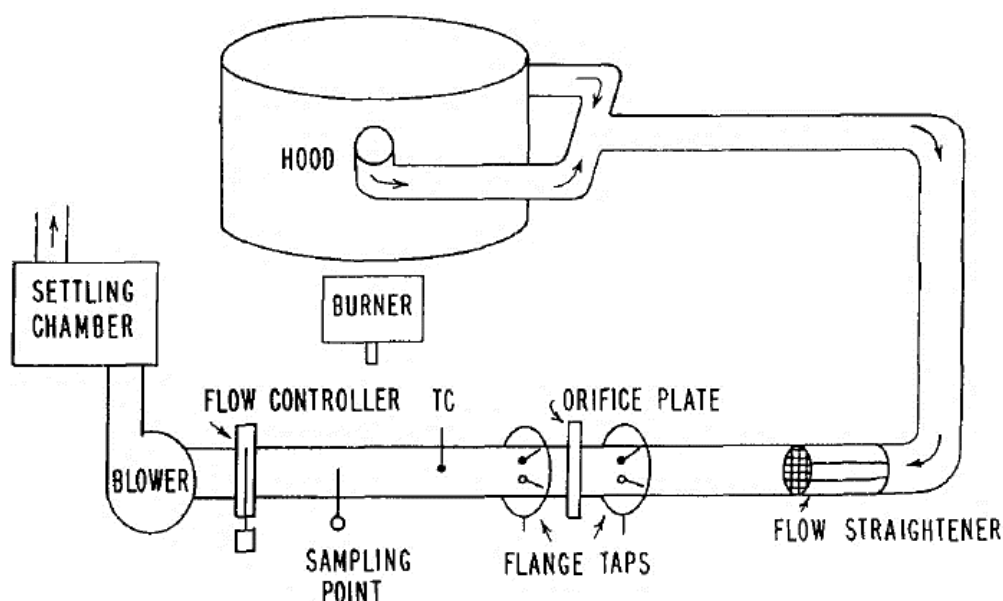


Figure 1.13 - Schéma de la hotte et du système d'évacuation utilisés par Beyler pour étudier la formation de produits de combustion des incendies en milieu à deux couches (Beyler C. L., 1986). Figure récupérée de (Pitts, 1995).

Tableau 1.3 - Résultats de Beyler pour la formation de CO dans des conditions de combustion riche (Beyler C. L., 1986).

Combustibles	Formule	CO (%)	Rendement en CO (g/g)
Propane	C_3H_8	1.8	0.23
Propène	C_3H_6	1.6	0.20
Hexane	C_6H_{14}	1.6	0.20
Toluène	C_7H_8	0.7	0.11
Méthanol	CH_3OH	4.8	0.24
Éthanol	C_2H_5OH	3.6	0.22
Isopropanol	C_3H_7OH	2.4	0.17
Acétone	C_3H_6O	4.4	0.30
Polyéthylène	$-CH_2-$	1.7	0.18
PMMA	$-C_5H_7O_2-$	3.0	0.19
Bois de pin	$C_{0.95}H_{2.4}O$	3.2	0.14

Zukoski et al. (Zukoski, Morehart, Kubota, & Toner, 1991) ont étudié la production d'espèces chimiques lors des incendies de gaz naturel. Le dispositif expérimental décrit dans la Figure 1.14 a été utilisé. Il a été observé que les espèces chimiques produites dans la flamme dépendent principalement de la stœchiométrie du gaz présent dans la couche de fumée chaude (couche supérieure). La température de la couche chaude a une faible influence, et est indépendant du rapport combustible/air qui entre à la couche supérieure à travers le panache. Ils ont également constaté que les espèces présentes dans les produits de combustion ne dépendent pas du temps de séjour du gaz dans la hotte. Les auteurs suggèrent que certaines des réactions chimiques dans les flammes de gaz naturel ont été quenché (interrompus) à cause de l'entraînement de gaz viciés à des températures inférieures à 900 K.

Mulholland et al. (Mulholland, Janssens, Yusa, Twilley, & Babrauskas, 1991) ont exploré les effets de la viciation de l'oxygène sur rendement des produits de la combustion. Un cône calorimétrique dans une enceinte (Figure 1.15) a été développé. Le méthane, propane, poly-méthyl-méthacrylate (PMMA) et acrylonitrile-butadiène-styrène (ABS), polyéthylène et bois ont été utilisés comme source de combustion. Dans cette recherche, la condition de viciation a été obtenue en ajoutant de l'azote ou du CO_2 au courant d'air entrant, c'est-à-dire avec une dilution dans la couche inférieure. Il a été trouvé que le rendement en CO du propane était supérieur à celui du méthane. Il a également été trouvé que lorsque la concentration

d'oxygène diminue de 21 % à environ 14 %, le rendement en CO augmente considérablement. Cette augmentation du rendement en CO a été constaté pour tous les types de combustibles, qu'ils soient gazeux ou solides.

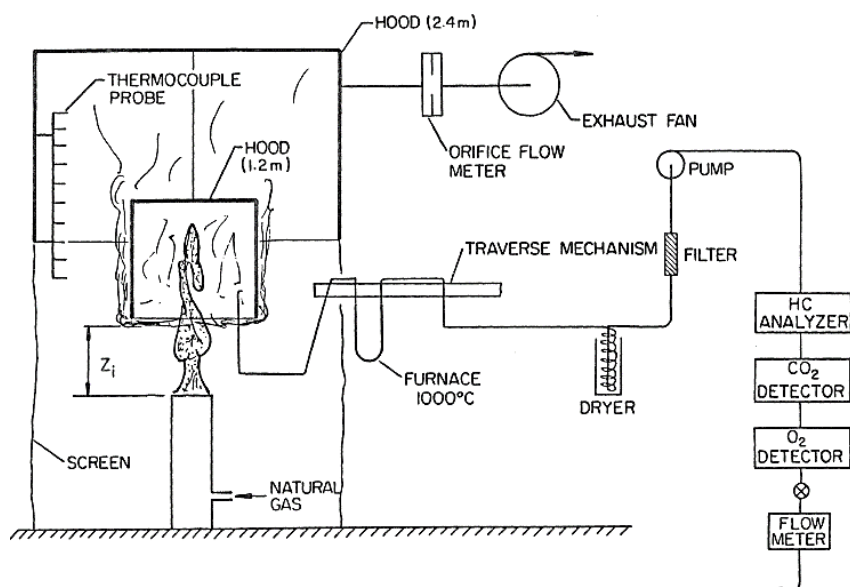


Figure 1.14 - Schéma du dispositif expérimental de la hotte utilisés par Zukoski (Zukoski, Morehart, Kubota, & Toner, 1991) pour étudier la production d'espèces chimiques dans des incendies gaz naturel à deux couches. Figure récupérée de (Cetegen, Zukoski, & Kubota, 1984).

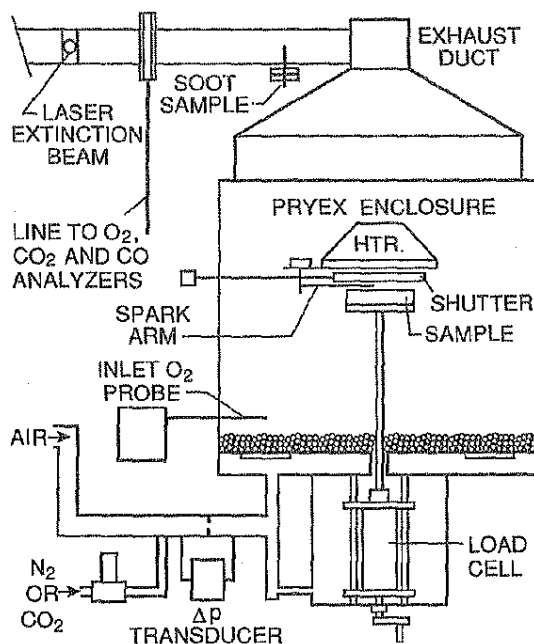


Figure 1.15 - Schéma du dispositif expérimental développé par Mulholland et al (Mulholland, Janssens, Yusa, Twilley, & Babrauskas, 1991).

Morehart et al. (Morehart, Zukoski, & Kubota, 1992) ont utilisé le dispositif décrit ci-dessous (Figure 1.16). Ils ont montré que la formation de CO lors des incendies dans des conditions réduites en oxygène et près de la limite d'inflammabilité, est peu affectée par la présence de l'air vicié, à des niveaux suffisamment élevés pour provoquer l'extinction de la combustion elle-même. Dans ce contexte, il a été conclu que les effets de la viciation de l'air sur la génération de CO dans les incendies de compartiments près de l'extinction sont minimales. Au point qu'il pourrait être considéré comme négligeable. Lors de ces expériences, il convient de noter que de l'air a été introduit dans la couche de gaz chaud (couche supérieure).

Il convient également de remarquer qu'ajouter de l'air à la couche de fumée chaude diminue la température. Par conséquent, la réaction chimique impliquant le CO est réduite (notion de quenching). Selon le mécanisme ci-dessus (mécanisme de Hautman), le CO est le premier produit de l'oxydation d'un hydrocarbure par rapport au CO_2 , donc le quenching de la réaction chimique (équation 1.29) peut entraîner une augmentation de la concentration de CO au lieu du CO_2 (Pitts, 1995).

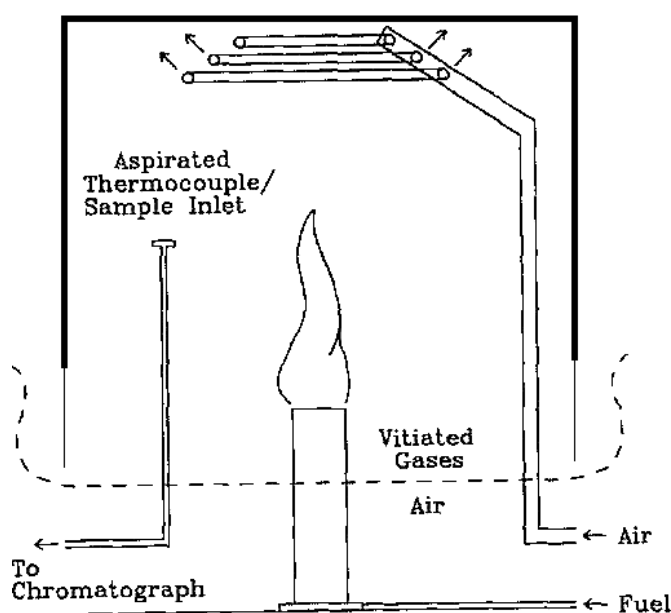


Figure 1.16 - Schéma de la hotte utilisés par Morehart pour étudier la production des espèces chimiques dans des incendies proches de la limite d'inflammabilité (Morehart, Zukoski, & Kubota, 1992).

Le concept de richesse globale (cf. équation 1.9) et la température de la couche de fumée chaude ont été largement utilisés pour expliquer la formation du CO dans des environnements différents (hotte et compartiments). Gottuk et al. (Gottuk D. T., Roby,

Peatross, & Beyler, 1992) ont développé des expériences d'incendie dans un compartiment ventilé naturellement. Différents types de combustibles ont été utilisés, hexane, PMMA, épicea et polyuréthane flexible. Les incendies se sont développés dans des conditions pauvres en combustible ($GER < 1$). La température de la couche de fumée chaude a été trouvée supérieure à 875 K. Ils ont observé des rendements en CO relativement faibles et des rendements en CO_2 plus élevés de par rapport aux expériences menées dans des hottes, dans les mêmes conditions (type de combustible and GER). Si la température de la couche de fumée chaude est inférieure à la température indiquée ci-dessus (environ 875 K), il est peu probable que la conversion du CO en CO_2 se produise, ce qui entraîne des niveaux plus élevés de produits de combustion incomplets et de CO. Il a également été observé que la formation du CO dépend beaucoup de la dynamique des flux du compartiment. C'est-à-dire du rapport entre le taux de combustion du carburant et le taux d'entraînement de l'air (GER), de la température de couche supérieure et, à un degré moins important, du type de combustible.

Gottuk et al. (Gottuk, Roby, & Beyler, 1995) ont étudié le rôle de la température sur la formation de CO lors des incendies dans un compartiment. Il a été observé que les incendies dans des conditions sous-ventilés, la concentration de CO augmente rapidement au fil du temps. À mesure que la richesse globale et la température augmentent, il a été observé que la production de CO augmente également. Dans des conditions sous-ventilées, deux mécanismes affectent la formation de CO (l'oxydation du CO et des hydrocarbures). L'augmentation de la température au-dessus de 900 K consomme le CO en accélérant la conversion du CO à CO_2 . Cependant, avec l'augmentation de la richesse globale, l'oxydation incomplète des hydrocarbures non brûlés augmente la production de CO. L'oxydation des hydrocarbures est beaucoup plus rapide que l'oxydation du CO. Les niveaux nets de CO augmentent avec la richesse globale et, à mesure que les concentrations d'hydrocarbures non brûlés augmentent. Il a donc conclu que les températures élevées de la couche chaude affectent la production de CO. Une couche de fumée a été considérée comme non réactive, si une augmentation de CO inférieure à 1 % s'est produite. Sur la base de ce critère, la couche de fumée supérieure d'un feu de compartiment peut être considérée comme non réactive à une température d'environ 800 K ou moins pour des temps de séjour inférieurs à 15 s, si la température est d'environ 750 K pour des temps inférieurs à 92 s, et si la température est d'environ 700 K pour des temps inférieurs à 760 s. Donc, si la température de la couche supérieure est inférieure à 800 K, cela indique que la couche est chimiquement non réactive.

La Figure 1.17 montre une comparaison entre les données expérimentales de Beyler (Beyler C. L., 1986), lors d'un incendie d'hexane en hotte (cf. courbe 1b) et les données expérimentales de Gottuk (Gottuk D. T., Roby, Peatross, & Beyler, 1992), pendant un incendie

dans un compartiment (cf. courbe 1a) avec le même type de combustible. La température de la couche supérieure obtenue dans l'expérience de Beyler était d'environ 650 K, tandis que celles de Gottuk d'environ 900 K. À partir de cette figure, il est possible de faire les observations suivantes : (i) dans les deux expériences, pour $\Phi_g < 0.5$, le rendement en CO est faible, environ 0.01 g/g. (ii) dans l'intervalle de $0.5 < \Phi_g < 1.0$, des rendements en CO plus élevés sont observés dans la hotte de Beyler que dans le compartiment de Gottuk. Donc, à basse température et dans de conditions pauvres de combustible, le rendement en CO est plus élevé. (iii) Pour $\Phi_g > 1.5$, le rendement du CO dans les deux cas semble être constante, en dépit des données limitées de Beyler. Dans ce contexte, il est possible de supposer que le rendement de CO dans les incendies sous-ventilés (condition riche en carburant) augmente avec l'augmentation de la température de la couche de fumée. Des travaux de Beyler et de Gottuk et al., deux corrélations ont été proposées, à savoir les équations 1.31 et 1.32. Ces corrélations permettent de déterminer le rendement en CO lorsque la richesse globale est connue.

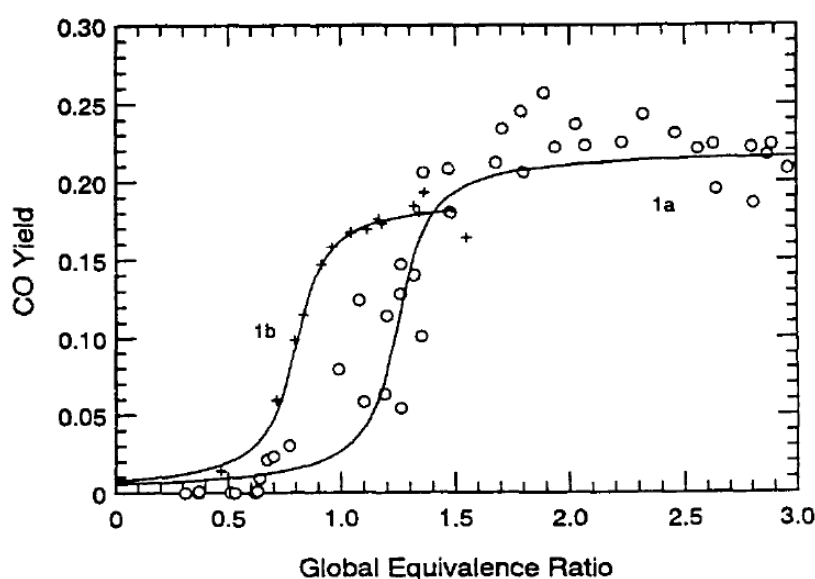


Figure 1.17 - Rendement du CO en fonction du GER pendant des incendies d'hexane. Comparaison entre les données expérimentales dans un compartiment de Gottuk (courbe 1a) et les données expérimentales en hotte de Beyler (courbe 1b). Figure récupérée de (Gottuk, Roby, & Beyler, 1995).

$$Y_{CO} = (0.22/180) \tan^{-1}[10\Phi_g - 1.25] + 0.11 \quad \text{Correlation de Gottuk (1a)} \quad 1.31$$

$$Y_{CO} = (0.19/180) \tan^{-1}[10\Phi_g - 0.8] + 0.095 \quad \text{Correlation de Beyler (1b)} \quad 1.32$$

Pitts (Pitts, 1995) fournit un résumé complet des études sur la formation de CO des incendies dans des compartiments et hottes. Selon leur recherche, le concept du GER est inapproprié pour être appliqué dans les conditions suivantes : (i) incendie ayant $GER > 0.5$, pour un intervalle de température d'environ $700 < T < 900$ K dans la couche chaude. Dans cette situation, la génération du CO dépend de la température dans cette zone et du temps de séjour. (ii) températures de feu > 900 K pour lesquelles l'oxygène (air) est directement introduit dans une couche supérieure riche, toute quantité d'oxygène qui atteint la couche supérieure réagit directement avec les gaz riches et produit surtout du CO par rapport au CO_2 .

Selon les différentes études sur la formation de CO dans un incendie soit en hotte ou dans un compartiment (tous deux ventilés naturellement), quatre variables qui affectant la formation CO ont été observées : la richesse globale, la température de la couche chaude, le temps de séjour et, dans une moindre mesure, le nature du combustible.

1.8.2. Formation de particules de suie

Les particules de suie sont des particules carbonées générées lors de la combustion incomplète ou de la pyrolyse d'hydrocarbures. La présence de suies dans les flammes provoque des radiations, et donc la luminosité et la couleur jaune des flammes.

La formation de suie est directement liée à la formation des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP^d), qui représentent une variable clé (Bockhorn, 1994). Au cours de la formation de suie, divers processus chimiques et physiques interviennent, entraînant la transformation des molécules d'hydrocarbures en particules de suie (transition de la phase gazeuse à une phase solide). Ces processus comprennent la nucléation, la croissance de surface, la coagulation, l'agglomération et oxydation (Kennedy, 1997; Mansurov, 2005).

La Figure 1.18 montre le mécanisme de la formation de suies dans un milieu homogène (flamme pré-mélangée), depuis un hydrocarbure jusqu'à la formation de HAP et de suie. Bien que la flamme d'un incendie soit une flamme de diffusion (flamme non pré-mélangée), les étapes présentées dans la Figure 1.18 se produisent également dans la zone de combustion de ce type d'incendie (Lahaye, 1990). Le processus commence par la combustion de l'hydrocarbure en présence du comburant (oxygène ou air). Les fameux précurseurs de suie, CO_2 , CO, H_2 , H_2O et d'autres espèces de petite taille (C_2 jusqu'à C_6) sont formés. Les molécules créées entrent en collision et réagissent entre elles, ce qui entraîne la croissance des HAPs par

^d HAP, Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques.

nucléation. Cette étape est également représentée par la transition entre la phase gazeuse et la phase solide. Elle est caractérisée par la formation des premières espèces aromatiques ou nucléi. Les espèces aromatiques se développent grâce à l'addition d'autres espèces aromatiques et de petit alkyle, qui forment des hydrocarbures aromatiques polycycliques plus grands ou HAP (Krestinin, 2000; Mansurov, 2005).

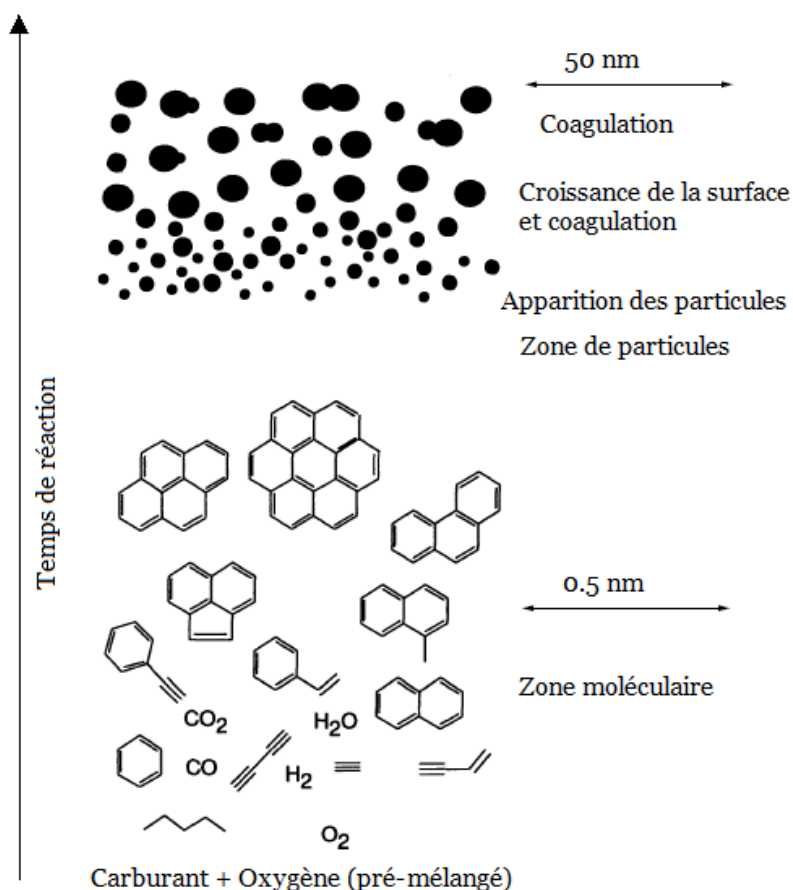


Figure 1.18 - Formation de particules de suies à partir d'un mélange combustible et comburant (Bockhorn, 1994).

Ensuite les nucléi, particules de petit diamètre de l'ordre du nanomètre et de masse d'environ 1000 uma (unité de masse atomique), commencent à augmenter de volume. Ce processus est la croissance en surface des HAPs. Ce processus de croissance de surface permet aux particules de suie de devenir plus grandes et plus complexes. Au cours de cette étape, les espèces gazeuses réagissent à la surface des nucléi, donnant lieu à des espèces solides, cycliques hautement hydrogénées et réactives (HAPs, acétylène, poly-acétylène, benzène, etc.). Les espèces solides se condensent alors par réaction de coagulation, ce qui favorise l'augmentation du diamètre des particules produites. Les particules de diamètre initial d'environ 0.5 à 1.0 nm ont maintenant un diamètre d'environ 10 nm ou plus et sont de forme

quasi sphérique (Thomson & Mitra, 2018; Wang & Chung, 2019). La croissance de la surface peut être représentée par la réaction suivante :



La coagulation des HAPs par condensation et l'agglomération des particules, permettent également la croissance rapide des particules de suie, formant des agrégats plus volumineux. À mesure que les particules continuent à évoluer, elles entrent en collision et forment des agglomérats faiblement liés par des particules primaires quasi-sphériques. La structure des particules semble être plus organisée. Les particules augmentent considérablement en taille, leur masse volumique augmente, et leur réactivité de surface peut également changer (Michelsen, et al., 2020).

L'oxydation, étape qui permet de brûler les particules de suie, se produit principalement dans les mélanges non prémélangés après addition de gaz qui contient de l'oxygène (dans les zones peu réactives de la flamme) (Mansurov, 2005). L'oxydation permet la combustion partielle des agrégats, ce qui peut conduire à une réduction de la taille des particules et à la formation de composés gazeux. Deux espèces différentes sont impliquées dans l'oxydation : l'oxygène et le radical OH et conduit à la diminution de la taille des particules (Yuen, et al., 2017).

Il faut rappeler que le processus de formation de suie ne se réalise qu'en milieu riche en combustible et à haute température ($T > 1400$ K). De plus, à chaque étape de la croissance des molécules, des réactions d'oxydation interviennent avec les espèces OH et O_2 . En général, il est considéré que le CO et la suie sont en compétition pour les radicaux libres, en particulier l'OH et l'O. Cela signifie que leur formation et leur émission dépendent de la disponibilité des radicaux libres (Glassman, 1989; Puri & Santoro, 1991). Un mécanisme global utilisé pour représenter cette compétition est présenté ci-dessous :



où, C_n représente une particule de suie avec n atomes de carbone. Cette représentation est une bonne approximation pour décrire la suie qui s'échappe d'une flamme lorsque le rapport C/H de la particule est élevé ($\cong 8$).

Des études antérieures ont examiné la production de fumée/suie ainsi que les caractéristiques des particules émises par des flammes pré-mélangées, des flammes de diffusion et des incendies ouverts. Cependant, il y a un manque d'investigations sur la production de suie lors d'incendies confinés dans des compartiments ventilés mécaniquement. Par conséquent, on va fournir une analyse qualitative de certains facteurs qui influent sur la production de suie, comme cela a été fait pour le monoxyde de carbone. Tsuchiya et Mathieu (Tsuchiya & Mathieu, 1991) ont mené une expérience sur de contreplaqué de bois dans une atmosphère pauvre en oxygène. Ils ont constaté que la diminution de la concentration de d'O_2 entraîne une diminution du dégagement total de fumée. Un fort dégagement de fumée correspond à un faible dégagement de CO. Par conséquent, le dégagement de fumée et le dégagement CO sont opposés, lorsque le CO augmente, la fumée (ou suie) diminue.

Léonard et al. (Léonard, Mulholland, Puri, & Santoro, 1994) ont mené des expériences dans un brûleur de type Burke-Schumann afin d'étudier le rendement en CO et en fumée (suie) pour des flammes de diffusion laminaire dans des conditions sous-ventilées. Le méthane (CH_4) et l'éthane (C_2H_4) ont été utilisés comme sources de combustion. En ce qui concerne le rendement en fumée (suie), il a été trouvé qu'il atteint le maximum pour une richesse globale (GER) d'environ 1, et qu'il diminue lorsque le GER augmente. De plus, il a été constaté que le rendement en fumée de l'éthène était cinq fois plus élevé que celui du méthane. Cette recherche met en évidence les variations du rendement en fumée en fonction des conditions de combustion et le type de combustible. Ces observations fournissent ainsi des informations essentielles pour mieux comprendre les caractéristiques de la combustion et de la formation des émissions toxiques.

Barakat et al. (Barakat, et al., 1998) ont analysé les émissions de fumées générées par différents combustibles, tels que le fioul domestique, l'huile UNIVIS J13, l'huile Mobil DTE 24, l'huile Mobil medium et l'huile SHC 120. Ces combustibles ont été sélectionnés en raison de leur potentiel d'utilisation à grande échelle dans les centrales nucléaires. Les chercheurs ont constaté que ces combustibles ont une forte tendance à générer des particules de suie lors des incendies. Tewarson (Tewarson A. , 2008) a examiné les émissions de fumées provenant d'incendies de différentes tailles et de divers types de combustibles, PMMA, bois, polychlorure de vinyle chloré, PVC, nylon, dans des conditions complètement ventilées. Les résultats ont révélé que les émissions de fumée sont influencées par la taille de l'incendie, qui peut être représenté par le taux de dégagement de chaleur, ainsi que par la chimie de la combustion, qui est gouvernée par la nature générique du combustible.

1.9. Conclusions

Cet état de l'art non-exhaustif des études expérimentales des incendies développés en atmosphères libres et en espaces confinés soit ventilés naturellement ou mécaniquement, montrent que les incendies suivent un schéma constitué de différentes phases (ignition, croissance, feu pleinement développé, décroissance et extinction). La combustion des matériaux dans différents scénarios a été largement explorée. Par exemple, les incendies à l'air libre, dans des hottes, dans des compartiments ventilés naturellement (à petite échelle et à grande échelle) ou ventilés mécaniquement, sur-ventilés ou bien sous-ventilés. Mais il existe peu d'informations sur les émissions des fumées polluantes (par exemple le monoxyde de carbone et la suie) dans le cas des compartiments ventilés mécaniquement avec des conditions sous-ventilés. La production de CO dans les incendies dans les bâtiments a été reconnue comme la principale cause de décès.

Il a été constaté que des niveaux élevés de CO existent lors des incendies dans les enceintes sous-ventilées. Un mécanisme responsable de la formation de CO qui a été identifié dans des expériences sous hotte est l'addition d'air dans la couche de fumée chaude (zone riche en produits combustibles), ce qui quench la réaction chimique, et peut entraîner une augmentation de la concentration de CO au lieu du CO₂. Le concept de richesse globale peut également être utilisé pour comprendre ou prédire la formation de CO lors d'un incendie, mais l'influence de la température n'est pas négligeable.

La présente étude a donc pour objectif principal d'analyser, à l'échelle du laboratoire, les incendies dans un compartiment ventilé mécaniquement, pour fournir plus d'informations, ainsi que des données expérimentales sur les comportements, les phénomènes, et les émissions des polluants (CO et suie). Cela permettra ensuite de mieux les maîtriser en cas d'accident dans une installation réelle. Grâce à une meilleure connaissance des comportements et des émissions des polluants, les professionnels et les autorités responsables de la sécurité pourront prendre des mesures préventives plus efficaces et élaborer des stratégies d'intervention appropriées en cas d'accident. Cela peut inclure l'amélioration des systèmes de ventilation, l'optimisation des procédures d'évacuation, l'adoption de mesures de prévention des incendies plus strictes et la formation du personnel sur les bonnes pratiques en matière de sécurité incendie.

Chapitre 2

Matériels et méthodes

2.1. Introduction

Ce chapitre montre en détail le montage expérimental qui a été utilisé pour développer ce travail de thèse, ainsi que les méthodes de mesure, les modes d'utilisation et les spécifications relatives de chaque appareil. En effet, les combustibles pour produire les incendies ainsi que les dispositifs pour qualifier les particules sont ensuite présentés. La dernière section du chapitre porte sur les différentes configurations étudiées sur les plans d'expérience mis en œuvre.

2.2. Dispositif expérimental

Ce sous-chapitre montre la chambre de combustion choisie pour le développement de cette thèse. Cette chambre consiste en un compartiment cubique en acier inoxydable à échelle réduite, hermétiquement fermé. Le choix de cette enceinte est justifié par le fait que, pour certaines activités industrielles, il est nécessaire de disposer de locaux confinés dont la ventilation est contrôlée mécaniquement. Par exemple, des installations qui générant des polluants gazeux ou des aérosols toxiques. Ces installations créant des problématiques particulières en cas d'incendie.

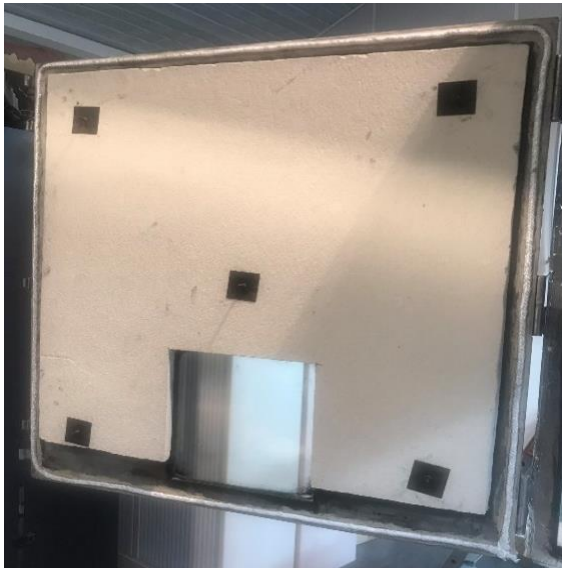
2.2.1. *Chambre de combustion*

La chambre de combustion consiste en un compartiment cubique fermé, ventilé mécaniquement de 1 m³ en acier inoxydable (Figure 2.1). Le dispositif a été construit au sein du Laboratoire CORIA, et a été utilisé dans les travaux de Coppalle et al. (Coppalle, Loo, & Aîné, 2016; Loo, Coppalle, Yon, & Aîné, 2016). Ces publications décrivent le montage expérimental. La paroi frontale du compartiment est ajustable et fonctionne comme une porte (Figure 2.1 – a). Au bas de cette porte, une fenêtre en verre céramique (30 cm x 30 cm) permet de visualiser le processus de combustion et de remplissage des fumées. Pour assurer l'étanchéité du compartiment, les murs internes ont été isolés avec des panneaux de fibres céramiques, de plus le sol a été recouvert de fibres céramiques et de briques, permettant ainsi la résistance à haute température (Figure 2.1 – b).

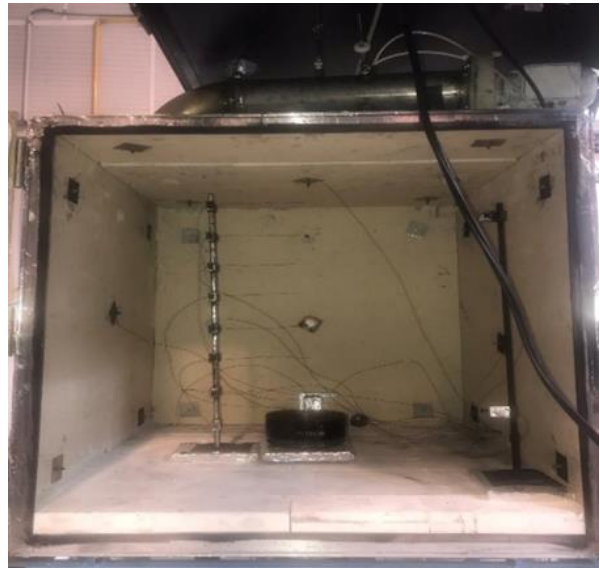
Ce dispositif permet la simulation d'incendies mécaniquement ventilés à échelle réduite. Le compartiment est équipé d'un système de ventilation externe constitué d'un conduit d'admission d'air et d'un conduit d'évacuation de gaz du côté opposé. L'air entre dans le compartiment par un conduit circulaire de 8 cm de diamètre interne et 47 cm de longueur. Ce conduit est équipé d'un diaphragme IRIS-80 situé sur la paroi droite dans la partie

inférieure à 13 cm du sol du compartiment. Le conduit d'évacuation est placé en partie haute du compartiment sur le toit, a un diamètre interne de 12.5 cm et 75 cm de longueur (voir Figure 2.2). Les fumées sont évacuées à l'aide d'un ventilateur électrique qui crée une pression négative dans le compartiment et extrait.

Les mesures effectuées au cours les incendies comprennent : le taux de perte de masse du combustible, la pression, la température, les concentrations en espèces chimique (oxygène, dioxyde de carbone et le monoxyde de carbone) dans le compartiment et le conduit d'évacuation, émission de particules de suie, granulométrie des particules de suie pour des différents taux de ventilation (ou renouvellement horaire, RH) et taille des bacs de combustible. Des concentrations de gaz ont été mesurées au moyen d'un analyseur de gaz Testo 350 et de deux analyseurs de gaz ECOM EN2.



a)



b)

Figure 2.1 - Chambre de combustion ventilée mécaniquement du laboratoire CORIA. (a) la porte avec le hublot ; (b) l'intérieur.

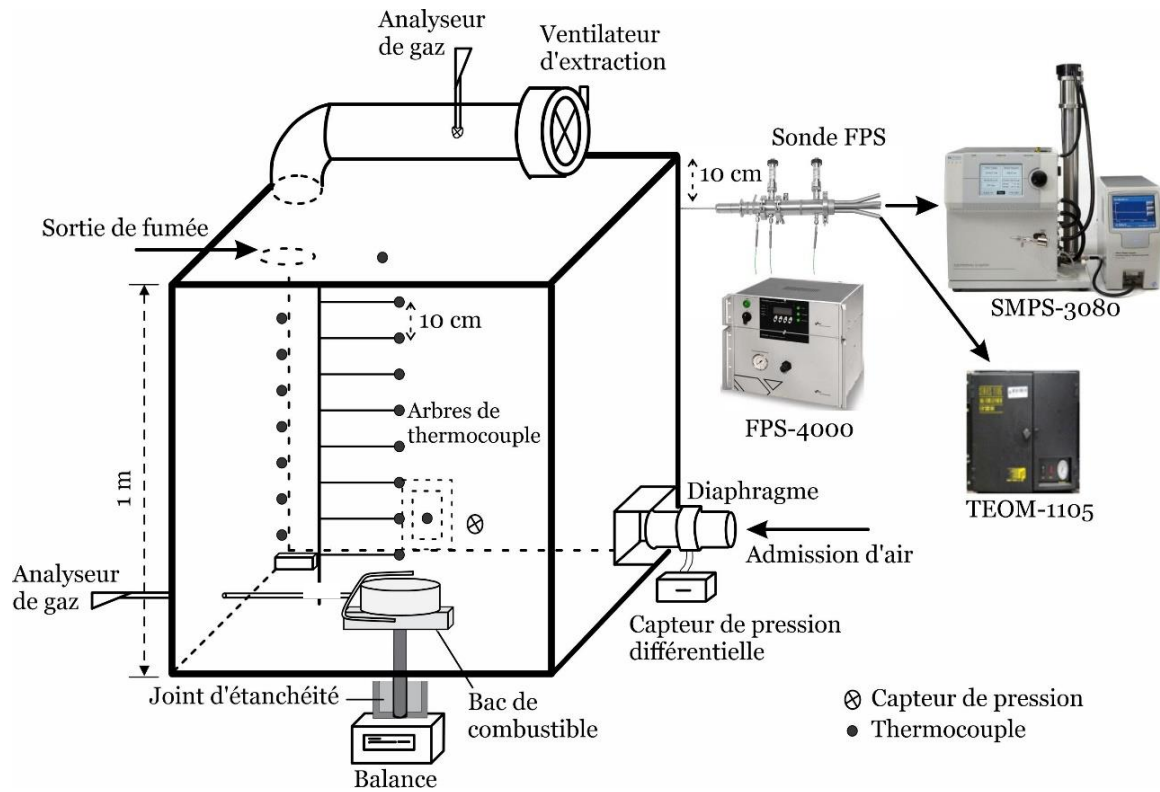


Figure 2.2 - Dispositifs de mesure.

2.2.2. Matériaux de construction de la chambre de combustion

La structure du compartiment a été construite en acier inoxydable de 6 mm d'épaisseur, ayant une conductivité thermique d'environ $k_c = 30 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, une masse volumique de $\rho = 770 \text{ kgm}^{-3}$ et une capacité calorifique massique de $C_p = 0.46 \text{ kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$. Le verre utilisé pour la construction de la fenêtre possède une conductivité thermique entre 20 à 200 °C de $k_c = 1.2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, une masse volumique à 20 °C de $\rho = 2230 \text{ kgm}^{-3}$ et une capacité calorifique massique de $C_p = 0.8 \text{ kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$.

Les parois internes et le plafond ont été recouverts avec des panneaux de fibre céramique pour l'isolation thermique, comme il a été indiqué précédemment, constitués de plaques de silicate de calcium de 25 mm d'épaisseur, ayant une conductivité thermique d'environ $k_c = 0.13 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ à 600 °C, une masse volumique nominale de $\rho = 330 \text{ kgm}^{-3}$, une capacité calorifique massique d'environ $C_p \approx 1.13 \text{ kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ à 1090 °C. Le sol a été recouvert par deux couches superposées, avec de la fibre céramique de 25 mm d'épaisseur et des briques réfractaires d'épaisseur d'environ 64 mm, ayant une conductivité thermique de $k_c = 0.19 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ à 1000 °C, une masse volumique de $\rho = 480 \text{ kgm}^{-3}$ et une capacité calorifique massique $C_p = 1.05 \text{ kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ à 1000 °C. Certaines des propriétés ont été données pour le fournisseur.

2.2.3. Source de combustion

Les combustibles liquides sont introduits dans des bacs circulaires en verre borosilicate ou en acier, situés au centre du compartiment près du sol. Le bac est légèrement élevé à une hauteur de 15 mm. Les dimensions (diamètres et hauteurs) des bacs sont indiquées dans le Tableau 2.1. Un support carré (20 cm x 20 cm) en silicate de calcium de 25 mm d'épaisseur a été placé sous le bac du combustible pour éviter le transfert de chaleur vers le système de mesure de la perte de masse (balance Mettler Toledo).

Tableau 2.1 - Types des bacs de combustible et dimensions.

Type de bacs / dimensions	Verre				Acier		
Diamètre (m)	0.115	0.14	0.19	0.23	0.19		
Hauteur (mm)	65	75	90	100	22	45	90

2.2.4. Caractéristiques du combustible

Les expériences ont été réalisées à l'aide de combustibles différents : n-Heptane pur (C_7H_{16}), dodécane technique ($C_{12}H_{26}$), kérosène Jet A-1, et l'huile Mobil DTE Heavy Medium (huile de base et additifs).

- L'heptane (C_7H_{16}) est un liquide incolore, très volatil et très inflammable (point d'éclair inférieur à 0 °C), insoluble dans l'eau et miscible avec plusieurs solvants organiques. L'heptane utilisé dans cette étude est certifié à 99.8 % pur.
- Le dodécane ($C_{12}H_{26}$) est un mélange d'isomères, il est aussi un liquide incolore et peu volatil. Comparé à l'heptane, le dodécane a un point éclair plus élevé, ce qui lui donne les caractéristiques d'un combustible qui ne s'enflamme pas très facilement. Le dodécane technique et l'heptane ont été étudiés pendant les travaux de Coppalle et al. (Coppalle, Loo, & Ainé, 2016).
- Kérosène Jet A-1 correspond au carburant pour les moteurs d'avion. Wu et al. (Wu, Modica, Yu, & Grisch, 2018) ont déterminé par chromatographie que la formule moléculaire empirique de ce kérosène commercial est environ $C_{11.16}H_{20.82}$. Pour le développement de cette thèse, il a été supposé la même formule empirique.
- Un combustible plus lourd que les trois précédents a également été pris en compte, l'huile Mobil DTE (on a supposé que cette huile est un hydrocarbure lourd dont la

masse moléculaire est d'environ 220.34 g/mol). L'huile Mobil DTE est une huile de lubrification de circulation haute performance, destinée à la lubrification des turbines et hydrauliques et à vapeur. Il est composé d'huile de base très raffinée (huile minérale) et d'un additif, le 2,6-di-tert-butyl-p-crésol ($C_{15}H_{24}O$), qui lui donne la caractéristique d'une haute stabilité thermique et chimique.

Les propriétés physico-chimiques de chaque combustible sont détaillées dans le Tableau 2.2. De plus, les hauteurs des points de fumée, une propriété importante qui indique la tendance du combustible à génère de la suie (Qasem, Al-Mutairi, & Jameel, 2023; Allan, Kaminski, Bertrand, Head, & Sunderland, 2009), sont également présentées.

Tableau 2.2 - Propriétés physico-chimiques des combustibles.

Combustibles / Propriétés	n-Heptane Pur	Dodécane Technique	Kérosène Jet A-1	Huile Mobil DTE
Masse molaire (g/mol)	100.21	170.33	155.02	> 220.34
Conductivité, λ (w/m K)	0.17	0.14	0.15	-
Masse volumique, ρ (kg/m ³)	684	751	797	838 – 870
Chaleur de combustion, ΔH_c (kJ/kg) x 10 ³	46.4	49.9	43.3	42.1
Chaleur de vaporisation, L_v (kJ/kg)	365	361	431	-
C_p à 298 K (kJ/kg K)	2.24	2.21	~2.01	~1.89 ^e
Point d'éclair (°C)	−4	44	43	> 270
Température d'ébullition à 1 atm (°C)	98	170 – 195	153	300 – 400
Point de fumée (mm) ^f	> 60	> 35	25	-

L'heptane et le dodécane ont été retenus dans cette thèse pour les bonnes connaissances de leurs propriétés physico-chimiques. Ce sont deux solvants largement utilisés dans le secteur industriel. Dans le cas du dodécane, ses propriétés physico-chimiques sont

^e $C_p = 0.00347T + 1.801$ à $T = 25^\circ\text{C}$ (Porto, et al., 2013).

^f Mesuré dans la présente étude par l'appareil de mesure du point de fumée (ASTM D1322 IPS57).

similaires à celles du tétra-propylène hydrogéné (souvent décrit comme un dodécane ramifié). Dans la plupart des usines de traitement du combustible nucléaire, il sert de diluant dans le procédé de séparation chimique. De nombreux chercheurs ont étudié les incendies dans des compartiments confinés en utilisant ces combustibles, de sorte qu'il existe une quantité importante d'informations disponibles pour comparer. Le kérosène et l'huile Mobil DTE heavy medium ont été sélectionnés pour étudier les effets du type de combustible sur les incendies dans les compartiments confinés mécaniquement ventilés et pour fournir une diversité de structures chimiques. Ces deux combustibles sont très peu étudiés dans la littérature.

Pour démarrer un incendie il faut sélectionner la quantité initiale de combustible, cette quantité peut être choisie soit en fonction de la hauteur initiale du combustible, du volume ou de la masse initiale. Chacun de ces paramètres dépend de la masse volumique du combustible (huile Mobil DTE > kérosène > dodécane > heptane). Pour des questions de comparaisons entre les différents combustibles et par convenance, les essais ont donc été effectués en utilisant la même quantité initiale de combustible (267 g). Afin de valider l'influence de la quantité initiale de combustible, des essais ont été réalisés avec différentes masses. Les résultats ont montré que si la quantité initiale de combustible diminue, le temps de combustion diminue également. En ce qui concerne les concentrations de gaz (O_2 , CO_2 et CO), des niveaux similaires ont été constatés.

Tous les combustibles ont été enflammés à l'aide d'un petit brûleur à butane d'une puissance de 1.6 kW. Dans le cas de l'huile Mobil DTE, il faut préchauffer à environ 10 degrés au-dessous de la température du point d'éclair au moyen d'une plaque de chauffage électrique (Severin KP-1091) d'une puissance de 1.5 kW.

2.3. Mesure de la perte de masse du combustible

Une balance de la marque Mettler Toledo (PL6001-S) avec une capacité maximale de 6.1 kg et une résolution de ± 0.1 g a été utilisée pour mesurer en continu la perte de masse du combustible. Lors des essais, la balance a été protégée de la chaleur en la plaçant à l'extérieur du compartiment comme il est indiqué sur la Figure 2.3. Ce mécanisme a été développé par Utiskul et al. (Utiskul, et al., 2005). La Figure 2.3 présente en détail le système de mesure. Un tube cylindrique avec un joint d'étanchéité d'eau relie la balance au bac du combustible. La balance mesure la masse du combustible et de la tige métallique. Dans chaque expérience, la masse perdue du combustible est déduite avec un pas de temps de 1 seconde.

À partir de la mesure obtenue, il a été possible de calculer le débit de pyrolyse du combustible (équations 2.1 et 2.2), à l'aide du dérivé de la masse. Pour la réalisation du calcul,

il a été d'abord appliqué une moyenne Mobile sur python à l'aide de la fonction « *Savitzky-Golay* (Savitzky & Golay, 1964) ».

Calcul du débit de pyrolyse du combustible

$$\dot{m}_{\text{Combustible}} = \frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{m_{(t_i+2)} - m_{(t_i-2)}}{t_{(t_i+2)} - t_{(t_i-2)}} \quad (\text{g/s}) \quad 2.1$$

$$\text{MLR} = \frac{\dot{m}_{\text{Combustible}}}{A_b} \quad \left(\frac{\text{g}}{\text{sm}^2} \right) \quad 2.2$$

où $\dot{m}_{\text{Combustible}}$ est la dérivée au cours du temps de la masse du combustible mesurée par la balance. MLR « *MLR pour Mass Loss Rate dans la terminologie anglo-saxonne* » est la perte de masse du combustible par unité de surface. A_b est la surface du bac de combustible en m^2 .

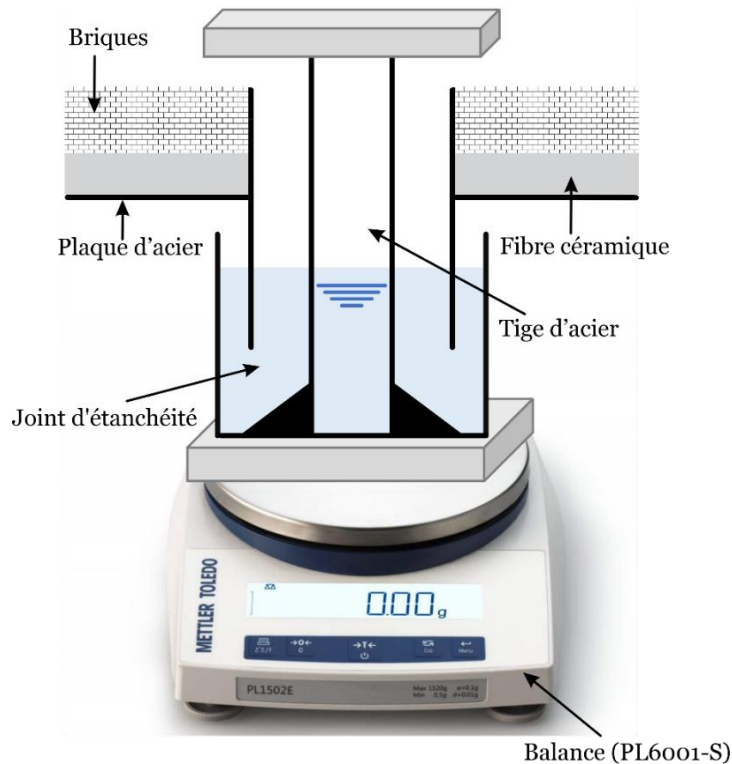


Figure 2.3 - Vue détaillée du système de mesure de la perte de masse.

La Figure 2.4 montre un exemple la perte de masse par unité de surface d'un incendie d'huile Mobil DTE heavy medium, déterminé par l'équation 2.2. Le taux de ventilation ou renouvellement horaire et diamètre du bac de combustible sont de 9.67 ACPH et 0.14 m, respectivement. Cette figure met en évidence que, dans les conditions utilisées, la perte de masse de combustible suit une évolution presque constante jusqu'à l'extinction de l'incendie.

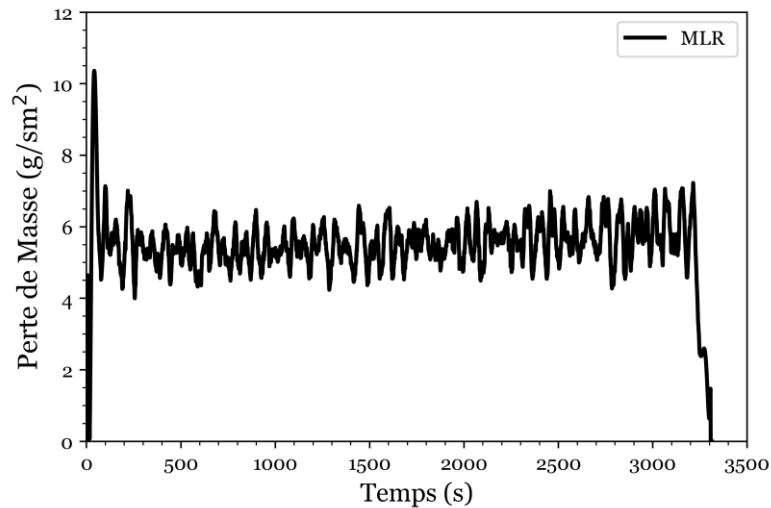


Figure 2.4 - Exemple de la perte de masse d'un feu de l'huile Mobil DTE à 9.67 ACPH et un diamètre du bac de combustible de $D = 0.14$ m. Puissance du feu ≈ 3.6 kW.

2.4. Mesure de la température dans le compartiment

Les évolutions et les distributions de température du gaz dans le compartiment et les parois ont été mesurées à l'aide d'un total de vingt-quatre thermocouples de type K (Chromel-Alumel). Thermocouples de gaine en acier inoxydable de précision ± 1.1 °C ou 0.4 % de la valeur mesurée, plus de détails sur le Tableau 2.3. Dans ce travail, les thermocouples n'ont pas été protégés contre les rayonnements. Trois arbres de thermocouples ont été placés à l'intérieur du compartiment et le reste des thermocouples ont été répartis dans le compartiment (Figure 2.5).

Le premier arbre de thermocouple a été placé dans le coin gauche du mur arrière, à environ 55 cm du centre de la source d'incendie. Il est composé d'un module vertical de huit thermocouples (TC_1 à TC_8). Le premier thermocouple (TC_1) a été mis à 10 cm du sol, et le reste des thermocouples ont été répartis uniformément à des intervalles de 10 cm. Les extrémités des thermocouples sont à environ 3 cm de la paroi latérale gauche. Cet arbre permet de mesurer les températures dans la chambre selon l'axe vertical ainsi que la température des fumées.

Le deuxième arbre de thermocouples a été placé à environ 20 cm du centre de la source d'incendie. De même, il s'agit d'un module vertical de huit thermocouples. Le premier thermocouple est situé à environ 13.5 cm du sol, les autres thermocouples sont espacés de 10 cm. Les extrémités des thermocouples sont positionnées selon l'axe central du feu.

Le troisième arbre de thermocouples a été positionné près du coin droit de la partie frontale, à environ 55 cm du centre de la source d'incendie. Celui-ci a été composé de deux thermocouples, l'un à 20 cm et l'autre à 70 cm du sol. Les extrémités des thermocouples se trouvent à environ 3 cm du mur latéral droit.

Tableau 2.3 - Caractéristiques des thermocouples de type K utilisés.

Paramètres	
Diamètre (mm)	1
Longueur (m)	2
Température maximale (°C)	1100
Matériau de la sonde	Acier réfractaire AISI 310
Temps de réponse (s)	0.7

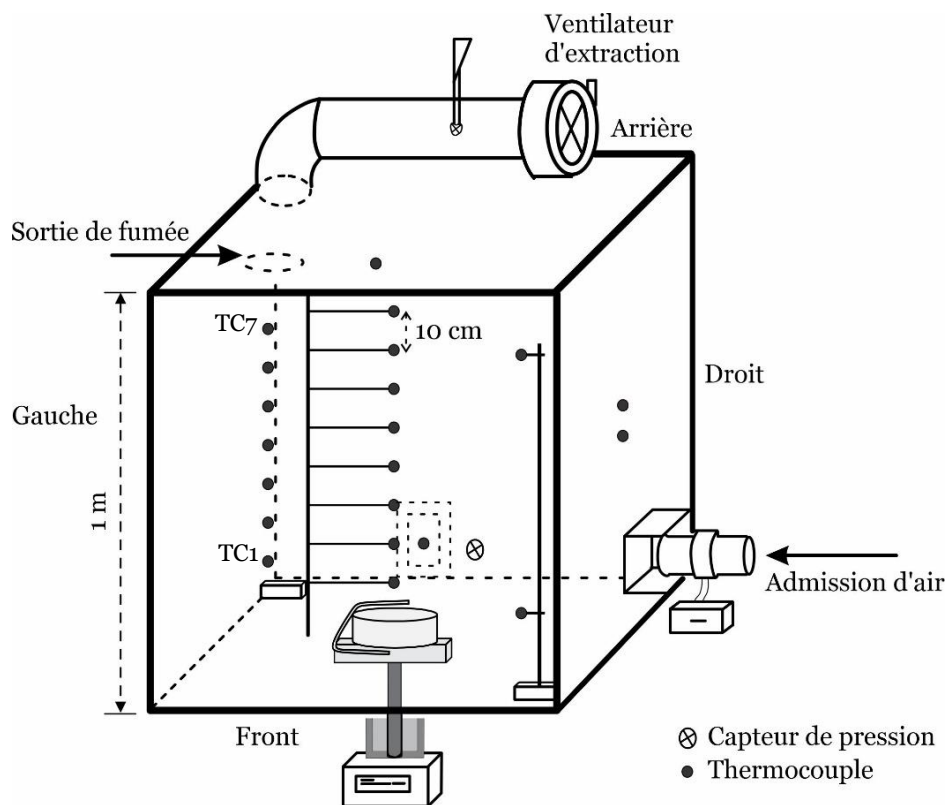


Figure 2.5 - Localisation des trois arbres de thermocouples dans le compartiment.

Les thermocouples restants ont été placés sur les parois latérales et le plafond. Sur chaque paroi latérale, un thermocouple a été placé sur la surface intérieure de la paroi et deux

sur la surface extérieure de la paroi. Les extrémités des thermocouples ont été mis au centre des murs. Sur le plafond, seulement un thermocouple est placé avec l'extrémité au centre.

2.5. Mesure des pressions

Trois mesures de pression sont réalisées avec différents transducteurs de pression, situés à différents points.

Un capteur de pression différentielle de Fumess Controls, modèle 318 a été placé sur le diaphragme. On a utilisé cette mesure de pression pour calculer le débit d'air entrant dans le compartiment (voir la section ci-dessous).

Une micro-manomètre de Fumess Controls, modèle 510 (transducteur de pression différentielle très sensible) a été placé au centre du conduit d'extraction. On a utilisé cette mesure de pression pour déterminer le débit de gaz à la sortie du conduit d'évacuation à l'aide d'une sonde bidirectionnelle (voir section ci-dessous).

Un transducteur Setra, modèle 267 a été placé à l'intérieur du compartiment, à environ 2 cm du sol. Cette mesure de pression a été utilisée pour suivre l'évolution de la pression dans la chambre lors des tests.

Tableau 2.4 - Caractéristiques des différents types de transducteurs de pression.

Capteurs	Range (Pa)	Temps de réponse	Précision	Résolution	Modèle
Pression différentielle	± 150	0.1 s	$< 0.25 \%$	0.1 Pa	FCO318
Micro-manomètre	0 – 20 0 – 200	-	$\pm 0.25 \%$	0.001 Pa	FCO510
Setra	± 50	-	$\pm 0.50 \%$	-	Setra 267

2.6. Débit de ventilation

Le système de ventilation est mécanique. Un ventilateur électrique placé sur le plafond, extrait la fumée du compartiment. L'air frais entre en bas du caisson à travers un régulateur à diaphragme IRIS (diamètre intérieur de 80 mm). Conformément au fabricant, les dispositifs

IRIS sont spécialement conçus pour mesurer et réguler les débits d'air dans les conduits circulaires de ventilation et de conditionnement d'air. Il a été situé à 13 cm du sol du compartiment.

Pour déterminer le débit volumique d'admission d'air, il est nécessaire de mesurer la différence de pression entre l'amont et l'aval de l'orifice du diaphragme à l'aide du capteur Fumess Controls modèle FCO318. Le débit volumique d'air est déduit à l'aide de la relation 2.3, où le coefficient K varie en fonction de la taille de l'ouverture de l'orifice du diaphragme (1 – 7). Une fois ce paramètre établi, il est également possible de déterminer le débit massique (équation 2.4) et la vitesse d'admission d'air.

$$\dot{q}_{\text{air}} = K\sqrt{\Delta P} \quad (\text{l/s}) \quad 2.3$$

$$\dot{m}_{\text{air}} = \dot{q}_{\text{air}} \rho_{\text{air}} \quad (\text{kg/s}) \quad 2.4$$

$$v_{\text{air}} = \frac{\dot{q}_{\text{air}}}{A_{\text{ad}}} \quad (\text{m/s}) \quad 2.5$$

où, \dot{q}_{air} est le débit volumique d'air (l/s), ΔP est la différence de pression entre l'amont et l'aval du diaphragme (Pa), K est le coefficient du diaphragme, \dot{m}_{air} est le débit massique de l'air entrant (kg/s), ρ_{air} est la masse volumique de l'air (kg/m³), v_{air} est la vitesse d'admission d'air (m/s) et A_{ad} est la surface du conduit d'admission, égale à environ 0.005 m².

La position 7 du régulateur IRS-80, dont la constante K est égale à 0.6, permet de mesurer un débit de 3 l/s à environ 14 l/s. Afin de mesurer un débit inférieur à 3 l/s, le diaphragme a été étalonné. Les essais ont été réalisés à froid (sans combustion). La Figure 2.6 présente les essais d'étalonnage des mesures de l'admission d'air en fonction de la pression différentielle et ainsi que les courbes d'ajustement utilisées pour le calcul du débit de ventilation. Il a été trouvé que la valeur moyenne de la constante du coefficient du diaphragme (K) de l'équation 2.3 est environ 0.5377.

Les conditions de ventilation lors des expériences sont repérées à l'aide du paramètre de renouvellement horaire (équation 2.6). On rappelle que le taux de renouvellement d'air est le nombre de fois par heure pour lequel le volume de l'enceinte est évacué.

$$RH = \frac{\dot{q}_v}{V} \quad (\text{ACPH}) \quad 2.6$$

où, RH est le taux de renouvellement d'air (h⁻¹) ou bien le changement d'air par heure (ACPH), V est le volume du compartiment égal à 1 m³. Les taux de renouvellement ont été établis à

4.83, 9.67 et 17.8 ACPH. Ces renouvellement horaires ont été considérés pour couvrir les conditions d'incendie bien ventilées et sous-ventilées. Donc la vitesse d'admission d'air pour les trois renouvellements horaires est donc 0.267, 0.534 et 0.984 m/s, respectivement.

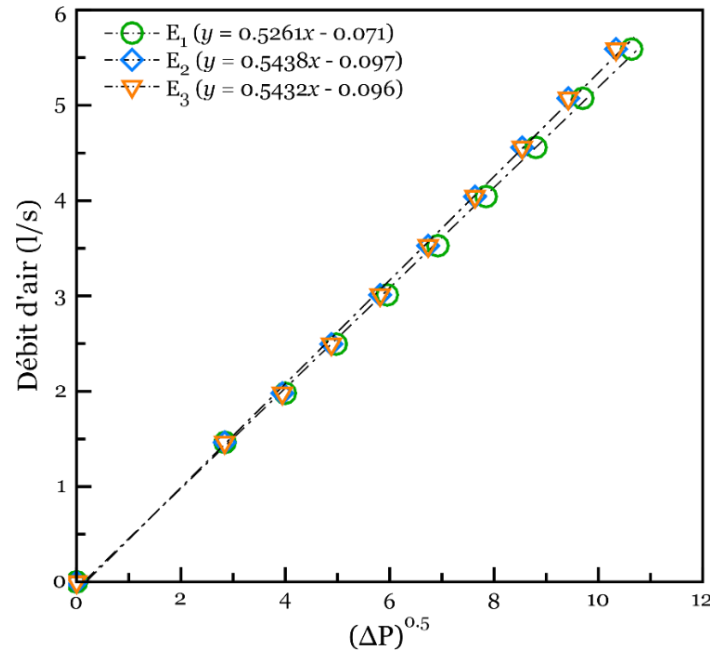


Figure 2.6 - Étalonage du diaphragme IRIS-80.

2.7. Débit des gaz de combustion

Le débit des fumées dans le conduit d'évacuation a été déterminé à l'aide d'une sonde de vitesse bidirectionnelle (sonde McCaffrey, similaire à la sonde Pitot-statique). La sonde du dispositif obstrue le flux du gaz et une différence de pression (ΔP) existe entre l'amont et l'aval (Bryant, 2009). La différence de pression est mesurée en utilisant le transducteur de pression différentielle FC0510 Furness Control micro-manomètre, un capteur de pression différentielle très sensible (ultra-basse range). L'équation 2.7 permet de déterminer la vitesse qui, multiplié par la surface du conduit, donne lieu au débit volumique des fumées (équation 2.8) (Bryant, 2009; Tiwari, Gupta, Kumar, & Sharma, 2020).

L'expression de la vitesse et du débit volumique des fumées sont données ci-dessous :

$$v = \frac{1}{f_c} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_{\text{gaz}}}} \quad (\text{m/s}) \quad 2.7$$

$$\dot{Q}_{\text{gaz}} = vA_{\text{ev}} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad 2.8$$

où, v , vitesse des fumées (m/s), f_c est un facteur de correction qui dépend du nombre de Reynolds. Pour une sonde Pitot-statique bien conçue, la constante de la sonde, f_c est égale à l'unité. Comme la sonde bidirectionnelle n'est pas une sonde idéale, McCaffrey et Heskestad (McCaffrey & Heskestad, 1976) ont déterminé que la constante de la sonde est d'environ 1.08 pour les écoulements dont le nombre de Reynolds est supérieur à 1000. Cette valeur a été retenue dans cette thèse. ΔP est la différence de pression (Pa), ρ_{gaz} est la masse volumique du gaz (kg/m^3), considérée comme la masse volumique de l'air à condition ambiante et corrigée à la température de la fumée ($\rho_{\text{gaz}} = \text{MW}_{\text{gaz}} P_{\text{ref}} / RT$). T est la température des fumées (K), R constante universelle des gaz parfaits $8.314472 \text{ Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$, MW_{gaz} est la masse molaire du gaz, supposée être égale à celle de l'air ($\text{MW}_{\text{gaz}} \approx 29 \text{ g/mol}$), P_{ref} est la pression atmosphérique (Pa). \dot{Q}_{gaz} est le débit volumique de la fumée dans le conduit d'évacuation, A_{ev} est la surface du conduit d'évacuation (égal à 0.0123 m^2).

2.8. Mesure de la concentration des espèces chimiques

Les concentrations molaires des espèces gazeuses (O_2 , CO_2 et CO) ont été mesurées à l'aide de trois analyseurs de gaz, Testo 350, ECOM EN2 modèle 4399 et ECOM EN2 modèle 6279, placés à différents points de mesure : autour de la flamme, à 10 cm de la sortie des gaz (dans le compartiment) et dans le conduit d'extraction du gaz.

ECOM EN2 est un analyseur de combustion fiable et portable. C'est un multi-contrôleur compact spécialement conçu pour le diagnostic gaz. L'appareil consiste en un coffret d'analyse, équipé de cellules ou capteurs électrochimiques pour la réalisation de la mesure. Le modèle ECOM EN2 4399, est composé d'une cellule O_2 (0 à 21 % vol., précision ± 0.3 %, résolution 0.1 %) et d'une cellule CO (0 à 4000 ppm, précision ± 20 ppm, résolution 1 ppm). Le modèle ECOM EN2 6279 a les mêmes deux capteurs mentionnés ci-dessus. Il possède en plus un autre capteur de CO qui mesure des concentrations de très élevées (0 à 63000 ppm, précision ± 100 ppm ou 10 % de la valeur mesurée, résolution 5 ppm). Il a été possible de suivre l'évolution de chaque mesure à l'aide du Logiciel « DAS5 ». Les analyseurs de gaz ECOM EN2 ne sont conçus que pour mesurer les concentrations d'oxygène et de monoxyde de carbone, car ces appareils ne sont pas équipés d'un capteur dioxyde de carbone. Ils réalisent une estimation du CO_2 en fonction de l'oxygène mesuré et du type de combustible en utilisant la réaction globale stœchiométrique (l'appareil contient les données pour les combustibles suivants fioul lourd, Fioul domestique ou F.O.D, gaz naturel, gaz de cokerie, butane, propane, bois, pellets et copeaux de bois).

Testo 350 est un appareil d'analyse de gaz de combustion précis portable professionnel. L'appareil est composé de l'unité de commande et d'un coffret d'analyse (instrument qui réalise la mesure). Il fonctionne avec des capteurs électrochimiques pour les mesures. Dans cette thèse, les capteurs les plus pertinents sont les suivants : O₂ (0 à +25 vol. %, précision ± 0.2 vol. %, résolution 0.01 vol. %) ; CO (0 à 10000 ppm, précision ± 10 ppm, résolution 1 ppm). Pour la mesure du CO₂, le dispositif Testo 350 utilise une cellule d'absorption infra-rouge (0 à +50 vol. %, précision ± 0.5 vol. % ± 1.5 % de la valeur moyenne, résolution 0.01 vol. %). L'évolution des émissions mesurées par le TESTO ont été suivies en permanence à l'aide du logiciel « *Easy emissions* ». Le temps de réponse de l'appareil dépend de chaque capteur de mesure. Le capteur d'O₂ a un temps de réponse d'environ 20 s, CO d'environ 40 s et CO₂ d'environ 10 s.

Les réponses des capteurs des appareils ont été régulièrement vérifiées à l'aide de deux bouteilles des gaz étalon (mélange Crystal d'air liquide et mélange de Linde). Le mélange Crystal contient 19.9 % de CO₂, 79.082 % de N₂ et 10000 ppm de CO. Le mélange de Linde contient 15 % d'O₂, 5 % de CO₂ et 3500 ppm de CO. Il faut rappeler que les mesures obtenues par les trois appareils sont sur une base sèche, c'est-à-dire sur des échantillons ne contenant pas de vapeur d'eau.

2.9. Mesure des émissions des particules dans les fumées

Le présent sous-chapitre décrit les appareils et le système de prélèvement utilisés pour mesurer et caractériser les émissions de particules de suie. Pour mieux comprendre les émissions lors d'un incendie sous-ventilé il est important de connaître et de quantifier les paramètres les plus pertinents, tels que la concentration et la taille des particules. Avant de les mesurer, il est nécessaire de diluer l'échantillon afin d'éviter tout dommage aux dispositifs et afin d'être dans les gammes de mesures des appareils. Le système de prélèvement est composé d'un système de dilution FPS (*Fine Particle Sampler*). La concentration massique des particules de suie a été mesurée avec l'appareil TEOM (*Tapered Element Oscillating Microbalance*) et la taille des particules avec le granulomètre SMPS (*Scanning Mobility Particle Size*).

2.9.1. Système de prélèvement des particules

La sonde de prélèvement des particules de suie FPS a été placée à 10 cm de la sortie de fumées. La sonde FPS est un système complet de conditionnement des échantillons pour les mesures de concentrations élevées de particules et dans des conditions chaudes et humides. La Figure

2.7 montre le principe de fonctionnement de la sonde de dilution FPS 4000 développée par la société DEKATI.

La dilution s'effectue en deux phases. La première dilution a lieu le plus près possible du point de prélèvement dans un tuyau poreux, cette dilution se caractérise par le fait qu'elle peut être chaude ou froide. Avec la dilution chaude, la condensation des espèces volatiles peut être évitée, alors qu'avec une dilution froide la nucléation des espèces volatiles peut être renforcée. Dans cette phase, l'air préalablement chauffé ou non est mélangé à l'aérosol par les trous du tube poreux. La deuxième dilution établit le débit de prélèvement du dispositif, elle consiste en un dilueur de type éjecteur, situé en aval de la dilution primaire.

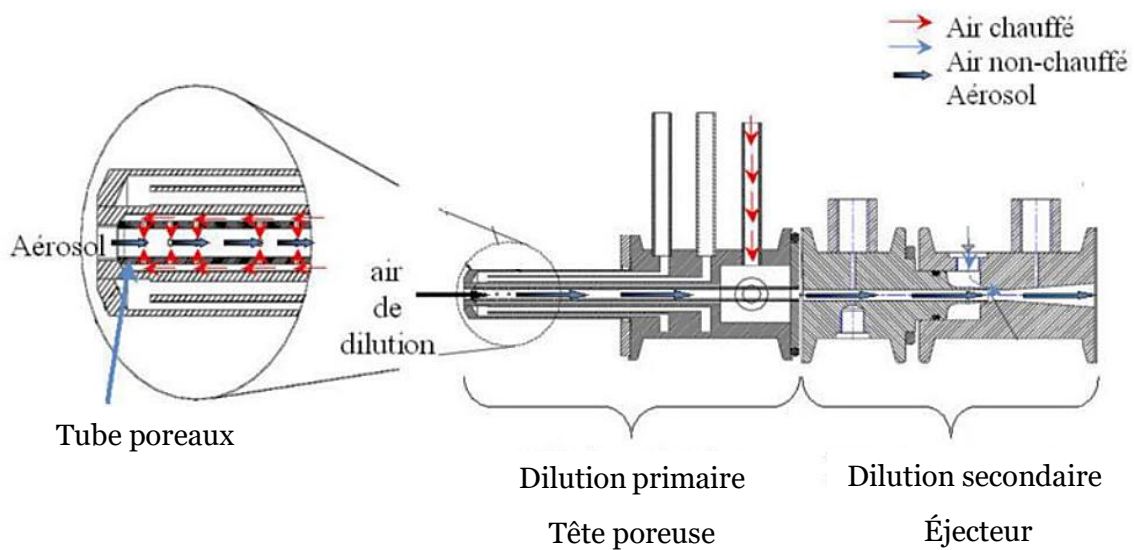


Figure 2.7 - Schéma du système de dilution FPS 4000 – DEKATI (Ouf, 2006).

Le diluteur éjecteur agit comme une pompe aspirant une quantité connue d'un échantillon dilué de la dilution primaire. L'aspiration est possible grâce à un venturi. L'air injecté en amont du venturi crée une différence de pression entre l'entrée et la sortie. Simultanément, une dilution secondaire est effectuée. Ce dispositif permet d'ajuster le facteur de dilution entre 10 et 200, mais il est recommandé d'utiliser un facteur de 20 ou plus. Le facteur de dilution peut être ajusté en augmentant et en diminuant la quantité d'air de dilution introduite dans la sonde grâce à un ensemble de vannes qui contrôlent son débit.

2.9.2. Concentration massique des particules de suie

La concentration massique des particules de suie a été mesurée par une microbalance oscillatoire (TEOM). Ce dispositif est largement utilisé pour mesurer les concentrations massiques de particules en continu dans les réseaux de la qualité de l'air. Le principe de

mesure consiste en la détermination de la variation de la fréquence d'oscillation d'un filtre, lorsque des particules sont déposées sur celui-ci. C'est-à-dire que la fréquence d'oscillation diminue lorsque la masse s'accumule, ce qui permet de mesurer directement l'accumulation de la masse sur le filtre au cours du temps (Allen, et al., 1997). Le TEOM chauffe le filtre pour éliminer les interférences et pour fournir une mesure stable et reproductible.

Dans la configuration standard, la microbalance TEOM collecte les particules à 3 litres par minute (lpm) sur un filtre oscillant chauffé à environ 50 °C. Ce dispositif est très sensible car il peut détecter des variations de masse aussi petites que 10 ng (Maugendre, 2009). Le schéma du principe de fonctionnement de l'appareil est montré sur la Figure 2.8.

Le TEOM effectue des mesures quasi-continues, mais il est nécessaire de définir un filtre de type moyenne glissante pour améliorer la qualité des résultats. Dans ce travail, une moyenne glissant sur 10 secondes a été utilisée. Les résultats sont directement liés à la masse des particules et indépendantes la nature et des propriétés des particules, telles que la composition et la masse volumique (Tortajada-Genaro & Borrás, 2011). Dans cette thèse, il a été utilisé la version TEOM séries 1105 manufacturée par Rupprecht et Patashnick Co. Inc. Pour leur utilisation, il faut d'abord l'étalonner, afin de trouver la constante de conversion (K_o) de l'équation 2.9 qui relie la variation de fréquence à la masse déposée sur le filtre. Une fois la masse de la particule connue, il est possible de déterminer la concentration massique des particules à l'aide de l'équation 2.10.

Calcul de la concentration massique des particules dans les fumées :

$$m_{\text{Suie}} = K_o \left(\frac{1}{f_1^2 - f_o^2} \right) \quad (\mu\text{g}) \quad 2.9$$

$$C_{\text{Suie}} = \frac{\dot{\Delta m}_{\text{Suie}}}{\dot{Q}_s} \quad (\text{mg}/\text{m}^3) \quad 2.10$$

où, m_{Suie} représente la masse de suie accumuler dans le filtre, K_o est la constante d'étalonnage du transducteur de masse ou constante spécifique d'élasticité, qui ne dépend pas du type de particule. Il a été utilisé la constante donner par le fournisseur ($K_o = 16680$), f_o représente à la fréquence initiale (Hz) et f_1 la fréquence finale (Hz), C_{Suie} est la concentration massique des particules de suie. $\dot{\Delta m}_{\text{Suie}}$ est la dérivée de la masse accumulée dans le filtre et \dot{Q}_s est le débit de prélèvement (3 l/min).

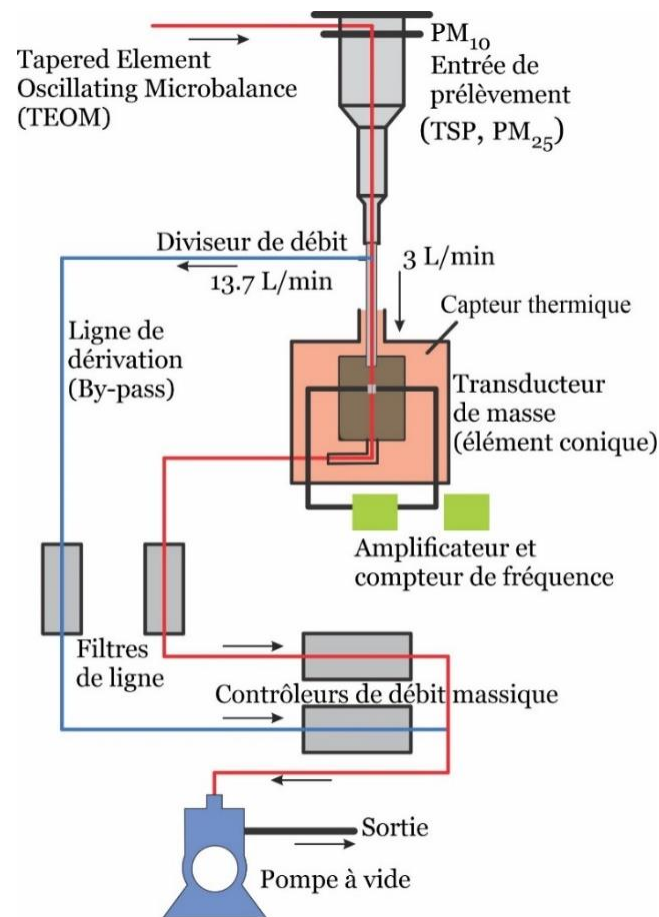


Figure 2.8 - Schéma du principe de mesure du TEOM (Ganesan, 2020).

La Figure 2.9 présente un exemple d'une mesure obtenue par l'appareil TEOM au cours d'un test avec l'huile Mobil DTE, dans les mêmes conditions que la Figure 2.4. La Figure 2.9 – a montre la masse des particules déposée sur le filtre. Lorsque des particules sont déposées sur le filtre, la masse doit augmenter continuellement et régulièrement. Si observe sur la figure l'évolution de la masse (Figure 2.9 – a), on constate qu'à environ 2400 s, il existe une petite fluctuation dans le comportement de la courbe. Cela peut être dû à une certaine instabilité de l'appareil causée par la condensation des gaz ou une courte variation de pression. Cette fluctuation est donc très perceptible ou sensible lors du calcul de la dérivée de la masse au cours du temps (Figure 2.9 – b). C'est pourquoi, pour certains résultats, ces fluctuations ne seront pas prises en considération lors de l'analyse des données du TEOM. La concentration massique de particules dans cet exemple, obtenue pendant la période stable (500 - 2200 s) est d'environ de 1684 mg/m³, en considérant qu'une dilution de l'ordre de 72 a été appliquée au FPS.

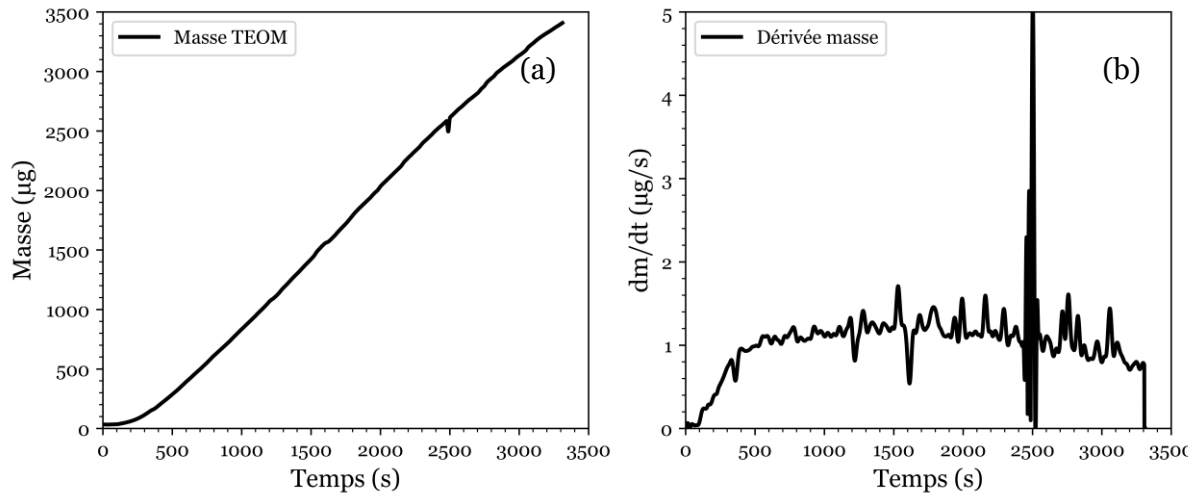


Figure 2.9 - Mesures fournies par le TEOM pour un feu de l'huile Mobil DTE à 9.67 ACPH et $D = 0.14$ m. (a) Masse des particules sur le filtre ; (b) Dérivée de la masse.

2.9.3. Granulométrie des particules de suie

La mesure de la taille des particules de suie a été effectuée au moyen d'un granulomètre SMPS « *Scanning Mobility Particle Size* » modèle 3080 de la marque TSI. Ce dispositif est un classificateur électrostatique qui classe les particules en fonction de leur diamètre de Mobilité électrique, et détermine une distribution de la taille des particules. Il est composé principalement d'un chargeur bipolaire Kr-85 pour neutraliser les charges sur les particules, d'un contrôleur du flux, et d'un analyseur de Mobilité différentielle (DMA) qui sépare les particules en fonction de leur Mobilité électrique (Figure 2.10). Ce paramètre est inversement lié à la taille des particules et proportionnel au nombre de charges sur les particules. Deux types de DMA peuvent être utilisés. Le DMA long, qui classifie les particules ayant un diamètre compris entre 10 et 1000 nm, et le DMA nano, qui classe les particules ayant un diamètre compris entre 2 et 150 nm. Le DMA long a été utilisé dans cette étude.

La Figure 2.10 (photo de l'appareil) présente l'ensemble des éléments qui constituent le SMPS, utilisé dans le cadre de cette étude pour caractériser le diamètre et le nombre de particules.

On trouve :

- Le classificateur électrostatique, dans lequel se trouve le neutralisateur d'aérosol (source radioactive de Kr-85) modèle 3087.
- La colonne de classification électrostatique.

- Le compteur de particules à condensation (CPC) modèle 3772, pour déterminer le nombre de particules par cm³ en sortie de la colonne de classification.

Les distributions des diamètres de particules de suies obtenues à partir du SMPS suivent souvent une loi de distribution log-normale, qui est représentée par l'équation 2.11. Cette équation a été utilisée dans ce travail pour comparer les résultats expérimentaux avec une loi théorique mais aussi pour extrapoler la valeur de la fonction de densité de la distribution pour des diamètres supérieurs à 1000 nm.

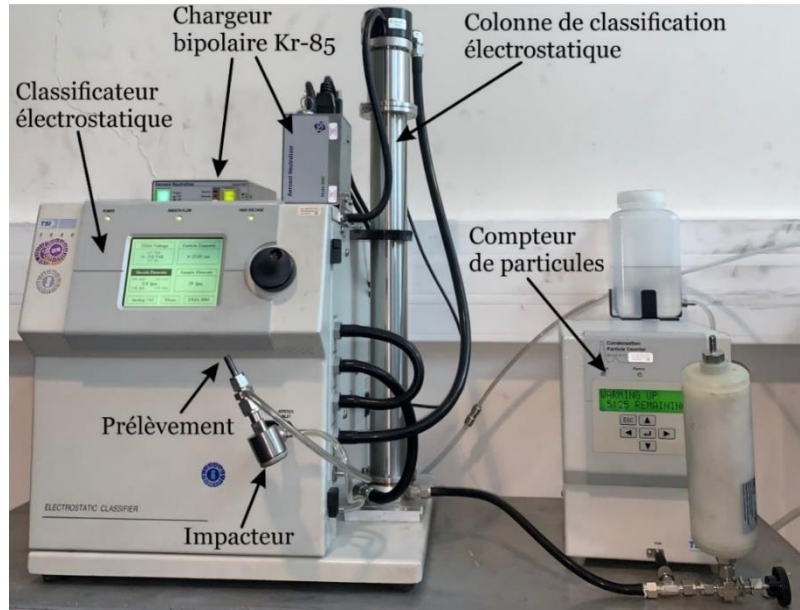


Figure 2.10 - Photo du Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS).

La loi de la distribution log-normale s'écrit de la manière suivante :

$$f(d_p) = \frac{N_T}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma_{geo}} \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{(\ln(d_p) - \ln(\overline{d_p}))^2}{(\ln \sigma_{geo})^2} \right] \quad 2.11$$

où, $f(d_p)$ est la fonction de densité de la distribution log-normale, N_T représente le nombre total des particules (nombre/cm³), d_p correspond au diamètre de particule ; $\overline{d_p}$ est le diamètre moyen géométrique (D_{modal}) et σ_{geo} est l'écart type géométrique. Un bon critère pour valider le modèle log-normale d'une distribution expérimentale est que le rapport $\frac{\overline{d_p}}{D_{modal}} = 1$ soit respecté.

La Figure 2.11 présente une comparaison entre la distribution obtenue par le SMPS (mesure dans l'air ambiant) et la distribution log-normale théorique, calculée à partir de

l'équation 2.11 et normalisée par rapport à la valeur maximale. Selon la Figure 2.11, on a observé un bon accord entre les données expérimentales et les données du modèle log-normal. Le Tableau 2.5 montre une synthèse des principaux paramètres (D_{modal} et σ_{geo}) obtenues par le SMPS et par l'équation 2.11. Le modèle présente une erreur relative de 2.87 % pour le calcul du diamètre modal et une erreur de 0.59 % pour l'écart-type géométrique. Ces erreurs sont faibles, et donc la distribution log-normal a été choisi dans ce travail pour représenter les données obtenues par le SMPS.

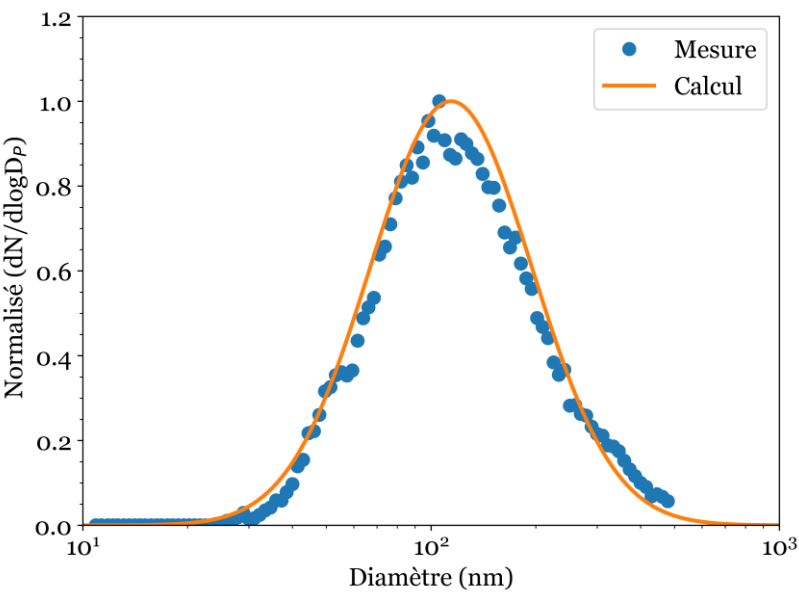


Figure 2.11 - Comparaison entre la distribution normalisée du SMPS et le modèle de l'équation 2.11, mesure dans l'air ambiant.

Tableau 2.5 - Paramètres obtenus à partir des distributions reportées sur la Figure 2.11.

Paramètres	SMPS	Modèle	Erreur (%)
D moyenne (nm)	135.61	-	-
D modal (nm)	117.54	114.17	2.87
Écart-type géom.	1.70	1.71	0.59

2.10. Système d'acquisition de données

Les données provenant des thermocouples et des transducteurs de pression ont été collectées à l'aide de cartes d'acquisition des données, DAQ National Instruments (NI). L'ensemble du module d'acquisition est composé d'une carte DAQ (NI-9203) qui mesure le signal de tension

pour le transducteur de pression Setra 267, un système composé de trois cartes DAQ (deux NI-9213 et un NI-9215) qui mesurent le signal de tension pour les vingt-quatre thermocouples et pour les transducteurs de pression FCO318 et FCO510. Chaque périphérique DAQ a été installé sur un système compact DAQ (NI cDAQ-9174) contrôlé par le logiciel LabVIEW.

Le logiciel d'acquisition de données « *LabVIEW* » a été utilisé pour contrôler, acquérir, et enregistrer les données de mesure y compris la mesure de la balance (Mettler Toledo PL 6001 -S). Le logiciel a permis une interface visuelle pour surveiller les conditions expérimentales et les sorties de tous les capteurs. Afin d'améliorer et faciliter l'acquisition, il a été créé un programme qui permet la conversion des signaux dans les unités désirées. Pendant les tests, les données mesurées par tous les instruments ont été enregistrées à une fréquence de 2 Hz. Après la fin de chaque test, les données ont été traitées dans Microsoft Excel. On a aussi développé un programme sur Python, qui permet d'optimiser le post-traitement des données.

2.11. Récapitulatif des configurations et plan d'expériences

De nombreux essais ont été réalisés dans la présente étude (environ 350 essais), tels que des essais à l'air libre, des essais de qualification, de répétabilité, pour étudier l'influence du taux de ventilation et pour étudier les effets du bac de combustible. Le Tableau 2.6 montre les différentes conditions utilisées et le type de mesures effectuées lors de l'étude des incendies mécaniquement ventilés.

Les tests en milieu confiné ont en commun l'instrumentation décrite dans les sections précédentes, ainsi que les caractéristiques spécifiques suivantes :

- Foyer : une nappe d'hydrocarbure contenue dans un bac circulaire en verre ou en acier, placé au centre du compartiment.
- Compartiment : une enceinte en acier inoxydable recouverte d'une couche de silicate de calcium, avec des briques disposées sur le sol.
- Ventilation : l'admission d'air se fait par la partie basse, régulée par un diaphragme et l'extraction forcée mécaniquement.

Tableau 2.6 - Récapitulatif de la campagne expérimentale.

Combustibles / RH (ACPH)	Bac en verre / Diamètre (m)				Bac en acier / Diamètre de 0.19 m Hauteur(mm)		
	0.115	0.14	0.19	0.23	22	45	90
n-Heptane Pur							
4.83							
9.67							
17.8							
Dodécane Technique							
4.83							
9.67							
17.8							
Kérosène Jet A-1							
4.83							
9.67							
17.8							
Huile Mobil DTE							
4.83							
9.67							
17.8							

Type de Mesure

1. MLR, pression et température
2. Concentration d'O₂, de CO₂ et de CO dans l'extraction
3. Concentration d'O₂, de CO₂ et de CO au niveau de la flamme
4. Mesure des particules de suie

Légende

Chapitre 3

Analyse de l'effet de ventilation sur le développement du Feu

3.1. Introduction

L'objectif principal de cette thèse expérimentale est de quantifier les émissions de polluants lors des incendies des combustibles liquides dans un compartiment mécaniquement ventilé, locaux généralement caractéristiques des installations des centrales thermiques ou nucléaires. On cherche à étudier les émissions de monoxyde de carbone et de particules de suie, qui sont des produits de combustion incomplète et peuvent provoquer l'inflammation des locaux voisins. Ces émissions constituent les deux principaux polluants responsables des décès par incendie.

Ce chapitre vise donc à montrer et analyser l'influence du taux de ventilation sur ce type d'incendie. La ventilation est l'un des paramètres les plus influents qui contrôlent le comportement d'un incendie (Tewarson & Steciak, 1983). La condition de ventilation peut être définie soit par la richesse globale (GER), soit par la viciation, c'est-à-dire la réduction du niveau d'oxygène dans l'air destiné à la combustion (Ukleja S. , 2012). Par conséquent, comprendre l'impact de ce paramètre sur les émissions de monoxyde de carbone et de particules de suie est un enjeu important. Dans ce chapitre, les résultats sont présentés et discutés systématiquement. Les résultats comprennent le taux de perte de masse du combustible par unité de surface (MLR), la richesse globale (GER), la mesure des températures, les concentrations des espèces chimiques (O_2 , CO_2 , CO et suie), le rendement du monoxyde de carbone et des particules de suie, la puissance dégagée (HRR) et des corrélations entre certaines de ces grandeurs. Chaque mesure a été mise en œuvre en tenant compte de différentes conditions de ventilation (Renouvellement Horaire) lors des incendies dans un compartiment mécaniquement ventilé.

3.2. Conditions initiales

Cette section présente les paramètres utilisés pour étudier l'influence de la condition de ventilation (taux de ventilation ou renouvellement horaire) lors des incendies de combustibles liquides ventilés mécaniquement. Le protocole des expériences est donné en Annexe A. Les expériences ont été réalisées avec quatre types de combustible, n-heptane pur, dodécane de qualité technique, kérosène Jet A-1 et l'huile Mobil DTE heavy medium. Trois taux de ventilation ont été considérés, 4.83, 9.67 et 17.8 ACPH, respectivement. Un bac en verre borosilicate de 0.19 m de diamètre a été utilisé comme source de combustion. Il faut rappeler que le conduit d'admission d'air est placé dans la partie inférieure du compartiment. La

Tableau 3.1 résume la masse initiale de combustible et la hauteur initiale (H_o) de combustible dans le bac de 0.19 m de diamètre.

Tableau 3.1 - Quantités et hauteurs initiales des combustibles.

Paramètres	Heptane	Dodécane	Kérosène	Huile Mobil DTE
Masse (g)	267	267	267	267
H_o (cm)	1.7	1.65	1.6	1.45

3.3. Répétabilité des mesures

Tout d'abord, afin de s'assurer de la répétabilité du fonctionnement du dispositif expérimental (voir Figure 2.2) et la qualification des mesures, quatre essais ont été menés pour les combustibles n-heptane pur et dodécane technique à des temps différents. Pour chaque combustible, deux essais ont été réalisés le même jour, tandis que les deux autres ont été effectués à des jours différents. Les feux d'heptane sont nommés (Essai 1 à 4), dont l'essai 1 et essai 2 ont été réalisés le même jour, à un écart de temps d'environ de 3 heures. Alors que les feux de dodécane sont nommés (Essai 5 à 8), dont l'essai 5 et essai 6 ont été réalisés le même jour, dans le même écart des temps (Tableau 3.2). Pour réaliser ces mesures, il a été considéré un taux de ventilation de 9.67 ACPH, et un bac de combustible en verre de 0.19 m de diamètre. Le taux de ventilation a été réglé avant l'allumage du combustible (également défini en tant que renouvellement horaire, RH).

Tableau 3.2 - Essais de qualification du compartiment d'incendie.

Essai	Combustible	Masse (g)	H_o (cm)	RH (ACPH)	Diamètre du bac (m)
1 - 4	Heptane	267	1.7	9.67	0.19
5 - 8	Dodécane				

Les résultats sur le débit de pyrolyse par unité de surface, la pression différentielle dans le diaphragme, les évolutions de températures, la concentration d'oxygène et monoxyde de carbone sont présentés ci-dessous :

La Figure 3.1 montre l'évolution temporelle du taux de perte de masse par unité de surface du bac de combustible (MLR) pour les feux d'heptane (Figure 3.1 – a) et de dodécane (Figure 3.1 – b). La superposition des courbes du MLR pour les deux combustibles en une seule courbe est correcte. L'écart maximum est pour l'essai 3 avec l'heptane (Figure 3.1 – a). À partir de 900 s, présente un écart de l'ordre de 6.2 % par rapport aux autres essais. Cette valeur a été obtenue à partir de l'écart-type sur la période considérée divisé par la valeur moyenne des quatre essais (coefficient de variation).

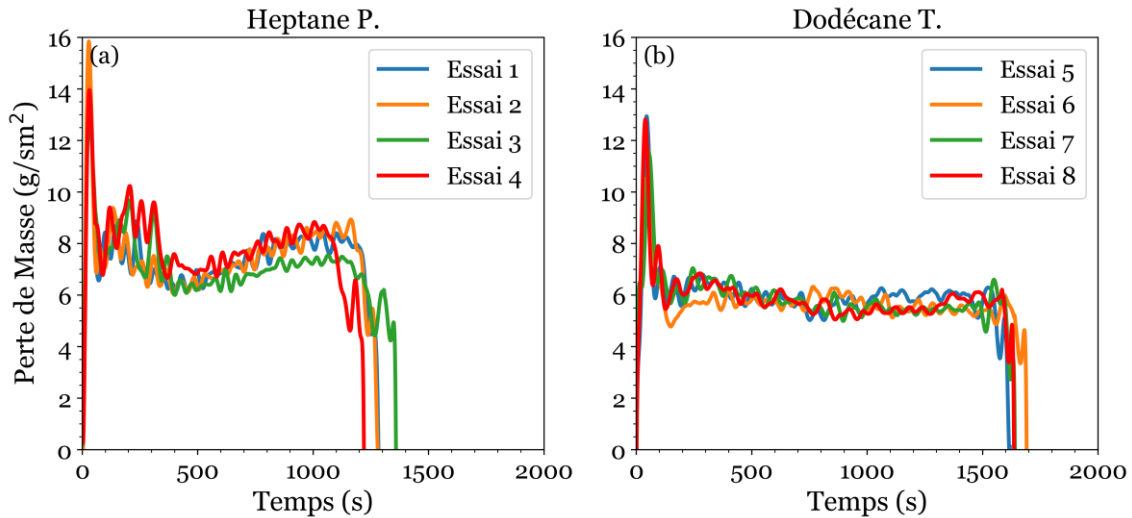


Figure 3.1 - Évolution temporelle du taux de perte de masse lors des incendies ventilé mécaniquement à 9.67 ACPH et $D = 0.19$ m. (a) n-heptane pure ; (b) dodécane technique.

La Figure 3.2 présente l'évolution de la pression différentielle dans le diaphragme en fonction du temps. Il faut rappeler que cette mesure est utilisée pour calculer le débit d'air qui entre dans le compartiment (voir Section 2.6). Les courbes de la pression pour les deux scénarios d'incendie, d'heptane (Figure 3.2 – a) et de dodécane (Figure 3.2 – b) sont identiques, ce qui démontre la répétabilité de ce dispositif de mesure. Par conséquent, l'écart observé dans le MLR de l'essai 3 (Figure 3.2 – a) ne résulte pas d'un changement de la pression à l'entrée du compartiment, puisque le débit d'air pour les quatre essais est identique.

L'évolution temporelle de la température au niveau de la flamme pour les deux combustibles est présentée sur la Figure 3.3. Le thermocouple a été placé à environ 22 cm au-dessus du bac de combustible. Pour l'incendie de n-heptane pur (Figure 3.3 – a), les courbes de la température suivent une courbe unique pendant les 800 premières secondes des incendies. Au-delà de 800 s, les essais 1 et 2, réalisés le même jour, présentent un écart d'environ 160 °C par rapport aux deux autres essais (différence entre la valeur moyenne des essais 1 et 2 moins la valeur moyenne des essais 3 et 4). Pour le dodécane (Figure 3.3 – b), le

comportement est similaire à celui de l'heptane pour des temps inférieurs à environ 800 s. Aux temps supérieurs à 800 s, la courbe de l'essai 6 présente un écart d'environ 75 °C par rapport aux autres essais (différence entre la valeur moyenne de l'essai 6 moins la valeur moyenne des essais 5, 6 et 8, dans la période concernée). Le même comportement des températures dans l'axe vertical de la flamme a été observé pour le reste des thermocouples pour les deux types de combustible.

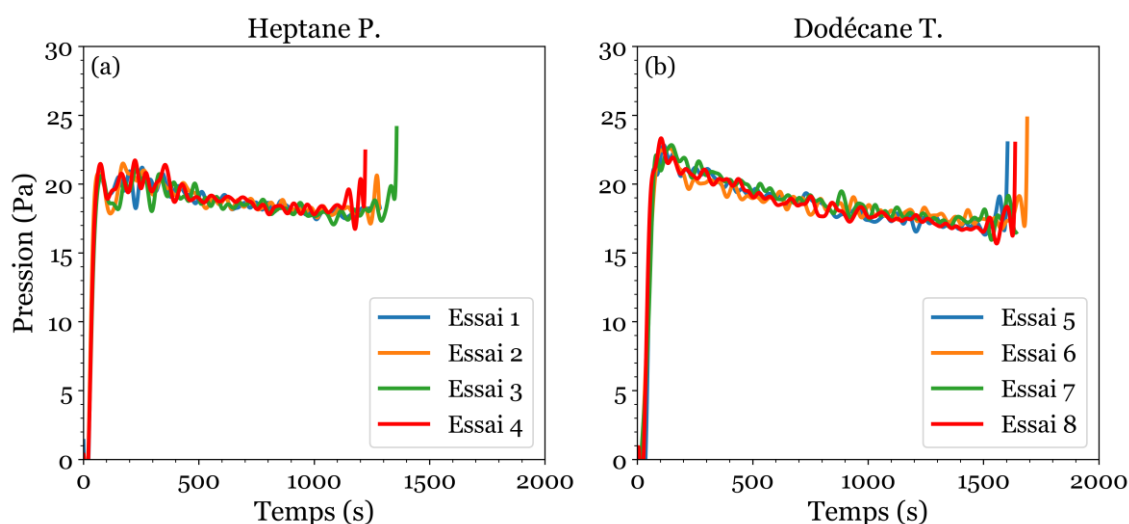


Figure 3.2 - Évolution temporelle de la pression différentielle dans le diaphragme lors des incendies ventilé mécaniquement à 9.67 ACPH et $D = 0.19$ m. (a) n-heptane pure ; (b) dodécane technique.

En fait, la localisation du thermocouple dans la zone de flamme est un paramètre sensible car les gradients horizontaux sont importants. Il est possible que les différences observées sur la Figure 3.3 soient dues à un léger changement de position du thermocouple par rapport à l'axe de la flamme, peut être au moment de l'introduction du bac de combustible avant allumage. D'autre part il est possible que l'efficacité de la combustion ait été meilleur (en fin d'essais) pour les tests présentant une température plus élevée. Cela aura des conséquences sur la répétabilité des mesures du CO, comme on le verra ci-dessous. Mais globalement, on peut voir que la répétabilité reste assez bonne pour cette mesure de température dans la flamme.

L'évolution temporelle de la température du gaz dans la zone de fumée chaude pour les deux types des incendies est présentée sur la Figure 3.4. Le thermocouple a été placé dans le coin du caisson à environ 80 cm du sol du compartiment. Les courbes des deux scénarios d'incendie, n-heptane (Figure 3.4 – a) et dodécane technique (Figure 3.4 – b) se regroupent en une courbe unique. La température moyenne dans la fumée des feux d'heptane est de 340

°C et de 277 °C pour le dodécane. Cependant, dans le cas d'heptane, à environ 850 s, il existe un écart relatif en moyenne inférieur à 3 % entre l'essai 3 par rapport aux essais 1, 2 et 4. Pour le dodécane, si l'on considère l'intervalle de temps 900 à 1300 s, l'essai 5 exhibe un écart relatif en moyenne d'environ 4.1 %. Ces données ont montré un écart type relativement faible, de sorte qu'un bon accord entre les mesures a été considéré.

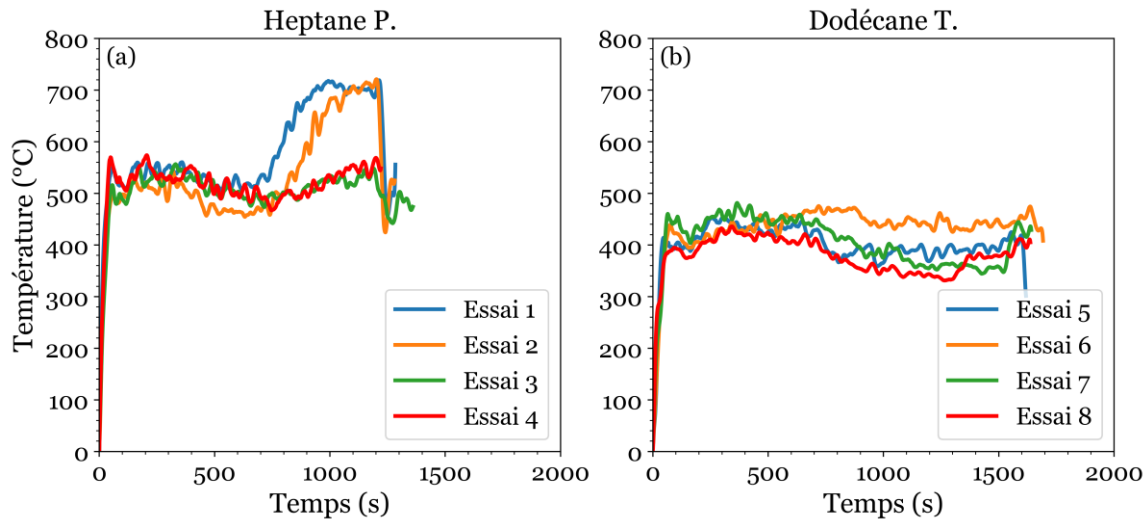


Figure 3.3 - Évolution temporelle de la température dans la zone de flamme lors des incendies ventilé mécaniquement à 9.67 ACPH et $D = 0.19$ m. (a) n-heptane pure ; (b) dodécane technique.

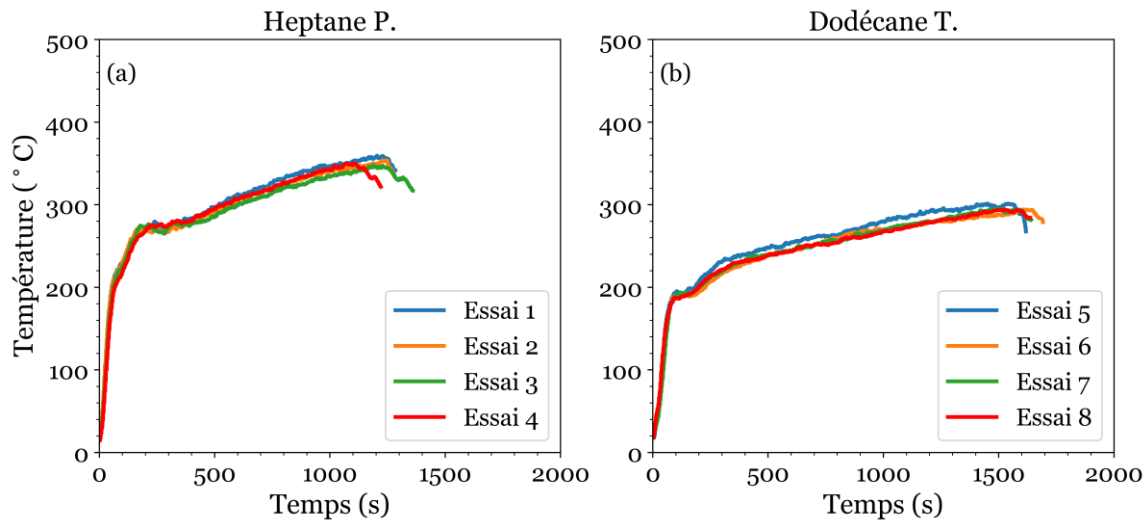


Figure 3.4 - Évolution temporelle de la température dans la zone des fumées lors des incendies ventilé mécaniquement à 9.67 ACPH et $D = 0.19$ m. (a) n-heptane pure ; (b) dodécane technique.

Il a été observé la même répétabilité des mesures des températures dans les gaz pour l'autre des thermocouples dans la chambre. On voit que, dans le cas des mesures dans les fumées, la position exacte du thermocouple de mesure par rapport à l'axe du bac est beaucoup moins sensible que dans le cas des mesures au sein de la flamme. Ce qui est logique, car en hauteur le mélange horizontal est important et les gradients moins forts. La répétabilité des mesures dans les fumées est très satisfaisante.

La répétabilité des mesures de la concentration d'oxygène est présentée sur la Figure 3.5. L'analyseur de gaz ECOM EN2 modèle 6279 a été utilisé, la sonde de l'appareil a été placée dans le conduit d'évacuation des gaz. Les essais de n-heptane pur (Figure 3.5 – a) pendant environ 200 s montrent une courbe unique. Pendant la période de 200 à 400 s, il existe un écart d'environ 8 % entre les essais 1 et 2 par rapport aux essais 3 et 4 (écart-type entre la valeur moyenne). Au-delà de 400 s, les courbes ont la même évolution. Lors des essais de dodécane (Figure 3.5 – b), un comportement similaire à celui de l'heptane a été constaté pendant la période de 200 à 400 s. Au cours de cette période, seulement l'essai 6 a montré un écart en moyenne inférieur à 4.6 %. Au-delà de 400 s, un bon accord a été trouvé entre les essais 5, 7 et 8. Pendant la période 900 à 1100 s, pour le dodécane, un écart d'environ 4.5 % (écart-type entre la valeur moyenne) a été constaté.

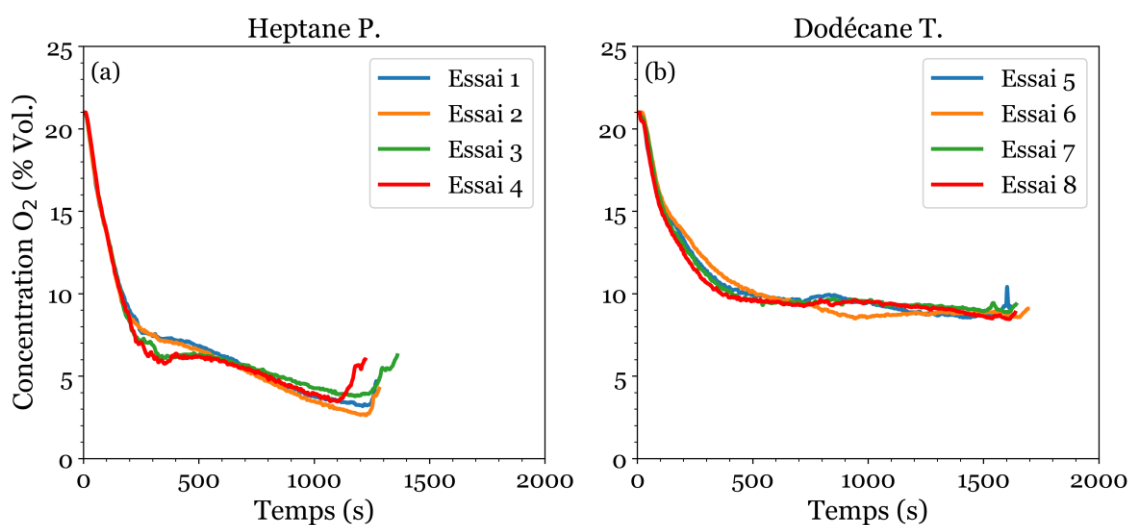


Figure 3.5 - Évolution temporelle de la concentration d'oxygène dans le conduit d'évacuation du gaz lors des incendies ventilé mécaniquement à 9.67 ACPH et $D = 0.19$ m. (a) n-heptane pure ; (b) dodécane technique.

Sur la base des résultats ci-dessus, il a été considéré que les mesures d'oxygène sont reproductibles, même si les conditions ambiantes du laboratoire sont différentes. Par contre,

comme on va le voir ci-dessous pour le CO, ces faibles variations d'oxygène dans le caisson entraîneront des variations importantes pour le monoxyde de carbone.

La Figure 3.6 présente la répétabilité de l'évolution de la concentration de monoxyde de carbone dans le conduit d'évacuation des gaz. La sonde de l'analyseur du gaz ECOM EN2 a été placée aux mêmes endroits que pour la mesure d'oxygène. L'évolution du CO pour les deux combustibles présente une tendance similaire. Cependant, pour les essais de n-heptane (Figure 3.6 – a), les valeurs maximales de CO ont été relevées juste avant l'extinction des incendies. Dans le cas de l'heptane, de 250 s à environ 650 s, les essais 1 et 2 ont montré un écart en moyenne de 14.9 % par rapport aux essais 3 et 4. Dans les cas de dodécane (Figure 3.6 – b), les courbes se superposent pendant environ 700 s. Au-delà de cette période, à environ 1000 s, il a été observé un écart significatif, d'environ 15.5 % entre l'essai 6 par rapport aux essais 5, 7 et 8 et un écart d'environ 14.6 % à 1300 s entre les essais 5 et 6 par rapport aux essais 7 et 8, respectivement.

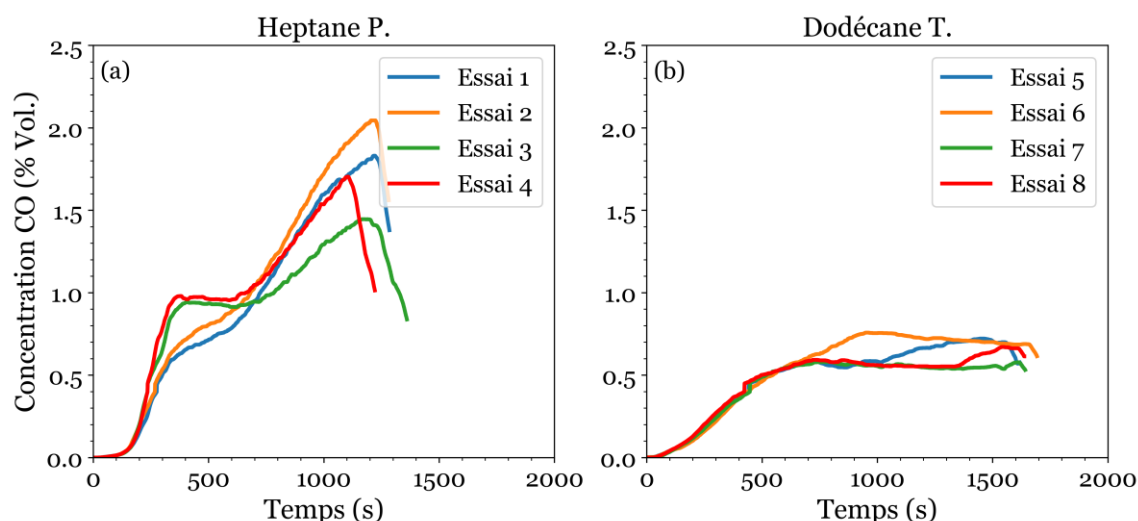


Figure 3.6 - Évolution temporelle de la concentration de monoxyde de carbone dans le conduit d'évacuation du gaz lors des incendies ventilés mécaniquement à 9.67 ACPH et $D = 0.19$ m. (a) n-heptane pure ; (b) dodécane technique.

On voit que les variations les plus fortes se produisent aux mêmes périodes pendant lesquelles la concentration en oxygène (O_2) varie un peu entre chaque essai (voir Figure 3.5). On peut déjà affirmer que la production de monoxyde de carbone (CO) est sensible aux variations de l' O_2 . Les différences observées entre les mesures du CO peuvent aussi être attribuées au fait que la température dans la zone de flamme varie d'un essai à l'autre, comme cela a été montré dans la Figure 3.3. La production du CO semble aussi sensible à la température dans la zone de flamme. Mais les variations de l' O_2 et de la température de

flamme ne jouent pas dans le même sens. La production de CO augmente si l'oxygène disponible diminue, mais aussi si la température dans la zone de flamme augmente.

Les résultats visant à qualifier le fonctionnement des appareils de mesure, ont montré une bonne répétabilité des mesures. Les résultats obtenus permettent d'utiliser les dispositifs expérimentaux présentés sur la Figure 2.2 pour le développement de cette étude.

3.4. Effet de la ventilation sur la perte de masse, la richesse globale et la température

Les résultats de la perte de masse par unité de surface du bac de combustible (MLR), la richesse globale (GER) et la température pour les quatre combustibles à différents taux de ventilation sont présentés dans cette section. Une série d'expériences a été réalisée à 4.83, 9.67 et 17.8 ACPH afin d'examiner l'impact du débit de ventilation sur chaque type d'incendie, et de pouvoir caractériser l'évolution du processus de combustion lors des incendies confinés et ventilés mécaniquement dans le compartiment de 1 m³ du laboratoire CORIA.

3.4.1. Perte de masse du combustible et richesse globale

Perte de masse du combustible (MLR)

Le taux de perte de masse (MLR) a été obtenu en mesurant la masse du combustible évaporée dans un bac en verre pyrex de 0.19 m diamètre, placé sur la balance Mettler Toledo (cf. section 2.3). L'évolution du MLR en fonction du temps pour les différents combustibles utilisés est présentée sur la Figure 3.7. Cette figure montre également le taux de perte de masse pour le même diamètre du bac lors des incendies ouverts sous une hotte (ligne noire pointillée). L'augmentation du taux de ventilation (RH) contribue à une augmentation de la perte de masse du combustible. Par ailleurs, le MLR est plus important dans le cas des feux ouverts.

Les résultats sur la perte de masse des incendies ouverts (MLR_{ouvert}) pour les quatre combustibles, ont montré qu'elle augmente assez rapidement jusqu'à atteindre un état quasi-stable (période de 200 à 800 s) qui s'étend jusqu'à l'extinction, et varie selon le type de combustible. Les pertes de masse moyennes de chaque combustible pendant cette période sont : 12.32 g/sm² pour l'heptane (Figure 3.7 – a), 11.40 g/sm² pour le dodécane (Figure 3.7 – b), 10.73 g/sm² pour le kérosène (Figure 3.7 – c) et 9.95 g/sm² pour l'huile Mobil DTE (Figure 3.7 – d), respectivement. En accord avec Coppalle et al. (Coppalle, Loo, & Ainé, 2016), cet écart est certainement lié aux propriétés physiques des combustibles (voir Tableau 2.2). Si on compare ces propriétés pour l'heptane et le kérosène, on constate des différences importantes

au niveau de la chaleur latente et du point éclair. Les valeurs les plus faibles sont observées pour l'heptane.

La tendance générale pour les quatre combustibles étudiés est donc la suivante : Plus l'hydrocarbure liquide est lourd, plus les valeurs de la chaleur latente et du point éclair sont grandes, ce qui entraîne une diminution de la perte de masse (on rappelle que la molécule d'heptane contient 7 atomes de carbone et celle de l'huile Mobil DTE plus de 12 atomes). Après la période quasi-stationnaire, la perte de masse de ces feux ouverts diminue jusqu'à zéro lorsque le combustible a brûlé complètement. Un autre point important en ce qui concerne les feux à l'air libre est le temps de combustion, qui diffère suivant le type de combustible. Celui-ci se situe entre 850 s (temps de combustion de l'heptane) à 1100 s (temps de combustion de l'huile Mobil DTE), le dodécane et le kérosène ont montré des temps de combustion similaires, environ 900 s.

Les résultats obtenus, en faisant varier le taux de renouvellement d'air, permettent de caractériser les processus de développement des incendies ventilés mécaniquement dans ce compartiment. Selon la Figure 3.7, le processus de combustion des feux de nappe peut être divisé en trois phases : (i) inflammation du combustible et croissance, (ii) profil quasi-stable, (iii) décroissance et l'extinction du feu, par manque soit de combustible soit d'oxygène.

La phase (i) représente l'inflammation du combustible et la croissance de la flamme. L'inflammation s'effectue avec la porte du compartiment ouverte, à l'aide d'une source de chaleur externe (brûleur à butane d'une puissance de 1.6 kW). En ce qui concerne la croissance rapide du taux d'évaporation du combustible, elle se caractérise par une augmentation de la puissance de feu. Pendant cette phase, le MLR augmente très rapidement après l'allumage du combustible. Les taux de combustion, dans les trois conditions de ventilation utilisées, atteignent leur valeur maximale, supérieures à celles des feux ouverts (Figure 3.7). Cette phase dure environ 50 s, de sorte qu'elle pourrait être caractérisée comme une augmentation rapide suivie d'une diminution rapide, parfois jusqu'à des valeurs inférieures à celles des feux ouverts. Ce pic dans le MLR n'a été observé que dans les incendies ventilés mécaniquement. Un pic similaire a également été trouvé par Saux et al. (Saux, Pretrel, Lucchesi, & Guillou, 2008), Melis et al. (Melis & Audouin, 2008) lors des incendies avec du Tetra-Propylène d'Hydrogène (TPH) à différents taux de ventilation (1.5, 4.7 et 8.4 ACPH) dans un compartiment de 120 m³, et par Loo et al. (Loo, Coppalle, Yon, & Aîné, 2016) lors des incendies d'heptane et de dodécane à 5 et 8 ACPH.

La phase (ii) est caractérisée par un profil quasi-stable du MLR, sauf pour l'heptane et le dodécane avec la ventilation la plus forte (17.8 ACPH). En dehors de ces deux cas, la perte

de masse est quasi constante. La durée de cette phase dépend du type de combustible. Pour le renouvellement le plus faible (4.83 ACPH), le MLR de chaque combustible reste presque constant jusqu'à l'extinction du feu. À 17.8 ACPH, les incendies d'heptane et de dodécane (Figure 3.7 – a et b) présentent un accroissement dans la courbe de la perte de masse peu avant la fin du test. En revanche, le MLR pour les incendies du kérosène et l'huile Mobil DTE (Figure 3.7 – c et d), dans les conditions de ventilation utilisées, varie peu jusqu'à l'extinction. Cette différence de comportement à 17.8 ACPH, un peu avant la fin des tests, s'explique par l'effet du rayonnement des parois et de la fumée sur le bac, qui devient important et non négligeable. En effet, lors de la présentation des résultats de température, on constatera un accroissement important des valeurs à forte ventilation. Un calcul simple des flux rayonnés reçus par le bac, détaillé en Annexe C, montrera que le flux rayonné des parois et de la fumée a une contribution non négligeable par rapport à celui de la flamme.

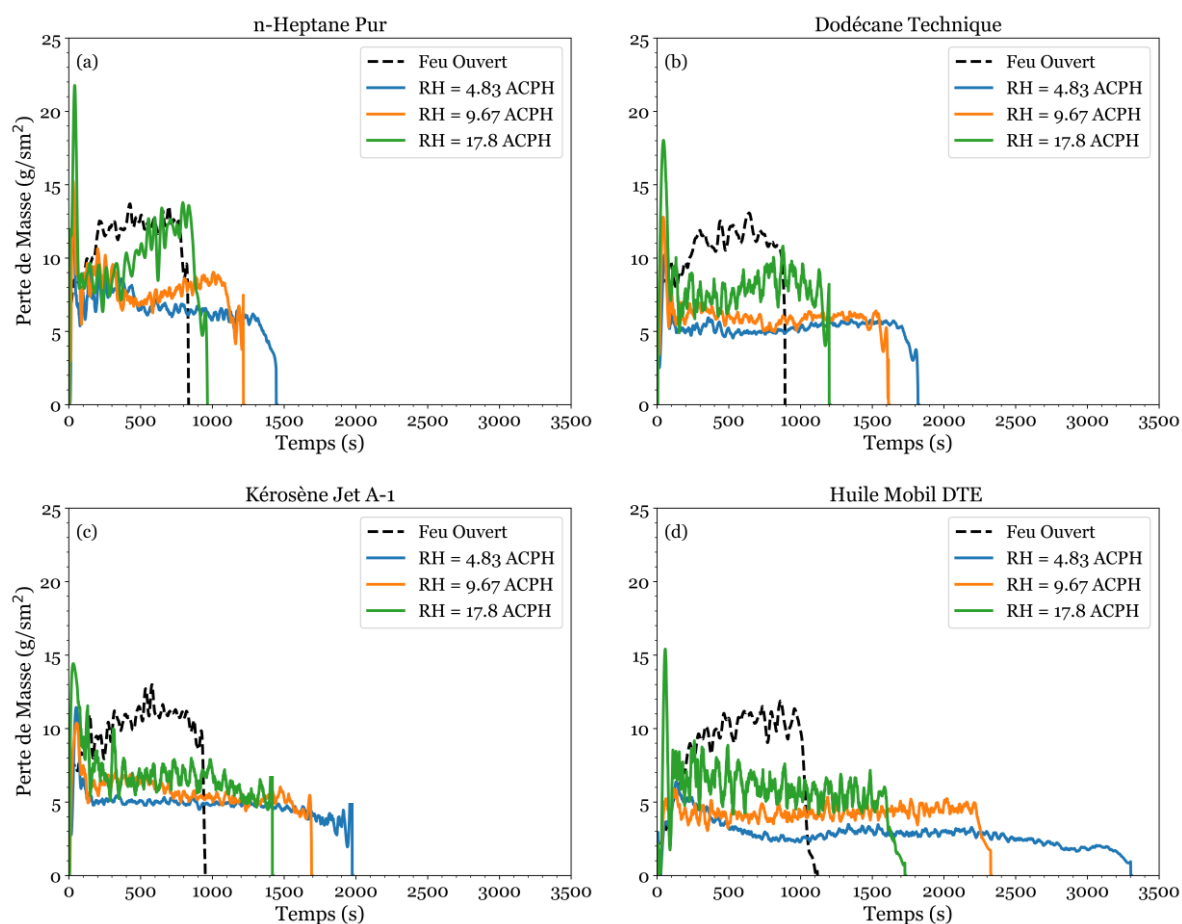


Figure 3.7 - Influence du taux de ventilation sur l'évolution de la perte de masse du combustible au cours du temps. (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m.

Cependant, un phénomène d'effet de bord est possible. Lassus et al. (Lassus, et al., 2010; Lassus J. , et al., 2014) ont montré que la hauteur entre le bord du bac et la surface du combustible liquide pouvait jouer sur le MLR. Il est intéressant de savoir si cet accroissement dans la courbe de la perte de masse à des taux de ventilation élevés pendant les incendies d'heptane et de dodécane est dû aux effets du bord, du fait que la hauteur entre le bord du bac et la surface du combustible liquide a diminué en fin de tests. Des expériences ont donc été réalisées avec des bacs en acier de hauteurs différentes, 22, 45 et 90 mm, pour la même quantité initiale de combustible. Les essais ont été menés avec l'heptane pur à 9.67 ACPH, ce paramètre a été pris en compte car le phénomène d'accroissement s'est produit à partir de cette condition dans le cas de l'heptane. Les résultats sont présentés dans l'Annexe B (cf. Figure B. 1). Il a été constaté que, pour la condition de ventilation utilisée, le MLR consiste en une phase stable suivie d'une phase d'accroissement, très similaire aux résultats trouvés. Aucune différence a été observée entre les bacs aciers de différentes hauteurs, et les valeurs sont identiques aux résultats déjà présentés ci-dessus avec un bac en verre. Il a donc été conclu que l'accroissement observé dans le MLR pour les feux d'heptane et de dodécane, après la période quasi-stable, à des taux de ventilation élevés, est plutôt dû au rayonnement de l'enceinte sur la surface du liquide.

Pendant la phase quasi-stable, et pour tous les combustibles, l'augmentation du taux de ventilation génère des taux de perte de masse du combustible plus élevés, ce qui augmente le taux de dégagement de chaleur et diminue le temps de combustion (extinction plus rapide). Il peut être également considéré que des taux de ventilation élevés favorisent le mélange entre la vapeur du combustible disponible pour la combustion et l'air entrant, c'est-à-dire que le mélange combustible/air est plus homogène, ce qui favorise la combustion.

La phase (iii) est la décroissance du feu suivie de l'extinction, qui correspond à la fin du processus de combustion. Le taux de combustion diminue jusqu'à ce que le feu s'éteigne. Dans les conditions étudiées, l'extinction de chaque type de combustible se produit par manque de combustible.

La richesse globale (GER)

La richesse globale « GER » (Global Equivalence Ratio dans la terminologie anglo-saxonne), symbolisé par Φ_g , est définie comme le rapport entre le débit de combustible et le débit d'air qui entre dans le compartiment par le même rapport à la stœchiométrique, $(\dot{m}_{\text{Combustible}}/\dot{m}_{\text{air}})/(1/s)$. Où $\dot{m}_{\text{Combustible}}$ est le débit d'évaporation du combustible (g/s),

\dot{m}_{air} est le débit massique de l'air entrant (g/s), s est la valeur stœchiométrique du rapport $(\dot{m}_{\text{air}}/\dot{m}_{\text{Combustible}})_{\text{st}}$.

Dans la présente étude, le GER est utilisé pour caractériser la ventilation du caisson pendant les incendies. Le critère est : (i) $\text{GER} < 0.7$, pour un foyer sur-ventilé ou bien ventilé, ces incendies se développent dans un environnement où l'apport d'air est illimité, par exemple les feux ouverts ; (ii) $0.7 \leq \text{GER} < 1.5$, foyer sous-ventilé, avec un apport d'air limité ; (iii) $\text{GER} \geq 1.5$, foyer très sous-ventilé, dans lequel l'apport d'air est plus limité par rapport au précédent cas (Tewarson & Steciak, 1983; Magnognou, Garo, Coudour, & Wang, 2017). Tewarson et al. (Tewarson & Steciak, 1983) ont souligné qu'en passant d'une situation de sur-ventilé à sous-ventilé, les propriétés du feu peuvent changer. Ce changement comprend : l'énergie d'inflammation, le flux thermique de la flamme, la chaleur de combustion ou même l'efficacité de la combustion, le rendement d'émission des espèces chimiques, les propriétés des fumées (taille des particules de suie ou masse volumique).

L'évolution de la richesse globale pour les quatre combustibles étudiés est présentée sur la Figure 3.8. Les résultats ont montré que le GER diminue lorsque le taux de ventilation est important. Lorsque le taux de ventilation est faible, les incendies se développent dans un environnement qui se comporte de manière sous-ventilée, et dans le cas d'heptane très sous-ventilée (Figure 3.8 – a) avec des valeurs au-dessus de 1.5.

À part les cas de l'heptane à 9.67 et 17.8 ACPH et du dodécane à 17.8 ACPH, il a été constaté que le GER reste presque constant au cours de chaque test. Pour l'huile Mobil DTE, dans les trois taux de ventilation, les foyers sont dans un milieu suffisamment ventilé, c'est-à-dire $\text{GER} < 0.6$.

Enfin, en comparant la Figure 3.7 et Figure 3.8, on s'aperçoit que les variations du GER suivent celles du MLR. Le GER semble donc conditionné par la valeur du MLR. Ceci est corroboré par les résultats de pression reportés sur la Figure 3.2 pour l'heptane et le dodécane à 9.67 ACPH. La pression différentielle entre l'extérieur et l'intérieur du caisson décroît légèrement pendant ces deux tests. Ce qui veut dire que le débit d'air varie peu aussi, si bien qu'il peut-être considéré constant. Les variations du GER pendant un test sont essentiellement contrôlées par celles du MLR.

Les conditions de ventilation utilisées dans cette étude ont permis d'étudier des incendies qui se sont développés dans des environnements dits bien ventilés (cas de l'huile Mobil DTE, dans les trois conditions), de ventilation sous-ventilés (cas d'heptane, dodécane et kérosènes à 9.67 et 17.8 ACPH) et très sous-ventilés (cas d'heptane à 4.83 ACPH).

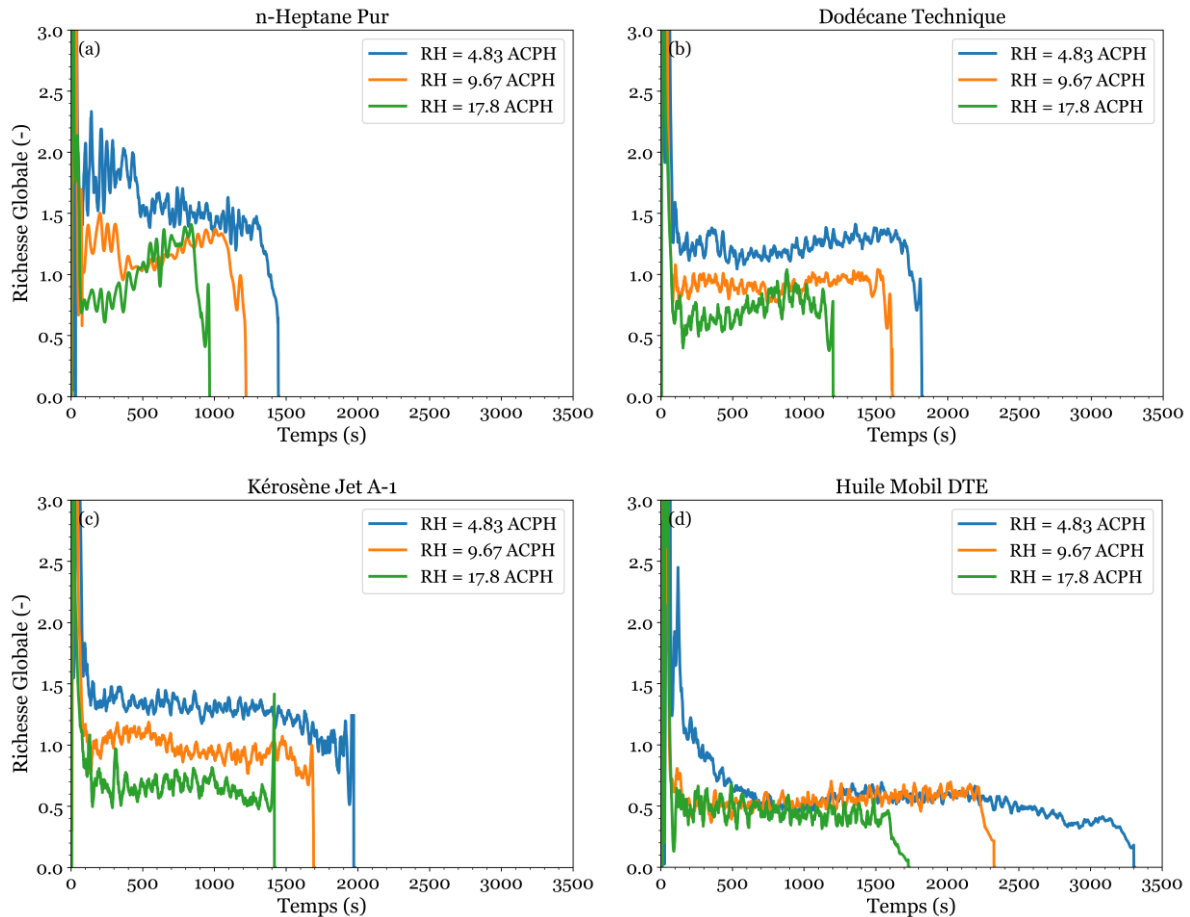


Figure 3.8 - Effet du taux de ventilation sur la richesse globale. (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m.

3.4.2. Relation entre la perte de masse du combustible et le taux de ventilation

Afin de connaître la relation directe entre la perte de masse de chaque type de combustible et le renouvellement horaire, la Figure 3.9 a été réalisée. À partir de l'évolution du MLR présentée sur la Figure 3.7, une valeur moyenne dans la phase de l'incendie « *quasi-stable* » a été considérée (cette période sera définie précisément lors de la présentation des résultats sur l'oxygène). Pour l'heptane et le dodécane, il a également été reporté les valeurs obtenues par Loo et al, et qui correspondent à la valeur moyenne pendant la période stable à 8 ACPH (Loo, Coppalle, Yon, & Aîné, 2016).

Les résultats pour les quatre combustibles, dans les conditions utilisées, montrent une tendance qui semble être linéaire. Le MLR augmente linéairement à mesure que le taux de ventilation dans le compartiment augmente et varie en fonction du type de combustible. Des résultats similaires ont été trouvés par Aljumaiah et al. (Aljumaiah, et al., 2011), lors des

incendies ventilés mécaniquement dans un compartiment de 1.6 m³, à l'aide de palettes en bois de pin.

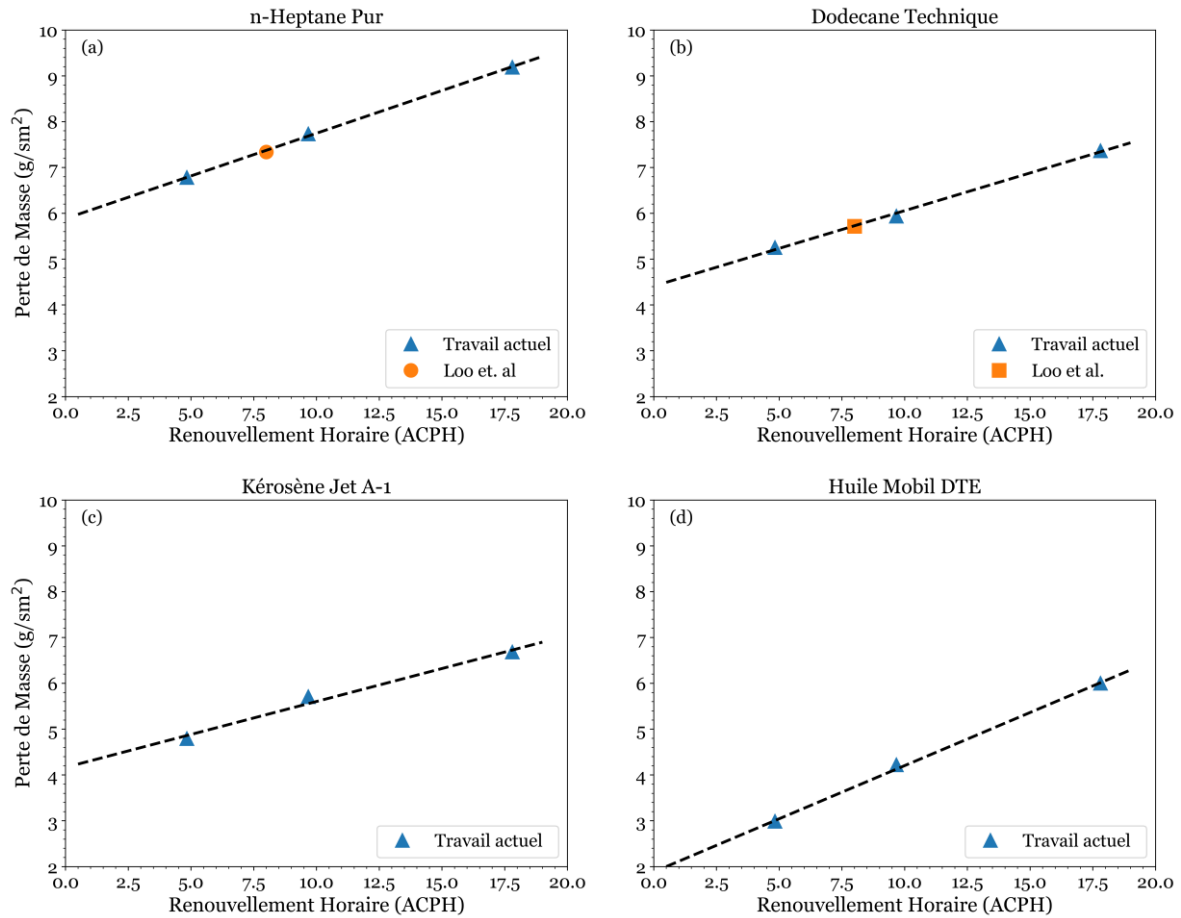


Figure 3.9 - Relation entre le débit de pyrolyse du combustible par unité de surface et le taux de ventilation à $D = 0.19$ m, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.

3.4.3. Évolution de la température en fonction du taux de ventilation

Température selon l'axe vertical de la flamme

La mesure de la température dans la flamme a été effectuée à l'aide de 8 thermocouples positionnés selon l'axe vertical de la flamme (cf. Figure 2.5) au-dessus du bac du combustible au centre du compartiment. Cette mesure a été utilisée pour déterminer l'influence de la ventilation sur la température dans la zone de flamme lors des incendies de compartiment ventilé mécaniquement. Les résultats obtenus ont ensuite été comparés avec la corrélation empirique développée par McCaffrey et Bernard (McCaffrey B. J., 1979) pour les incendies ouverts (cf. Section 1.5).

La corrélation de McCaffrey permet de calculer les températures dans la flamme. Cette corrélation est basée sur le fait que la flamme est divisée en trois zones, continue, intermittente et panache thermique. La variable $Z/\dot{Q}^{-2/5}$, proposé par McCaffrey, est donc retenu pour représenter la hauteur Z dans la flamme, avec $Z = z - z_0$, z est la hauteur réelle du point de mesure (thermocouple), z_0 est la hauteur de l'origine ponctuelle virtuelle de la source de diamètre finie D , \dot{Q} est le taux moyen de dégagement de chaleur, obtenu par la méthode théorique (cf. Section 1.7).

La Figure 3.10 présente les résultats obtenus sur la température moyenne dans la période stable du feu, selon l'axe vertical de la flamme à différents taux de ventilation. Pour un point de mesure donné sur l'axe et au-dessus du bac. Il a été trouvé que la température augmente en fonction de la ventilation.

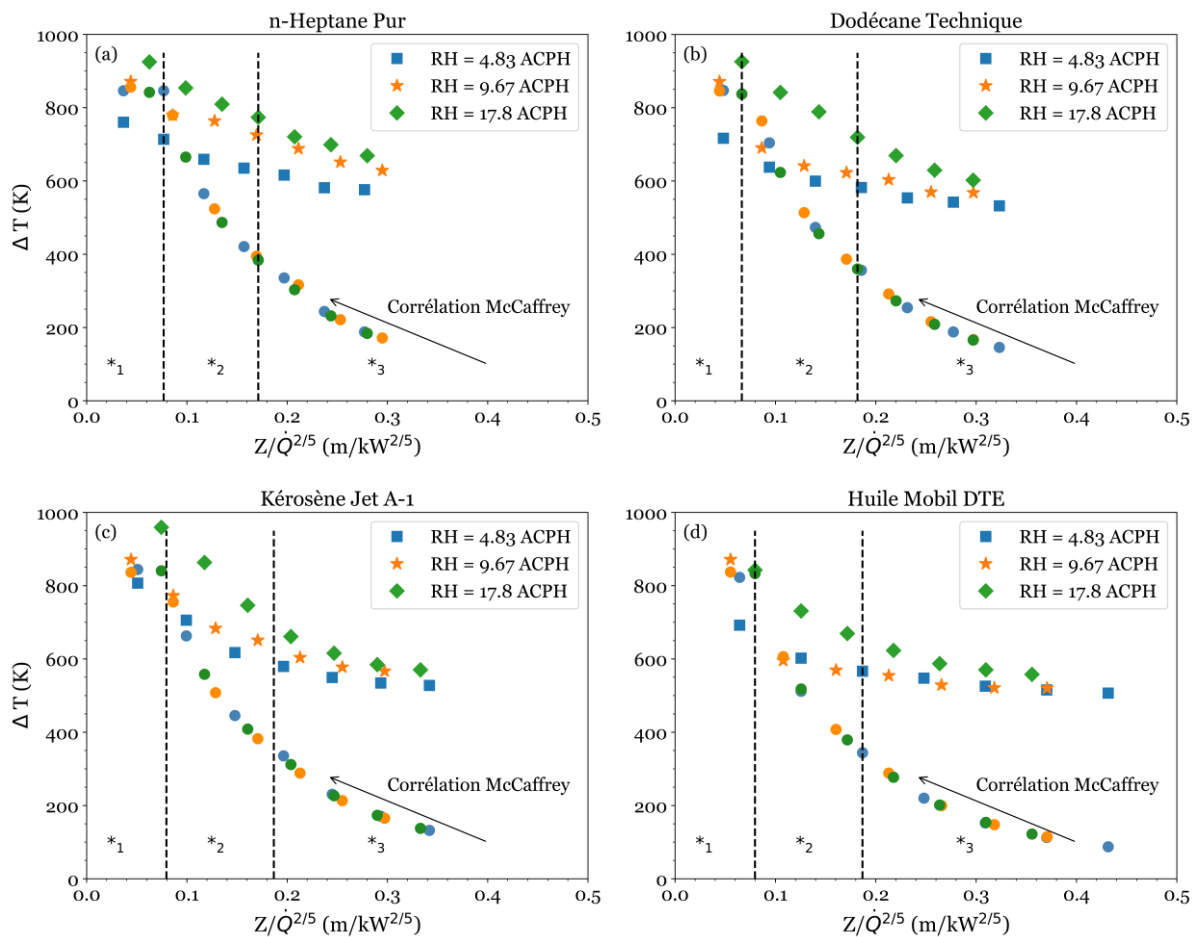


Figure 3.10 - Variation de la température selon l'axe vertical de la flamme dans un compartiment ventilé mécaniquement. (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m. *1 est la zone continue ; *2 est la zone intermittente ; *3 est la zone de panache.

Pour un point de mesure donné sur l'axe et au-dessus du bac. Il a été trouvé que la température augmente en fonction de la ventilation. Pour chaque type de combustible et chaque taux de ventilation, il est possible de calculer une température avec la corrélation de McCaffrey, en calculant un HRR égale au produit de la perte de masse fois la chaleur de combustion (J/kg du combustible). De même, on définit les trois zones de température avec les critères de McCaffrey. Les résultats pour les trois taux de ventilation montrent que les températures dans la zone continue (*1) s'approchent de celles obtenues avec la corrélation de McCaffrey. Dans cette zone, la variation de la température est de l'ordre de 700 à 950 K. Par contre, les températures mesurées dans la zone de flamme intermittente (*2) et le panache (*3) sont plus importantes que celles obtenues par la corrélation McCaffrey, avec un écart important. Un comportement similaire a été observé pour les quatre combustibles dans les trois zones définies par la corrélation de McCaffrey. Ceci était attendu, car le confinement conduit à la formation d'une couche chaude sous plafond, dans laquelle la température est élevée. En réalité, la stratification des températures est surtout contrôlée par les recirculations internes. Ces résultats conduisent à deux conclusions : (i) il y a un effet du confinement et de la ventilation sur la température au niveau de la zone de flamme. (ii) la corrélation de McCaffrey ne peut pas être appliquée à un foyer confiné.

Température dans les fumées

La mesure de température dans les fumées a été effectuée à l'aide de 8 thermocouples situés dans le coin gauche du compartiment. Seul un thermocouple a été pris en considération pour l'analyse de la ventilation. Placer toutes les mesures de température qui ont été obtenues à partir de l'arrangement de thermocouples aurait compliqué l'analyse et l'interprétation des données. La mesure montrée ci-dessous a été faite par le thermocouple 8 de l'arbre des thermocouples (voir Figure 2.5), qui est positionné plus précisément à 10 cm de la sortie de fumées du compartiment vers le conduit d'évacuation. Il s'agit de la valeur maximale atteinte dans chaque incendie. Les résultats de l'évolution des températures des quatre types de combustibles pour les trois conditions de ventilation sont présentés sur la Figure 3.11.

Les résultats montrent qu'avec l'augmentation du taux de ventilation, la température des fumées augmente, et que cela dépend du type de combustible. En effet, les valeurs sont décroissantes selon l'ordre suivant pour les combustibles : heptane > dodécane > kérosène > huile. Pour un RH donné, la température des fumées augmente continuellement, sans atteindre une valeur constante. Ce qui s'explique par le transfert et le stockage de chaleur qui diminue dans les parois au cours du test. Un comportement similaire a également été observé

pour les quatre types de combustible et par Prétrel et al. (Prétrel, Bouaza, & Suard, 2021). Selon les conditions utilisées, la température des fumées dans les incendies d'heptane varie de 270 à environ 400 °C, dans le cas de dodécane de 260 à environ 350 °C, pour le kérosène de 250 à environ 290 °C et pour l'huile Mobil DTE de 230 à environ 280 °C. Ces données représentent les taux de ventilation à 4.83, 9.67 et 17.8 ACPH, respectivement.

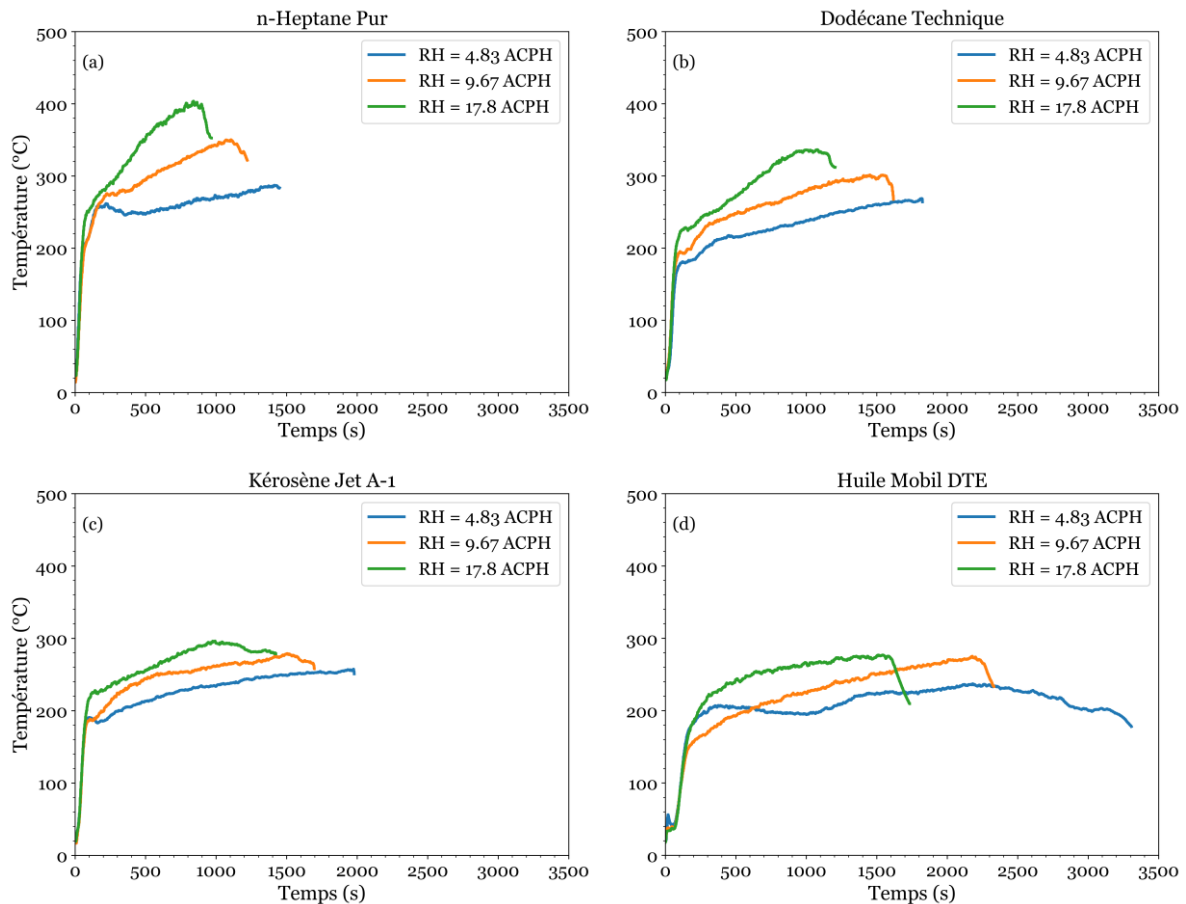


Figure 3.11 - Influence du taux de ventilation sur l'évolution de température du gaz dans le compartiment. (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m.

Lassus et al. (Lassus, et al., 2010) ont mesuré la température des fumées dans le conduit d'évacuation, dans un compartiment en béton de 8 m³. Un bac d'heptane de 0.23 m et à différents taux de ventilation (1 à 7.62 ACPH) a été utilisé. Il a été trouvé des températures de gaz qui varient de 250 à 300 °C. D'après les auteurs, ces niveaux de température sont suffisants pour entraîner une auto-inflammation des gaz imbrûlés dans le conduit. Des expériences similaires ont été menées par Magnognou et al. (Magnognou, Garo, Coudour, & Wang, 2017), ces expériences ont été réalisées dans le même compartiment avec de l'heptane et du dodécane à 3 et 5 ACPH avec différentes tailles de bac (0.23, 0.30 et 0.40 m). Il a été

trouvé des températures de fumées à l'entrée du conduit d'évacuation d'environ 250 à 450 °C, les auteurs ont souligné qu'à 450 °C, il y a eu auto-inflation du gaz dans le conduit. Sur la base des résultats montrés par ces auteurs, il peut être considéré que les températures trouvées dans la présente étude pourraient également déclencher l'inflammation de gaz non brûlés. Mais d'autres conditions, comme la concentration minimale de gaz imbrulés, peuvent jouer. Dans la présente thèse, on ne montre pas la concentration des imbrulés, on montre uniquement celle du monoxyde de carbone qui est très faiblement inflammable dans nos conditions.

Profil vertical de température dans la fumée

En considérant les mesures avec l'arbre de thermocouples du coin, il est possible d'obtenir le profil vertical de température du gaz pour chaque type de combustible. La Figure 3.12 montre les profils verticaux des températures des fumées dans le compartiment à 9.67 ACPH. Cette figure met en évidence la stratification thermique des fumées dans le caisson.

Les résultats obtenus avec cette condition de ventilation (9.67 ACPH) montrent que, dès 100 s, deux zones se forment dans le compartiment. On observe une cassure de pente à partir de 0.2 à 0.3 m par rapport au sol. La zone supérieure constituée des fumées, dont la température pour les quatre combustibles est au-dessus de 200 °C et la zone inférieure contenant du gaz relativement frais à une température inférieure à 200 °C. La couche de fumées chaudes, observée à travers le hublot du caisson, est descendue à environ 0.3 m du sol au cours des incendies d'heptane, et à environ 0.2 m pour le dodécane, le kérosène et l'huile Mobil DTE. Ces valeurs ne changent pas au cours de l'essai quel que soit le combustible. Pour résumer, la couche de fumée n'atteint pas le sol et ne descend pas en dessous de 20 cm (30 cm pour l'heptane). Au-dessus de ces hauteurs, il existe un gradient de température d'environ 100 °C/m, ce qui indique que la couche de fumées chaudes n'est pas complètement homogène, car la température augmente avec la hauteur.

On remarque aussi sur la Figure 3.12 que les profils de température sont pratiquement parallèles et qu'ils se décalent vers les plus hautes températures au cours du temps. Ce qui veut dire que la température des fumées augmente au cours du temps. Ce qui est aussi le cas pour la température au voisinage du sol. Ceci doit être nuancé pour le cas de l'heptane, car on s'aperçoit que la cassure de pente est fortement atténuée vers la fin du test, indiquant que la stratification est de plus en plus faible.

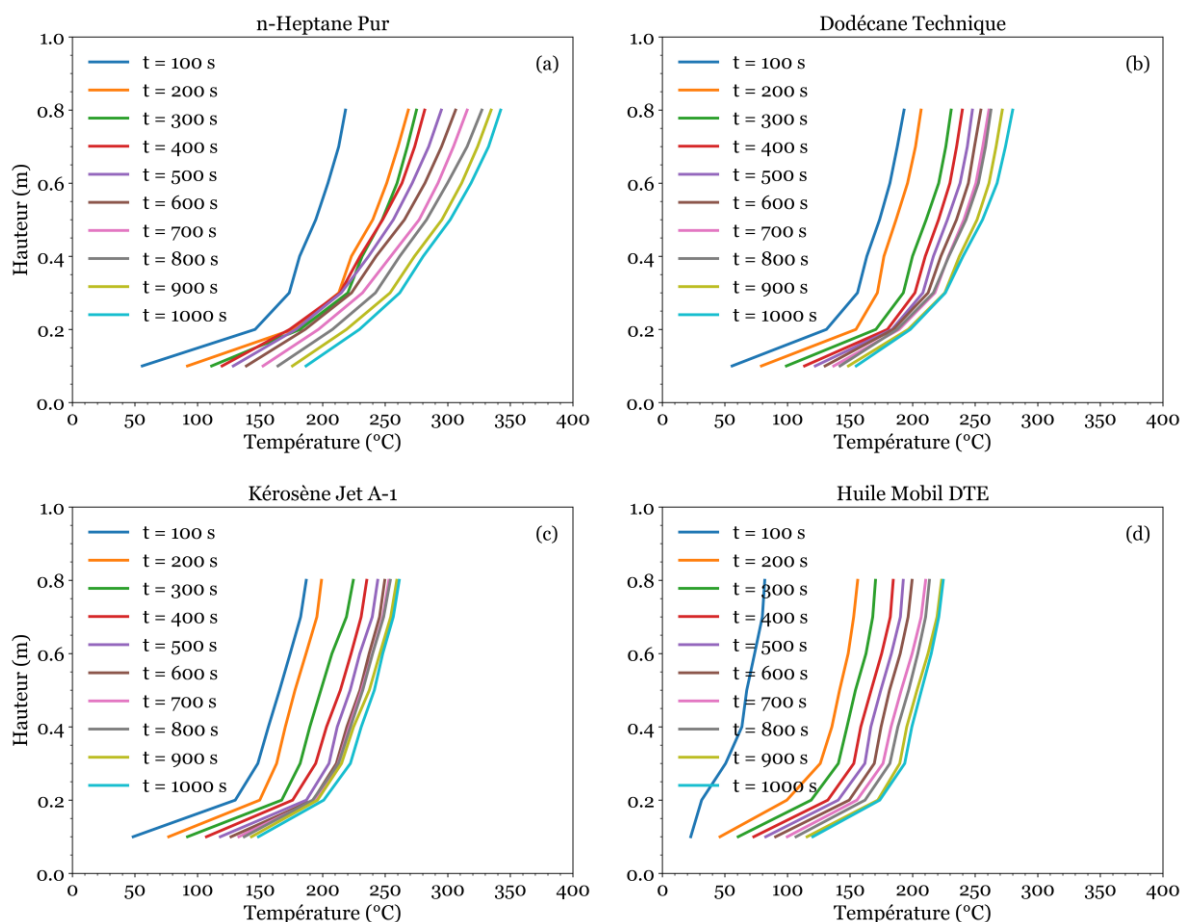


Figure 3.12 - Profil de température dans le coin gauche du compartiment à $D = 0.19$ m et 9.67 ACPH. (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.

Afin d'analyser l'influence du taux de ventilation sur le profil vertical de température de la fumée et faciliter l'interprétation des données. Le temps à 600 s a été pris en compte, ce laps de temps assure qu'il y a un feu établi. Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 3.13. La stratification et l'existence d'une couche de fumée, décrite ci-dessus, est toujours évidente et la température augmente dans chaque couche avec la ventilation. L'écart de température entre les différentes conditions de ventilation diminue au fur et à mesure que l'on utilise un hydrocarbure de plus en plus lourd.

Comme il a été dit précédemment, plus la ventilation est forte plus la température de la couche de fumée est élevée. Mais il existe des différences entre les quatre combustibles. Pour la ventilation la plus forte (17.8 ACPH), on constate un ordre décroissant des températures maximales (sous plafond) quand on passe de l'heptane, au dodécane, au kérosène et enfin à l'huile Mobil DTE. On a une température maximale de 370 °C pour l'heptane, de 280 °C pour

le dodécane, de 260 °C pour le kérosène et enfin de 240 °C pour l'huile Mobil DTE. On remarque que pour l'heptane, la température maximale dépasse aussi les 300 °C pour 9.67 ACPH, mais que cela ne se produit pas pour les autres combustibles. Comme cela a été remarqué sur la Figure 3.7 (paragraphe 3.4.1), la valeur du MLR augmente fortement pour l'heptane et le dodécane vers la fin du test avec 17.8 ACPH, et pour l'heptane avec 9.67 ACPH. Il est intéressant de se demander si, à ce niveau de température, il y a une contribution non négligeable des flux rayonnés par les parois et la couche de fumée sur la surface du combustible.

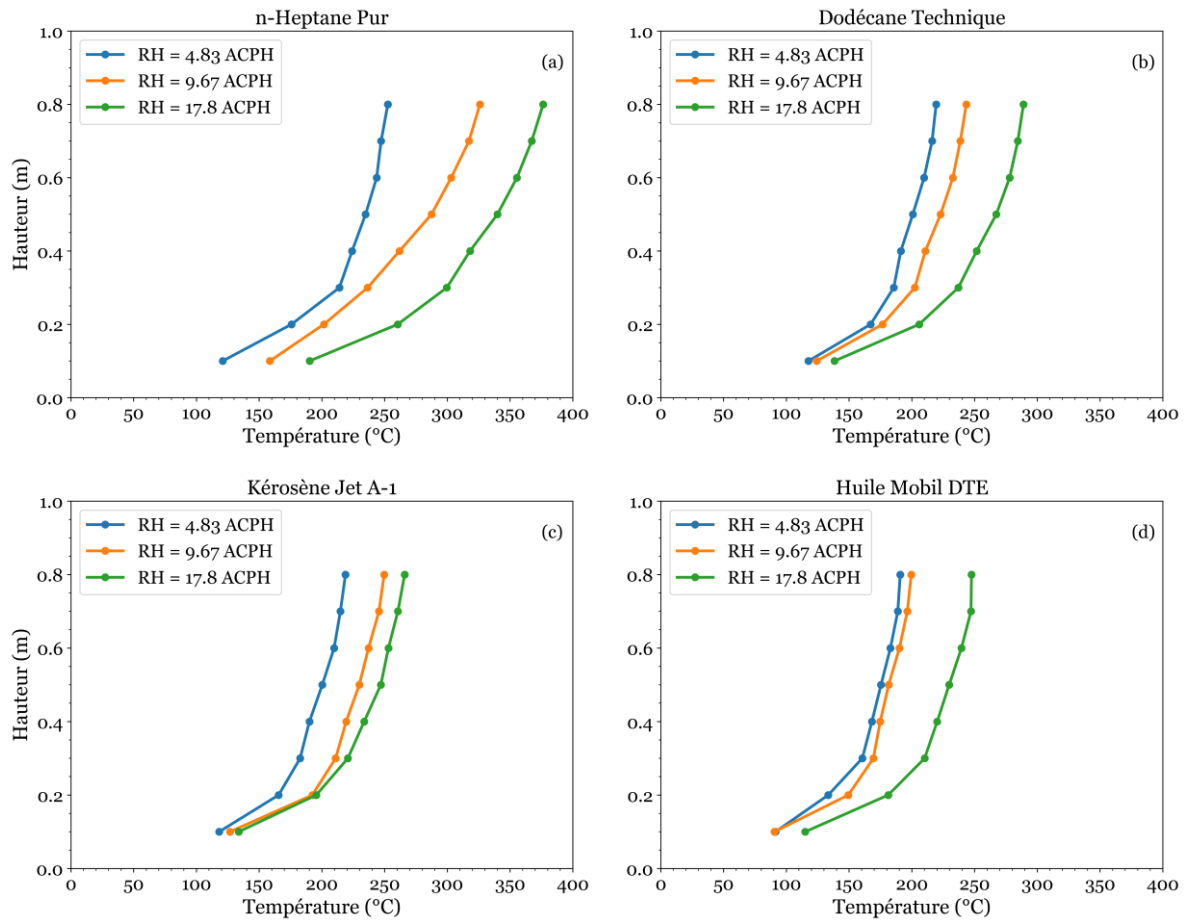


Figure 3.13 - Profils verticaux de température à 600 s en fonction du taux de ventilation. (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m.

Un calcul simple de cette contribution a été développé et il est détaillé en Annexe C. Les résultats sont obtenus pour des valeurs réalistes des températures et d'émissivités de paroi. En faisant varier la température des fumées, on constate que, comparée à une température moyenne de 200 °C, si la température des fumées dépasse 300 °C, une

augmentation d'environ 50 % du flux apporté par les parois et les fumées est possible et que ce flux est de l'ordre de quelques kW/m². Ceci n'est pas négligeable par rapport au flux direct de la flamme, de l'ordre de 10 kW/m² (Oztekin, et al., 2012).

3.5. Analyse de la concentration d'oxygène et de dioxyde de carbone en fonction de la ventilation

Cette section aborde la mesure des concentrations d'oxygène, de dioxyde de carbone et leurs corrélations lors des incendies des combustibles testés. Les concentrations d'oxygène ont été mesurées autour de la flamme à environ 3 cm du bac de combustible, à une hauteur de 12 cm par rapport au sol, mais aussi dans le conduit d'évacuation des fumées, plus précisément au centre du conduit. Les concentrations obtenues aux différents points de mesures seront ensuite analysées et comparées à la littérature.

3.5.1. Concentration d'oxygène au niveau de la flamme

L'influence du taux de ventilation sur la concentration d'oxygène autour de la flamme est présentée sur la Figure 3.14 pour chaque type de feu. Il a été trouvé que jusqu'à environ 400 – 550 secondes, la concentration autour de la flamme diminue rapidement. Les lignes pointillées en noir de 400 à 550 s, sont utilisées pour identifier le début du feu établi. Cette ligne sépare la phase d'inflammation et de croissance de l'incendie de la phase du feu établi. Les lignes pointillées bleues, oranges et vertes permettent d'identifier la fin de la phase de feu établi, ces lignes séparent la phase de feu établi de la phase d'extinction. Les trois couleurs des lignes représentent l'incendie pour un taux de ventilation spécifique, 4.83, 9.67 et 17.8 ACPH, respectivement.

Les résultats obtenus dans la Figure 3.14 montrent qu'avec un faible renouvellement horaire, la quantité d'oxygène disponible pour la combustion diminue. Nasr et al. (Nasr, et al., 2013) ont montré que le niveau de concentration d'oxygène autour de la flamme affecte directement le taux de vaporisation, qui affecte à son tour le temps de combustion. Donc, plus la concentration d'oxygène est élevée, plus la durée du feu est courte. En accord avec Prétrel et al. (Prétrel, Bouaza, & Suard, 2021), la diminution du taux de ventilation contribue à réduire la concentration d'oxygène à l'intérieur de l'enceinte et, par conséquent, le MLR du combustible et la température de la fumée.

À 4.83 ACPH, la concentration d'oxygène diminue jusqu'à environ 14.2 %, 15.8 %, 16 % et 16.8 %, pour l'heptane, le dodécane, le kérosène et l'huile Mobil DTE, respectivement. On

voit donc que l'oxygène disponible pour la combustion décroît si la masse de l'hydrocarbure décroît. À partir de 500 s, la concentration d'oxygène au cours des incendies d'heptane et d'huile Mobil DTE augmente légèrement, tandis que pendant les feux de dodécane et de kérosène, la concentration d'oxygène au pied de la flamme semble rester constante.

À 9.67 ACPH, dans la période du feu établi, les variations de la concentration d'oxygène des feux d'heptane, de dodécane et de kérosène ont des allures très similaires. La concentration augmente légèrement pour ensuite décroître jusqu'à l'extinction. Dans le cas de l'huile Mobil DTE, la concentration diminue légèrement et continuellement jusqu'à la fin du test. Par contre, on observe que les concentrations mesurées sont du même ordre de grandeur pour les quatre combustibles, entre 18 % et 19 %. Ce qui est assez étonnant, compte tenu des propriétés thermochimiques différentes de ces produits.

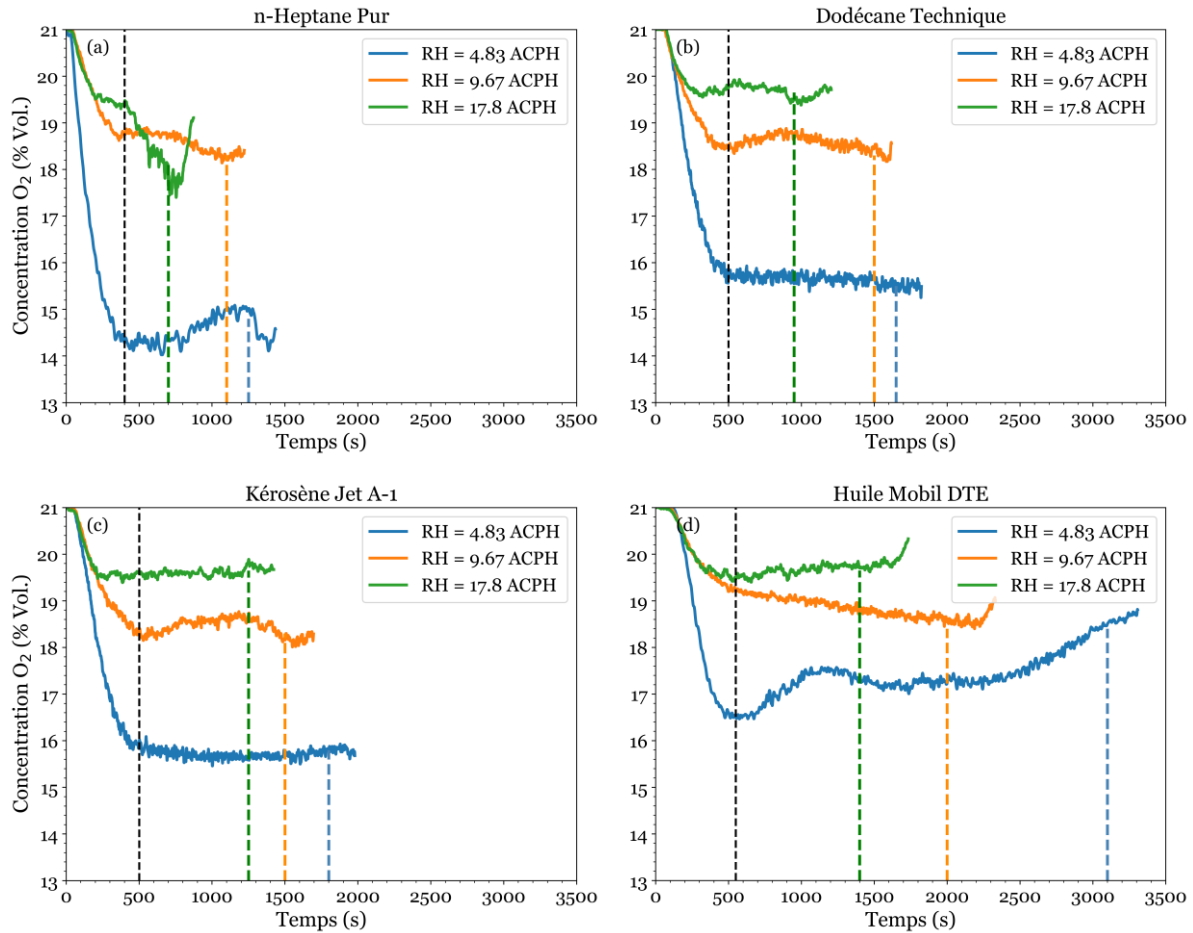


Figure 3.14 - Influence de la ventilation sur la concentration d'oxygène autour de la flamme, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m.

À 17.8 ACPH, pour l'heptane, la concentration d'oxygène atteint des valeurs inférieures à celles obtenues à 9.67 ACPH, et diminue même régulièrement jusqu'à l'extinction du feu. Ceci s'explique par l'accroissement du MLR, provoqué par le rayonnement des parois et de la fumée sur le bac (voir précédemment). L'apport supplémentaire de vapeur combustible entraîne une consommation plus forte de l'oxygène, qui n'est pas limitée vu la forte ventilation du caisson. Pour le dodécane, le kérosène et l'huile Mobil DTE, la concentration d'oxygène au pied de la flamme varie peu et les valeurs sont proches, entre 19.5 % et 20 %, respectivement.

Les valeurs de concentration de l'oxygène à la base de la flamme sont nettement inférieures à 21 %, surtout pour les faibles ventilations. Ceci montre qu'il existe des recirculations des fumées du haut vers le bas du caisson, qui viennent polluer l'air frais entrant dans le caisson. On va analyser si cette viciation de l'air influence les grandeurs telles que la perte de masse ou la concentration d'espèces chimiques.

Les données illustrées dans la Figure 3.14 ont permis d'identifier et de définir les trois phases de développement de chaque incendie, inflammation et croissance, période quasi-stable (ou période du feu établi) et l'extinction, comme mentionné ci-dessus. Le Tableau 3.3 montre la période de feu établi pour chaque type d'incendie, cette période sera prise en compte pour les analyses futures.

Tableau 3.3 - Identification de la période de feu établi pour chaque combustible.

Combustible / RH (ACPH)	n-Heptane Pur	Dodécane Technique	Kérosène Jet A-1	Huile Mobil DTE
4.83	400 – 1250 s	500 – 1650 s	500 – 1800 s	550 – 3100 s
9.67	400 – 1100 s	500 – 1500 s	500 – 1500 s	550 – 2000 s
17.8	250 – 700 s	400 – 750 s	250 – 1250 s	550 – 1400 s

3.5.2. Effet de la concentration d'oxygène au niveau de la flamme sur la perte de masse

La Figure 3.15 montre l'effet de la concentration d'oxygène autour de la flamme sur le taux moyen de la perte de masse normalisée, au cours de la période de feu établi pour chaque combustible. Le MLR normalisé est le rapport entre la perte de masse lors des incendies ventilés mécaniquement et la valeur pour le feu à l'air libre (cf. Figure 3.7).

Le MLR normalisé, pour les conditions de ventilation utilisées, augmente avec la concentration d'oxygène disponible au pied du foyer. Excepté le cas de l'heptane à 17.8 ACPH. Pour chaque combustible et les conditions de ventilations utilisées, le MLR confiné est toujours inférieure au cas d'un foyer libre. La diminution du MLR est importante pour la plus faible ventilation 4.83 ACPH. Cette diminution est d'environ 50 % pour l'heptane, le dodécane et le kérosène, et 70 % pour l'huile Mobil DTE. Pour le cas particulier de l'heptane à 17.8 ACPH, la valeur du MLR en foyer libre a été atteinte vers la fin du test. Ceci est expliqué par le rôle important du rayonnement des parois et de la fumée, comme cela a été discuté précédemment. Pour analyser cet accroissement du MLR avec la concentration d'oxygène au pied du foyer, les résultats de chaque type de combustible dans les conditions de ventilation utilisées seront comparés entre eux par la suite, car une tendance quasi-linéaire a été trouvée par d'autres auteurs (Peatross & Beyler, 1997; Melis & Audouin, 2008; Alibert, Coutin, Mense, Pizzo, & Porterie, 2019; Prétrel, Bouaza, & Suard, 2021).

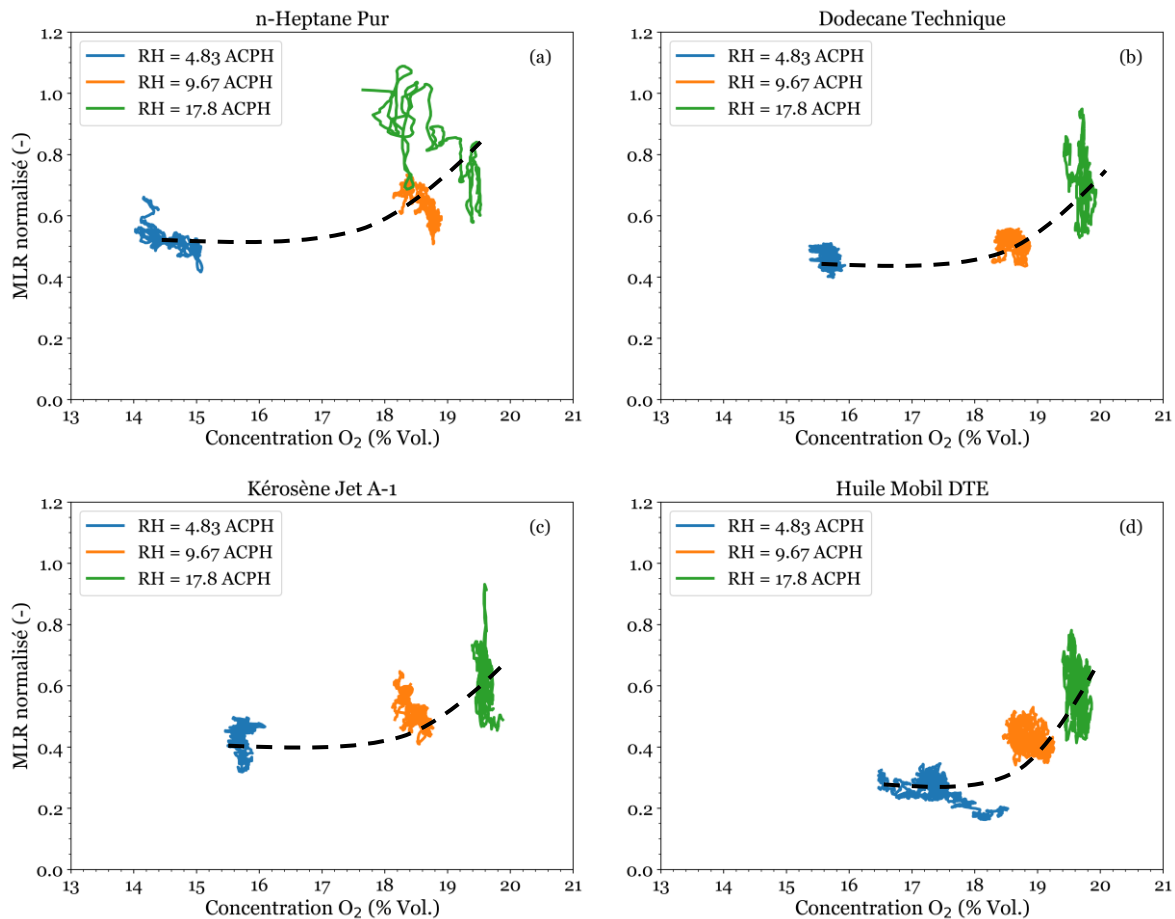


Figure 3.15 - Relation entre la concentration d'oxygène au pied de la flamme et la perte de masse du combustible, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m.

3.5.3. Concentration d'oxygène dans les fumées

L'influence du taux de ventilation sur l'évolution temporelle de la concentration d'oxygène résiduel dans les fumées, au niveau de l'extraction ou dans le conduit d'évacuation est présentée sur la Figure 3.16. Les résultats montrent que plus le taux de ventilation est faible, moins il existe de l'oxygène dans les fumées. Il a également été constaté que chaque profil de mesures à l'extraction est très similaire à celui obtenu dans les mêmes conditions au pied du foyer.

À faible taux de ventilation (4.83 ACPH), pour le feu d'heptane à partir de 500 s (période de feu établi), il ne reste que 2 % à 3 % d'oxygène et une flamme visible a été observée jusqu'à l'extinction de l'incendie par manque de combustible. Car la concentration autour de la flamme est restée à environ 14.5 % (cf. Figure 3.14 – a). Pendant la même période, le feu de dodécane (Figure 3.16 – b), présente une diminution lente et continue, mais l'O₂ résiduel reste à environ de 5 %. Pour le kérosène (Figure 3.16 – c), il n'y a pas de décroissance, les valeurs sont proches du cas du dodécane. Pour l'huile Mobil DTE (Figure 3.16 – d), il reste à environ 10 %, le niveau d'oxygène résiduel le plus élevé. Cependant, des oscillations ont été constaté.

À 9.67 ACPH, on peut faire à peu près les mêmes remarques que pour l'oxygène au pied du foyer (paragraphe précédent). Les feux d'heptane, de dodécane et d'huile Mobil DTE montrent une diminution régulière de l'oxygène résiduel, assez forte dans le cas de l'heptane. Tandis que, pour le kérosène, la concentration reste constante, comme pour l'oxygène au pied du foyer. Les valeurs observées pour les quatre combustibles sont dans le même ordre que pour l'oxygène au pied du foyer, à savoir par ordre croissant heptane < dodécane < kérosène < huile Mobil DTE, mais avec des valeurs beaucoup plus basses.

À 17.8 ACPH, Les variations de l'oxygène résiduel sont assez similaires à celles qui ont été observées au pied de la flamme. Pour les feux d'heptane et de dodécane, la concentration diminue régulièrement jusqu'à l'extinction du feu. Ceci s'explique par l'accroissement du MLR, provoqué par le rayonnement des parois et de la fumée sur le bac (voir précédemment). Pour le kérosène et l'huile Mobil DTE, les concentrations d'O₂ varient peu et les valeurs sont proches, environ égales à 15 %.

Les résultats obtenus permettent de faire les remarques suivantes : l'heptane consomme la plus grande quantité d'oxygène, tandis que l'huile Mobil DTE, qui est un combustible lourd avec plus de 12 carbones, consomme la plus petite quantité d'oxygène. Il y a une plus grande consommation d'oxygène lors des feux sous-ventilés ($0.7 \leq \text{GER} < 1.5$). À des taux de ventilation élevés ($\text{RH} \geq 9.67$ ACPH), la concentration d'oxygène à l'extraction diminue continuellement jusqu'à l'extinction sans atteindre un état stable. Le kérosène et dans

une moindre mesure l'huile Mobil DTE, dans les trois conditions de ventilation étudiées, ont montré des concentrations d'oxygène quasi-stables au cours de la période de feu établi.

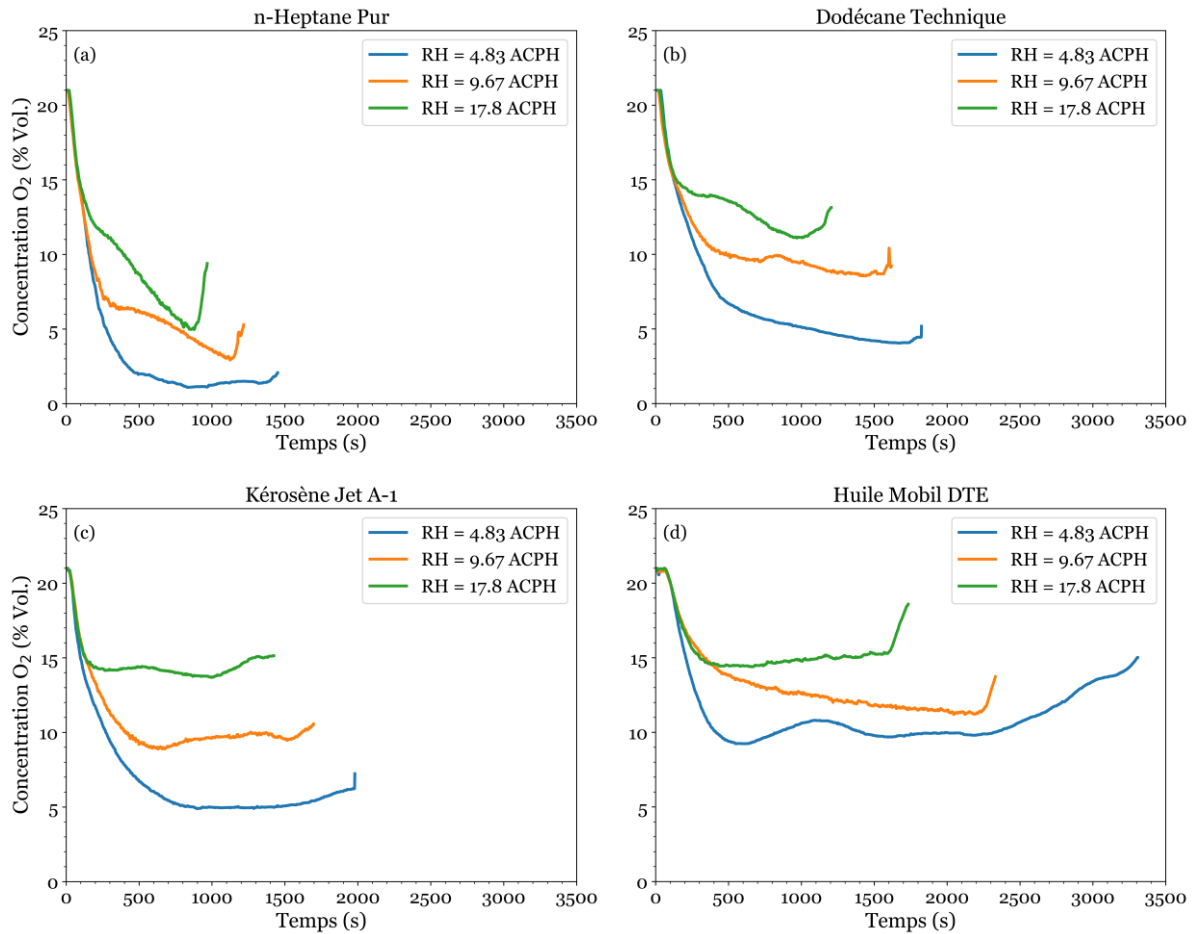


Figure 3.16 - Influence de la ventilation sur la concentration d'oxygène dans les fumées, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m.

3.5.4. Relation entre les concentrations de dioxyde de carbone et d'oxygène dans de fumées

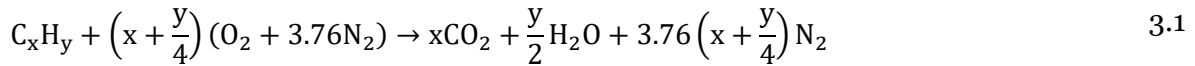
La concentration de dioxyde de carbone en fonction de la concentration d'oxygène consommé par la combustion est représentée sur la Figure 3.17 pour les différentes conditions de ventilation. La concentration de dioxyde de carbone a été mesurée avec l'appareil Testo 350. La concentration d'oxygène consommé est définie par la différence entre la concentration d'oxygène dans l'air ambiant (21 %) et la concentration d'oxygène résiduel (mesure à l'extraction). La figure présente également la concentration de dioxyde de carbone dite théorique (ligne pointillée rouge), la concentration minimale d'oxygène (CMO) du monoxyde de carbone (6.25 %) et de chaque type de combustible, 11.55 %, 11.10 %, ~ 11.46 % et ~13.02

%. Qui correspondent à l'heptane, au dodécane, au kérosène et à l'huile Mobil DTE, respectivement. Ces données ont été obtenues à l'aide de l'équation 1.6.

À 4.83 ACPH, la mesure de CO₂ par l'analyseur de gaz TESTO 350 a été limitée, cet appareil ne permet de mesurer des concentrations de CO que jusqu'à 10000 ppm, et certaines conditions ont atteint des valeurs plus élevées. En ce qui concerne l'heptane, les mesures ont pu être faites pendant les 400 premières secondes. Pour le dodécane, pendant 840 secondes. Pour le kérosène pendant 930 secondes. Pour des raisons de protection du capteur (CO), il n'a été possible de mesurer que pendant ces périodes.

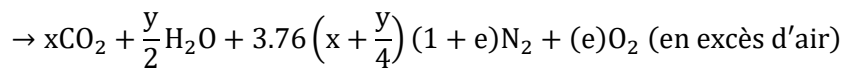
La concentration théorique de dioxyde de carbone a été obtenue à partir de la réaction de combustion complète d'un hydrocarbure.

Afin de calculer la concentration théorique de dioxyde carbone, il faut écrire l'équation de combustion complète du combustible :



$$X_{CO_2} = \frac{x}{x + \frac{y}{2} + 3.76 \left(x + \frac{y}{4}\right)} \text{ (stœchiométrique) } \quad 3.2$$

Dans le cas d'un excès d'air, on obtient :



$$X_{O_2} = \frac{e}{x + \frac{y}{2} + 3.76 \left(x + \frac{y}{4}\right) (1 + e) + e} \text{ (oxygène résiduel) } \quad 3.4$$

$$X_{CO_2} = \frac{x}{x + \frac{y}{2} + 3.76 \left(x + \frac{y}{4}\right) (1 + e) + e} \text{ (théorique) } \quad 3.5$$

La première réaction est l'équation de combustion complète (équation 3.1), dans laquelle les produits de la combustion sont CO₂, H₂O et N₂. À partir de cette équation, la concentration de CO₂ peut-être facilement estimée (équation 3.2), par contre une certaine quantité d'oxygène existe dans le conduit d'évacuation, il a donc été supposé que la combustion se réalise avec un excès d'air.

L'excès d'air (en pourcentage) est calculé par la relation $e = (\lambda - 1) \times 100$, où λ représente le facteur d'air, égal à $1/\Phi$. Avec un excès d'air, l'équation 3.1, devient alors

l'équation 3.3, à partir de laquelle on obtient les produits de combustion mentionnés ci-dessus, et un résiduel d'oxygène. Mais en utilisant l'équation 3.4, qui donne ce résiduel, il est possible d'estimer les moles d'oxygène en excès (e). Une fois que les moles d'oxygène sont connues, il est possible d'obtenir la concentration de dioxyde de carbone théorique (équation 3.5). Pour le calcul de la concentration de CO_2 , la vapeur d'eau n'a pas été prise en compte, car les analyseurs de gaz donnent les mesures en base sèche (cf. Section 2.8).

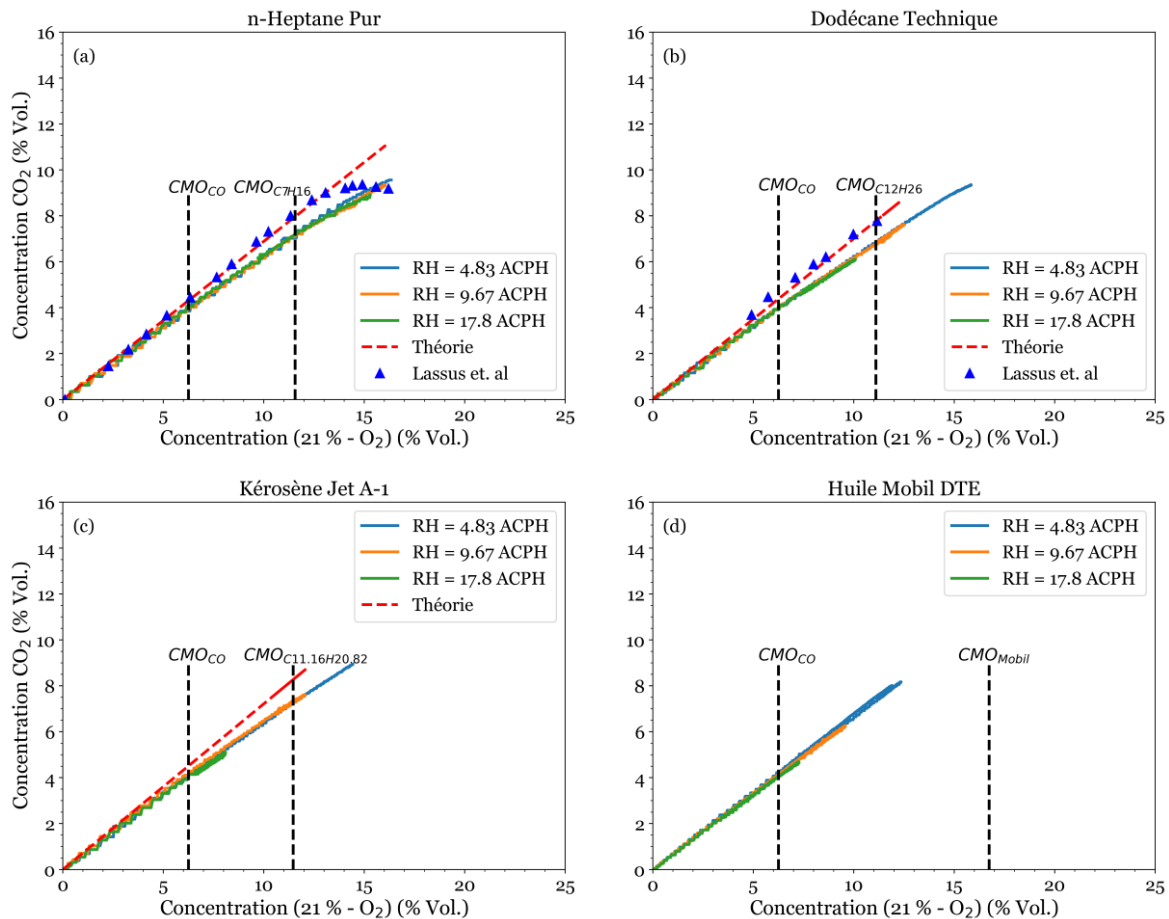


Figure 3.17 - Concentration de dioxyde de carbone en fonction de la concentration d'oxygène, mesure dans le conduit d'évacuation des gaz, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m.

Les résultats obtenus montrent qu'il n'y a pas de différence appréciable entre les trois taux de ventilation sur la formation de dioxyde de carbone en fonction de l'oxygène consommé. Les courbes pour chaque type de combustibles se superposent pour les trois conditions de ventilation. Cependant, à partir de CMO_{CO} les résultats expérimentaux s'écartent de la valeur théorique, de sorte que cette valeur a été considérée comme indicateur de

l'efficacité de la combustion. En effet, trois régimes peuvent être définis. Selon Lassus et al. (Lassus J. , et al., 2016), ces régimes correspondent aux cas sur-ventilé, sous-ventilé et très sous-ventilé. Il a été considéré que pour une concentration d'oxygène consommée comprise entre zéro et le CMO_{CO} , le foyer se trouve dans le régime sur-ventilé, dans lequel il y a un bon accord entre la valeur théorique et expérimentale du CO_2 . Pendant ce régime, il existe assez d'oxygène pour oxyder le CO en CO_2 (cf. Paragraphe 1.8.1, mécanisme de Hautman).

Pour une concentration d'oxygène comprise entre le CMO_{CO} et le $CMO_{combustible}$, se trouve le régime sous-ventilé, où on observe un écart relatif maximal qui varie de 4.3 % à environ 15.2 % entre les données expérimentales et les valeurs théoriques. Lorsque la concentration d'oxygène consommée est supérieure à CMO_{CO} , le régime très sous-ventilé apparaît, l'écart relatif maximal entre les données expérimentales et théoriques est de 13.5 à environ 14.7 % pour les feux de dodécane et d'heptane, respectivement. C'est-à-dire que dans ce régime, il peut exister jusqu'à 2 % (écart absolu) de CO_2 qui est non produit et remplacé par du gaz combustible non brûlé ou par des polluants dans les fumées.

Les données obtenues dans cette étude lors des incendies d'heptane et de dodécane ont également été comparées aux résultats obtenus par Lassus et al. (Lassus J. , et al., 2014; Lassus J. , et al., 2016). Les expériences ont été réalisées dans un compartiment en béton de 8 m³, avec un bac de combustible en acier inoxydable de 30 cm de diamètre et un taux de ventilation de 3 ACPH. Les résultats de CO_2 de Lassus et al. sont très proches des valeurs théoriques jusqu'au $CMO_{combustible}$, contrairement aux résultats présentés ici (Figure 3.17 – a et b).

3.6. Émissions de monoxyde de carbone en fonction de la ventilation

Cette section présente les résultats de la concentration de monoxyde de carbone pour les quatre combustibles. Il convient de rappeler que l'émission de monoxyde de carbone est l'un des principaux paramètres d'intérêt dans cette thèse. Lors d'un incendie dans un compartiment, le monoxyde de carbone est émis en quantités significatives et participe majoritairement à la toxicité des fumées.

3.6.1. Concentration de monoxyde de carbone en fonction de la ventilation

Concentration de monoxyde de carbone au niveau de la flamme

L'évolution de la concentration de monoxyde de carbone au pied de la flamme en fonction du temps est présentée sur la Figure 3.18. Les résultats montrent que la concentration de CO au

pied de la flamme diminue avec l'augmentation du taux de ventilation. On constate aussi que l'émission de CO diminue pour un hydrocarbure de plus en plus lourd. Par contre, la concentration de CO au pied de la flamme n'atteint un état quasi-stable que pour le feu de kérosène. La concentration en CO augmente lentement mais continument à 9.67 ACPH pour le dodécane et l'huile Mobil DTE. En revanche, dans le cas de l'heptane, la concentration en CO peut varier considérablement vers la fin du test. Comme on peut le constater, certaines tendances se dégagent si on compare l'ensemble des résultats obtenus pour les quatre combustibles.

Par exemple, à 4.83 ACPH, l'heptane produit une concentration maximale d'environ 5400 ppm, le dodécane de ~3200 ppm, le kérosène de ~2600 ppm et l'huile Mobil DTE de ~600 ppm. Ce dernier combustible a montré un comportement très particulier, pendant les 1000 premières secondes du feu, la concentration de CO a augmenté après l'allumage du combustible et atteint un maximum avant de diminuer (Figure 3.18 – d), ce comportement n'apparaît que pour ce combustible et pour cette condition de ventilation. Autre cas particulier, l'heptane à 9.67 et 17.8 ACPH, montre une augmentation brusque en fin de test. Ceci doit être encore corrélé à la perte de masse, qui augmente fortement en fin de test. Cette augmentation est principalement due à la contribution non négligeable du rayonnement des parois et des fumées sur la surface du bac dans ces deux conditions de ventilation.

La comparaison des résultats des Figure 3.14 et Figure 3.18 montre que si la concentration d'oxygène au pied de la flamme diminue, alors le CO au pied de la flamme augmente. Si on compare finement les résultats des Figure 3.14 et Figure 3.18, on s'aperçoit que des petites variations d'oxygène au pied de la flamme entraînent des variations importantes sur la concentration du CO. Par exemple, pour l'heptane à 9.67 ACPH, une baisse de moins de 1 % sur l'O₂ (environ 1/19 en relatif) double la concentration du CO. Autre exemple, le dodécane à 4.83 ACPH, une baisse de l'ordre de 0.2 % sur l'O₂ (environ 1/16 en relatif) entraîne une augmentation de 1000 ppm du CO (soit 1/3 en relatif). Enfin, dernier exemple, pour l'huile Mobil DTE à 4.83 ACPH, entre 500 et 1500 s (au niveau du premier pic de CO), une augmentation de 1 % sur l'O₂ (soit environ 1/6 en relatif) entraîne une diminution du CO de 400 ppm (soit environ 4/6 en relatif). Il apparaît que la production de CO est très sensible aux variations d'O₂ au pied du foyer.

Ces résultats permettent également d'avoir une idée de la recirculation des gaz dans le compartiment ainsi que du degré de pollution de l'air qui alimente la flamme, comme cela sera abordé plus loin.

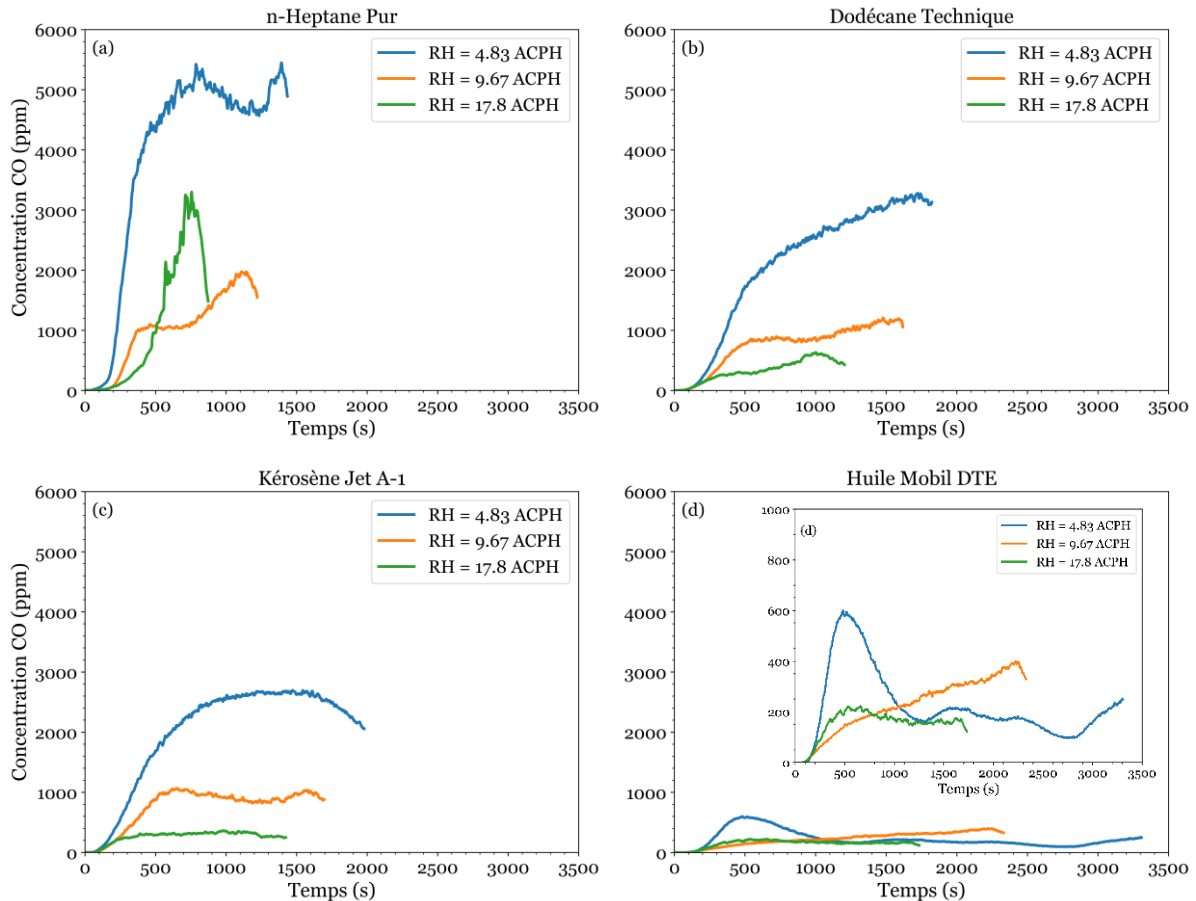


Figure 3.18 - Influence de la ventilation sur l'évolution de la concentration de monoxyde carbone autour de la flamme, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m.

Concentration de monoxyde de carbone à l'extraction

- Analyse globale des concentrations :

L'évolution de la concentration du monoxyde de carbone dans le conduit d'évacuation est présentée sur la Figure 3.19. Comme on peut le voir, les résultats sont consistants avec les tendances des résultats précédents. Les mêmes remarques peuvent être faites, la concentration de CO diminue avec le taux de ventilation. Un autre point important à souligner est qu'il semble que plus la quantité de carbone présente dans un hydrocarbure est faible, plus la production de CO est importante (heptane > dodécane > kérosène > huile Mobil DTE).

Pour chaque combustible et chaque RH, la courbe suit les mêmes variations que celles de la concentration de CO au pied de la flamme. Cette « *homothétie* » entre la concentration dans les fumées et au pied de la flamme montre qu'il existe un rapport constant entre les deux grandeurs, ce dernier représentant un taux de dilution entre le CO éjecté par la flamme dans

les fumées et le CO introduit au pied de la flamme par la recirculation des fumées. En fin de test, ce taux de dilution est estimé à environ 5 pour l'ensemble des résultats.

- Analyses cas par cas des profils de concentrations :

Pour les incendies à faible renouvellement horaire (4.83 ACPH), la concentration de monoxyde de carbone dans le feu d'heptane augmente jusqu'à environ 22500 ppm (ce combustible, dans toutes les conditions d'étude, a généré la plus forte concentration de CO). Le dodécane jusqu'à environ 14000 ppm, le kérosène jusqu'à environ 11000 ppm. L'huile Mobil DTE a atteint sa valeur maximale d'environ 1600 ppm au début du feu. L'huile Mobil DTE est le combustible qui a systématiquement produit la plus faible concentration de monoxyde de carbone. À 9.67 et 17.8 ACPH, les résultats pour chaque type de combustible ont montré une concentration de CO qui augmente de plus en plus jusqu'à l'extinction de l'incendie sans atteindre un état stable (cas de l'heptane et du dodécane), ou qui diminue (voir par exemple le cas de l'huile à 17.8 ACPH).

Pour les incendies à faible renouvellement horaire (4.83 ACPH), la concentration de CO pour le feu d'heptane augmente jusqu'à environ 22500 ppm (ce carburant, dans toutes les conditions d'étude, a généré la plus forte concentration de CO). Pour le dodécane, le CO est d'environ 14000 ppm, pour le kérosène 11000 ppm. L'huile Mobil DTE a atteint une valeur maximale d'environ 1600 ppm au début du test. Ce combustible est le combustible qui a systématiquement produit la plus faible concentration de CO. À 9.67 et 17.8 ACPH, les résultats pour chaque type de combustible ont montré une concentration de CO qui augmente de plus en plus jusqu'à l'extinction de l'incendie, sans atteindre un état stable (cas de l'heptane et du dodécane), ou qui diminue (voir par exemple le cas de l'huile Mobil DTE à 17.8 ACPH).

Il faut rappeler qu'à 4.83 et 9.67 ACPH, l'heptane, le dodécane et le kérosène, se sont développés dans un environnement sous-ventilé et très sous-ventilé comme le rappelle la Figure 3.8 ($GER > 0.7$). Des travaux précédents ont montré que les incendies sous-ventilés génèrent des émissions élevées de CO (Beyler C. L., 1986; Mulholland, Janssens, Yusa, Twilley, & Babrauskas, 1991; Gottuk D. T., Roby, Peatross, & Beyler, 1992; Utiskul, et al., 2005; Loo, Coppalle, Yon, & Aîné, 2016). Ces auteurs ont montré que des paramètres tels que la température des fumées, la richesse globale (GER) et le temps de séjour peuvent influencer la production de CO lors d'un incendie de compartiment. Mulholland et al. (Mulholland, Janssens, Yusa, Twilley, & Babrauskas, 1991) ont montré que la viciation de l'air qui alimente la flamme peut également affecter la production de CO dans une enceinte. L'effet de l'air vicié entraîne une réduction de la concentration en oxygène. Dans les sections suivantes, l'influence de ces facteurs sur les émissions de CO sera discutée.

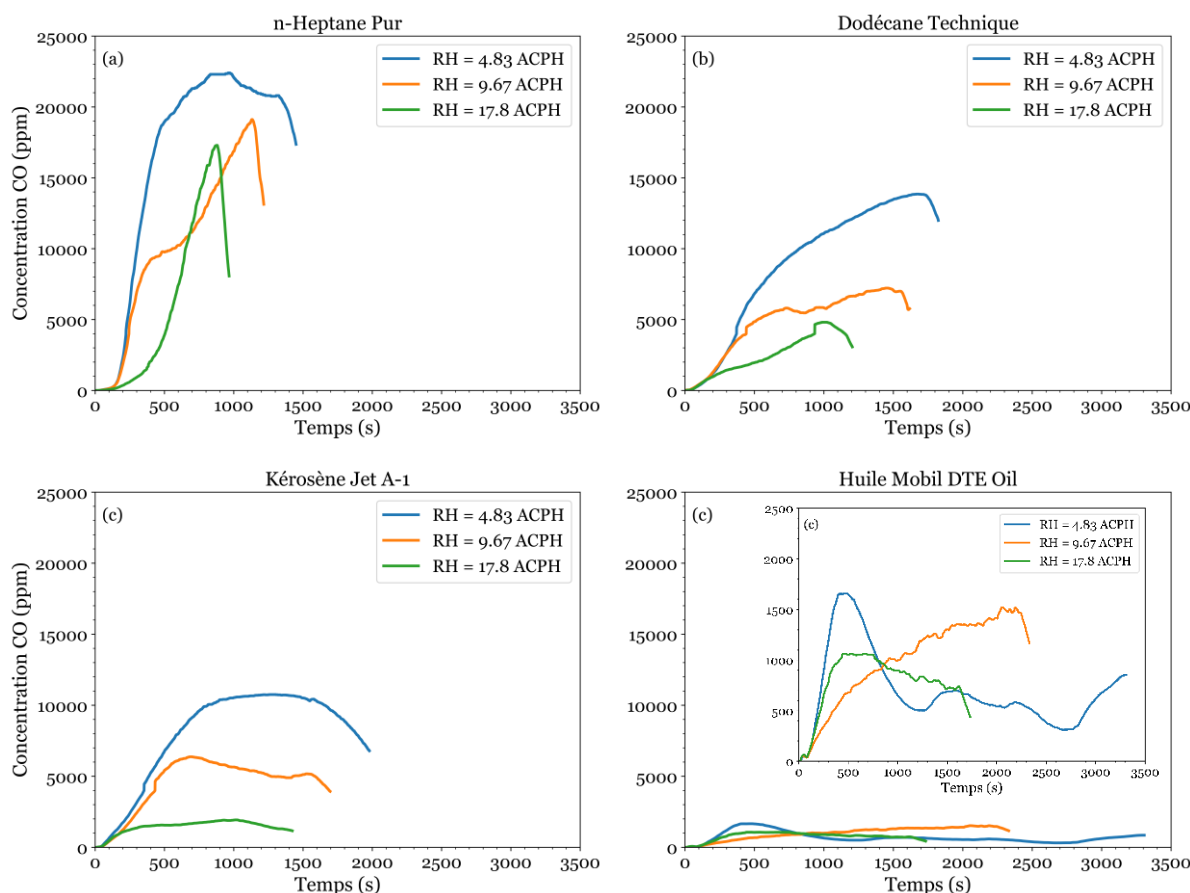


Figure 3.19 - Influence de la ventilation sur l'évolution de la concentration de monoxyde carbone dans le conduit d'évacuation des gaz, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m.

Des mesures effectuées dans la couche de fumée, à environ 10 cm de la sortie du gaz, ont montré la même tendance et des valeurs similaires à celles présentées sur la Figure 3.19. Si on considère que la température dans la zone de fumée est d'environ 350 °C, il a donc été présumé que la zone de fumée est non réactive, c'est-à-dire que la conversion de CO à CO₂ est peu probable.

3.6.2. Relation entre la concentration de monoxyde de carbone et la concentration d'oxygène

La Figure 3.20 montre les variations de la concentration du CO à l'extraction en fonction de la concentration d'oxygène au pied de la flamme pour les différentes conditions de ventilation. Pour l'analyse et l'interprétation des données, la phase d'extinction n'a pas été prise en compte.

Avec ce type de graphes, on cherche à savoir si le CO observé dans les fumées est corrélé à l'oxygène au pied de la flamme, c'est à dire à l'oxygène disponible pour la combustion.

En regardant la Figure 3.20, il semble qu'il n'y a pas de relation simple et unique entre la concentration du CO et l'oxygène disponible au pied de la flamme. Pour chaque ventilation, il y a une corrélation claire entre l'O₂ disponible et le CO produit. Mais cette corrélation change avec la ventilation. Par contre, on voit bien un effet de seuil. Par exemple, à 4.83 ACPH, la concentration de CO est négligeable (cas de l'heptane) ou faible (cas du dodécane et du kérosène) quand l'oxygène disponible est supérieur à environ 17 %. Si l'oxygène descend en dessous des 17 %, la concentration de CO va augmenter fortement.

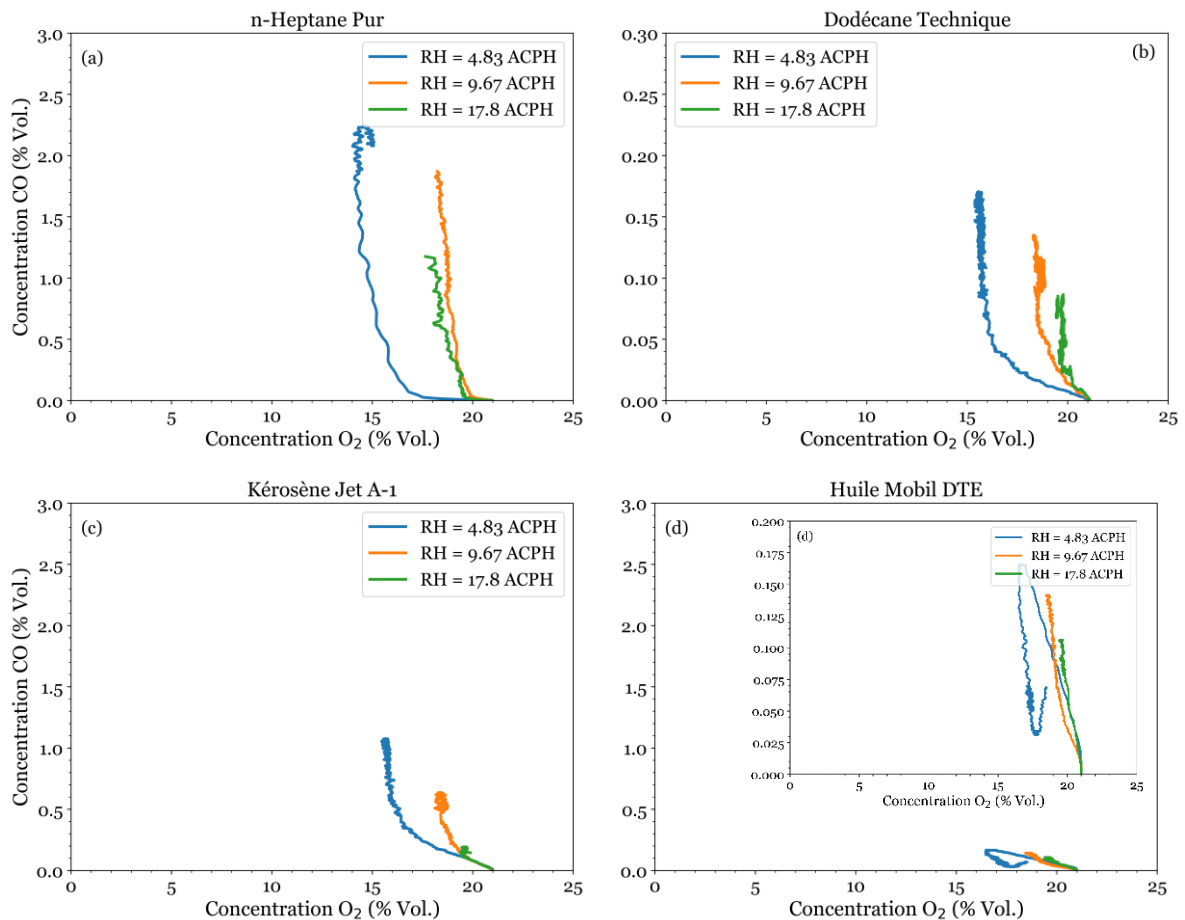


Figure 3.20 - Concentration de monoxyde de carbone en fonction de la concentration d'oxygène à la base de la flamme, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m.

On trouve dans la littérature, des graphes qui montrent la concentration du monoxyde de carbone (dans les fumées) en fonction de la concentration d'oxygène résiduel (dans les fumées) (Lassus J. , et al., 2014; Lassus J. , et al., 2016; Manescau, et al., 2020). La Figure 3.21

montre de tels graphes obtenus pour différentes conditions de ventilation, pour les quatre combustibles étudiés. Pour l'analyse et l'interprétation des données, la phase d'extinction n'a pas été prise en compte.

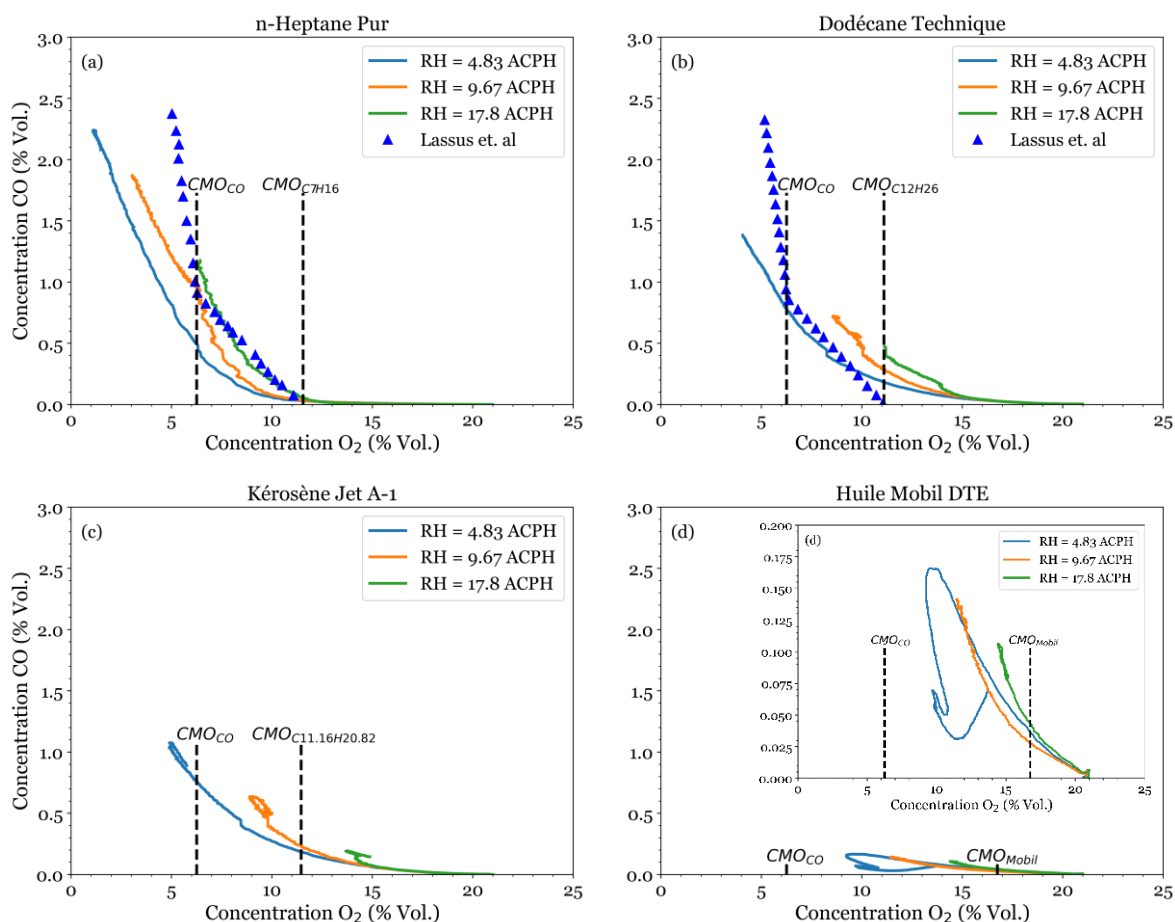


Figure 3.21 - Concentration de monoxyde de carbone en fonction de la concentration d'oxygène, mesure dans le conduit d'évacuation de fumée, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m.

On a observé des comportements similaires pour les quatre combustibles, l'heptane, le dodécane, le kérosène et l'huile Mobil DTE. Les courbes semblent présenter une tendance exponentielle décroissante. C'est-à-dire que la production de CO diminue de manière quasi-exponentielle quand l'oxygène résiduel augmente. De même que pour les graphes précédents, qui montrent le CO en fonction de l'oxygène disponible au pied de la flamme, on remarque que les courbes avec différents RH ne se superposent pas pour un même combustible. À une concentration fixée d'O₂ résiduel, le CO augmente avec la ventilation. Cela ne doit pas surprendre, car il faut se rappeler que la comparaison du comportement des feux à un O₂

résiduel fixé n'est pas pertinente. L'oxygène résiduel est une conséquence du comportement du foyer mais pas la cause. Par contre, l'effet de seuil constaté précédemment n'est pas visible sur les graphes de la Figure 3.21.

Pour une concentration d'oxygène entre le $CMO_{\text{combustible}}$ et le CMO_{CO} , se trouve le régime sous-ventilé, la concentration de CO augmente fortement à mesure que la quantité d'oxygène dans les fumées est faible. Dans ce régime, les vapeurs d'hydrocarbure peuvent s'enflammer mais pas le CO (température d'auto-inflammation de 600 à 700 °C). Dans ces conditions analysées, plus le contenu d'oxygène dans la fumée est faible, plus l'oxydation de l'hydrocarbure gazeux en CO est favorisée (Lassus J. , et al., 2014). Par exemple, dans les feux d'heptane à une concentration d'oxygène résiduel d'environ 9 %, la concentration de CO est environ 0.1 %, de 0.18 % et 0.3 %, à 4.83 ACPH, 9.67 ACPH et 17.8 ACPH, respectivement. Pour les conditions de ventilation de 4.83 et 9.67 ACPH, les feux de dodécane ont atteint, 0.32 % et 0.68 %, respectivement. Les feux de kérosène 0.35 % et 0.6 %. Par contre, il n'y a pas de données pour les incendies avec l'huile Mobil DTE à cause de l'extinction. Avec ce type de combustible, l'extinction des trois incendies ont été éteints dans ce régime et avant 9 % d'oxygène résiduel.

Pendant le régime très sous-ventilé, qui correspondent à une concentration d'oxygène inférieure à CMO_{CO} , la concentration de CO est très importante. L'oxydation de l'hydrocarbure gazeux en CO est très rapide par rapport à la réaction du CO en CO_2 . Par conséquent, des niveaux élevés de CO sont atteints.

Les données expérimentales ont été également comparées au modèle empirique développé par Lassus et al. (Lassus J. , et al., 2016), pour des incendies d'heptane et de dodécane, avec divers diamètres du bac de combustible (0.23 et 0.3 m pour l'heptane, 0.3 et 0.4 m pour le dodécane) et des taux de ventilation à 3 et 5 ACPH. Les écarts avec nos résultats montrent que ce modèle n'est pas forcément applicable pour tous les types de configuration (type et taille du compartiment, type ou taille du bac du combustible, type du combustible, etc.). Si on considère le cas d'heptane (Figure 3.21 – a), pendant le régime sous-ventilé, à $RH \leq 9.67$ ACPH, les résultats expérimentaux se situent en dessous des données du modèle. Par contre, à 17.8 ACPH, les données expérimentales sont très proches des données du modèle. Dans le cas de dodécane (Figure 3.21 – b), pendant le même régime, à 4.83 ACPH, il a été trouvé des données expérimentales très proches de celles du modèle, alors qu'à 9.67 ACPH, elles sont plus élevées.

En conclusion, pour ce type de configurations, une corrélation entre le CO et l' O_2 résiduel ne semble pas possible à définir clairement. Le développement d'un modèle qui

permette de prédire la concentration de monoxyde de carbone lors d'un incendie devra prendre en compte d'autres paramètres que l'oxygène résiduel dans les fumées.

3.6.3. Rapport $[CO]/[CO_2]$ comme indicateur de l'efficacité de la combustion

L'évolution du rapport des concentrations de monoxyde de carbone et de dioxyde de carbone, dans le conduit d'évacuation, est illustrée sur la Figure 3.22. D'après Gottuk et al. (Gottuk D. T., Roby, Peatross, & Beyler, 1992), le rapport entre la concentration de CO et CO_2 peut être utilisé comme un indicateur de l'efficacité de combustion. Une haute efficacité est obtenue lorsqu'un hydrocarbure brûle complètement en CO_2 et H_2O . Par conséquent, le rapport $[CO]/[CO_2]$ doit être proche de zéro. Sachant que le CO est un produit de la combustion incomplète et qu'il est produit en grande quantité lors des incendies sous-ventilés, le rapport $[CO]/[CO_2]$ est un paramètre intéressant à regarder.

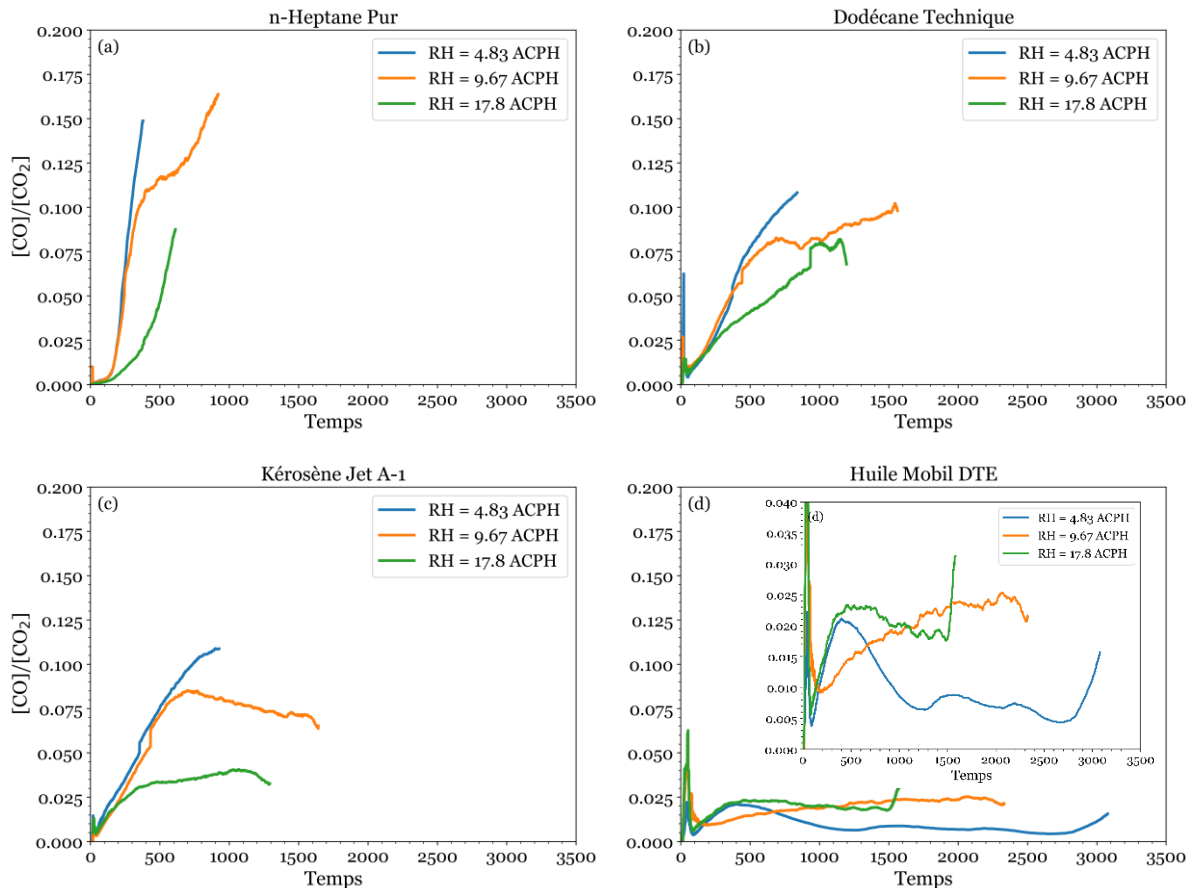


Figure 3.22 - Influence de la ventilation sur l'évolution du rapport $[CO]/[CO_2]$ en fonction du temps, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m.

Les résultats pour l'heptane, le dodécane et le kérosène ont montré, que l'efficacité de la combustion est meilleure si le taux de ventilation est grand, comme attendu. À faible taux de ventilation, la production de CO est importante, par conséquent, le rapport $[\text{CO}]/[\text{CO}_2]$ est élevé. En ce qui concerne l'huile Mobil DTE, il a été observé un comportement opposé à celui des autres combustibles, puisqu'à 17.8 ACPH, l'efficacité a été moins bonne qu'à 9.67 et 4.83 ACPH, respectivement.

Sur la base des résultats présentés sur la Figure 3.22, on voit que l'efficacité de la combustion avec l'heptane est moins bonne que pour les autres combustibles. Des valeurs aussi élevées que 0.165 de $[\text{CO}]/[\text{CO}_2]$ ont été constatées. Alors qu'avec le dodécane et le kérosène, ce rapport atteint au maximum 0.11. Pour l'huile Mobil DTE, le rapport $[\text{CO}]/[\text{CO}_2]$ maximum est environ 0.023. C'est donc l'huile Mobil DTE qui produit la meilleure efficacité. Ce résultat, qui semble à priori paradoxal, est bien expliqué par le fait que la perte de masse est plus faible que pour les autres combustibles, et donc à RH fixé, ce feu de nappe est mieux ventilé.

La Figure 3.23 montre la relation entre le rapport $[\text{CO}]/[\text{CO}_2]$ et la richesse globale pour les différents types de carburants, dans un bac de 0.19 m. Les résultats montrent que le rapport $[\text{CO}]/[\text{CO}_2]$ n'est pas corrélé au GER. Chaque combustible, l'heptane, le dodécane, le kérosène, et l'huile Mobil DTE, dans les trois conditions de ventilation, a produit des feux qui se sont développés avec une richesse globale qui semble rester quasi-constante (voir aussi Figure 3.8), alors que la concentration de CO a augmenté progressivement et, par conséquent, le rapport $[\text{CO}]/[\text{CO}_2]$ a également augmenté. La valeur moyenne pendant la période du feu établi dépend du GER, mais ce paramètre n'explique pas les variations observées pendant cette période.

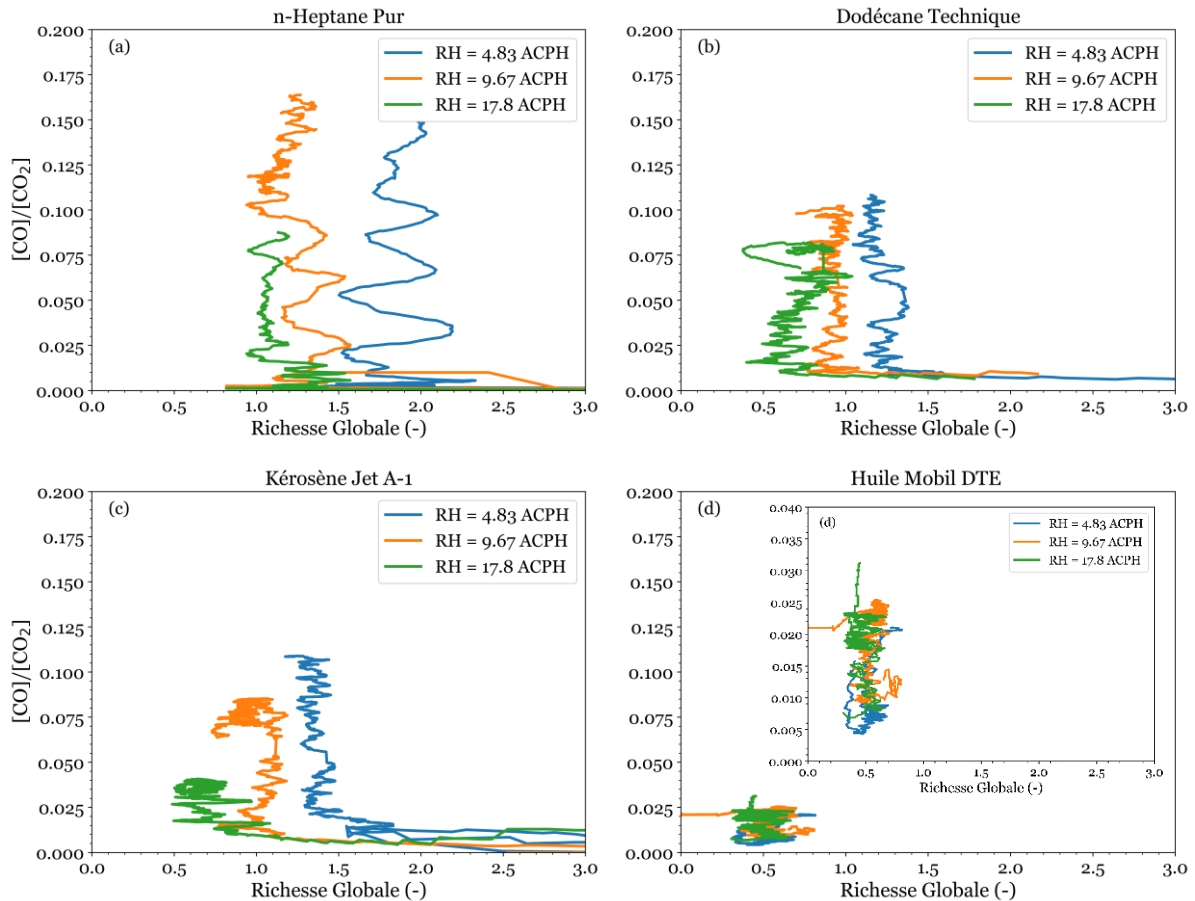


Figure 3.23 - Rapport $[CO]/[CO_2]$ en fonction de la richesse globale, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m.

Le rapport $[CO]/[CO_2]$ est illustré cette fois-ci en fonction de la concentration d'oxygène résiduel dans les fumées sur la Figure 3.24. Dans chaque courbe, la phase d'extinction n'a pas été prise en compte (cf. Paragraphe 3.5.1). Les résultats obtenus suivent la même tendance que ceux présentés dans la Figure 3.21. En considérant les trois régimes identifiés dans la section 3.5.4, sur-ventilé, sous-ventilé et très sous-ventilé, trois observations sont faites :

(i) Pendant le régime bien ventilé (de 21 % à $CMO_{combustible}$), une meilleure efficacité a été observée dans les incendies d'heptane par rapport aux cas du dodécane, du kérosène et l'huile Mobil DTE. Pour ces trois combustibles, une légère augmentation du rapport $[CO]/[CO_2]$ a été observée. Cela signifie que même pendant la phase suffisamment ventilée, l'efficacité de la combustion n'est pas complète. Pour le dodécane et le kérosène, de 21 % à 15 % d'oxygène résiduel, les trois courbes de conditions de ventilation sont superposées. En dessous de 15 % d'oxygène, le rapport $[CO]/[CO_2]$ varie en fonction du taux ventilation.

(ii) Pendant le régime sous-ventilé ($CMO_{\text{combustible}}$ à CMO_{CO}), le rapport $[CO]/[CO_2]$ augmente plus fortement si la concentration d'oxygène résiduel diminue, et ce rapport varie avec la ventilation. En ce qui concerne l'huile Mobil DTE, les évolutions du rapport sont difficiles à analyser, d'autant plus que les feux se sont éteints durant cette période.

(iii) Dans la condition très sous-ventilé, qui correspond à une concentration d'oxygène inférieure à la CMO_{CO} (6.25 %), seulement l'incendie d'heptane, de dodécane et de kérosène à 4.83 ACPH ont existé. Le rapport $[CO]/[CO_2]$ est relativement élevé, atteignant une valeur maximale de ~ 0.13 pour l'heptane et de ~ 0.11 pour le dodécane et le kérosène.

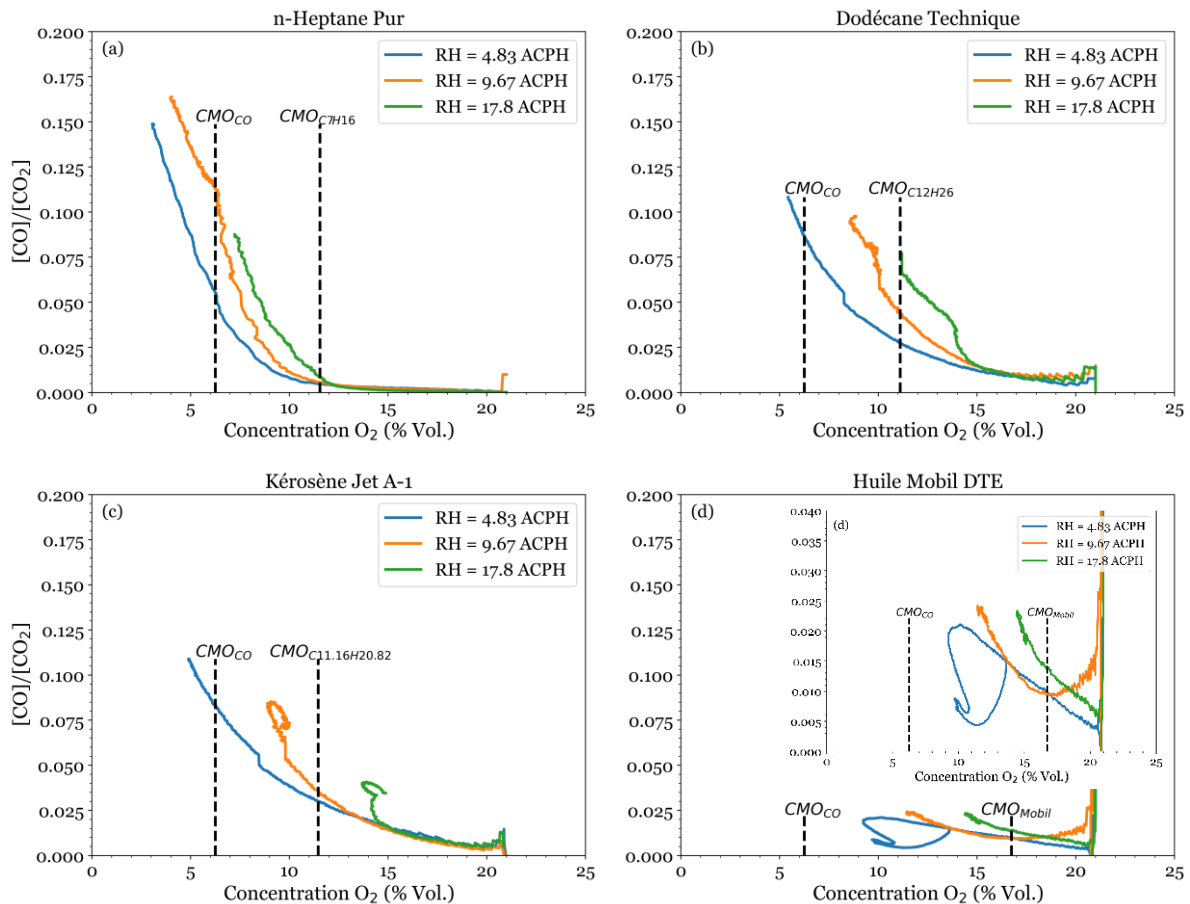


Figure 3.24 - Rapport $[CO]/[CO_2]$ en fonction de la concentration d'oxygène résiduel, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m.

3.6.4. Émission et rendement de monoxyde de carbone

Le rendement est défini comme la masse d'une espèce produite par la masse de combustible consommé (Gottuk D. T., Roby, Peatross, & Beyler, 1992; Wiecezorek, Vandsburger, & Floyd, 2004). Le rendement des produits de combustion lors d'un incendie, peut être déterminé à

partir de la mesure de la perte de masse du combustible et le débit d'air qui entre dans le compartiment.

$$Y_i = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_{\text{Combustible}}} = \frac{X_i MW_i (\dot{m}_{\text{Combustible}} + \dot{m}_{\text{air}})}{MW_{\text{gaz}}(\dot{m}_{\text{Combustible}})} \quad 3.6$$

où, Y_i est le rendement d'espèce i , ($i = \text{CO}$, CO_2 et suie) en g/g, \dot{m}_i est le débit massique de l'espèce i (g/s), $\dot{m}_{\text{Combustible}}$ est la perte de masse de combustible (g/s), \dot{m}_{air} représente le débit d'air qui entre au compartiment (g/s), X_i est fraction molaire des espèces i , MW_i représente la masse molaire de l'espèces i (g/mol), MW_{gaz} est la masse molaire du gaz à la sortie, supposée être la masse molaire de l'air ~ 29 g/mol.

La Figure 3.25 illustre pour chaque combustible, dans les trois conditions de ventilation, l'évolution du rendement du monoxyde de carbone (Y_{CO}) dans le temps. En comparant avec les résultats de la Figure 3.19, on s'aperçoit que ce rendement Y_{CO} varie comme la concentration de CO en fonction de la ventilation et du type de combustible. En effet, le Y_{CO} est plus important pour l'heptane, il est à peu près le même pour le dodécane et le kérosène, et il est le plus faible pour l'huile Mobil DTE. À part le cas particulier de l'heptane, le Y_{CO} augmente si la ventilation diminue.

Il faut se rappeler que certains incendies de l'heptane, du dodécane et du kérosène se développent dans des conditions sous-ventilées. Si le taux de ventilation est faible, la concentration de CO dans les fumées est importante, ainsi que le Y_{CO} . À un faible taux de ventilation (4.83 ACPH), le Y_{CO} est d'environ 0.26 g/g, ~ 0.15 g/g et ~ 0.035 g/g pour l'heptane, le dodécane et le kérosène, et l'huile Mobil DTE, respectivement. Tandis qu'à un taux de ventilation élevé (17.8 ACPH), le rendement de CO diminue, excepté le cas de l'heptane.

Si on compare à nouveau les évolutions de la concentration de CO (Figure 3.19) à celles du rendement en CO (Figure 3.25), on s'aperçoit que, pour chaque combustible, l'amplitude des variations du rendement est moins forte que celle observée pour la concentration. Ceci souligne l'influence du MLR dans la concentration observée dans les fumées, alors que cela est moins sensible dans le rendement en CO, du fait de sa définition.

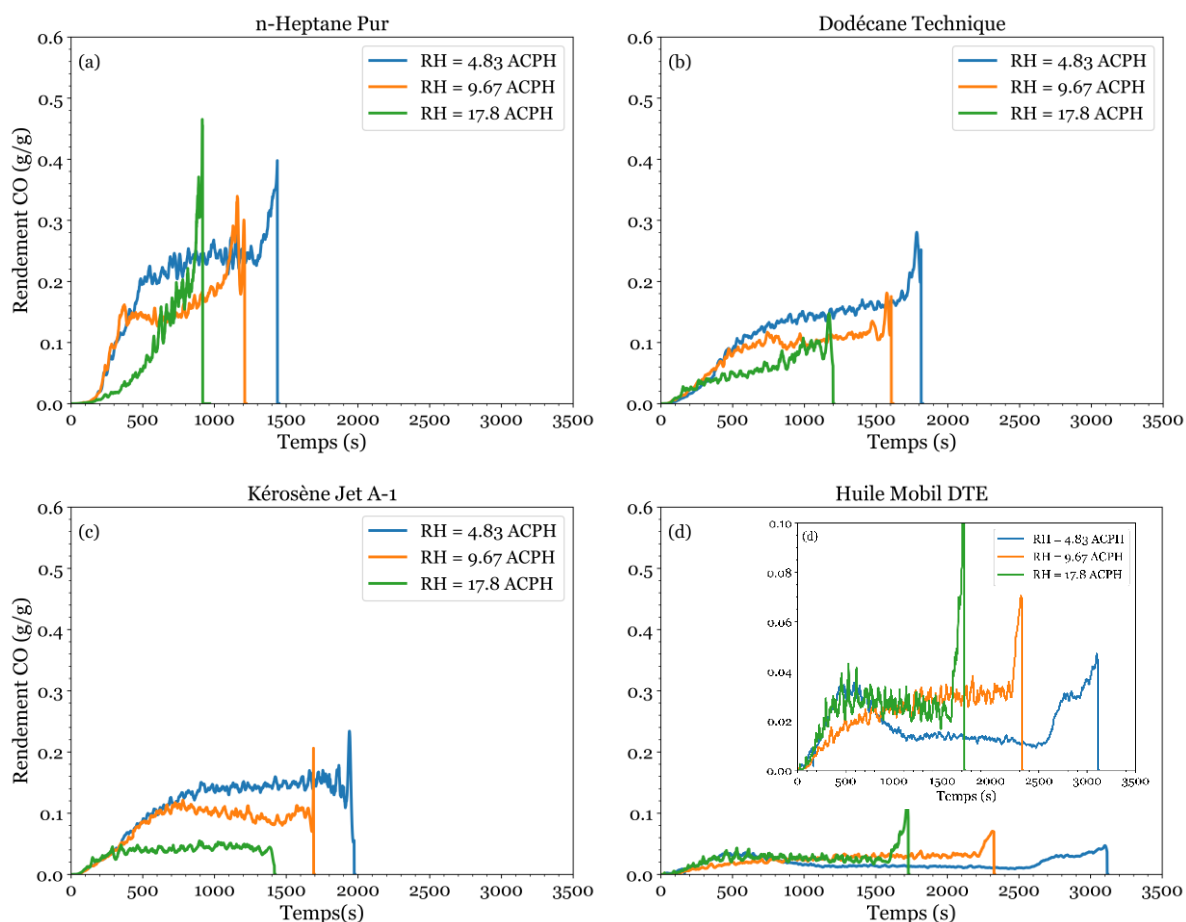


Figure 3.25 - Influence de la ventilation sur l'évolution du rendement de monoxyde de carbone, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m.

Relation entre le rendement de monoxyde de carbone et la richesse globale (GER)

Les travaux réalisés par Beyler (Beyler C. L., 1986), Zukoski et al. (Zukoski, Morehart, Kubota, & Toner, 1991), Morehart (Morehart J. H., 1991) lors des incendies ouverts « *en hotte* » et par Gottuk et al. (Gottuk D. T., Roby, Peatross, & Beyler, 1992) lors de feux dans un compartiment ventilé naturellement, ont montré que les rendements des espèces chimiques peuvent être corrélés soit avec la richesse du panache (Φ_p) ou avec la richesse de la couche supérieure (Φ_1). Selon Zukoski et al. (Zukoski, Morehart, Kubota, & Toner, 1991) ces deux paramètres sont égaux. La richesse du panache (Φ_p) est définie comme le rapport entre le taux de production du combustible gazeux à la surface du combustible et le taux d'entraînement de l'air dans la flamme entre la surface du combustible et l'interface couche chaude/froide, normalisé par le rapport stœchiométrique. La richesse de la couche supérieure (Φ_1), représente le rapport de la masse de gaz dans la couche supérieure dérivée du combustible à celle introduite de l'air,

normalisé par le rapport stœchiométrie (Pitts, 1995; Wieczorek, Vandsburger, & Floyd, 2004; Gottuk & Lattimer, 2016).

À partir de ces travaux réalisés dans différents types de configurations (hotte et compartiment), la Figure 3.26 a été créée, mais au lieu d'utiliser la richesse du panache (Φ_p), on a utilisé la richesse globale (GER ou Φ_g). Pour l'analyse, les résultats sont uniquement basés sur la période de feu établi (cf. Paragraphe 3.5.1).

Dans l'ensemble, la richesse globale varie peu au cours d'un test, comme le montre la Figure 3.8. Les points reportés sur la Figure 3.26 sont donc assez resserrés. Il y a deux exceptions notables, l'heptane à 9.67 et 17.8 ACPH. Comme expliqué précédemment, cela est dû à l'augmentation du MLR en fin de test, qui est provoquée par une contribution plus importante du flux rayonné des parois et des fumées sur le bac de combustible.

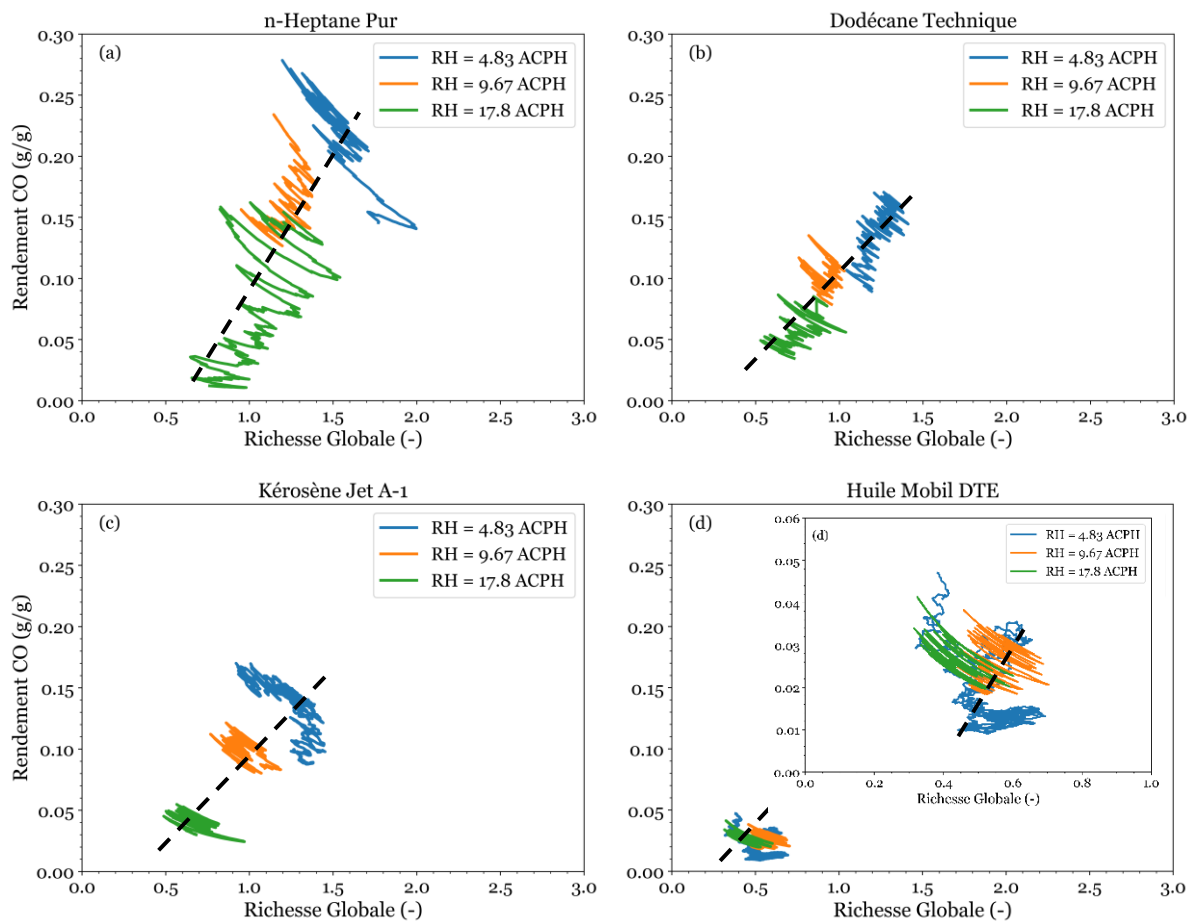


Figure 3.26 - Rendement de CO en fonction de la richesse globale pour, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m.

Les résultats obtenus montrent que le Y_{CO} augmente quand le GER varie de 0.7 à 1.5 avec un accroissement assez linéaire. Il est important de souligner que les rendements de monoxyde de carbone sont faibles pour les feux dont le GER est inférieur 0.7 (Figure 3.26 – d). Proche de la valeur stœchiométrique ($GER = 1$), il existe une production importante du CO. Avec les conditions expérimentales utilisées dans ce travail, le paramètre GER n'a pas dépassé la valeur de 1.5 et la production de CO n'a pas atteint de régime asymptotique.

Dans ce type de compartiment, la variation du GER n'explique pas complètement la production de CO. Sur la Figure 3.26, on voit qu'à une valeur fixée du GER il existe des variations importantes du rendement de CO. Ce dernier dépend donc aussi d'autres paramètres. En effet, le GER est un paramètre représentant la ventilation globale de l'enceinte, mais qui ne renseigne pas sur la qualité du mélange et de la combustion au niveau du foyer, qui est la zone de production du CO. Il est donc nécessaire d'examiner l'influence d'autres paramètres.

Relation entre le rendement de monoxyde de carbone et la concentration d'oxygène

Le rendement de CO est présenté, dans Figure 3.27, cette fois-ci en fonction de la concentration d'oxygène au pied de la flamme. Ces données visent à comprendre l'influence de la viciation de l'air alimentant le foyer ($O_2 < 21\%$) sur la production de monoxyde de carbone lors d'incendies de compartiments mécaniquement ventilés.

Les observations qui ont été faites dans le cas des variations de la concentration du CO en fonction de l' O_2 au pied de la flamme peuvent être formulées également ici.

À 4.83 ACPH, dans le cas de l'heptane, de 21 % à environ 17 %, il a été constaté que la viciation a un impact négligeable sur la production de CO. En dessous de 17 %, la diminution de la concentration d'oxygène au pied de la flamme entraîne une augmentation forte de la production de CO. Pour le dodécane, le kérosène et l'huile Mobil DTE, de 21 % à 17 %, la production de CO n'est pas négligeable, comparée au cas de l'heptane. Mais en dessous de 17 %, un comportement similaire à celui de l'heptane a été observé. Il existe une augmentation significative du rendement en CO si l' O_2 diminue. Ceci a aussi été constaté précédemment pour la concentration de CO (voir Figure 3.20). Cet accroissement rapide n'est pas observé pour l'huile Mobil DTE, car la ventilation et le MLR ont été tels que l' O_2 au pied de la flamme a toujours été supérieur à 17 %.

À 9.67 et 17.8 ACPH, la production de CO en fonction de l' O_2 au pied de la flamme suit le même profil que dans le cas à 4.83 ACPH, mais la transition vers une production forte est

décalée vers 19 % et 20 %, à 9.67 et 17.8 ACPH, respectivement. Il convient de souligner que les courbes de Y_{CO} en fonction de la concentration d' O_2 pied de la flamme ont montré des comportements différents pour les trois conditions de ventilation étudiées. Une corrélation unique, indépendante du taux de ventilation, ne semble pas envisageable.

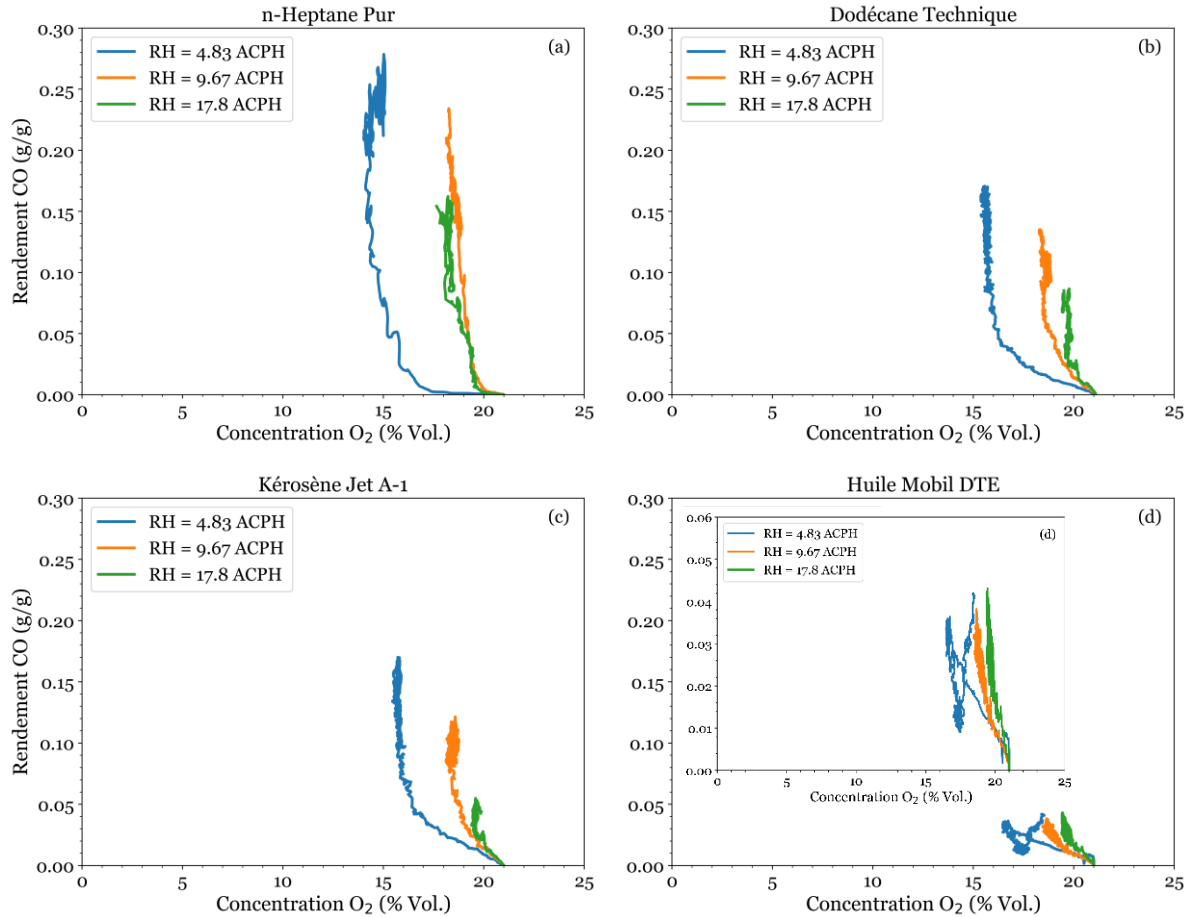


Figure 3.27 - Rendement en CO en fonction de la concentration d'oxygène autour de la flamme pour, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m.

La Figure 3.28 porte sur la relation entre le rendement en CO et la concentration d'oxygène à l'extraction. La figure indique également la concentration minimale d'oxygène pour chaque combustible ($CMO_{combustible}$) et pour le monoxyde de carbone (CMO_{CO}). Les résultats montrent les mêmes tendances que pour la relation entre la concentration de CO en fonction de la concentration d'oxygène à l'extraction (Figure 3.21). Comme prévu, dans les trois régimes, le Y_{CO} augmente très rapidement avec la diminution de la concentration d' O_2 résiduel et, pour une valeur d'oxygène donnée, le Y_{CO} augmente avec le taux de ventilation.

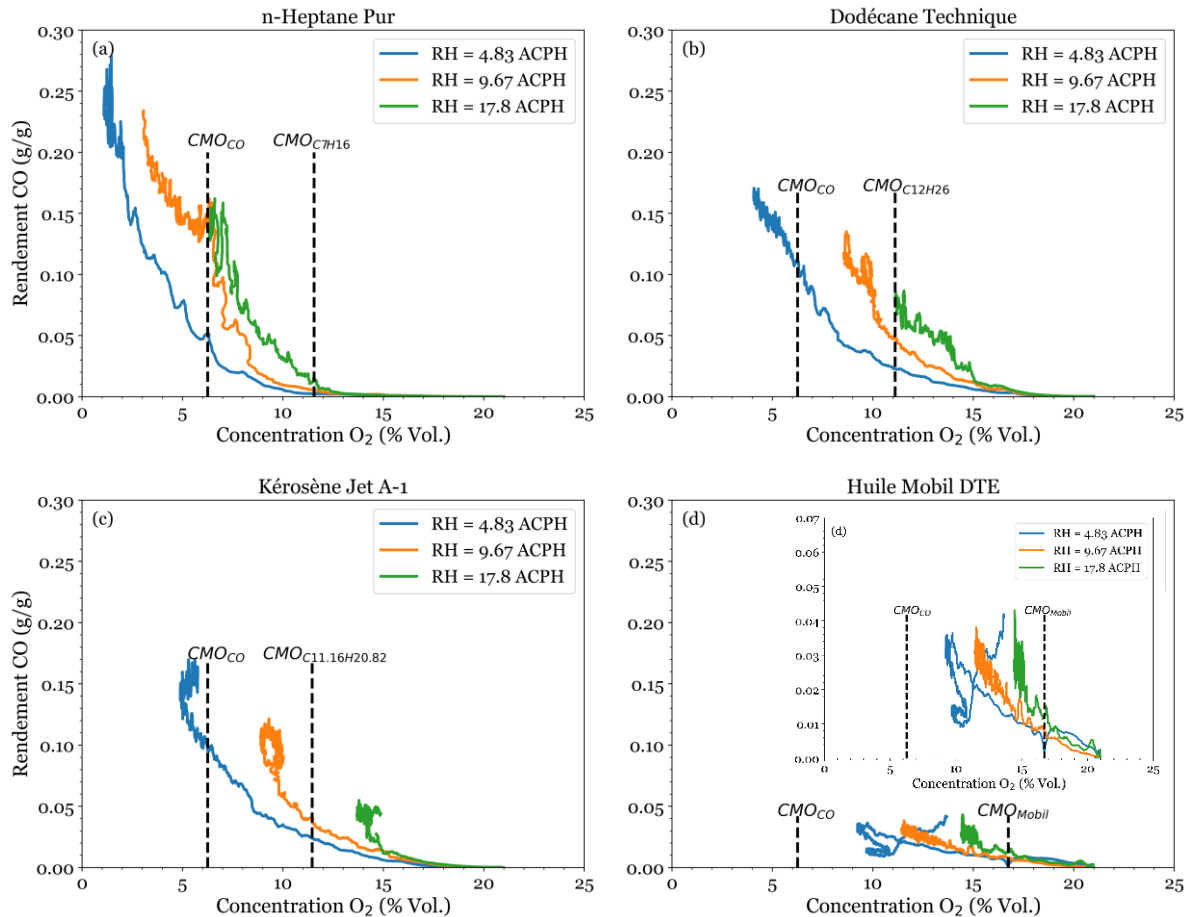


Figure 3.28 - Rendement en CO en fonction de la concentration d'oxygène à l'extraction pour, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible 0.19 m.

3.7. Émission des particules de suie

Ce sous-chapitre présente les émissions de particules de suie dans les fumées. On rappelle que les mesures de la concentration massique de particules de suie ont été réalisées à l'aide d'une microbalance TEOM séries 1105. L'appareil est placé derrière la sonde de dilution du FPS, cette sonde a été ajustée à un facteur de dilution d'environ 80. Plus de détails sur les dispositifs de prélèvement et de mesure des particules de suie sont donnés dans la section 2.9.

3.7.1. Concentration massique des particules de suie dans les fumées en fonction de la ventilation

La Figure 3.29 présente la concentration massique des particules de suie lors des incendies mécaniquement ventilés. Les résultats montrent que la concentration de suie augmente avec le taux de ventilation. Si on considère les données présentées dans la Figure 3.19 et Figure 3.25

sur l'influence de la ventilation sur les émissions de CO, on observe deux grandes tendances inverses à celles observées pour les suies :

1. Une diminution de la production de CO avec la ventilation, alors que dans le cas des suies, l'effet inverse est observé. L'existence d'une compétition chimique entre les deux produits est donc évidente. En effet, si la ventilation est faible, la formation de CO est favorisée, alors que si la ventilation est importante, la formation de suie est favorisée.

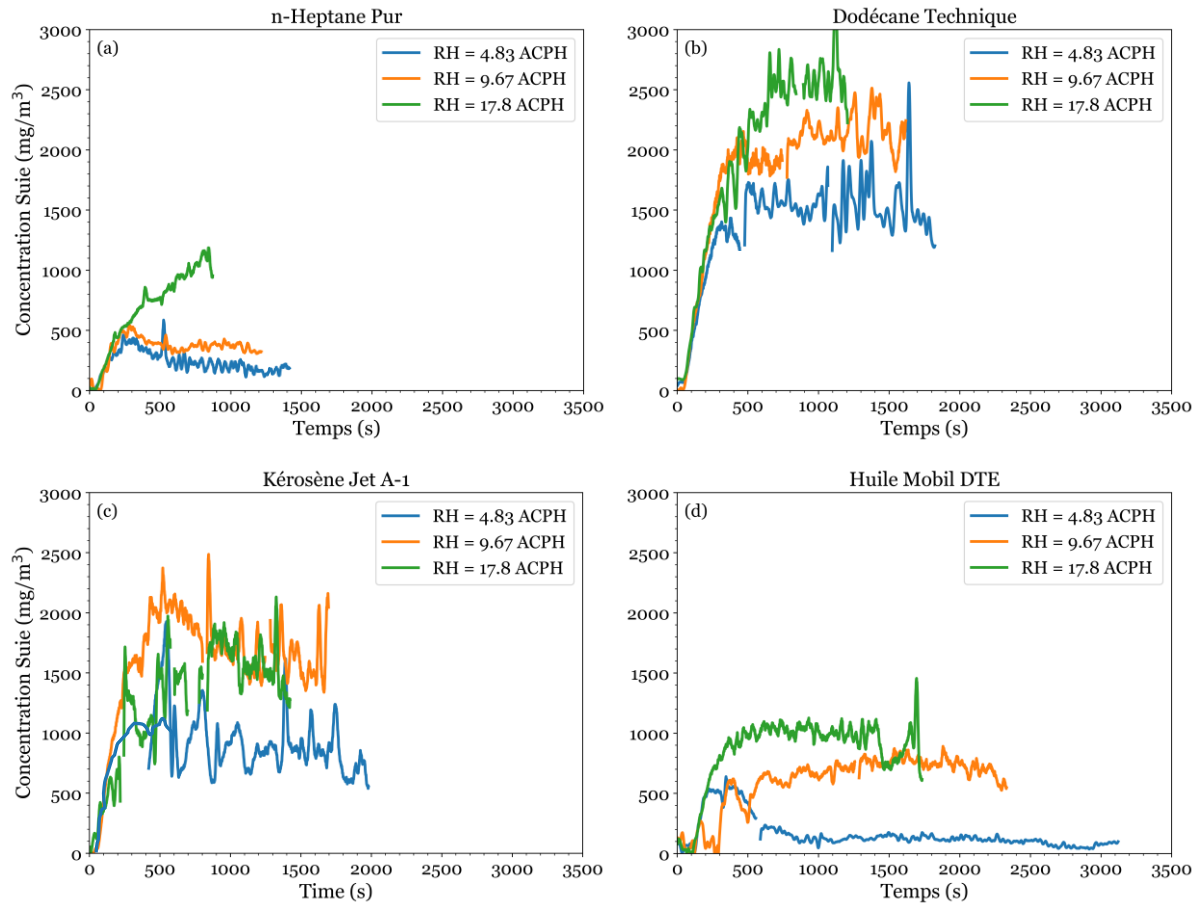


Figure 3.29 - Effet de la ventilation sur la concentration massique des particules de suie dans les fumées, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m.

2. La production de CO est plus forte pour l'heptane que pour le dodécane et le kérosène, alors que c'est l'inverse pour les suies. Les quatre combustibles ont été classés selon la quantité de suie produite dans l'ordre décroissant : dodécane, kérosène, huile Mobil DTE et heptane. Pour toutes les conditions de ventilation étudiées, ce dernier combustible a généré la concentration de CO la plus élevée et la plus faible concentration de suie.

Pour l'heptane, on observe qu'à 4.83 et 9.67 ACPH, pendant les 500 premières secondes, la valeur maximale de la production de suie a été atteinte. Au-dessus de 500, la concentration de suie a diminué jusqu'à atteindre un état quasi-stable. À 17.8 ACPH, la concentration de suie augmente progressivement sans atteindre un état stable (Figure 3.29 – a). Pour le dodécane et pour les trois ventilations, la concentration de suie augmente jusqu'à environ 500 s pour ensuite rester à peu près stable jusqu'à l'extinction (Figure 3.29 – b). Pour le kérosène, les profils de concentration des suies ressemblent à ceux du dodécane, les concentrations maximales de suie sont atteintes à partir de 500 s. Par contre, leurs valeurs sont plus faibles que dans le cas du dodécane (Figure 3.29 – c). Pour l'huile Mobil DTE, on trouve que à 4.83 ACPH, la concentration de sue augmente jusqu'à environ 500 s, pour ensuite décroître vers une valeur stable jusqu'à l'extinction du foyer. À 9.67 et 17.8 ACPH, les variations sont plus monotones et un maximum est atteint aussi à environ 500 s.

3.7.2. Relation entre la concentration de suie et la concentration d'oxygène résiduel

L'influence de la concentration d'oxygène résiduel dans les fumées sur la concentration de suie est présentée dans la Figure 3.30. Les données présentées dans cette figure sont exprimées en unités de fraction volumique (% vol.), obtenues à partir de la conversion des concentrations massiques de suie (voir la Figure 3.28). La Figure 3.30 inclut également le $CMO_{\text{combustible}}$, ainsi que le CMO_{CO} , comme il a été présenté dans les paragraphes précédents. Ces deux paramètres nous permettent d'analyser les données en fonction de trois régimes de combustion.

La conversion des unités a été effectuée à l'aide des équations 3.7 et 3.8. L'équation 3.7 consiste à changer la concentration de suie mg/m^3 en ppm, l'application de cette équation est basée sur une température de 25 °C et 1 atmosphère. L'équation 3.8 permet de changer de ppm en fraction volumique (% vol.)

$$C_{\text{Suie}} (\text{ppm}) = \frac{(C_{\text{Suie}} \text{ en } \text{mg/m}^3)(24.45)}{MW_{\text{Suie}}} \quad 3.7$$

$$C_{\text{Suie}} = (C_{\text{Suie}} \text{ en ppm}) * 10^{-4} \quad (\% \text{ Vol.}) \quad 3.8$$

où $C_{\text{Suie}} (\text{ppm})$ est la concentration de suie en ppm, MW_{Suie} est la masse molaire des particules de suie, supposée être celle du carbone $\sim 12.01 \text{ g/mol}$, C_{Suie} est la concentration de suie en % vol.

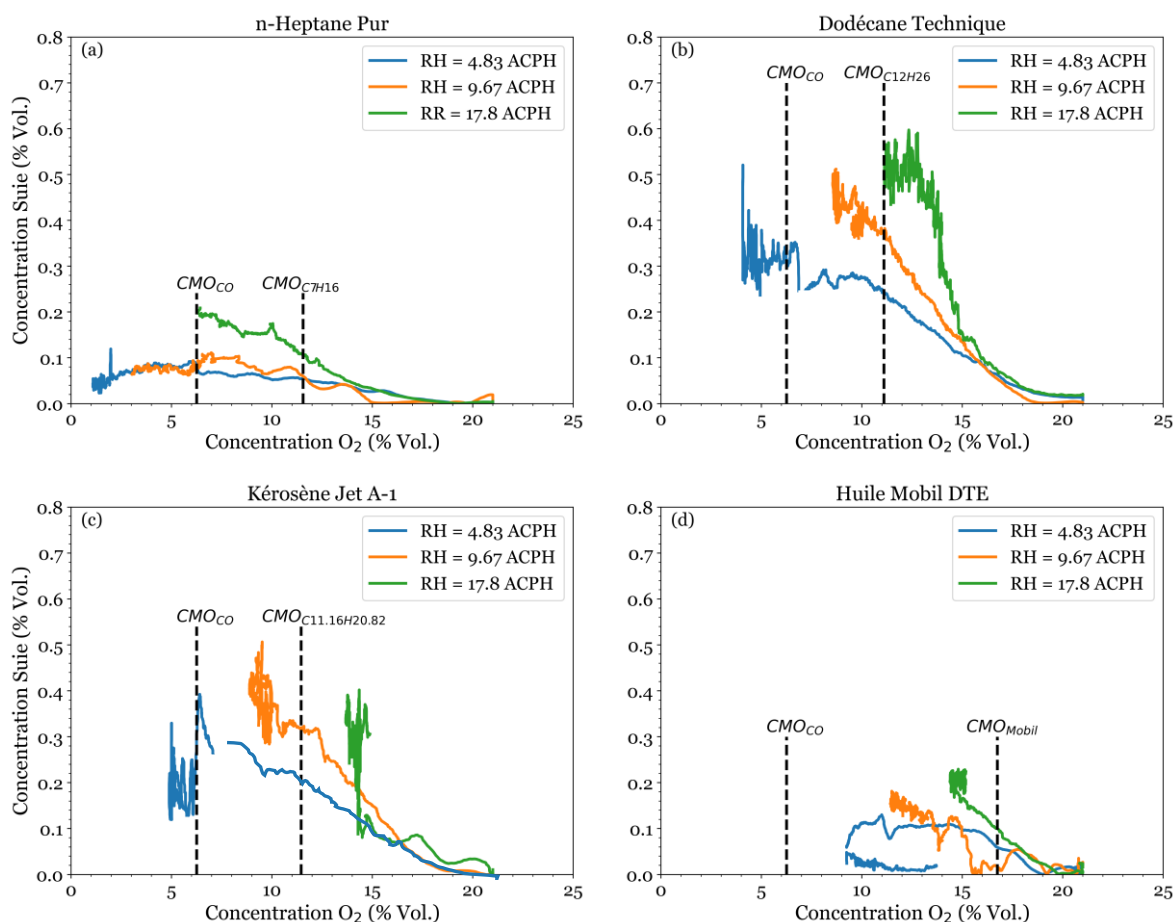


Figure 3.30 - Concentration des particules de suie en fonction de la concentration d'oxygène, mesure dans le conduit d'évacuation des gaz, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m.

Les résultats montrent que la concentration de suie est importante lorsque la quantité d'oxygène résiduel dans les fumées est faible. La concentration de suie maximale observée au cours d'un test dépend de la ventilation. Cependant, par rapport aux résultats obtenus pour le CO (Figure 3.20), la tendance de la concentration de suie en fonction de la ventilation est l'inverse de celle observée pour le CO. La concentration maximale de suies atteinte au cours d'un essai augmente avec la ventilation, alors que c'est l'inverse pour le CO.

En considérant les trois régimes identifiés précédemment, on constate que : pendant la période suffisamment ventilée (de 21 % à $CMO_{combustible}$), jusqu'à environ 15 % d'oxygène résiduel (comme pour le CO, voir Figure 3.21), la différence entre les trois conditions de ventilation est faible. La production de suie est peu importante, de l'ordre d'environ 0.1 % dans les incendies de dodécane et kérosène, et environ 0.08 % dans les incendies d'heptane. Pour

l'huile Mobil DTE, dans de régime, la production de suie est plus étroite (de 21 % à 17.5 % d'oxygène). Au-dessus de ces concentrations d'oxygène, la concentration de suie augmente avec la ventilation.

Dans le régime sous-ventilée ($O_2 \leq CMO_{\text{combustible}}$), plus l'oxygène résiduel diminue, plus la concentration de suie augmente pour atteindre un plateau, pendant la période de feu établi. Ce plateau se situera soit dans le domaine $CMO_{CO} < O_2 < CMO_{\text{combustible}}$, soit dans le domaine $O_2 < CMO_{CO}$. Si on regarde les résultats reportés pour le CO Figure 3.21), on s'aperçoit que pour ce dernier, il n'y a pas de plateau. Dans des conditions sous-ventilées ($O_2 < CMO_{\text{combustible}}$), lorsque la concentration d'oxygène devient faible, la production de suie est ralentie et la formation de CO est favorisée. Cette tendance avait déjà été formulée dans le paragraphe précédent (cf. Paragraphe 3.7.1), soulignant ainsi qu'il existait une compétition entre les productions de CO et des suies.

3.7.3. Effets de la concentration de CO sur la concentration des particules de suie

Afin d'analyser l'effet de la production de CO sur celle de suie, qui a été introduit précédemment comme une compétition entre les deux productions. La Figure 3.31 présente la concentration de suie en fonction de celle du CO. On observe qu'il existe un effet de saturation sur la production de suie :

1. Pour les faibles valeurs de CO ou de suies, les concentrations augmentent en même temps (corrélation positive).
2. Pour les fortes valeurs de CO, les suies n'augmentent plus, mais le CO augmente. La compétition chimique entre la production des suies et celle du CO est à l'avantage de ce dernier. Autrement dit, l'hydrocarbure est oxydé pour former du CO ($C_xH_y + y/2O_2 \rightarrow xCO$) et, les particules de suie également oxydées pour former du CO ($C + 1/2 O_2 \rightarrow CO$), les deux réactions privilégient la formation de CO.

Il faut remarquer que cette compétition existe quelques soient les conditions de ventilation du caisson et donc du foyer. Si on regarde les résultats de la Figure 3.8, qui donne la valeur du GER en fonction du temps, on constate que, sur l'ensemble des tests, le GER a varié entre 0.5 et 1.5. La compétition entre les productions de CO et des suies existe en régime bien ventilé et sous-ventilé.

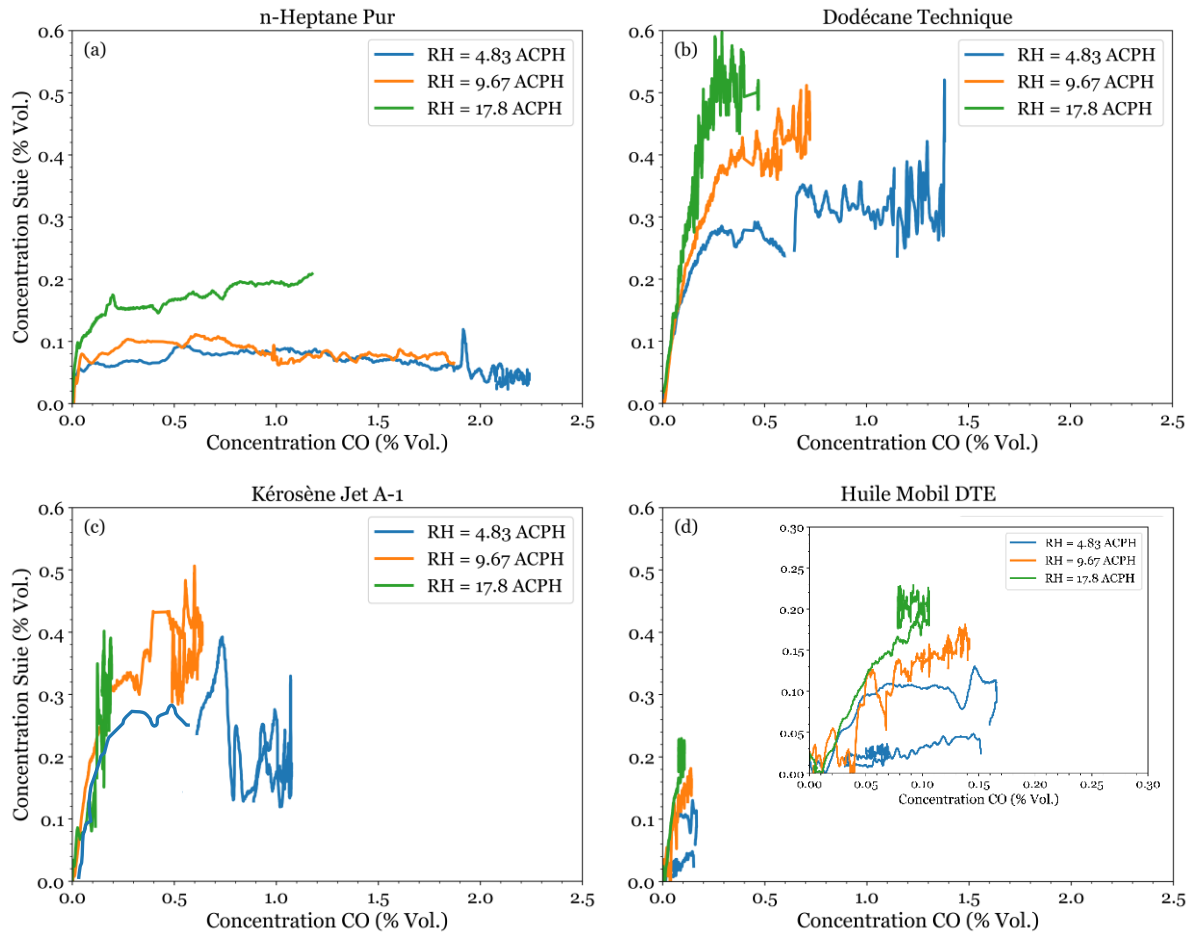


Figure 3.31 - Effets de la concentration monoxyde de carbone sur la concentration des particules de suie, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.

3.7.4. Émission et rendement de suie en fonction de la ventilation

Dans la Figure 3.32, l'évolution des rendements de suie est présentée. Le rendement de suie (Y_s) a été déterminé par l'équation 3.9. Où C_{Suie} est la concentration massique de suie (cf. Paragraphe 2.9.2), \dot{V}_e est le débit de gaz dans le conduit d'extraction (m^3/s), $\dot{m}_{\text{Combustible}}$ est la perte de masse du combustible (g/s).

$$Y_s = \frac{C_{\text{Suie}} \dot{V}_e}{\dot{m}_{\text{Combustible}}} \quad (\text{g/g}) \quad 3.9$$

Les résultats montrent que, lorsque le débit d'air entrant augmente, le rendement de suie (Y_s) augmente également. C'est-à-dire que la quantité de combustible utilisée pour former les particules de suie est plus importante, comme il fallait s'y attendre avec les résultats précédents. Des résultats similaires ont été trouvés par Ouf et. al (Ouf, 2006) lors des

incendies d'acétylène (C_2H_2), de toluène (C_7H_8) et de PMMA ($C_5H_8O_2$) dans un foyer d'environ 1 m^3 .

Comme le montre la Figure 3.32, le rendement en suie Y_s varie, tout comme la concentration de suies, en fonction du type de combustible. Le rendement en suie est plus important pour le dodécane et le kérosène, et il est le plus faible pour l'huile Mobil DTE et l'heptane. Le rendement augmente si la ventilation augmente.

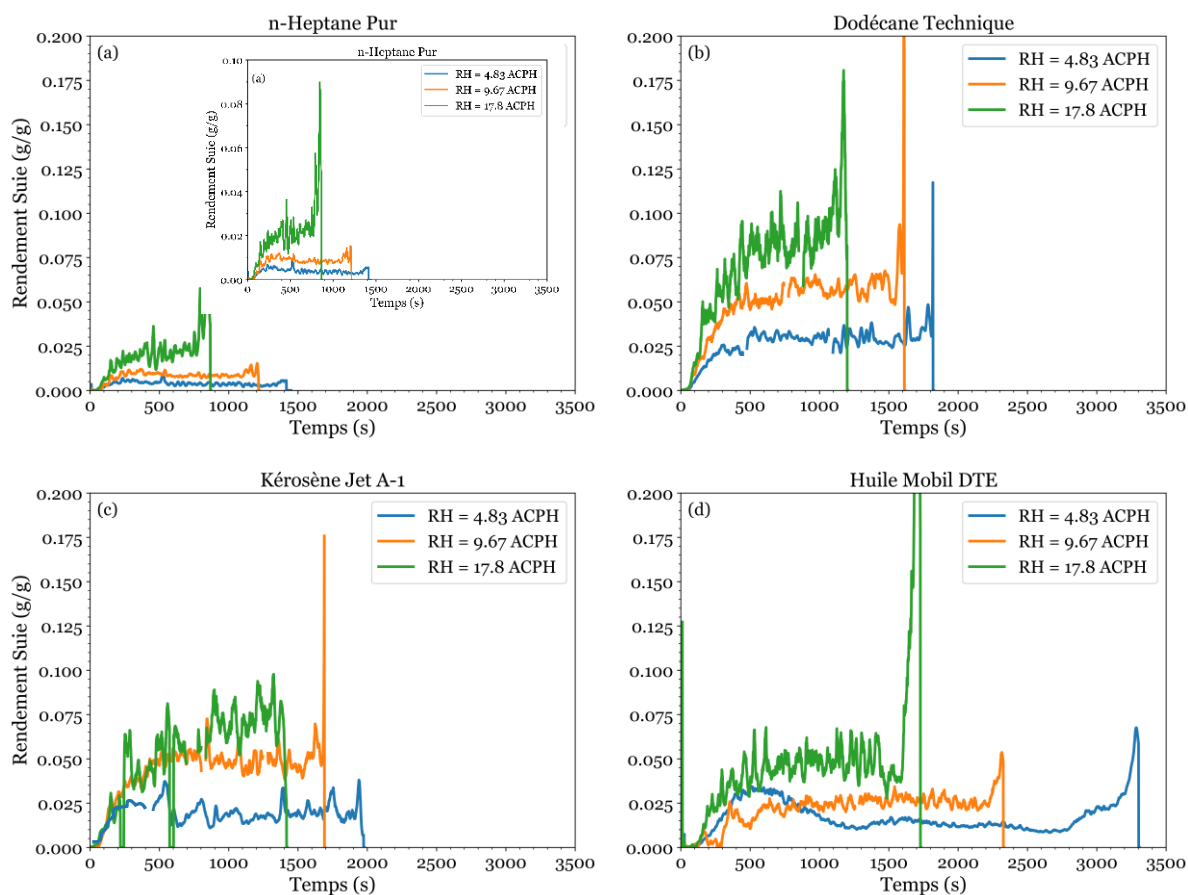


Figure 3.32 - Influence de la ventilation sur l'évolution du rendement de suie pour, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.

De même que dans le cas du CO, il est intéressant de comparer les évolutions de la concentration des suies (Figure 3.29) à celles du rendement (Figure 3.32). On s'aperçoit que pour chaque test, les variations au cours du temps du rendement sont moins fortes par rapport à celles de la concentration (voir par exemple le cas de l'heptane). Ceci souligne l'influence importante du MLR sur la concentration observée dans les fumées, alors que cela est moins sensible sur le rendement, du fait de sa définition.

Un résumé des résultats obtenus sur le rendement moyen et maximal du CO et de suie pour chaque scénario d'incendie est présenté dans le Tableau 3.4. Pour des comparaisons futures, nous avons également inclus la richesse globale. Ces données ne concernent que la période de feu établi.

Tableau 3.4 - Synthèse des résultats des rendements de CO et de suie en fonction de la ventilation, pendant le période de feu établi.

Combustibles / RH (ACPH)	Φ_g (-)	\bar{Y}_{CO} (g/g)	$Y_{CO,max.}$ (g/g)	\bar{Y}_S (g/g)	$Y_{S,max.}$ Max. (g/g)
Heptane					
4.83	1.52	0.224	0.278	0.004	0.009
9.67	1.18	0.158	0.234	0.008	0.012
17.8	1.11	0.084	0.162	0.021	0.036
Dodécane					
4.83	1.24	0.141	0.171	0.030	0.047
9.67	0.92	0.104	0.135	0.057	0.068
17.8	0.75	0.056	0.087	0.081	0.112
Kérosène					
4.83	1.26	0.137	0.170	0.020	0.037
9.67	0.97	0.10	0.121	0.050	0.073
17.8	0.67	0.042	0.055	0.059	0.094
Huile Mobil DTE					
4.83	0.53	0.018	0.047	0.016	0.034
9.67	0.55	0.027	0.038	0.025	0.034
17.8	0.45	0.028	0.042	0.048	0.068

Rendement de suie en fonction de GER

Les rendements de suie pour les quatre combustibles sont tracés en fonction de la richesse globale (GER) sur la Figure 3.33. Pour l'analyse, comme dans le cas du monoxyde de carbone, les résultats sont uniquement basés sur la période de feu établi. Dans les conditions étudiées, et contrairement au CO, le Y_S diminue à mesure que le feu devient sous-ventilé. On peut de plus noter que cette décroissance dépend également du combustible. Proche de la valeur stœchiométrique ($GER = 1$), il existe une production importante de suie.

Comme pour le CO, la variation du GER n'explique pas complètement la production de suie. Sur la Figure 3.33, on voit qu'à une valeur fixée du GER, il existe des variations importantes du Y_s (voir par exemple les quatre combustibles à 17.8 ACPH). Le Y_s dépend donc aussi d'autres paramètres. En effet, le GER est un paramètre représentant la ventilation globale de l'enceinte, mais qui ne renseigne pas sur la qualité du mélange et de la combustion au niveau du foyer, qui est la zone de production des suies. Il est donc nécessaire d'examiner l'influence d'autres paramètres.

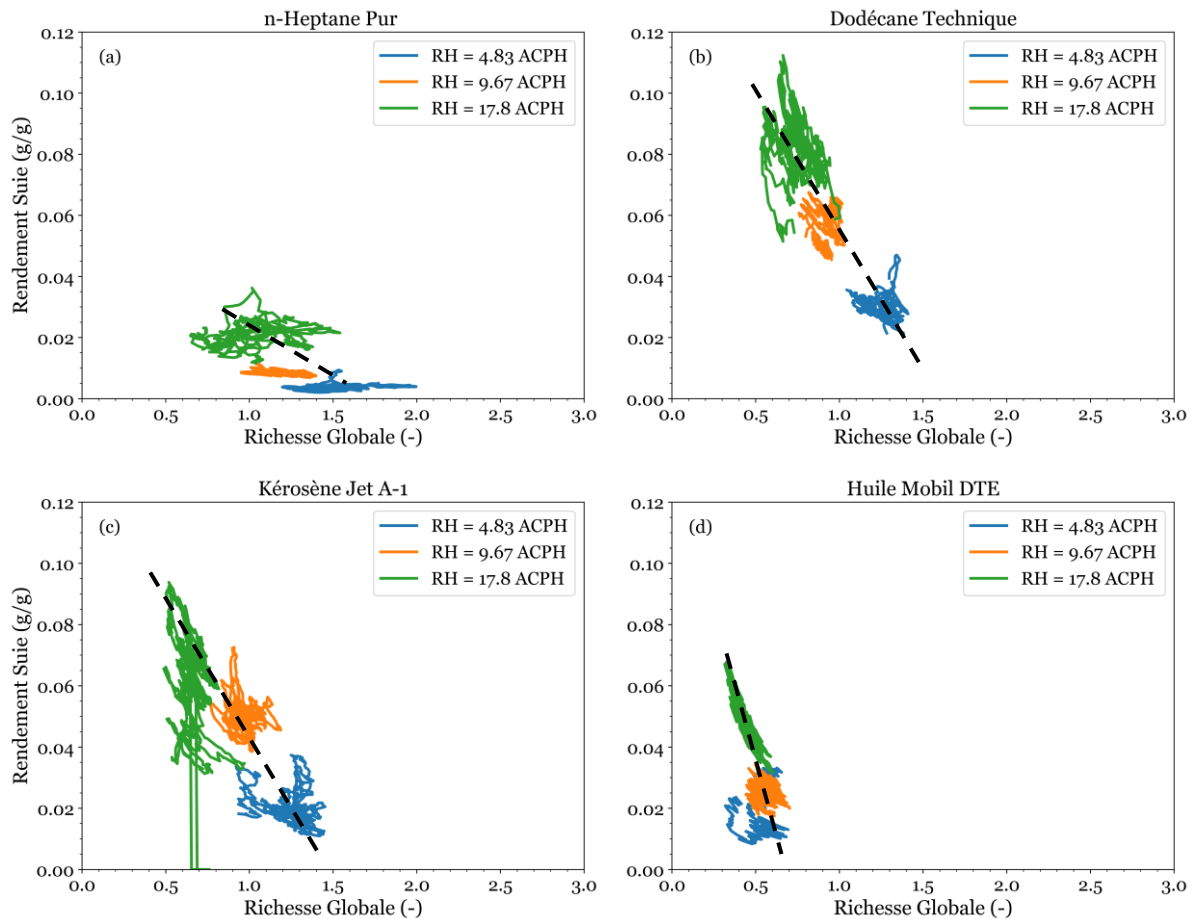


Figure 3.33 - Relation entre le rendement de suie et la richesse globale pour, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.

Relation entre le rendement de suie et la concentration d'oxygène

La Figure 3.34 illustre cette fois-ci la relation entre le Y_s et la concentration d'oxygène au pied de la flamme. Les données présentées précédemment sur la concentration d' O_2 au pied de flamme ont montré qu'elle diminue de 21 % à environ 14 %. Par conséquent, il est intéressant d'observer l'effet de cette viciation pour comprendre la production de suie dans les incendies de compartiment ventilés mécaniquement.

Les résultats montrent que, après l'allumage du combustible, le Y_s augmente si l' O_2 disponible diminue. Néanmoins, une fois que le feu est établi, les données se regroupent et forment un nuage, c'est-à-dire que le Y_s varie mais avec des variations assez faibles de l' O_2 disponible, sauf pour l'heptane à 17.8 ACPH. Ce dernier cas est assez particulier pour ce qui est du MLR, comme cela a été discuté dans un paragraphe précédent.

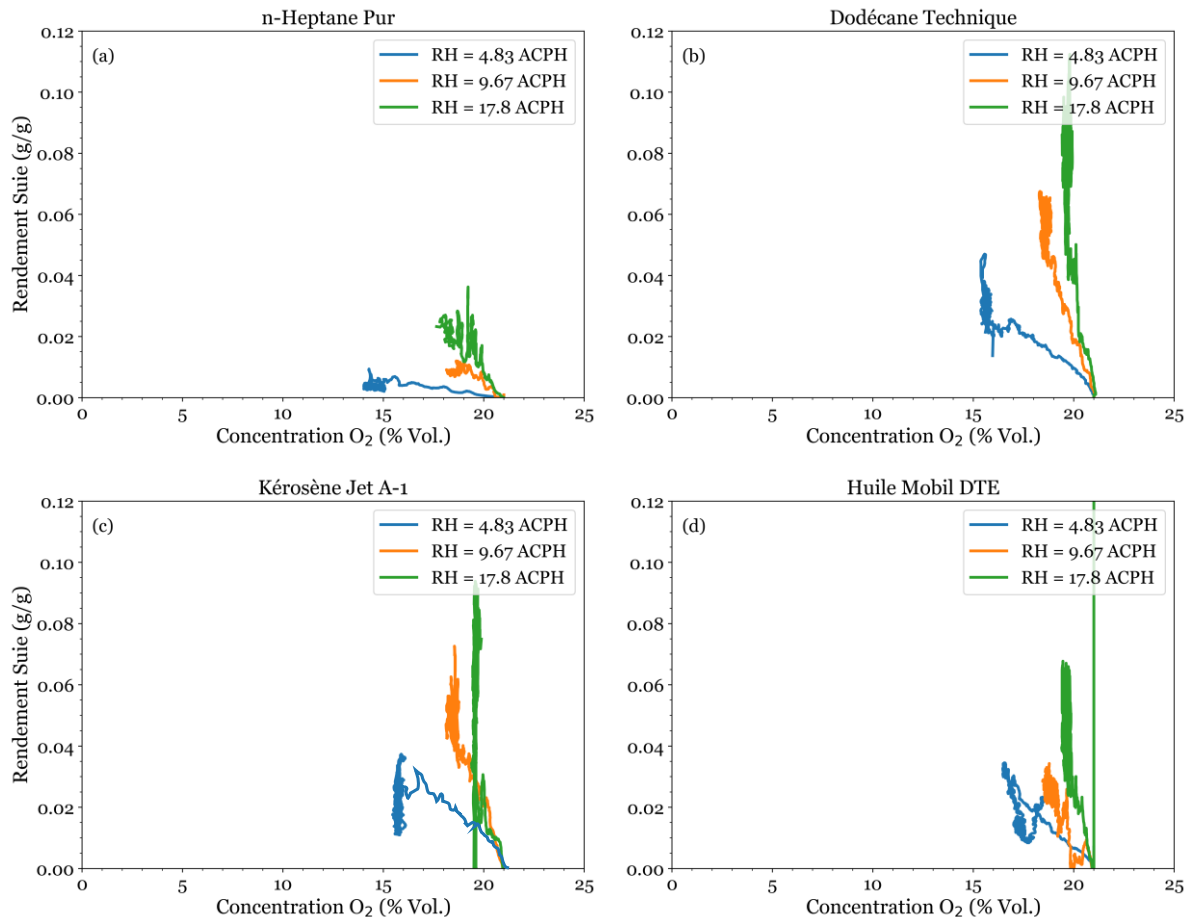


Figure 3.34 - Relation entre le rendement de suie et la concentration d'oxygène autour de la flamme pour les incendies de, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.

Le rendement en suie est également présenté en fonction de la concentration d'oxygène résiduel (à l'extraction) sur la Figure 3.35. La concentration minimale de d'oxygène du CO (CMO_{CO}) et du combustible ($CMO_{combustible}$) sont aussi représentés. Les courbes obtenues suivent le même comportement que celles de la Figure 3.30. Par conséquent, nous allons donc trouver, que le rendement de suie augmente jusqu'à la saturation lorsque la concentration d'oxygène résiduel devient faible. Cependant, aucune relation directe entre ces deux paramètres n'a été trouvée. Si on considère les trois régimes identifiés, on constate que :

pendant la période suffisamment ventilée (de 21 % à $CMO_{combustible}$), le Y_s est faible, mais néanmoins, il augmente légèrement avec la ventilation.

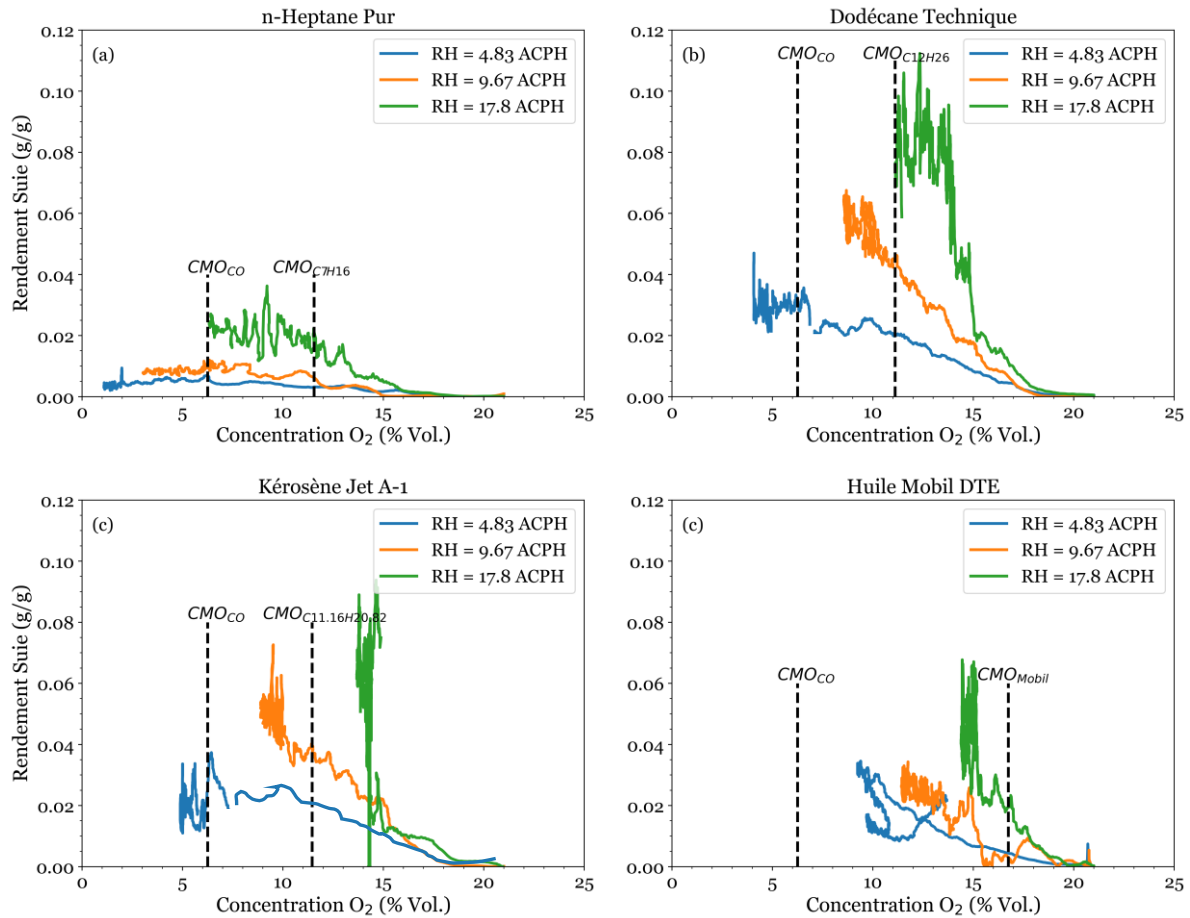


Figure 3.35 - Relation entre le rendement de suie et la concentration d'oxygène à l'extraction pour les incendies de, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.

Dans le régime dit sous-ventilé (de $CMO_{combustible}$ à CMO_{CO}), l'augmentation du rendement avec la diminution de l' O_2 et de la ventilation persiste. Toutefois, l'écart entre les trois courbes (trois taux de ventilation), est plus important par rapport au régime précédent. Le dernier régime, représenté par une concentration d' O_2 inférieure à celle du CMO_{CO} , seuls les incendies d'heptane à 4.83 et 9.67 ACPH, dodécane et kérosène 4.83 ACPH persistent. Dans ce régime, le Y_s semble rester constant, les données sont regroupées et forment un petit nuage, comme observé aussi sur la Figure 3.34.

3.7.5. Influence du taux de ventilation sur la distribution de la taille des particules de suie

Les mesures de la granulométrie des particules de suie ont été réalisées à l'aide de l'appareil SMPS « *Scanning Mobility Particle Sizer* », placé derrière la sonde de dilution du FPS. Plus de détails sur le dispositif de prélèvement et de mesure ont été donnés au paragraphe 2.9.3. La Figure 3.36 montre les distributions théoriques ajustées par l'équation 2.11 « *loi log-normale* », et appliquées systématiquement aux distributions obtenues directement par le DMA (cf. Annexe E). La procédure pour obtenir la distribution théorique log-normale à partir des valeurs expérimentales est détaillée dans l'Annexe E. Cette distribution ajustée nous a permis d'estimer le diamètre moyen géométrique ou le diamètre modal, l'écart-type géométrique et la largeur à mi-hauteur (LMH, déterminé par la relation : $2\sqrt{2 \ln(2)} \sigma_{\text{géom}}$).

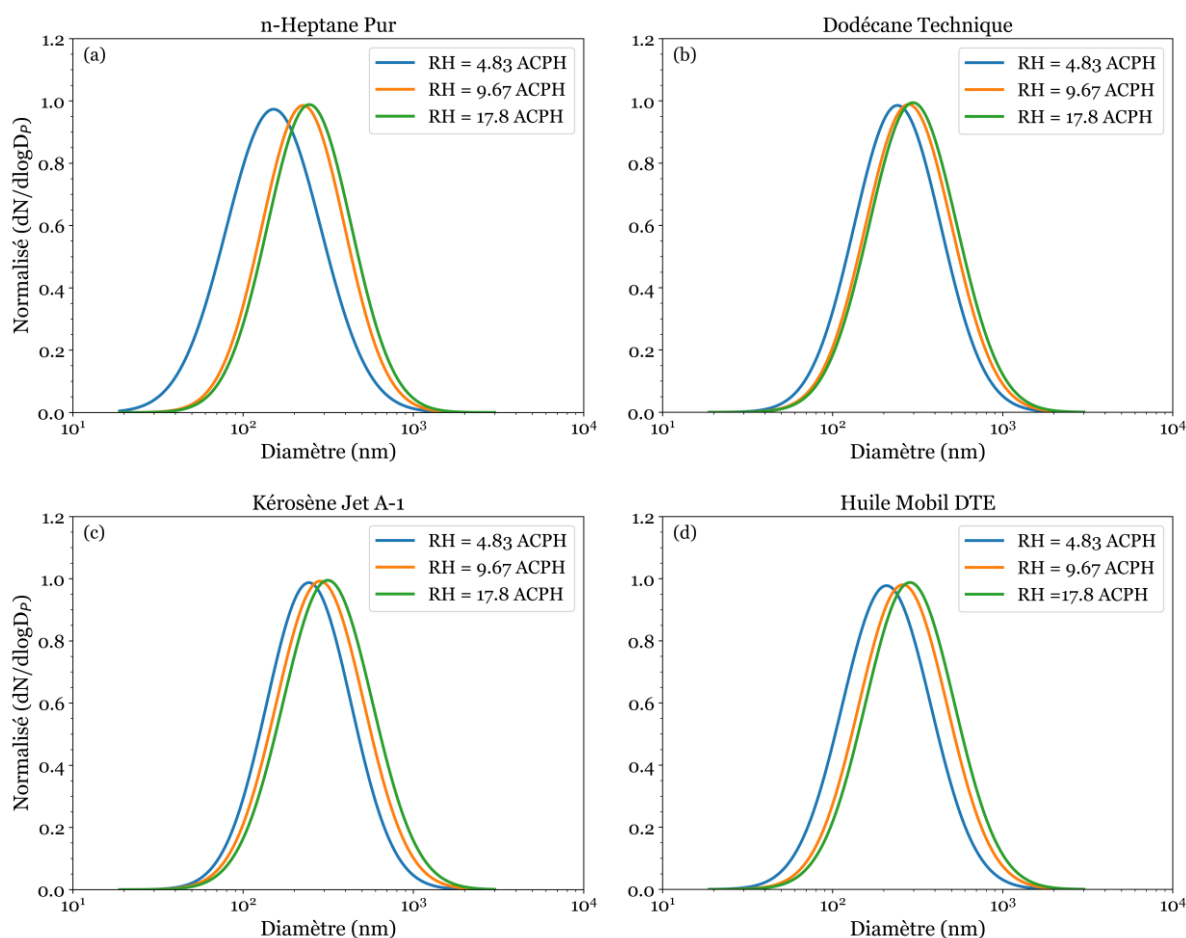


Figure 3.36 - Influence de la ventilation sur la distribution de la taille moyenne des particules, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de combustible de 0.19 m

On peut constater sur la Figure 3.36 que les particules de suie produites lors des expériences sont de très grosses particules. La plupart des particules ont un diamètre modal supérieur à 240 nm (Tableau 3.5). Sauf pour l'heptane et l'huile Mobil DTE à 4.83 ACPH, qui ont montré un diamètre modal d'environ 153.54 nm et 207.31 nm, respectivement. Par conséquent, il a été considéré que ces mesures représentent la taille des particules qui se sont agglomérées dans les fumées de l'enceinte et non la taille des particules produites par la zone de flamme (voir Chapitre 1, paragraphe 1.8.2). Pour connaître la taille réelle des particules générées par la flamme, il faudrait effectuer des mesures in situ dans cette zone. En général si on compare les diamètres modaux pour les trois taux de ventilation, on trouve qu'ils augmentent légèrement avec la ventilation (Tableau 3.5).

Tableau 3.5 - Synthèse issues des distributions obtenues par loi log-normale loi en fonction de la ventilation.

Combustibles / RH (ACPH)	D modal (nm)	Écart-type géom.	LMH (nm)
Heptane			
4.83	154	1.89	4.45
9.67	225	1.75	4.12
17.8	245	1.76	4.15
Dodécane			
4.83	241	1.80	4.24
9.67	280	1.79	4.22
17.8	297	1.81	4.26
Kérosène			
4.83	243	1.77	4.17
9.67	283	1.81	4.77
17.8	314	1.83	4.26
Huile Mobil DTE			
4.83	207	1.82	4.29
9.67	259	1.82	4.80
17.8	285	1.83	4.31

Il faut se rappeler que les distributions présentées sur la Figure 3.36 sont normalisées à un. Ceci permet de voir plus facilement s'il y a des différences dans la forme des distributions.

Par contre, les distributions non normalisées sont différentes car le nombre total de particules a varié et est dépendant des conditions de ventilation.

3.8. Comparaison des différentes méthodes pour déterminer le taux de dégagement de chaleur

Dans ce paragraphe, on étudie l'influence de la ventilation sur la puissance dégagée (HRR pour Heat Release Rate) par le feu. Il s'agit d'un paramètre important pour déterminer ou évaluer le risque d'incendie dans un compartiment, qu'il soit ventilé naturellement ou mécaniquement. En ce qui concerne la méthode de calcul du HRR, on rappelle qu'il existe trois méthodes pour la déterminer. La méthode théorique qui utilise la valeur du MLR. La méthode chimique qui réalise un calcul soit à partir de la consommation d'oxygène (OC), soit avec la génération de dioxyde de carbone (GDC). La méthode thermique, qui repose sur un bilan de chaleur (cf. Section 1.7). Afin d'éviter un nombre excessif de courbes dans une même figure, les résultats du HRR pour les trois conditions de ventilation et les quatre combustibles, obtenus en utilisant les trois méthodes de calculs, sont résumés dans le Tableau 3.6 Les données représentées ci-dessous, correspondent à la moyenne pendant la période de feu établie (cf. Paragraphe 3.5.1).

D'après les résultats, il est observé que la puissance dégagée par le feu augmente avec l'augmentation de la ventilation, comme prévu. Lorsque la flamme est bien oxygénée, la perte de masse du combustible (MLR) et la température dans le compartiment atteignent des niveaux élevés (cf. Section 3.4). Cette combustion est plus complète et entraîne une réduction des émissions en CO (voir Section 3.6) et des émissions en suie relativement faibles, allant de 0.04 g/g à environ 0.1 g/g (cf. Section 3.7). Par conséquent, le taux de dégagement de chaleur (HRR) est important.

En comparant les trois méthodes de calcul utilisées, pour les quatre combustibles, on constate systématiquement que la méthode théorique fournit des valeurs plus élevées que les autres méthodes (consommation d'oxygène et la méthode thermique). Cette différence peut s'expliquer par les simplifications et les hypothèses inhérentes à la méthode théorique. Par exemple, celle-ci suppose un foyer bien ventilé et ne prend pas en compte les effets du feu ou du confinement sur le système de mesure de la masse. Ces simplifications peuvent surestimer la puissance dégagée par le feu. La méthode de la consommation d'oxygène présente des valeurs légèrement supérieures à la méthode thermique. La méthode de la consommation d'oxygène est aujourd'hui largement utilisée. Cependant, il est important de prendre en compte l'utilisation de constantes d'enthalpie de combustion par unité de masse d'O₂ consommé ou de CO₂ généré,

les incertitudes des analyseurs de gaz, leurs temps de réponse et un étalonnage correct des capteurs. Par conséquent, cette méthode a tendance à sous-estimer la puissance libérée. En ce qui concerne la méthode thermique, il est prévu d'obtenir des résultats plus bas, car cette méthode repose sur le bilan d'énergie du système incluant l'incendie lui-même. Par conséquent, cette méthode nécessite un ensemble spécifique de mesures, telles que les flux de chaleur thermique à toutes les frontières ou la température du gaz pour le calcul de l'augmentation de l'enthalpie, ce qui peut être difficile à traiter de manière fiable (Pretrel, Saux, & Audouin, 2013).

Tableau 3.6 - Puissance dégagée par les incendies. Comparaison entre les trois méthodes de calcul.

Combustibles / RH (ACPH)	Théorique (kW)	Chimique - OC (kW)	Thermique (kW)
Heptane			
4.83	8.48	5.04	4.14
9.67	10.22	6.34	6.03
17.8	13.32	8.75	6.73
Dodécane			
4.83	7.46	4.14	3.73
9.67	8.22	4.62	5.07
17.8	11.49	5.78	6.29
Kérosène			
4.83	5.82	4.0	3.73
9.67	6.74	4.47	4.89
17.8	8.09	4.75	5.61
Huile Mobil DTE			
4.83	3.16	2.84	2.87
9.67	5.12	3.68	4.0
17.8	6.96	4.46	4.26

Si l'on considère le taux de ventilation à 9.67 ACPH, on constate les écarts suivants entre les différentes méthodes de calcul pour l'heptane (incendie développé dans un environnement sous-ventilé) : l'écart absolu entre les méthodes théorique et chimique est d'environ 3.88 kW, entre les méthodes théorique et thermique est de 4.19 kW, et entre les

méthodes chimique et thermique est d'environ 0.31 kW. En ce qui concerne l'huile Mobil DTE (incendie développé dans un environnement bien ventilé) : l'écart absolu entre les méthodes théorique et chimique est d'environ 1.44 kW, entre les méthodes théorique et thermique est de 1.12 kW, et entre les méthodes chimiques et thermique est de 0.32 kW.

Comme indiqué dans la section 1.7, on confirme que la méthode théorique surestime la puissance du feu. Il n'est donc pas recommandé d'utiliser cette méthode sur les incendies dans ce type de configuration si le foyer est sous-ventilé. Cela a également été observé par Lassus et al. (Lassus J. , et al., 2014) ainsi que par Manescau et al. (Manescau, Wang, Coudour, & Garo, 2019). Cependant, lorsque le foyer se développe dans un environnement bien ventilé, tel que le cas de l'huile Mobil DTE, le calcul du HRR par la méthode théorique, reposant sur la valeur du MLR, donne des valeurs assez raisonnables.

3.9. Conclusions

Des mesures ont été réalisées pour étudier l'influence du taux de ventilation lors des incendies d'heptane, de dodécane, de kérosène et l'huile Mobil DTE dans un compartiment confiné à échelle réduite mécaniquement ventilé. Ce compartiment a permis de réaliser des expériences qui se reproduisent de manière très satisfaisante. Les mesures rapportées dans ce chapitre comprennent le taux de perte de masse (g/sm^2), les températures, les concentrations des espèces chimiques (O_2 , CO_2 , CO et suie), et la granulométrie des particules.

Les taux de renouvellement horaire adoptés, 4.83, 9.67 et 17.8 ACPH ont permis de produire des incendies, bien ventilés, sous-ventilés et très sous-ventilés. Dans ces conditions, il a été possible de caractériser l'évolution ou le comportement du feu de quatre types de combustibles. En utilisant le taux d'évaporation du combustible et la concentration en oxygène au pied de la flamme, il a été constaté que les incendies se développent en trois phases : inflammation et croissance, période du feu établi et extinction. Les résultats ont également montré que, plus le taux de ventilation est important, plus l'oxygène est disponible pour la combustion. Cela augmente le taux d'évaporation du combustible, et donc le dégagement de chaleur et la température dans la chambre de combustion.

En ce qui concerne la température des fumées, dans tous les tests effectués, les profils verticaux ont suggéré qu'il existe une stratification dans le caisson. Deux couches de fumées ont été observées, la couche froide, avec des températures de 50 à environ 180 °C et la couche chaude, avec des températures pouvant atteindre 350 °C. Un taux de ventilation élevé favorise le mélange combustible/air, ce qui a pour effet une augmentation de la concentration d'oxygène résiduel (à l'extraction). Toutefois, lorsque le taux de ventilation est faible, la

concentration d'oxygène dans la zone de la flamme est également faible, et la combustion est mal entretenue. Le dégagement de chaleur peut être faible, et la conversion du monoxyde de carbone en dioxyde de carbone n'est pas favorisée. Par conséquent, la production de monoxyde de carbone devient importante. Il a été constaté une compétition entre les productions de CO et des suies, pour lesquelles un effet contraire a été observé par rapport au cas du CO. Si la ventilation augmente, la production des suies augmente.

De plus, la taille des agglomérats des particules de suie augmente légèrement avec la ventilation. Les particules de suie produites lors des expériences réalisées sont de très grosses particules, la plupart des particules ont eu un diamètre de mobilité (diamètre modal) supérieur à 240 nm.

Les feux de compartiment confinés avec de l'heptane comme source de combustion produisent beaucoup plus de monoxyde de carbone, alors que c'est le combustible qui produit le moins de suie. Dans ce contexte, la production de monoxyde de carbone, par ordre décroissant, est heptane, dodécane, kérosène et l'huile Mobil DTE, tandis que la production de suie est dodécane, kérosène, heptane et l'huile Mobil DTE.

Chapitre 4

Analyse des incendies confinés et mécaniquement ventilés en fonction du bac et de la nature du combustible

4.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de quantifier les émissions de polluants provenant des incendies de combustibles liquides dans un compartiment ventilé mécaniquement. Différents bacs de combustibles (tailles et types de matériaux) ont été utilisés. Plus précisément, il s'agit d'étudier les émissions de monoxyde de carbone et de particules de suie. Ce chapitre vise à analyser les effets de la variation du diamètre du bac, la nature de la nappe et du combustible sur les émissions de CO et de suies. Les résultats seront présentés comme dans le Chapitre 3.

Les données auxquelles on s'intéresse comprennent le taux de perte de masse du combustible par unité de surface, les températures, les concentrations des espèces chimiques (O_2 , CO_2 , CO) ainsi que les particules de suie, qui sont des paramètres clés dans la caractérisation de la combustion des hydrocarbures. Pour chaque type d'hydrocarbures, des corrélations entre certaines de ces grandeurs seront établis.

4.2. Conditions expérimentales

Cette section est consacrée aux paramètres initiaux utilisés pour étudier les émissions de polluants des feux confinés avec ventilation forcée. Les essais ont été faits à l'aide de quatre combustibles liquides, n-heptane pur, dodécane technique, kérosène Jet A-1 et l'huile Mobil DTE heavy medium, dont les caractéristiques sont présentées au Chapitre 2. Deux matériaux de bacs (verre borosilicate type pyrex et acier) et quatre diamètres de bac ont été considérés, 0.115, 0.14, 0.19 et 0.23 m. Pour chaque diamètre, plusieurs essais ont été réalisés à différents taux de ventilation et dans des conditions non confinées « *incendies ouverts* ». Cependant, pour l'analyse et l'interprétation des données dans ce chapitre, il n'est considéré que le taux de ventilation de 9.67 ACPH.

La masse initiale de combustible lors des essais est la même, 267 g. Mais comme la hauteur des bacs varie en fonction du diamètre (cf. Tableau 2.1), la hauteur initiale (H_0) de combustible dans le bac augmente lorsque le diamètre est petit. Le Tableau 4.1 montre les diamètres des bacs et hauteur initiale de l'hydrocarbure liquide. Le protocole expérimental est donné en Annexe A.

Tableau 4.1 - Taille des bacs et hauteur initiale du combustible.

Paramètres	Heptane			Dodécane			Kérosène			Huile Mobil DTE		
Diamètre (m)	0.115	0.14	0.19	0.115	0.14	0.19	0.115	0.14	0.19	0.115	0.14	0.19
H ₀ (cm)	4.1	3.1	1.7	3.8	2.8	1.65	3.7	2.7	1.6	3.3	2.5	1.45

4.3. Influence du diamètre du bac sur la perte de masse, la richesse globale et la température

Comme il a été fait au Chapitre 3, les résultats de la perte de masse (MLR), la richesse globale (GER) et la température dans la couche de fumée, pour les quatre combustibles avec différentes tailles du bac sont présentés dans cette section. Une série d'expériences a été menée avec des bacs en verre de diamètre de 0.115, 0.14 et 0.19 m. Ces conditions ont permis d'analyser l'influence de la taille de la nappe sur chaque combustible, et de pouvoir caractériser l'évolution du processus de combustion lors de tests ventilés mécaniquement dans le compartiment cubique de 1 m³ du laboratoire CORIA.

4.3.1. Perte de masse du combustible et richesse globale en fonction de la taille du bac

Variation du taux perte de masse du combustible (MLR)

La Figure 4.1 présente l'évolution temporelle de la perte de masse par unité de surface de chaque hydrocarbure, (a) n-heptane pur, (b) dodécane technique, (c) kérosène Jet A-1, (d) huile Mobil DTE heavy medium. Il a été constaté qu'après l'inflammation, la flamme est immédiatement en contact avec la surface libre du combustible. Les résultats montrent que le MLR (g/sm²) diminue légèrement avec l'augmentation du diamètre de la nappe. Mais comme attendu, le taux d'évaporation en g/s augmente à mesure que le diamètre est plus grand (voir Annexe F, Figure F. 1). Un comportement similaire a été observé par Mense et al. (Mense, Pizzo, Prétrel, Lallemand, & Porterie, 2019). En accord avec Nasr et al. (Nasr, et al., 2013) et Tiwari et al. (Kumar Tiwari, Gupta, Kumar, & Kumar Sharma, 2021), le taux d'évaporation (g/s) de combustibles liquides lors d'un feu de compartiment est influencé par plusieurs facteurs, en particulier le rayonnement des parois ou de la fumée vers la surface du

combustible (comme indiqué à l'Annexe C). Ainsi si la chaleur est transférée du plafond et des parois du compartiment à la surface du combustible, le taux d'évaporation (g/s) augmente.

Les incendies de chaque type de combustible ont duré plus longtemps lorsque les bacs ont des diamètres plus petit (0.115 et 0.14 m). Cette variation est gouvernée par le fait que, pour les petites tailles de bacs, la surface d'évaporation est réduite et, par conséquent, le flux de vapeur combustible est plus faible, ce qui entraîne un temps de combustion plus long. Le temps de combustion dépend également du type d'hydrocarbure, il a été trouvé des feux courts pour l'heptane et plus longs pour l'huile Mobil DTE. Lorsque le diamètre du bac varie de 0.115 à 0.19 m, le temps de combustion pour l'heptane varie de 40 à 20 minutes, pour le dodécane et le kérosène de 70 à 30 minutes et pour l'huile de 87 à 38 minutes. Les combustibles lourds s'évaporent plus lentement que les combustibles légers en raison de leurs propriétés physiques et chimiques. Les combustibles légers ont une pression de vapeur élevée, ce qui leur permet de s'évaporer rapidement à des températures relativement basses. De plus, les hydrocarbures lourds ont des chaînes moléculaires plus longues et plus complexes, c'est-à-dire, plus difficile à briser lorsqu'ils sont chauffés.

Comme dans le Chapitre 3, il est possible d'identifier plusieurs phases dans le développement du feu. Selon la Figure 4.1, trois phases distinctes peuvent être définies pour les quatre combustibles : (i) inflammation du combustible et croissance, (ii) phase quasi-stable, (iii) décroissance et l'extinction du feu. Dans le cas d'heptane, une phase transitoire ou un effet d'accroissement avant l'extinction a également été observé.

La phase (i) représente l'inflammation du combustible et la croissance de la flamme. C'est le début de la combustion, ou cause de l'incendie. L'allumage a été fait au moyen d'un brûleur à butane de 1.6 kW. Dans le cas de l'huile Mobil DTE, un préchauffage a été nécessaire. Après l'allumage, on observe la croissance rapide, le MLR augmente rapidement, suivi d'une diminution rapide jusqu'à atteindre une valeur presque constante. Cette phase est également caractérisée par un pic très important au début de l'incendie. Le MLR atteint sa valeur maximale. Ce pic ne se manifeste que dans le cas des incendies confinés. Il convient de rappeler que pendant l'allumage, la porte du compartiment est restée ouverte. Néanmoins, ce pic n'est caractéristique que des feux confinés, car les incendies ouverts « *en hotte* » ne l'ont pas produit.

La phase (ii) se caractérise par un profil quasi-stable dans les courbes de MLR. Dans les incendies avec du dodécane, du kérosène et de l'huile Mobil DTE, le MLR est relativement constante jusqu'à l'extinction, pour les trois diamètres de bacs. Pour l'heptane, l'effet d'accroissement est apparu après la phase quasi-stable, et a persisté jusqu'à l'extinction. Cet

accroissement a été plus fort lorsque le diamètre du bac est petit ($D = 0.115$ m). Lassus et al. (Lassus J. , et al., 2014) suggèrent que cette croissance pourrait être causée par l'effet de bord. Ce phénomène a été analysé et les résultats sont fournis dans l'Annexe B. Des expériences ont été réalisées avec des bacs en acier de hauteurs différentes, 22, 45 et 90 mm, pour la même quantité initiale de combustible (267 g).

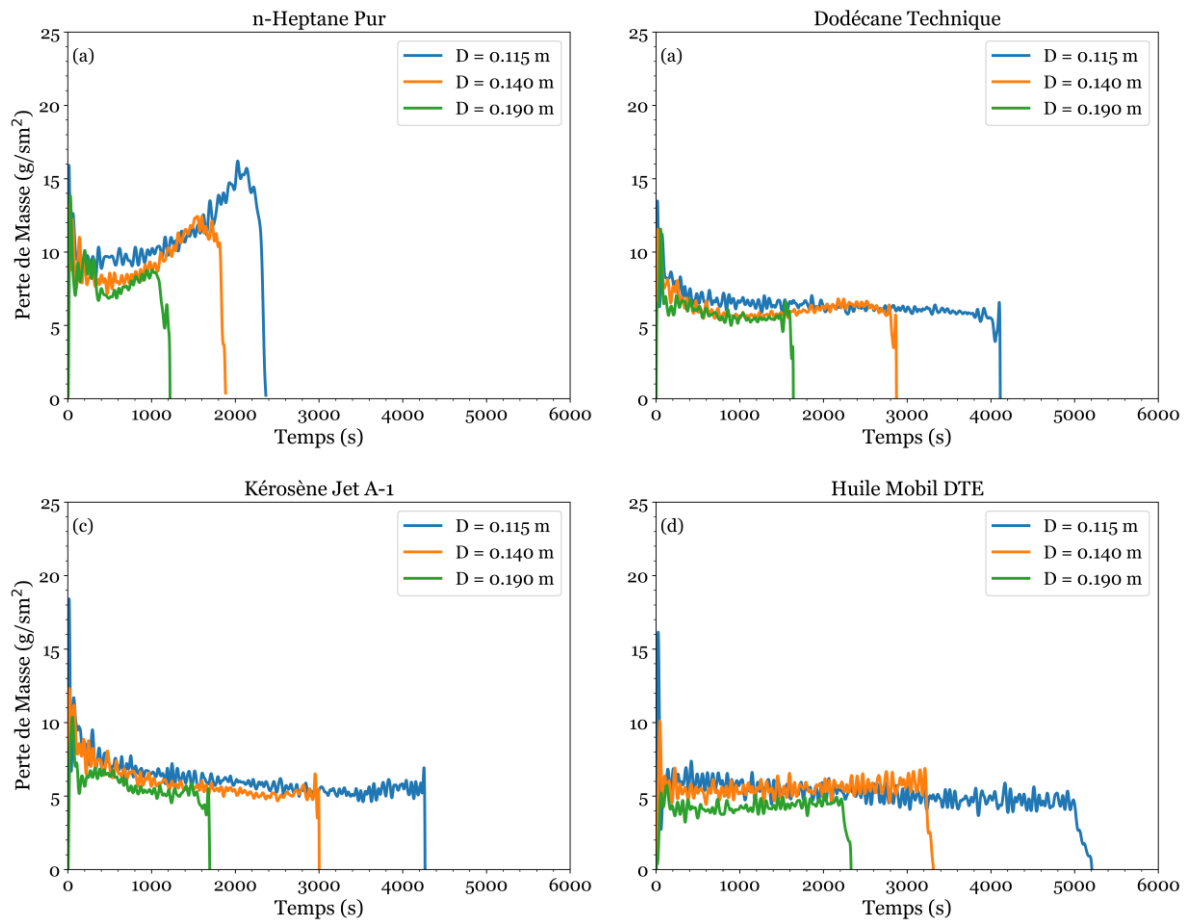


Figure 4.1 - Effets du diamètre du bac sur l'évolution de la perte de masse du combustible à 9.67 ACPH, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.

Il a été constaté que même en faisant varier hauteur entre le bord du bac et la surface du combustible, le phénomène d'accroissement persiste (Figure B. 1). On attribue donc ce comportement à l'effet du rayonnement des parois et de la fumée sur le bac. Un calcul simple des flux rayonnés reçus par le bac est donné à l'Annexe C, il permet de confirmer que l'effet du rayonnement des parois et de la fumée sur le bac est significatif et non négligeable. Selon les résultats précédents (cf. Figure 3.7) et actuels (Figure 4.1), on peut conclure que l'accroissement du MLR observé en fin de tests pour les feux d'heptane est dû au rayonnement

de la fumée et des murs sur la surface du liquide. Cela ne se produit qu'à partir d'une température maximale de 300 °C des fumées, qui est observée uniquement pour l'heptane et dans une moindre mesure le dodécane (voir Chapitre 3). Dans la phase stable, le MLR pour l'heptane varie de 9.8 à 7.7 g/sm², pour le dodécane de 6.5 à 5.7 g/sm², pour le kérosène de 5.9 à 5.8 g/sm² et pour l'huile Mobil DTE de 5.1 à environ 4.3 g/sm². Ces données sont relatives aux diamètres de la nappe de 0.115 m et 0.19m, respectivement.

La phase (iii) se caractérise par l'épuisement du combustible et la décroissance rapide du feu suivi de l'extinction. Le taux de combustion diminue jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de flamme visible. Dans chaque d'incendie, l'extinction a eu lieu par manque de combustible.

Les résultats montrent que l'augmentation du diamètre du bac de combustible, diminue légèrement le MLR (g/sm²). On observe que le diamètre du bac le plus grand est environ 1.65 fois celui du plus petit, cependant, l'écart entre les deux résultats de MLR n'est pas si important. L'écart relatif, en tenant compte des chiffres ci-dessus, est d'environ 22 % pour l'heptane, de ~14 % pour le dodécane, de ~7.3 % pour le kérosène et de ~17.5 % pour l'huile Mobil DTE. Il est conclu que le fait de changer la taille du bac affecte faiblement le taux de perte de masse par unité de surface dans ce compartiment. Par contre, cette faible augmentation du MLR avec la diminution de la taille du bac est à rapprocher des résultats du Chapitre 3, qui ont montré que le MLR augmente si le taux de ventilation augmente (cf. Figure 3.7).

Variation de la richesse globale (GER)

La Figure 4.2 montre l'évolution de la richesse globale (GER) au cours du temps pour les quatre combustibles à 9.67 ACPH. Le GER augmente si le diamètre du bac augmente. Le grand diamètre du bac génère des incendies en milieux sous-ventilés ($GER > 0.7$), comme attendu. À mesure que la taille de la nappe est importante, le GER augmente, car le taux d'évaporation du combustible (g/s) augmente. En accord avec nos expériences, le débit d'air entrant dans le compartiment pendant l'incendie diminue légèrement entre les diamètres du bac, mais en général, il reste constant (voir Annexe F, Figure F. 2). Pour les trois diamètres du bac, le débit initial d'air entrant est fixé à 9.67 m³/h, qui, après inflammation, diminue légèrement à mesure que la taille de la nappe devient importante, puis reste ensuite stable juste avant l'extinction. Dans la zone de combustion, pour le mélange combustible/air, l'apport d'air est très limité, de sorte que le GER augmente. Avec le grand bac de combustible ($D = 0.19$ m), la plupart des combustibles entraînent des incendies dans un environnement sous-ventilé.

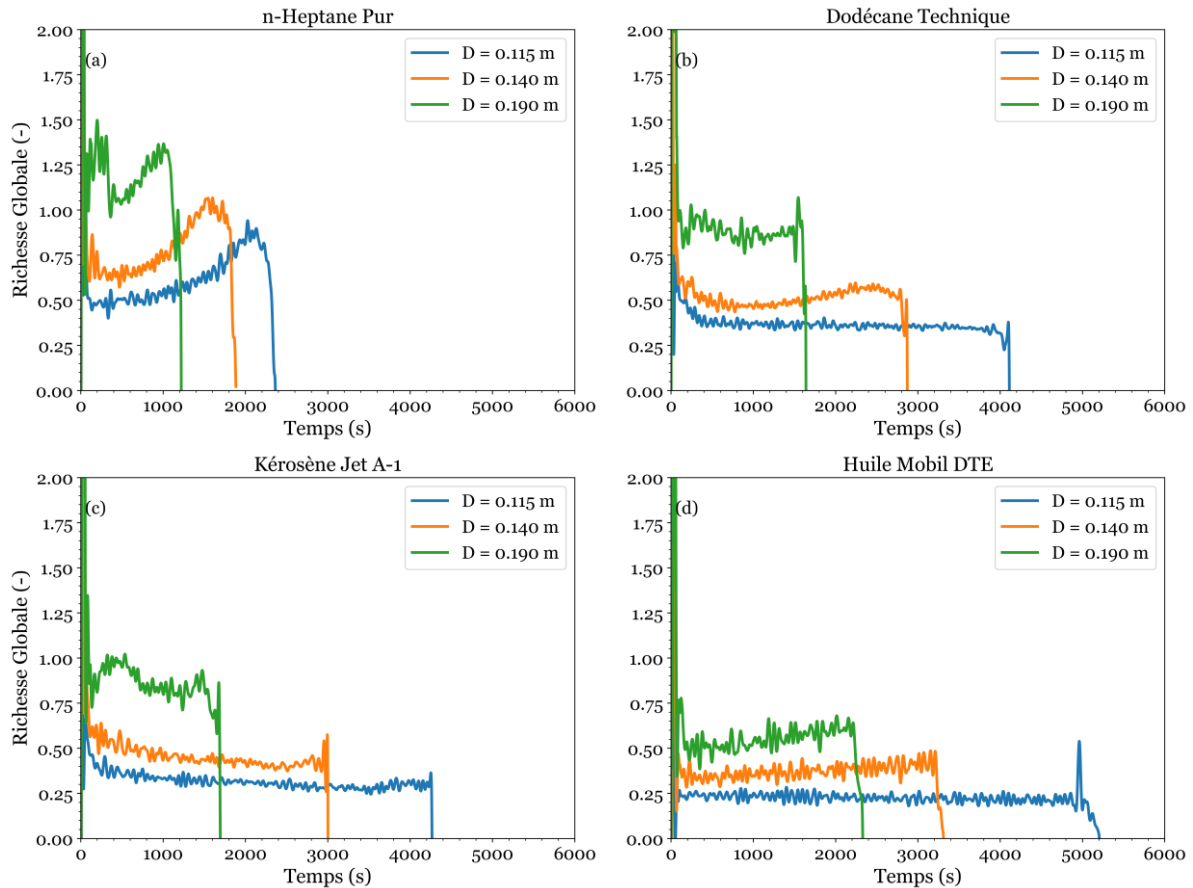


Figure 4.2 - Effets du diamètre du bac sur l'évolution de la richesse globale à 9.67 ACPH, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.

Conformément aux critères de ventilation déjà discutés au chapitre 3 (cf. Paragraphe 3.4.1), si l'on considère les valeurs de GER pour les petits diamètres dans la phase de feu quasi-stable ($D = 0.115$ et 0.14 m), les quatre combustibles, heptane, dodécane, kérosène et l'huile Mobil DTE, ont donné lieu à un foyer sur-ventilé ou bien ventilé ($GER < 0.7$). Par contre avec le bac de 0.19 m, l'heptane, le dodécane et le kérosène, ont donné lieu à foyer sous-ventilé ($0.7 \leq GER < 1.5$). Cependant, dans le cas de l'huile Mobil DTE, le GER moyen reste inférieur à 0.6 , de telle sorte qu'il n'a pas été possible d'obtenir des feux sous-ventilés, quelle que soit la taille du bac.

En comparant la Figure 4.1 et la Figure 4.2, comme démontré au Chapitre 3 (cf. paragraphe 3.4.1), on confirme que les variations du GER suivent celles du MLR. De sorte que les variations du GER au cours d'un test sont principalement contrôlées par celle du MLR. Pour conclure, le choix de ces diamètres a permis d'étudier des incendies ventilés mécaniquement, développés dans des milieux bien ventilés, tels que de l'heptane, le dodécane

et kérosène avec des diamètres de 0.115 et 0.14 m, ainsi que l'huile Mobil DTE avec les trois diamètres du bac. Des incendies qui se développent dans des milieux sous-ventilés, tels que l'heptane, le dodécane et le kérosène avec le diamètre du bac 0.19 m. Cependant, le GER est un paramètre global qui ne représente pas la ventilation existante réellement près de la flamme (Kumar Tiwari, Gupta, Kumar, & Kumar Sharma, 2021).

4.3.2. Relation entre la perte de masse du combustible lors des incendies non-confinés et le diamètre de la nappe

Pour les incendies ouverts le taux de perte masse peut être estimé en utilisant la formule de Zabetakis et Burgess (Zabetakis & Burgess, 1961). La corrélation permet de calculer le taux de perte de masse par unité de surface en fonction de la taille du bac de combustible lors des incendies dans des atmosphères libres. L'équation 4.1 représente la corrélation de Zabetakis et Burgess. Il est important de noter que cette corrélation a été développée pour des grands feux où la taille de la nappe est supérieure ou égale à 0.2 m ($D \geq 0.2$ m). Pour connaître sa validité à petite échelle ($D < 0.2$ m), nous allons appliquer cette corrélation aux petits bacs. De l'équation 4.1, $\dot{m}''_{\text{Combustible}}$ représente le MLR en atmosphère ouverte (g/ms^2), \dot{m}''_{∞} est le MLR maximal en régime stable (g/ms^2), $(1 - e^{-\kappa\beta D})$ est l'émissivité du volume effectif de la flamme, où, κ est le coefficient d'extinction d'absorption de la flamme ; β est un facteur de correction de la longueur moyenne du faisceau et D est le diamètre du bac (m).

$$\dot{m}''_{\text{Combustible}} = \dot{m}''_{\infty}(1 - e^{-\kappa\beta D}) \quad 4.1$$

Pour appliquer la corrélation ci-dessus, des feux ouverts ont été réalisés avec les quatre combustibles liquides et avec les quatre diamètres du bac 0.115, 0.14, 0.19 et 0.23 m. Les valeurs moyennes du MLR pendant la phase stable sont présentées sur la Figure 4.3. Cette figure montre aussi les courbes d'ajustement obtenues avec l'équation 4.1 (ligne pointillée noire) pour les quatre combustibles étudiés. Les valeurs de \dot{m}''_{∞} et $\kappa\beta$ ont été obtenues par un ajustement non linéaire des données expérimentales pour les quatre combustibles.

Il a été constaté que le MLR des feux ouverts augmente avec la taille du bac de combustible, comme prévu. De plus, les comparaisons entre les données expérimentales et les valeurs prédites par la corrélation (lignes pointillées en noir) montrent un bon accord, même pour les diamètres inférieurs à 0.2 m. Par contre, pour ces mêmes diamètres ($D < 0.2$ m), il a été remarqué (pour les quatre combustibles) que le MLR et le diamètre du bac semblent avoir une relation plutôt linéaire (indiqué sur la Figure 4.3 par une droite pointillée rouge). Avec le

diamètre du bac de 0.23 m, les données sont plus proches de la prédiction de Zabetakis et Burgess (ligne pointillée noire) que ceux de la ligne pointillée rouge.

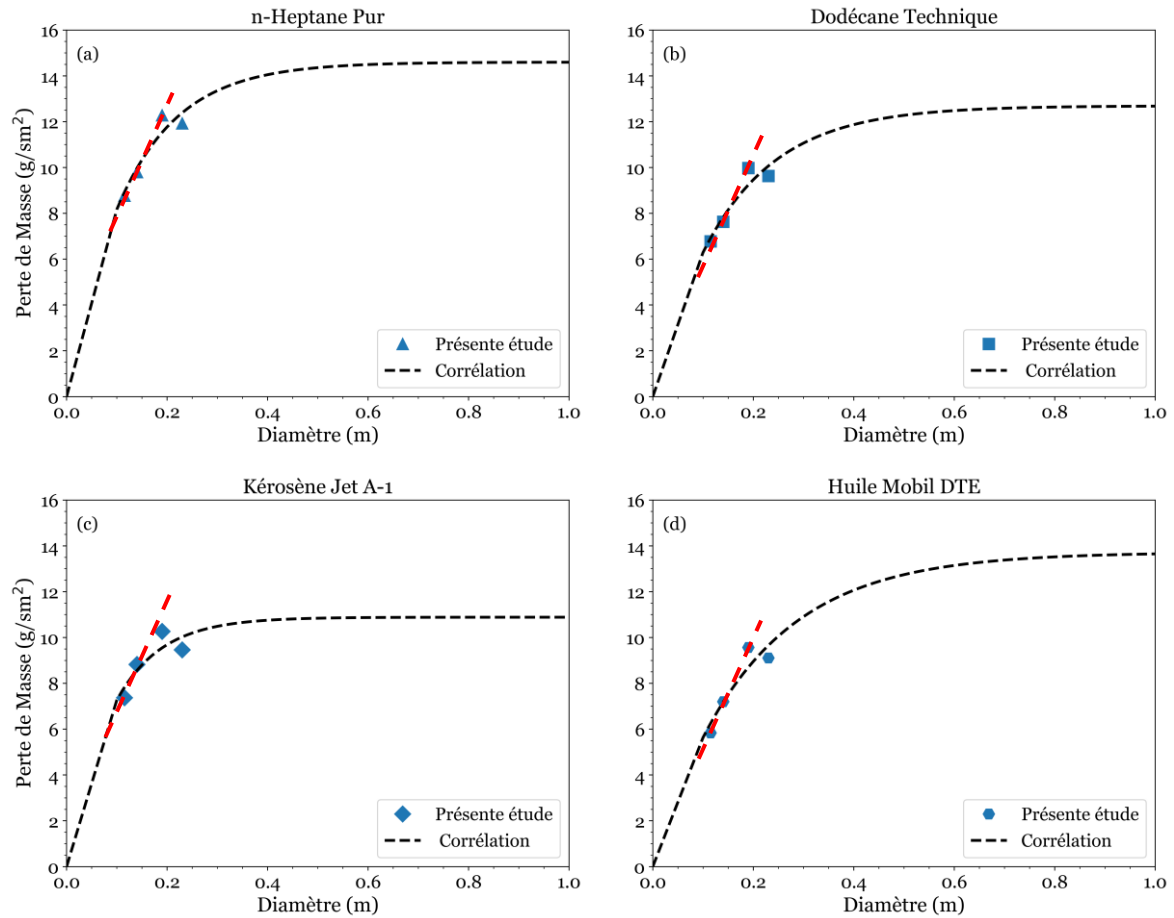


Figure 4.3 - Taux de combustion par unité de surface en fonction du diamètre du bac de combustible dans une atmosphère ouverte, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.

Les valeurs ajustées des paramètres \dot{m}''_{∞} et $\kappa\beta$ pour chaque combustible sont listées dans le Tableau 4.2. Si l'on compare les paramètres \dot{m}''_{∞} et $\kappa\beta$ de la présente étude à ceux de la littérature, on constate qu'il existe des divergences. Babrauskas (Babrauskas, 1983) a trouvé $\dot{m}''_{\infty} = 101 \text{ g/ms}^2$ et $\kappa\beta = 1.1 \text{ m}^{-1}$ pour l'heptane, 39 g/ms^2 et 3.5 m^{-1} pour le kérosène. Rew et al. (Rew, Hulbert, & Deaves, 1997) ont trouvé des valeurs de 81 g/ms^2 et 1.394 m^{-1} pour l'heptane et 61 g/ms^2 et 1.296 m^{-1} pour le kérosène JL5. Prétrel et al. (Prétrel, Bouaza, & Suard, 2021) ont mené des expériences à petite échelle avec le dodécane et à grande échelle avec le Tétra-propylène d'hydrogène. Les auteurs ont déterminé expérimentalement $\dot{m}''_{\infty} = 35 \text{ g/ms}^2$ et $\kappa\beta = 2.5 \text{ m}^{-1}$. Les résultats obtenus dans cette étude ont montré des valeurs beaucoup plus faibles de \dot{m}''_{∞} , alors que les valeurs de $\kappa\beta$ sont plus élevées. Ceci est

certainement dû au domaine de variations des diamètres choisis. En effet pour ajuster la loi de Zabetakis et Burgess aux valeurs expérimentales et obtenir une valeur correcte de \dot{m}''_{∞} , il faut réaliser les expériences avec de grands diamètres, supérieurs à 0.2 m. Sinon, l'ajustement se fait dans le régime des petits diamètres, c'est-à-dire linéaire.

Tableau 4.2 – Valeurs des paramètres de la corrélation de Zabetakis et Burgess pour les combustibles étudiés.

Combustibles	\dot{m}''_{∞} (kg/ms²)	$\kappa\beta$ (m⁻¹)
Heptane (C ₇ H ₁₆)	14.59	8.20
Dodécane (C ₁₂ H ₂₆)	12.69	6.85
Kérosène (C _{11.16} H _{20.82})	10.89	11.03
Huile Mobil DTE (-)	13.72	5.29

4.3.3. Température de la fumée en fonction de la taille du bac du combustible

Pour rappel, la mesure de température du gaz a été réalisée avec un arbre de thermocouple composé de 8 thermocouples, installé dans un coin du compartiment (voir Figure 2.5). La Figure 4.4 montre la variation dans le temps de la température des fumées à 80 cm du sol, près de la sortie d'évacuation pour les quatre combustibles étudiés. Comme attendu, les résultats montrent que la température des fumées augmente si la taille du bac augmente. Plus le diamètre du bac est grand, plus est grande la flamme, et par conséquent, le taux d'évaporation du combustible (g/s) et le dégagement de chaleur augmentent, ce qui influence en retour la température des fumées.

On observe que la température de la fumée augmente continuellement jusqu'à atteindre sa valeur maximale, juste avant l'extinction. À l'exception du dodécane, du kérosène et de l'huile Mobil DTE, à 0.115 m, où la température semble rester quasi-constante. Ceci s'explique par le transfert et le stockage de chaleur qui diminue dans les parois pendant l'essai, permettant ainsi une augmentation de la température des fumées dans le caisson. La température maximale atteinte varie de 320 à 350 °C pour l'heptane, de 190 à 300 °C pour le dodécane, de 170 à environ 280 °C pour le kérosène, et de 150 °C à environ 275 °C pour l'huile Mobil DTE, correspondant aux diamètres des bacs de 0.115 et 0.19 m, respectivement.

Lassus et. al (Lassus, et al., 2010) ont étudié le risque d'auto-inflammation dans le conduit d'extraction, en considérant uniquement l'ordre de grandeur de la température. Pour le plus petit diamètre ($D = 0.115$ m), ce risque est minimal, car l'auto-inflammation des gaz non brûlés (non mesurés dans cette thèse) peut se produire à des températures supérieures à 200 °C, et si la concentration de gaz non brûlés est dans les proportions nécessaires. En revanche, pour un diamètre moyen et grand (0.14 m et 0.19 m), les niveaux de températures sont suffisamment élevés, et cela pourrait déclencher l'inflammation des hydrocarbures imbrûlés.

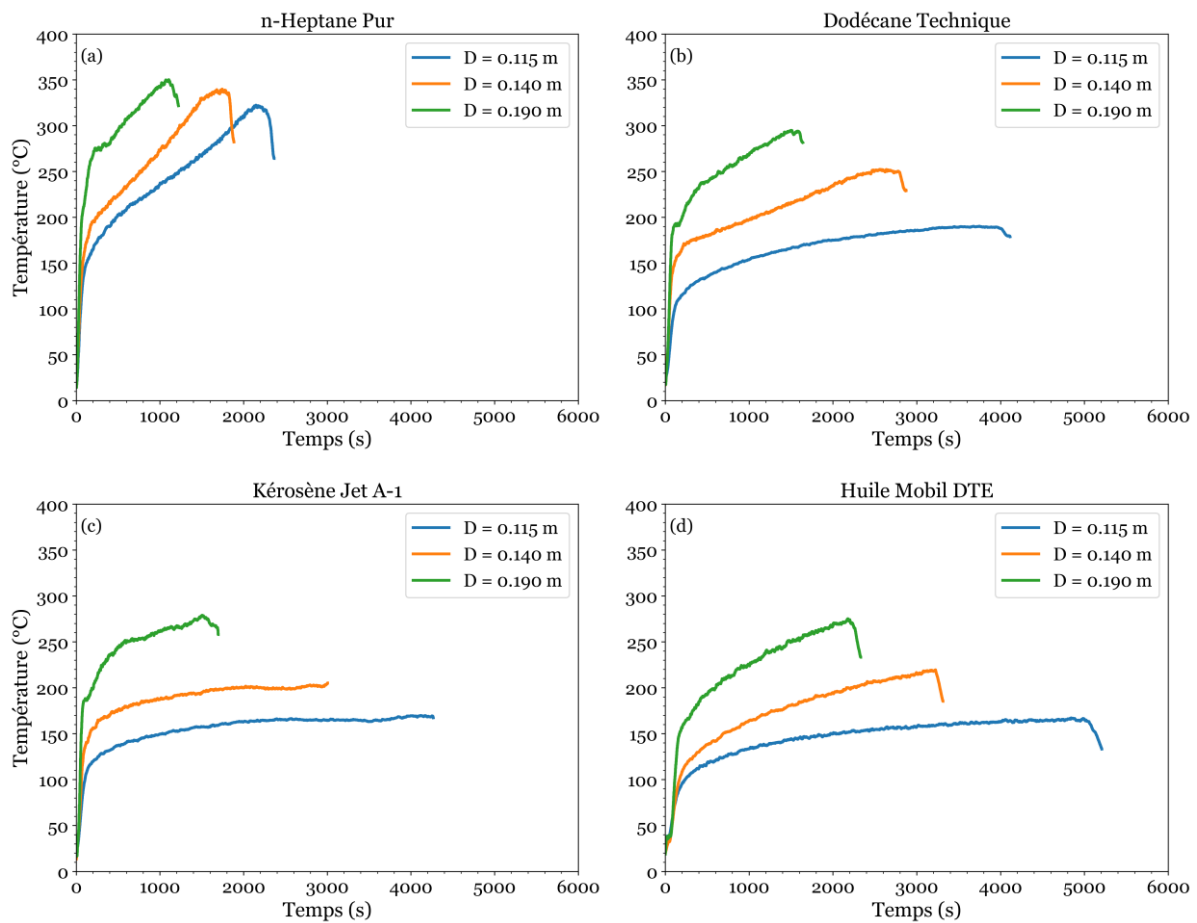


Figure 4.4 - Impact du diamètre de la nappe sur l'évolution de température du gaz dans la fumée à 9.67 ACPH, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.

Profil vertical de température en fonction de la taille du bac

L'ensemble des mesures obtenues avec l'arbre à 8 thermocouples dans le coin du compartiment a permis de déterminer le profil vertical de température dans la fumée, comme au Chapitre 3. La Figure 4.5 montre l'effet de la taille du bac sur les profils verticaux de

température des fumées pour les quatre combustibles. Les données présentées correspondent au temps de 600 secondes. On observe la stratification thermique des fumées dans le caisson pour chaque type de combustible. Deux zones de température se forment dans le compartiment (la couche chaude et la couche relativement froide), la séparation étant donnée par la cassure de pente des profils verticaux. Pour l'heptane et le dodécane, la couche de fumée chaude descend jusqu'à environ 0.3 m du sol. Pour le kérosène et l'huile Mobil DTE jusqu'à environ 0.2 m du sol. On retrouve le même comportement constaté dans le chapitre 3 en changeant le taux de ventilation avec un diamètre fixé de bac.

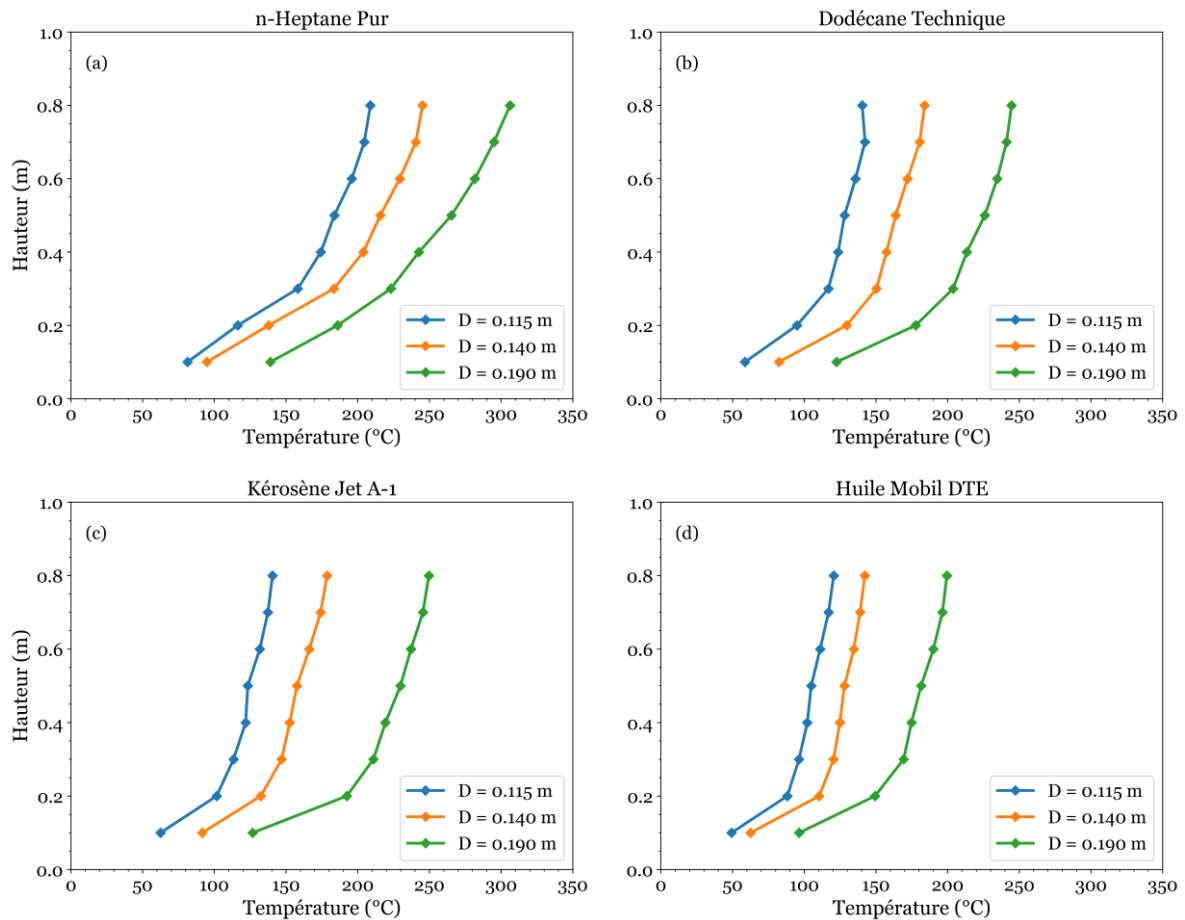


Figure 4.5 - Profils des températures des fumées à 600 m lors de incendies mécaniquement ventilé à 9.67 ACPH, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Temps 600 secondes.

Comme indiqué précédemment, plus le diamètre du bac est grand plus la température de la couche de fumée est élevée. Cependant, il existe des différences entre les quatre combustibles. Pour le plus grand diamètre ($D = 0.19$ m), une séquence de températures maximales décroissantes (sous le plafond) a été observée, passant de l'heptane au dodécane,

puis au kérosène' et enfin à l'huile Mobil DTE. Il a été trouvé une température maximale de 310 °C pour l'heptane, de 245 °C pour le dodécane, de 250 °C pour le kérosène et de 200 °C pour l'huile Mobil DTE. Avec l'heptane, la température des fumées dépasse aussi les 300 °C pour les trois diamètres, vers la fin du test (voir Figure 4.4 – a), mais ce n'est pas le cas pour les autres combustibles. Il convient de souligner que le MLR augmente fortement pour l'heptane vers la fin du test (voir paragraphe 4.3.1). Cela correspond aux cas pour lesquels la température dans les fumées peut dépasser les 300 °C. Le calcul de la contribution des flux rayonnés par les parois et la couche de fumée, détaillé en Annexe C, montre que si la température des fumées dépasse 300 °C, une augmentation d'environ 50 % du flux apporté par les parois et les fumées est possible.

L'amplitude du gradient de température dans la couche de fumée chaudes, à une hauteur de 0.2 m à 0.8 m, est illustrée dans le Tableau 4.3. Ce gradient a été calculé en faisant $(TC_8 - TC_2) / (0.8 - 0.2)$. Il a été constaté l'augmentation du gradient de température avec la taille de la nappe. Le gradient diminue avec la quantité de carbone atomique dans la formule chimique du combustible. Lorsque le diamètre de la nappe est grand, des gradients de température élevés montrent que la couche de fumées chaude n'est pas très homogène en température.

Tableau 4.3 - Gradients de température dans la couche de fumée fumante. Hauteur des thermocouples de 0.2 m à 0.8 m.

Grad. Température / Combustibles	$\nabla T_{0.115\text{ m}}$ (°C/m)	$\nabla T_{0.14\text{ m}}$ (°C/m)	$\nabla T_{0.19\text{ m}}$ (°C/m)
Heptane (C_7H_{16})	84	103	139
Dodécane ($C_{12}H_{26}$)	76	91	112
Kérosène ($C_{11.16}H_{20.82}$)	65	77	95
Huile Mobil DTE (-)	54	53	84

4.4. Analyse de la concentration d'oxygène et de dioxyde de carbone en fonction de la taille du bac

Ce sous-chapitre est consacré aux mesures des concentrations d'oxygène, du dioxyde de carbone et aux corrélations qui en sont extraites. Les concentrations d'oxygène et de dioxyde de carbone ont été mesurées à deux endroits différents. À la base de la flamme à environ 3

cm du bac de combustible, à une hauteur de 12 cm par rapport au sol, et aussi dans le conduit d'évacuation des gaz, plus précisément au centre de celui-ci. Ces mesures ont été faites avec la même méthode utilisée dans le Chapitre 3.

4.4.1. *Effet du diamètre de la nappe sur la concentration d'oxygène à la base de la flamme*

La Figure 4.6 montre l'effet de la taille du bac de combustible sur la concentration d'oxygène qui alimente la flamme pour les quatre combustibles étudiés à 9.67 ACPH. Les lignes pointillées en noir sont utilisées pour identifier le début de la période de feu établi pour chaque type de combustible, qui varie entre 400 à 550 s. Les lignes pointillées de couleur (bleu, orange et vert) sont utilisées pour identifier la fin de la phase de feu établi, les lignes séparent cette phase de la phase d'extinction. Les couleurs représentent les diamètres du bac à 0.115, 0.14 et 0.19 m, respectivement.

La Figure 4.6 montre que plus le diamètre de la nappe est grand, moins la quantité d'oxygène qui alimente la flamme et participe à la combustion est élevée. La pollution (ou viciation, $O_2 < 21\%$) de l'air qui alimente la flamme est importante. Donc, la flamme est alimentée avec une forte concentration en azote mais aussi en CO et CO_2 , comme cela sera montré un peu plus loin. Au début de l'incendie, la concentration d'oxygène décroît rapidement. Pour le plus grand diamètre (0.19 m) et après la ligne pointillée en noir, on trouve que la concentration d'oxygène diminue jusqu'à environ 18.2 % pour l'heptane, à environ 18.4 % pour le dodécane et le kérosène, et à environ 18.6 % pour l'huile Mobil DTE.

Dans le cas de l'heptane pour les trois diamètres, on observe que la concentration d'oxygène diminue continuellement sans atteindre un état stable. Ceci s'explique par l'accroissement de la perte de masse, causé par le rayonnement des parois et de la fumée sur le bac (voir précédemment). Par contre, dans le cas de l'huile Mobil DTE à $D = 0.14$ m et 0.19 m, le MLR reste presque stable jusqu'à l'extraction, mais l'oxygène diminue de façon continue. Ce qui est un comportement inattendu et qui ne peut pas être expliqué par l'effet du rayonnement des parois et de la fumée, car leurs températures restent assez faibles. Pour le petit diamètre ($D = 0.115$ m), on observe que la concentration d'oxygène pour le dodécane, le kérosène et l'huile Mobil DTE semble rester constante et se stabiliser autour d'une valeur moyenne de 20.3 %. À $D = 0.14$ m, le dodécane et le kérosène ont montré une concentration d'oxygène presque stable à environ 19.7 %.

Avec le diamètre du bac de 0.19 m, le dodécane et le kérosène ont révélé une légère augmentation après la ligne pointillée noire, pour ensuite décroître jusqu'à l'extinction. Par

contre on observe que les concentrations mesurées à la fin des tests sont du même ordre de grandeur pour les quatre combustibles (heptane, dodécane, kérosène et l'huile Mobil DTE), entre 18.1 et 18.6 %.

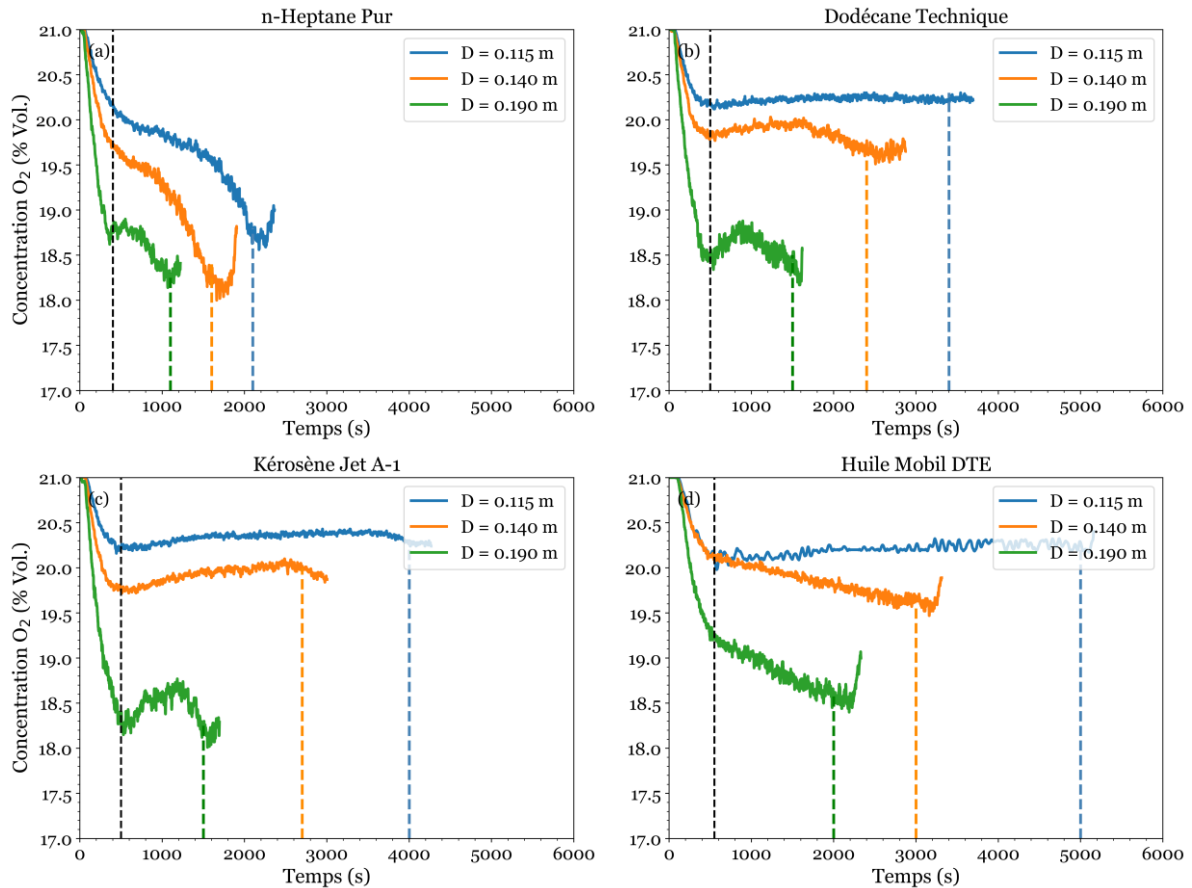


Figure 4.6 - Effet de la taille du bac sur la concentration d'oxygène autour de la flamme à 9.67 ACPH, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.

Les valeurs de concentration d'oxygène à la base de la flamme sont bien au-dessous de de 21 %, surtout pour le grand bac. Ceci confirme qu'il y a des recirculations des fumées du haut vers le bas du compartiment, qui viennent polluer l'air frais entrant dans le compartiment. On va analyser si cette viciation de l'air influence des paramètres tels que la perte de masse, ou la concentration d'espèces chimiques.

Comme indiqué dans la section 4.3, les incendies ont été éteints par manque de combustible. Il y a un équilibre entre l'oxygène fourni dans le compartiment et l'oxygène consommé pendant la combustion. Par conséquent, la concentration limite d'oxygène (LOI) n'est jamais atteinte dans tous les tests. Les valeurs de LOI pour les combustibles liquides utilisés sont limitées dans la littérature. Les références (Simmons & Wolfhard, 1957; Beyler C.

, 2016) fournissent des valeurs de LOI pour l'hexane, l'octane et le décane d'environ 13.3 à 13.5 %. Les concentrations d'oxygène les plus basses mesurées à la base de la flamme pour l'heptane, le dodécane et le kérosène se situent entre 18 à 18.5 %, au-dessus des valeurs de LOI précédentes.

La Figure 4.6 a également permis d'identifier et de définir les trois phases du développement du feu décrits au paragraphe 4.3.1, l'inflammation et croissance du feu (de 0 jusqu'à la ligne pointillée noire), période du feu établie (ligne pointillée noire jusqu'à la ligne pointillée correspondant à l'incendie en question), période d'extinction. Le Tableau 4.4 indique le début et la fin de la période de feu établie pour les quatre combustibles en fonction de la taille du bac. Cette période sera prise en compte pour les analyses futures des résultats.

Tableau 4.4 - Identification de la phase de feu établi pour chaque combustible en fonction de la taille du bac.

Combustible / D (m)	Heptane	Dodécane	Kérosène	Huile Mobil DTE
0.115	400 – 2100 s	500 – 3400 s	500 – 4000 s	550 – 5000 s
0.14	400 – 1600 s	500 – 2400 s	500 – 2700 s	550 – 3000 s
0.19	400 – 1100 s	500 – 1500 s	500 – 1500 s	550 – 2000 s

4.4.2. Relation entre la concentration d'oxygène à la base de la flamme et la perte de masse

La concentration d'oxygène au pied de la flamme est l'un des facteurs qui influence le MLR. L'effet de cette grandeur ou de la viciation sur le MLR est montré sur la Figure 4.7 pour les quatre combustibles. Le MLR indiqué sur la figure est la valeur du MLR normalisée par le MLR en foyer ouvert. Chaque valeur étant moyennée sur la période de feu établi (voir précédemment). Le MLR normalisé augmente avec la concentration d'oxygène disponible à la base du foyer, comme cela a déjà été montré au Chapitre 3. Pour l'heptane et pour les trois diamètres, la dispersion est grande pour chaque valeur de O_2 et donc la corrélation est faible. Ceci s'explique par le comportement particulier du MLR, qui augmente fortement vers la fin du test. Ceci a été expliqué par le rôle important du rayonnement des parois et de la fumée. Pour les combustibles plus lourds (dodécane, kérosène et l'huile Mobil DTE), les résultats montrent que le MLR normalisé augmente linéairement avec l'oxygène près de la flamme. Cela a aussi été observé par (Peatross & Beyler, 1997; Melis & Audouin, 2008; Alibert, Coutin, Mense, Pizzo, & Porterie, 2019; Prétrel, Bouaza, & Suard, 2021) et par Chen et al. (Chen, et

al., 2019). Dans le cas de cette dernière étude, cette tendance a été observée pour les feux de nappe de n-heptane et d'éthanol dans des environnements naturellement ventilés.

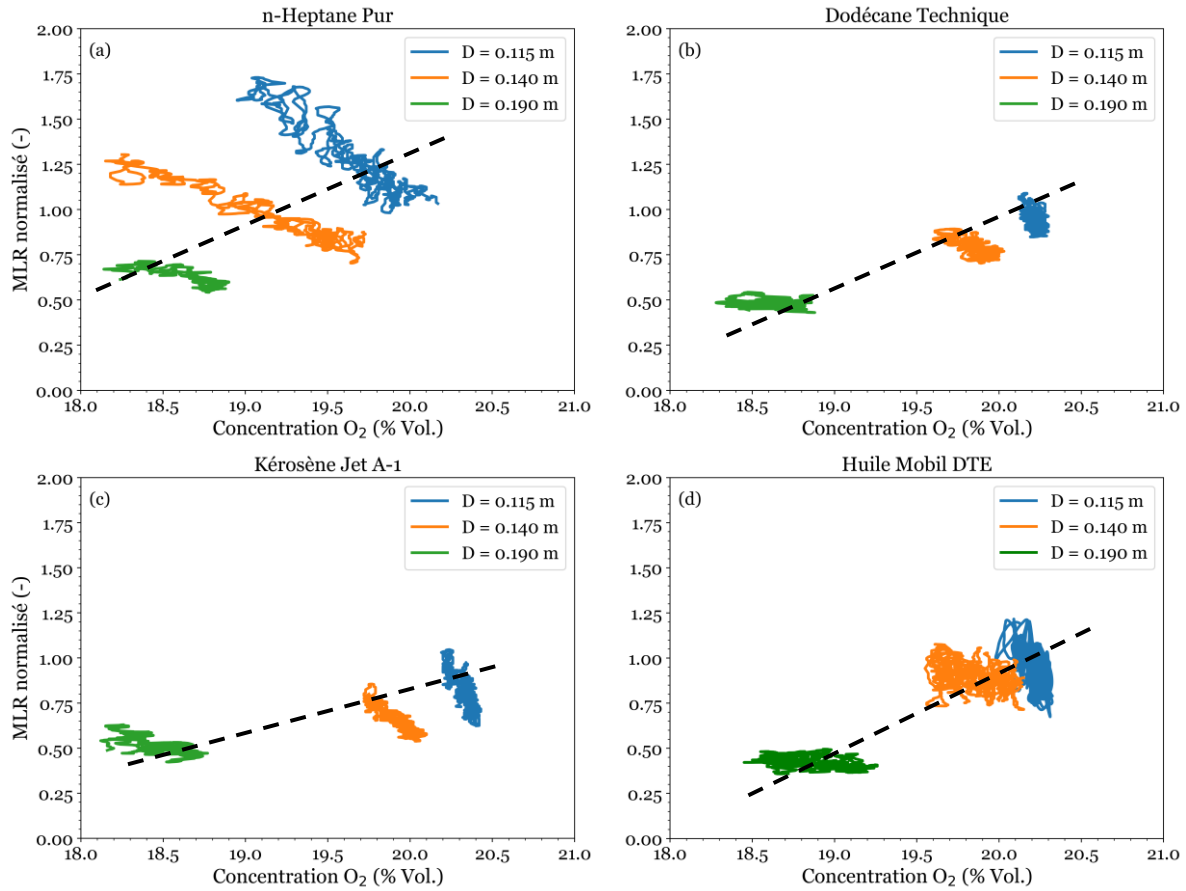
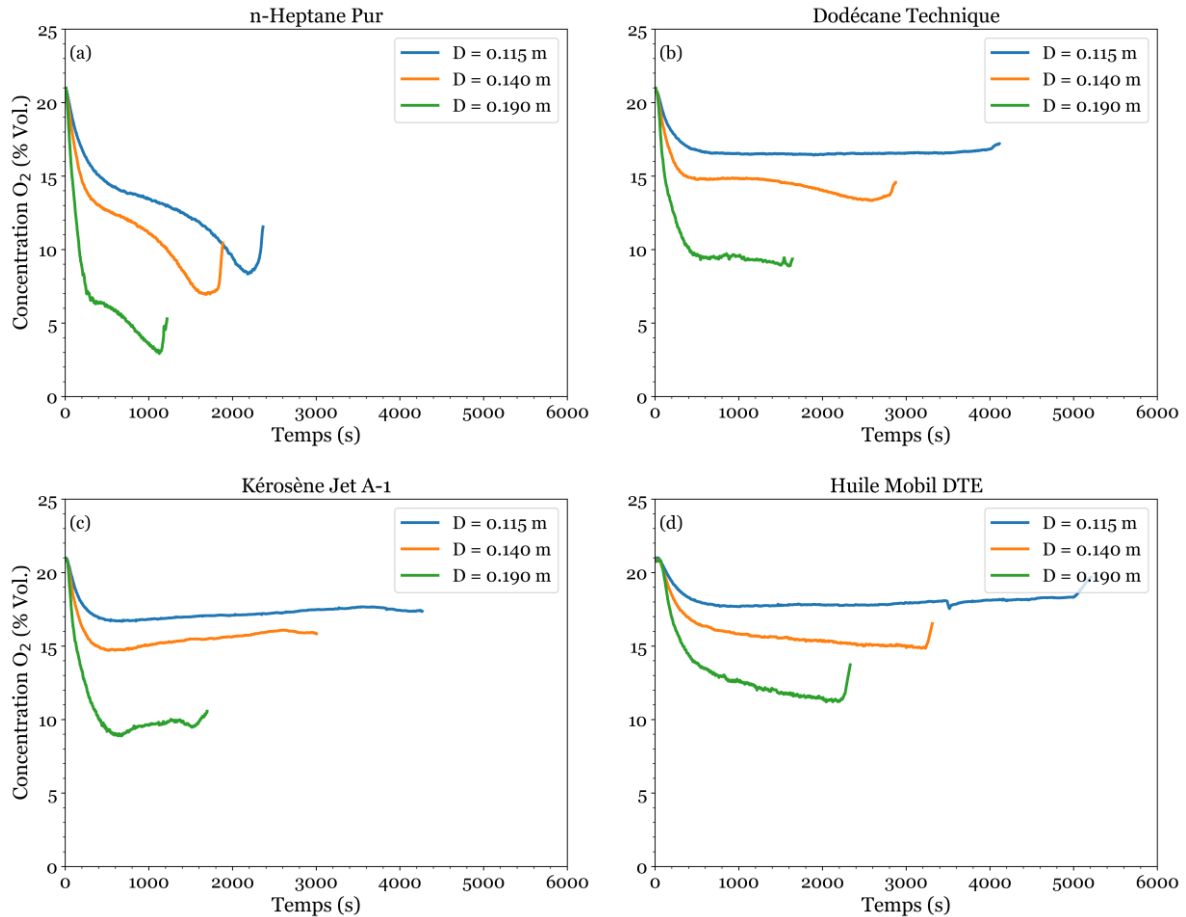


Figure 4.7 - Relation entre la concentration d'oxygène au pied de la flamme et le MLR à 9.67 ACPH, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.

4.4.3. Concentration d'oxygène dans le système d'évacuation des fumées

La Figure 4.8 présente l'effet de la variation du diamètre du bac sur l'évolution temporelle de la concentration d'oxygène résiduel dans les fumées (au niveau de l'extraction) pour les quatre combustibles étudiés à 9.67 ACPH. Les résultats montrent que plus la taille du bac est grande, moins il existe reste d'oxygène dans les fumées. La comparaison des résultats reportés dans la Figure 4.6 et la Figure 4.8 montre que chaque profil d'O₂ à l'extraction est similaire à celui obtenu pour l'O₂ au pied du foyer. Par exemple, le rapport entre les valeurs d'oxygène est d'environ à 1.2 pour le petit diamètre et à 1.8 pour le grand diamètre, à la fois pour le dodécane et le kérosène.

Les feux d'heptane montrent une concentration d'oxygène en constante diminution jusqu'à l'extinction, tandis que les autres combustibles, à partir d'environ 600 s, ont présenté une concentration d'oxygène presque stable. L'huile Mobil DTE avec le plus grand bac (0.19 m) a également montré une diminution constante.



À faible diamètre du bac ($D = 0.115$ m), pour l'heptane à partir de 500 s (période de feu établi), il ne reste entre 15 % à 11 % d'oxygène dans les fumées, pour le dodécane et le kérosène à environ 16.5 %, et pour l'huile Mobil DTE 18 %. Cela signifie que pour l'ensemble des combustibles, de 3 % à 10 % de l'oxygène initial a été consommé lors de la combustion. À part le cas de l'heptane, il n'y a pas eu de décroissance continue de l'oxygène résiduel.

Pour le diamètre de 0.14 m, il est possible de faire à peu près les mêmes remarques. Pour l'heptane, l'oxygène résiduel diminue, sans atteindre un état-stable, il reste à environ 13 % d'oxygène. Pour le dodécane et le kérosène, les valeurs de la concentration d'oxygène sont

comparables. Pour ces combustibles, ainsi que pour l'huile Mobil DTE, il reste plus de 15 % d'oxygène dans les fumées. Ces combustibles ont montré une concentration qui reste presque constante. Les valeurs observées pour les quatre combustibles sont dans le même ordre que pour l'oxygène au pied du foyer, à savoir par ordre croissant heptane < dodécane < kérosène < huile Mobil DTE, mais avec des valeurs beaucoup plus basses. En effet pour l'ensemble des combustibles, de 6% à 8 % de l'oxygène initial a été consommé lors de la combustion.

Avec le diamètre de 0.19 m, les combustibles les plus lourds ont exhibé entre 9 % à ~11.5 % d'oxygène. En revanche, l'heptane a montré environ 3 % d'oxygène résiduel à la fin du test, même si la flamme a été observée jusqu'à l'extinction. Cela est dû au fait que la concentration autour de la flamme est restée à environ 18 % (cf. Figure 4.6 – a). D'ailleurs pour l'ensemble des combustibles, il a toujours été constaté une extinction par manque de combustible, ce qui veut dire qu'il y avait suffisamment d'oxygène pour maintenir une flamme visible attachée à la surface du liquide jusqu'à l'extinction. En ce qui concerne spécifiquement l'huile Mobil DTE, l'oxygène résiduel est environ 11.5 %, c'est-à-dire la valeur la plus élevée par rapport aux autres combustibles. En accord avec Beyler (Beyler C. L., 1986), des niveaux élevés d'oxygène sont possibles grâce à la stabilité thermique et chimique de certains composés. On rappelle que cette huile Mobil DTE est un mélange d'huiles très raffinées et d'additifs (2,6-di-tert-butyl-p-crésol), qui selon les spécifications techniques de ce composé, lui confère une haute stabilité thermique.

En conclusion, l'heptane consomme la plus grande quantité d'oxygène, soit en fonction du taux de ventilation (Section 3.5, Figure 3.14 – a et Figure 3.16 – a) soit en fonction de la taille du bac de combustible (Figure 4.6 – a et Figure 4.8 – a). L'huile Mobil DTE consomme la plus petite quantité d'oxygène, dans les mêmes conditions expérimentales. Il y a bien sûr, une plus grande consommation d'oxygène lorsque la taille du bac change de 0.14 à 0.19 m, les feux passant alors d'un environnement bien ventilé à sous-ventilé ($0.7 \leq \text{GER} < 1.5$).

4.4.4. Relation entre la concentration de dioxyde de carbone et d'oxygène dans les fumées pour différentes tailles du bac

La relation entre la concentration de dioxyde de carbone en fonction de la concentration d'oxygène consommé par la combustion ($\text{O}_2(\text{ambiant}) - \text{O}_2(\text{résiduel})$) est présentée sur la Figure 4.9 pour les quatre combustibles. La figure montre également la concentration de dioxyde de carbone théorique (ligne pointillée rouge), obtenue par l'équation 3.5. Comme montré au Chapitre 3, ceci est utilisé comme un critère pour évaluer l'efficacité de la combustion. Les concentrations minimales d'oxygène (CMO) du monoxyde de carbone et du chaque type de

combustibles sont également présentées. Cette concentration est de 6.25 % pour le monoxyde de carbone, et de 11.55 %, 11.10 %, 11.46 %, ~ 13.02 %, pour l'heptane, le dodécane, le kérosène et l'huile Mobil DTE, respectivement. Les concentrations minimales d'oxygène ont été utilisées pour identifier le comportement du feu en fonction des trois régimes de combustion, sur-ventilé, sous-ventilé et très sous-ventilé (Lassus J. , et al., 2014). Pour l'analyse, les données présentées dans la Figure 4.9 ne comprennent que la phase d'inflammation et la phase de feu établi.

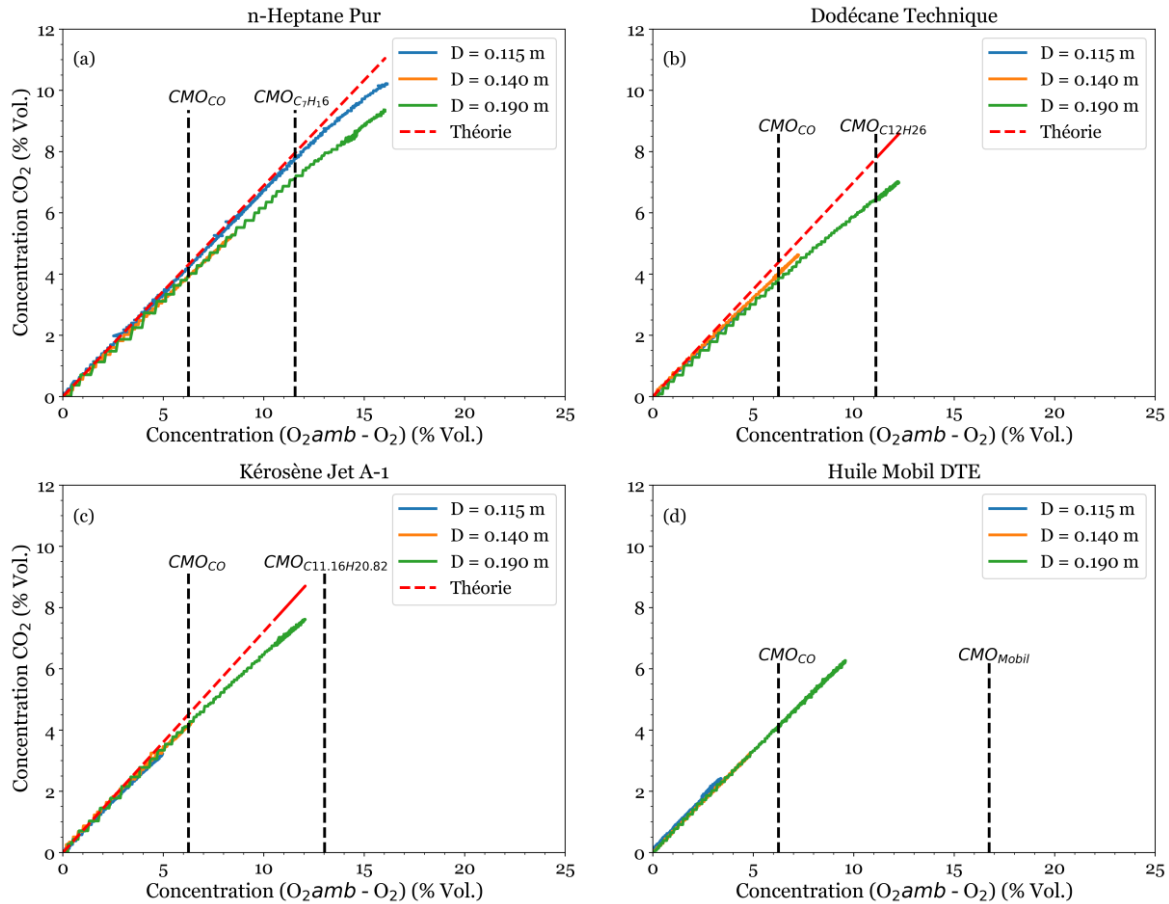


Figure 4.9 - Concentration de dioxyde de carbone en fonction de la concentration d'oxygène consommé par la combustion (O_2 (ambiant) – O_2 (résiduel)) à 9.67 ACPH, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.

Les résultats obtenus pour les combustibles lourds, indiquent qu'il n'y a pas de différence significative dans la formation de dioxyde de carbone quel que soit le diamètre du bac. Cependant, la plupart des tests n'ont pas permis d'atteindre des régimes sous-ventilés et donc d'observer, si cela est toujours vrai quand la consommation d' O_2 est grande, comme cela a été étudié dans le Chapitre 3. Néanmoins, l'heptane ne montre pas ce comportement. Les

courbes ne se superposent pas lorsque la consommation d'O₂ est élevée ($D = 0.115$ m et 0.19 m).

Pour une concentration d'oxygène consommé en dessous du CMO_{CO} , les résultats expérimentaux pour l'heptane, le dodécane et le kérosène avec les trois diamètres sont très similaires à la courbe de la valeur théorique. Ce régime est connu comme suffisamment ventilé, où il existe assez d'oxygène pour oxyder CO en CO₂, de sorte qu'il existe une bonne combustion. Le mélange combustible/oxygène est dans les proportions nécessaires pour assurer une combustion complète (cf. Section 1.8.1, mécanisme de Hautman). Pendant ce régime, il y a une relation linéaire entre le de dioxyde de carbone généré et l'oxygène consommé.

Lorsque la concentration d'oxygène consommée est comprise entre le CMO_{CO} et $CMO_{combustible}$, la condition dite sous-ventilée apparaît, les données expérimentales s'écartent de la courbe théorique. Cela signifie que dans ce régime, la réaction d'oxydation est incomplète. L'ensemble des résultats de la Figure 4.9 montre qu'il existe un écart absolu d'environ 2 % à la fin du test. C'est-à-dire 2 % de CO₂ qui n'est pas produit en fin de tests, et est remplacé par du gaz imbrûlé ou des polluants dans les fumées.

4.5. Émissions de monoxyde de carbone en fonction de la taille du bac de combustible

Ce sous-chapitre est destiné à étudier la concentration de monoxyde de carbone. Les mesures ont été effectuées avec des analyseurs de gaz ECOM EN2, avec un échantillonnage à la base de la flamme et dans le conduit d'évacuation de la fumée.

4.5.1. Influence de la taille de la nappe sur la concentration de monoxyde de carbone

Concentration de monoxyde de carbone à la base de la flamme

La Figure 4.10 montre l'évolution temporelle de la concentration de monoxyde de carbone (CO) à la base de la flamme pour les quatre combustibles à 9.67 ACPH. Les résultats montrent que la concentration de CO au pied de la flamme augmente avec l'augmentation de la taille de la nappe. Pour le diamètre 0.19 m, les feux d'heptane, de dodécane et de kérosène ont été alimentée avec de l'air vicié, contenant entre 1000 ppm et 2000 ppm de CO. Pour l'huile Mobil DTE, la concentration de CO inférieure à 300 ppm. Tout comme les résultats présentés dans le Chapitre 3, on constate que cette concentration de CO diminue en fonction de la quantité de carbone présente dans l'hydrocarbure.

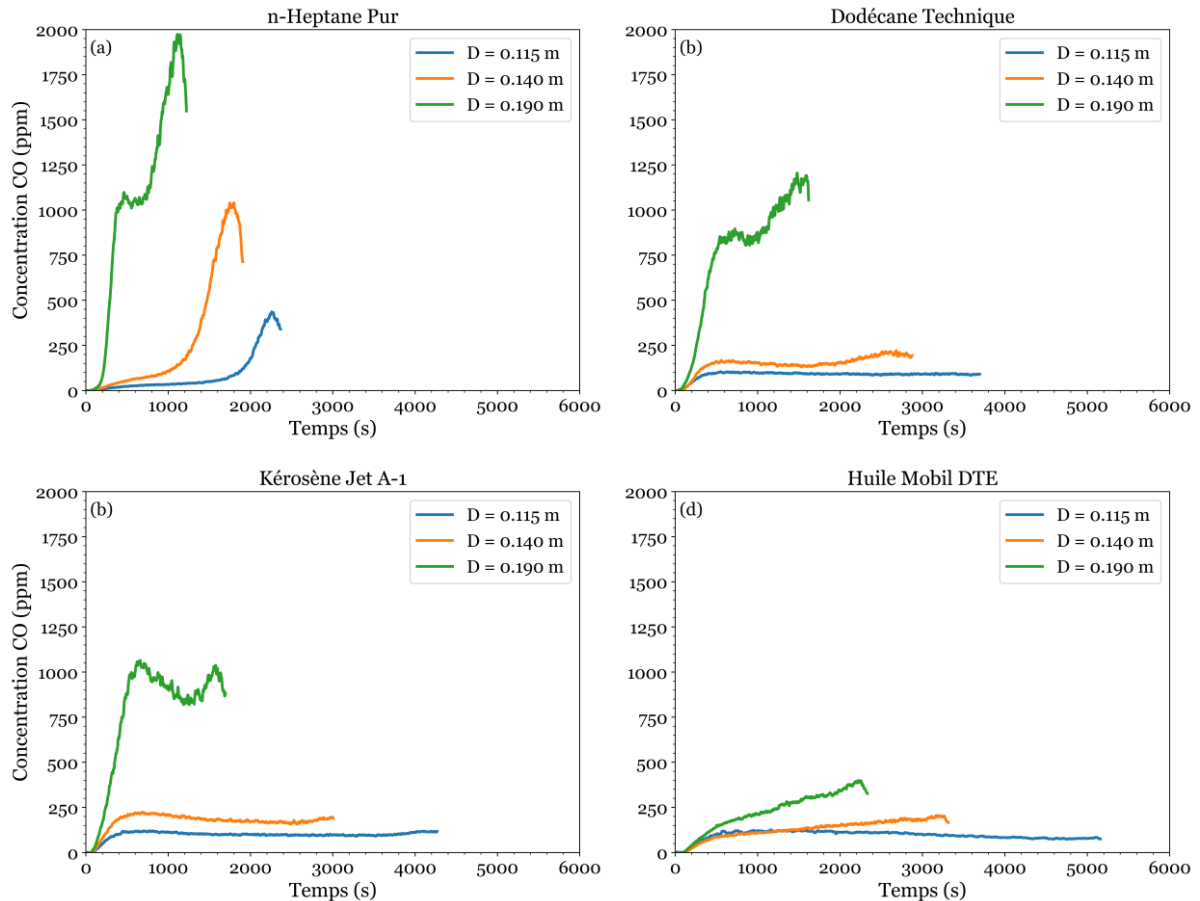


Figure 4.10 - Concentration de monoxyde de carbone autour de la flamme à 9.67 ACPH, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.

On s'aperçoit aussi que la concentration de CO au pied de la flamme n'atteint un état quasi-stable qu'avec les petits diamètres du bac (0.115 et 0.14 m), sauf le l'heptane. À $D = 0.19$ m et en fin de test, le CO augmente sans atteindre un état stable. Les courbes de CO au pied de la flamme de l'heptane, du dodécane présentent deux niveaux (Figure 4.10 – a, b et c). En revanche, l'huile Mobil DTE n'a fait qu'augmenter jusqu'à l'extinction (Figure 4.10 – d).

Comme dans le Chapitre 3, on peut conclure que la concentration de CO est fortement liée à la concentration d'oxygène au pied de la flamme, si l'oxygène diminue (voir Figure 4.6), alors le CO augmente. Des faibles variations d'oxygène à la base de la flamme entraînent de grandes variations sur la concentration de CO. De plus, les niveaux de CO mesurés à cet endroit, indiquent à quel point l'air qui alimente la flamme est pollué, et donne une idée de la recirculation des gaz dans la chambre de tests.

Concentration du monoxyde de carbone à la l'extraction

La Figure 4.11 présente l'évolution de la concentration de monoxyde de carbone dans le conduit d'évacuation des fumées pour les quatre combustibles. Les résultats sont consistants avec les tendances des résultats au pied de la flamme (Figure 4.10). Les courbes de CO au pied de la flamme et dans les fumées sont très homothétiques. Par exemple, à $D = 0.19$ m, le rapport moyen entre les concentrations de CO ($CO_{\text{extraction}}/CO_{\text{flamme}}$) est d'environ 10, 5.98, 6 et 4.55, qui correspond à l'heptane, au dodécane, au kérosène et à l'huile Mobil DTE, respectivement. De plus, la concentration de CO à l'extraction augmente avec le diamètre du bac. Un autre point important à souligner est que si la quantité de carbone présent dans un hydrocarbure est faible, ce dernier a tendance à produire plus de CO.

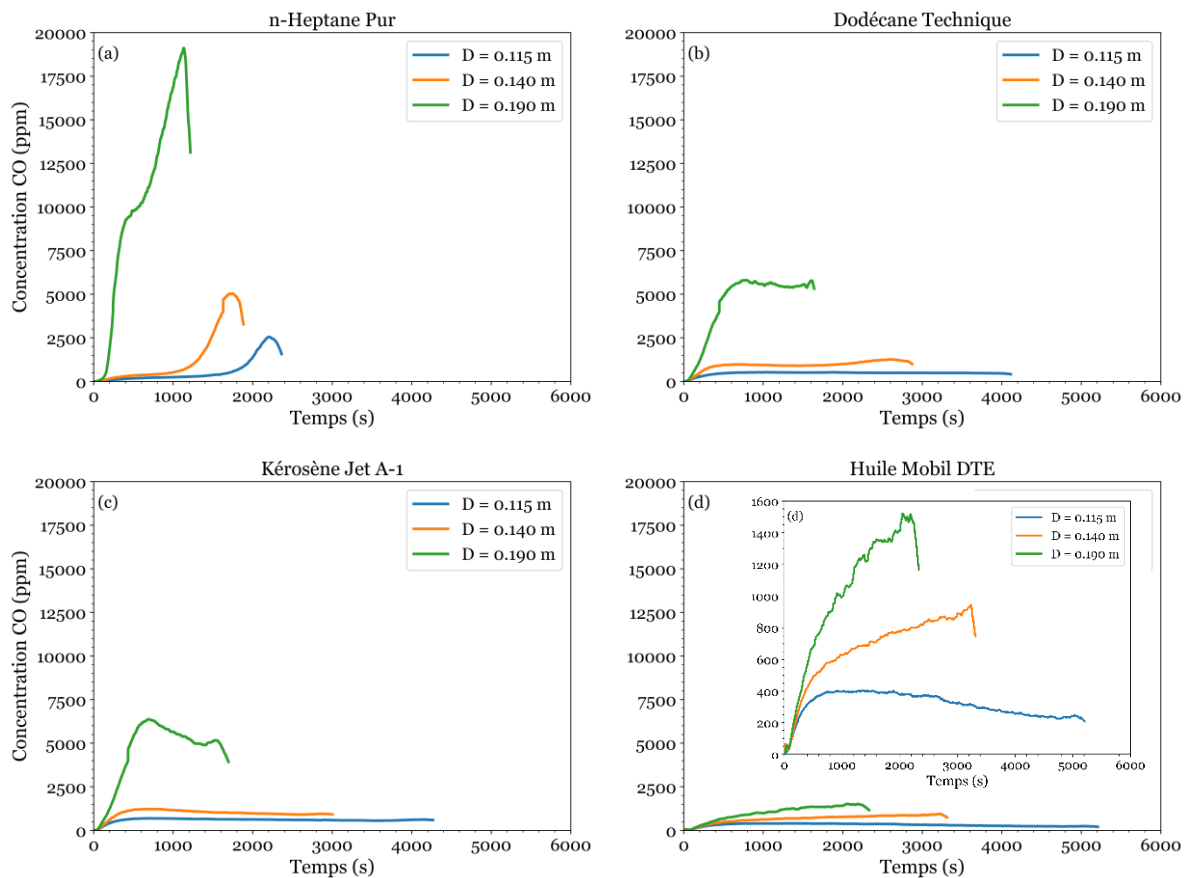


Figure 4.11 - Concentration de monoxyde de carbone dans la conduite d'évacuation à 9.67 ACPH, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.

Comme pour la concentration de CO au pied de la flamme, l'heptane montre une concentration de CO à l'extraction à deux niveaux, quasi-stable jusqu'à environ 1000 s à 1800 s. Au-delà de cette période, une augmentation constante a eu lieu, le CO atteint sa valeur

maximale, juste avant l'extinction. Pour le dodécane, le kérosène et l'huile Mobil DTE, une fois que les incendies sont établis, la concentration de CO atteint un état quasi-stable. Par contre, l'huile Mobil DTE à 0.14 et 0.19 m présente une augmentation progressive.

La concentration de CO maximale produite par les combustibles, en tenant compte les bacs de petite et moyenne taille, varie de 2500 ppm à 5000 ppm pour l'heptane, de 500 ppm à 1250 ppm pour le dodécane et le kérosène, de 380 ppm à 900 ppm pour l'huile Mobil DTE. Ces incendies se sont développés dans un milieu dit « *bien ventilé* », ce qui pourrait expliquer les faibles concentrations de CO mesurées à l'extraction. Lors des incendies étudiés, la température dans la couche de fumée est relativement basse. Pour le diamètre du bac à 0.115 m, la température de la fumée pour la plupart des combustibles est inférieure à 180 °C (453 K). En accord avec Gottuk et al. (Gottuk, Roby, & Beyler, 1995), cette température correspond à une couche de fumée non réactive.

Pour le grand diamètre du bac ($D = 0.19$ m), des niveaux élevés de CO ont été mesurés. En particulier, l'heptane a généré environ 19000 ppm de CO, tandis que le dodécane et le kérosène ont produit 6000 ppm et 6500 ppm, respectivement. En revanche, l'huile Mobil DTE, qui est le combustible le plus lourd, a généré environ 1500 ppm de CO. Plusieurs facteurs peuvent expliquer les niveaux élevés de CO lors de l'utilisation du bac de 0.19 m, pour les feux d'heptane, de dodécane et de kérosène. Tout d'abord, la flamme a été développée dans un milieu sous-ventilés, caractérisés par un $GER > 0.7$. De Plus, du fait de la ventilation mécanique, il existe des recirculations entre la couche de fumée et le bas de la chambre. Le bac de combustible a donc été placé dans un environnement très vicié, avec une concentration en oxygène au pied de la flamme comprise entre 18 % à 18.6 % (voir Figure 4.6). Enfin, des températures élevées dans la couche de fumée, allant de 553 K à environ 623 K, ainsi qu'un temps de séjour très long d'environ 373 s, ont également contribué à ces niveaux élevés de CO. Selon Beyler (Beyler C. L., 1986), Zukoski et al. (Zukoski, Morehart, Kubota, & Toner, 1991), Gottuk et al. (Gottuk D. T., Roby, Peatross, & Beyler, 1992), Gottuk et Lattimer (Gottuk & Lattimer, 2016), ces conditions peuvent avoir un effet significatif sur la production de CO. Comme indiqué ci-dessus (voir paragraphe 4.3.3), ces niveaux de CO et des températures augmentent le risque d'inflammation du gaz dans le conduit d'évacuation, (Lassus, et al., 2010; Magnognou, Garo, Coudour, & Wang, 2017; Manescau, Wang, Coudour, & Garo, 2018).

4.5.2. Relation entre la concentration de monoxyde de carbone et la concentration d'oxygène

La Figure 4.12 montre les variations de la concentration de CO à l'extraction en fonction de la concentration d'oxygène autour de la flamme pour les quatre combustibles. Ces données tiennent compte uniquement de la phase d'inflammation et la phase de feu établi. Comme il a été indiqué précédemment, avec ce type de graphes, on cherche à savoir si le CO observé à l'extraction est corrélé à l'oxygène disponible pour la combustion. Les résultats montrent que la concentration de CO en fonction de l'oxygène au pied de la flamme varie peu avec le diamètre de la nappe, sauf pour l'heptane à 0.19 m. À part ce cas, où il y a une très forte production de CO. Les courbes de CO semblent se superposer, ce qui pourrait présager de l'existence d'une corrélation entre l'O₂ disponible pour la combustion au pied de la flamme et le CO produit. Mais cette corrélation change avec le type de combustible. Ceci n'a pas été constaté lors de l'étude de l'influence du taux de ventilation (cf. Section 3.5).

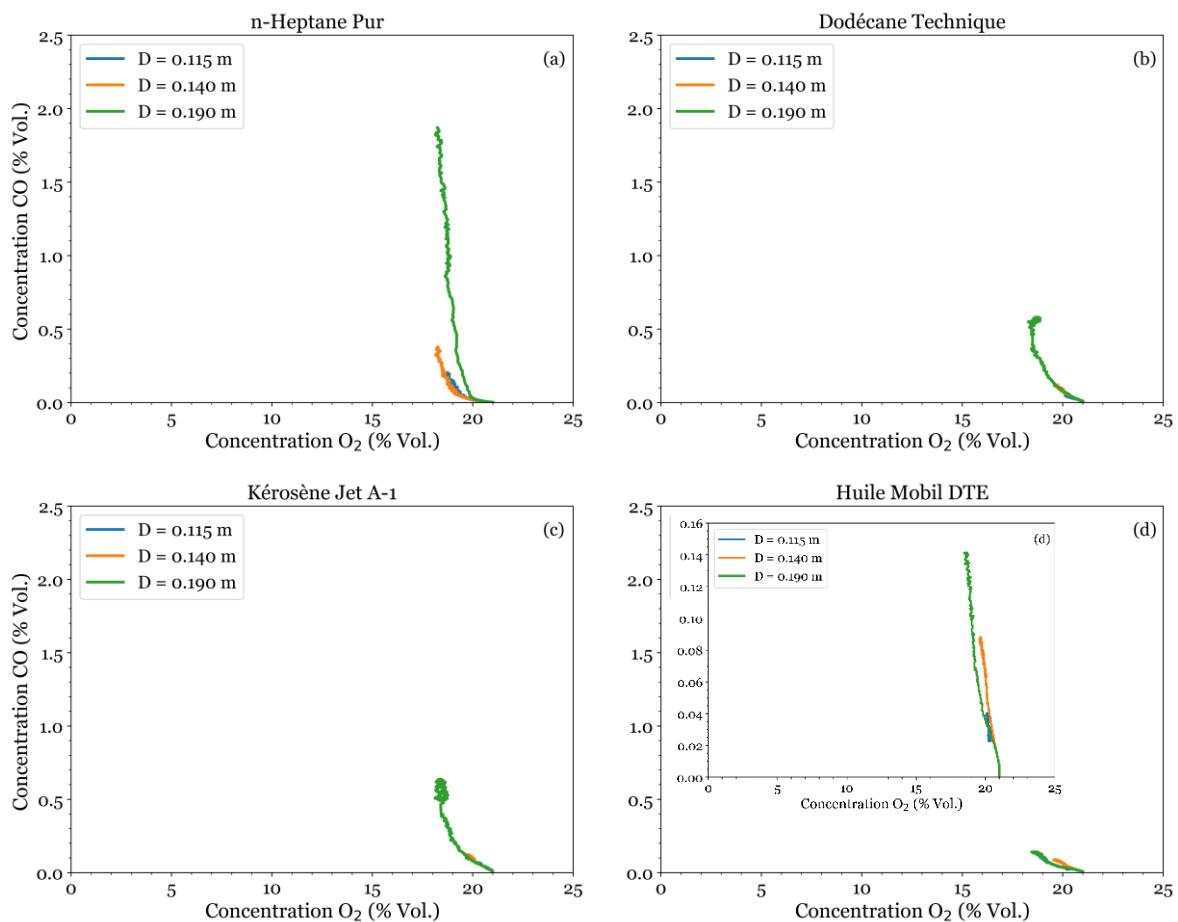


Figure 4.12 - Concentration de monoxyde de carbone à l'extraction en fonction de la concentration d'oxygène à la base de la flamme à 9.67 ACPH, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.

Cependant, il faut rappeler que, dans cette étude sur l'effet du diamètre du bac, les régimes de combustibles sont assez bien ventilés, contrairement aux résultats présentés dans le Chapitre à 3. D'autre part, il existe un effet de seuil. Lorsque la concentration d'oxygène disponible est supérieure à environ 19 %, la concentration de CO peut être considérée soit négligeable (cas de l'huile Mobil DTE), soit faible ($\text{CO} \leq 0.2 \%$), cas de l'heptane, du dodécane et du kérosène. Mais si la concentration d'oxygène est en dessous 19 %, la concentration de CO augmente considérablement, avec de faibles variations d' O_2 .

La Figure 4.13 montre cette fois-ci les variations de la concentration de CO à l'extraction en fonction de la concentration d'oxygène résiduel pour les quatre combustibles. La figure présente également les concentrations minimales d'oxygène (CMO_{CO} et $\text{CMO}_{\text{combustible}}$), utilisés pour caractériser le comportement d'une espèce chimique en fonction des trois différents régimes de ventilation, sur-ventilé sous-ventilé et très sous-ventilé, en suivant la procédure présentée au § 3.6.2. Les résultats présentés dans cette figure ne comprennent pas la période d'extinction.

On observe une tendance parabolique consistante, également montré au Chapitre 3 (voir paragraphe 3.6.2). On constate des comportements similaires pour les quatre combustibles. La concentration de CO augmente rapidement lorsque la concentration d'oxygène résiduel diminue. De même que pour la figure précédent (Figure 4.12), il est observé que les courbes correspondant à différents diamètres de bac se superposent ou sont très proches les unes des autres pour le même combustible. Par contre, l'effet de seuil constaté précédemment n'est pas perceptible sur la Figure 4.13.

Sur la base de trois régimes identifiés, on trouve que lorsque la concentration d'oxygène est compris entre 21 % à $\text{CMO}_{\text{combustible}}$, qui correspond au régime de l'incendie sur-ventilé, l'oxydation de l'hydrocarbure est complète ou presque complète. Par conséquent, la formation de CO est négligeable (cas d'heptane) ou faible (cas du dodécane, du kérosène et d'huile Mobil DTE). Pour ces trois combustibles, l'écart entre les trois diamètres peut également être considéré comme négligeable jusqu'à environ 18 % d'oxygène résiduel. Dans cet intervalle de concentration d'oxygène, les incendies de dodécane et de kérosène à 0.115 m et 0.14 m et l'huile Mobil DTE à 0.115 m, ont été éteints par manque de combustible. Mais avant l'extinction, ces combustibles ont montré que la concentration de CO augmente fortement au-dessous de ~15 % de l'oxygène, et semble augmenter si le diamètre du bac diminue. Même dans ce régime bien ventilé, la formation de CO lors de incendies de combustibles lourds est perceptible. En accord avec Gottuk et al. (Gottuk, Roby, & Beyler, 1995), des concentrations élevées de CO peuvent être atteintes même dans des conditions sur-

ventilées, si la température de la couche de fumée chaude reste en dessous 800 K, ce qui a pour conséquence de figer la réaction du CO en CO_2 .

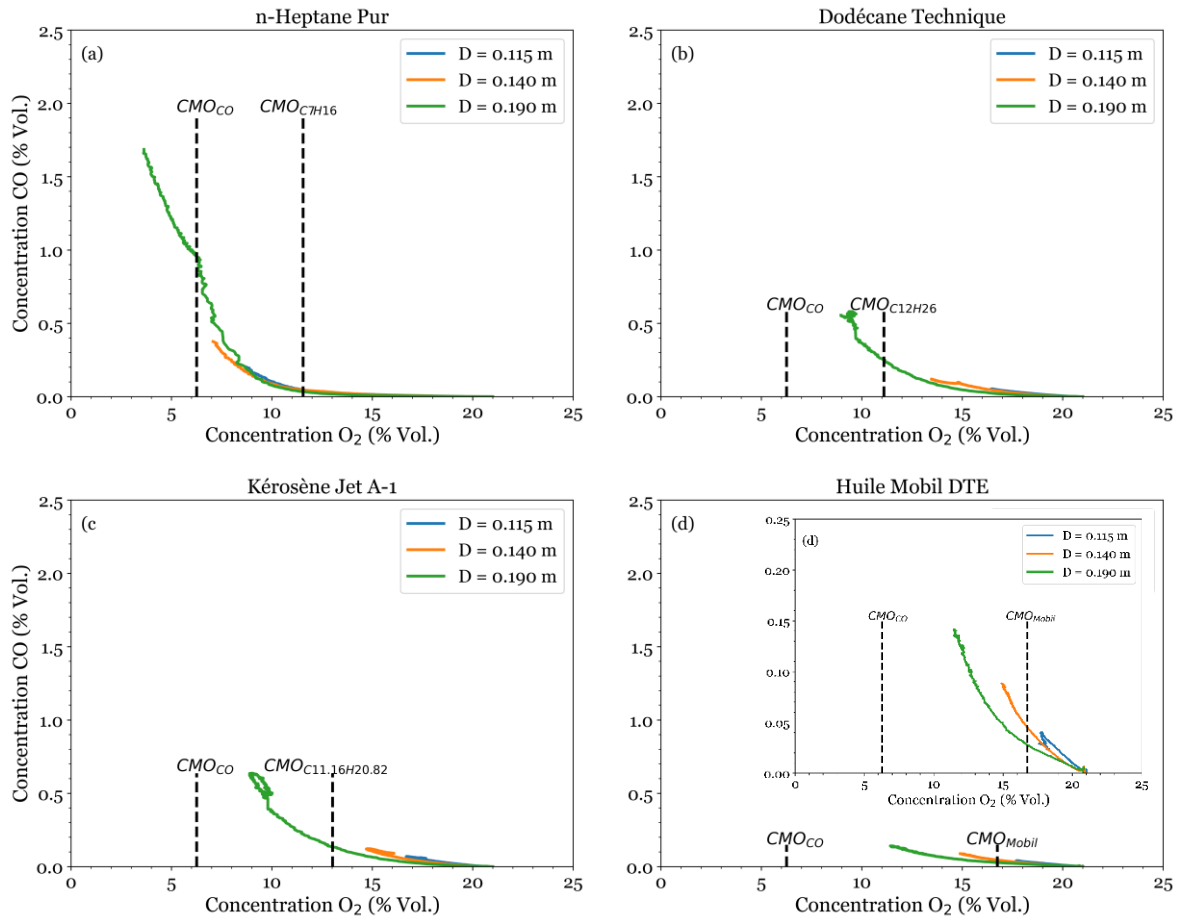


Figure 4.13 - Concentration de monoxyde de carbone en fonction de la concentration à l'extraction à 9.67 ACPH, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.

Pour une concentration d'oxygène résiduel compris entre le $\text{CMO}_{\text{combustible}}$ et CMO_{CO} , il existe le régime sous-ventilé. La production de CO est forte lorsque la concentration d'oxygène résiduel est faible. Plus le contenu d'oxygène dans la fumée est faible, plus l'oxydation de l'hydrocarbure en CO est favorisée (Lassus J. , et al., 2014). Pour l'heptane, la concentration de CO est indépendante du diamètre du bac. Ce combustible montre la plus grande émission de CO aux très faibles valeurs de l'oxygène résiduel. En revanche, dans la plage comprise entre le $\text{CMO}_{\text{combustible}}$ et CMO_{CO} pour l'oxygène, on trouve que les niveaux de CO atteints par le dodécane et le kérosène sont plus élevés que ceux de l'heptane, ce qui est assez inattendu. L'huile Mobil DTE montre une concentration de CO qui augmente si le diamètre du bac diminue. Les incendies de dodécane et de kérosène ont été éteints dans ce domaine.

En dessous du CMO_{CO} (concentration d'oxygène résiduel inférieure à 6.25 %), se trouve le régime fortement sous-ventilé, dans lequel seulement l'incendie d'heptane à $D = 0.19$ m persiste. La concentration de CO est beaucoup plus élevée que pour les autres cas, c'est-à-dire qu'au cours de la réaction d'oxydation de l'hydrocarbure, la formation du CO est privilégiée.

4.5.3. Rapport $[CO]/[CO_2]$ comme indicateur de l'efficacité de la combustion en fonction de la taille de la nappe

La Figure 4.14 présente l'évolution temporelle du rapport $[CO]/[CO_2]$ pour les quatre combustibles. Il faut rappeler que le rapport $[CO]/[CO_2]$ est utilisé comme un indicateur du mode ou de l'efficacité de la combustion (Gottuk D. T., Roby, Peatross, & Beyler, 1992). Si le rapport $[CO]/[CO_2]$ est proche de zéro, on considère que la combustion est bonne. Les résultats montrent que le rapport $[CO]/[CO_2]$ augmente si le diamètre du bac de combustible augmente. Il a été trouvé de très fortes variations du rapport en fonction de la taille du bac et du type de combustible. En considérant que le bac de 0.14 m est équivalent à environ 1.22 fois le bac plus petit ($D = 0.115$ m), on constate que les résultats sont très proches. Les différences entre les courbes sont minimales. Par contre, lorsqu'on augmente le diamètre du bac à environ 1.36 fois (c'est-à-dire de 0.14 m à 0.19 m), on observe que le rapport $[CO]/[CO_2]$ augmente de manière significative. L'écart entre les courbes est alors très important, à l'exception de l'huile Mobil DTE pour lequel le rapport $[CO]/[CO_2]$ varie très peu. Par conséquent, à $D = 0.19$ m, l'efficacité de la combustion diminue fortement.

Il convient de rappeler que la plupart des combustibles (l'heptane, le dodécane et le kérosène) ont produit des incendies dans un environnement sous-ventilé ($GER > 0.7$), ce qui permet une production forte du CO. On trouve que le rapport $[CO]/[CO_2]$ diminue lorsque la quantité de carbones présents dans l'hydrocarbure augmente. Si on considère l'heptane et l'huile Mobil DTE, à $D = 0.19$ m, on constate que l'heptane produit une très mauvaise combustion ($R_{Heptane} \approx 0.165$), alors que l'huile Mobil DTE produit une meilleure combustion ($R_{Mobil} \approx 0.025$). Ces données représentent les valeurs extrêmes atteintes par les quatre combustibles. Comme montré au Chapitre 3, ce résultat, qui semble à priori paradoxal, est bien expliqué par le fait que MLR est le plus faible pour l'huile Mobil DTE, et que sa combustion s'est toujours réalisée dans un régime bien ventilée pour les conditions expérimentales choisies (taux de ventilation et diamètre du bac).

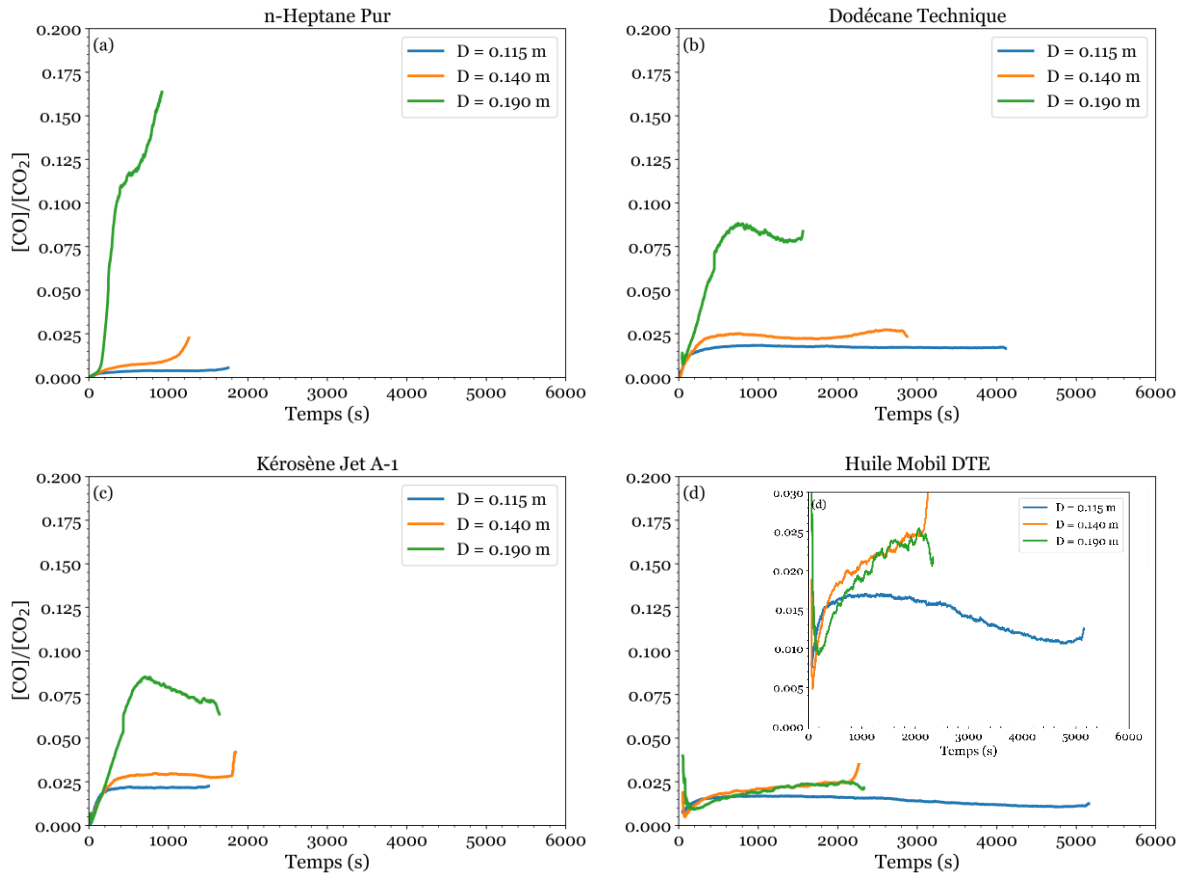


Figure 4.14 - Influence de la taille du bac sur l'évolution temporelle du rapport $[CO]/[CO_2]$, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.

La Figure 4.15 présente le rapport $[CO]/[CO_2]$ en fonction de la richesse globale (GER) pour les quatre combustibles. On rappelle que les valeurs reportées correspondent aux phases d'allumage et de feu établi. Pour le diamètre de 0.19 m, les valeurs sont dispersées. En réalité, elles illustrent les deux phases, en particulier l'allumage correspond à la partie ascendante depuis la valeur nulle jusqu'aux valeurs fortes qui ont été observées pendant la période de feu établi. Si donc on élimine les valeurs obtenues pendant la phase d'allumage, les résultants montrent que le rapport $[CO]/[CO_2]$ pourraient être corrélé au GER, et qu'il semble augmenter de manière exponentielle avec l'augmentation de le GER.

On observe que, dans des conditions bien ventilées ($GER < 0.7$), lorsque le GER augmente, le rapport $[CO]/[CO_2]$ augmente peu. En revanche, dans des conditions sous-ventilées ($GER > 0.7$), l'augmentation du GER entraîne une forte augmentation du rapport $[CO]/[CO_2]$. Les quatre combustibles ont montré une tendance similaire. Pour l'huile Mobil DTE, dans les conditions étudiées, le GER reste inférieur à 0.6 et, il a donc été observé un

rapport $[CO]/[CO_2]$ qui varie peu. Il est difficile de confirmer la tendance dans des conditions sous-ventilées.

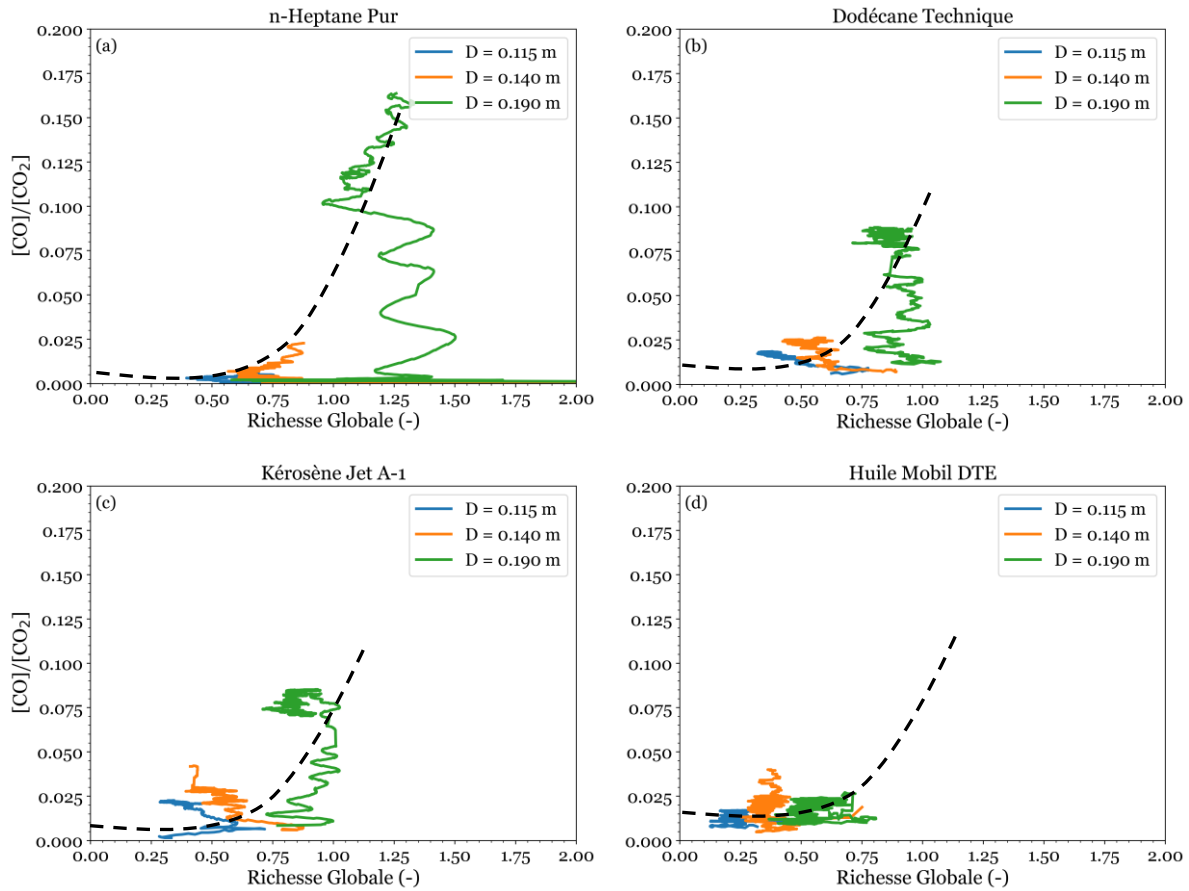


Figure 4.15 - Effet de la taille du bac sur rapport $[CO]/[CO_2]$ en fonction de la richesse globale, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.

La Figure 4.16 montre cette fois-ci le rapport $[CO]/[CO_2]$ en fonction de la concentration d'oxygène résiduel pour les quatre combustibles étudiés, à 9.67 ACPH. La figure montre également la concentration minimale d'oxygène de chaque combustible ($CMO_{\text{combustible}}$) et du monoxyde de carbone (CMO_{CO}). On rappelle que ces paramètres sont utilisés pour délimiter l'analyse en fonction des trois régimes de ventilation (Lassus J. , et al., 2016). Les résultats obtenus suivent en partie les mêmes tendances que ceux présentés dans la Figure 4.13. En basant l'analyse sur les trois régimes identifiés au paragraphe 3.5.4, sur-ventilé, sous-ventilé et très sous-ventilé, les observations suivantes sont faites :

(i) Pour une concentration d'oxygène résiduel comprise entre 21 % et ($CMO_{\text{combustible}}$), le régime est considéré comme bien ventilé. Mais le rapport augmente aussi légèrement avec la diminution de la concentration d'oxygène ainsi qu'avec la diminution de la taille de la nappe.

En ce qui concerne la taille du bac, lorsque le diamètre est petit, les valeurs du rapport $[CO]/[CO_2]$ sont toujours plus élevées.

(ii) Pour une concentration d'oxygène résiduel inférieur à $CMO_{\text{combustible}}$, on trouve un régime de combustion sous-ventilé ou très sous-ventilé. Le rapport $[CO]/[CO_2]$ augmente fortement si l'oxygène résiduel diminue. Comme il a été montré dans des résultats précédents, la formation de CO est favorisée par rapport à la formation de CO_2 , et donc la combustion est moins efficace.

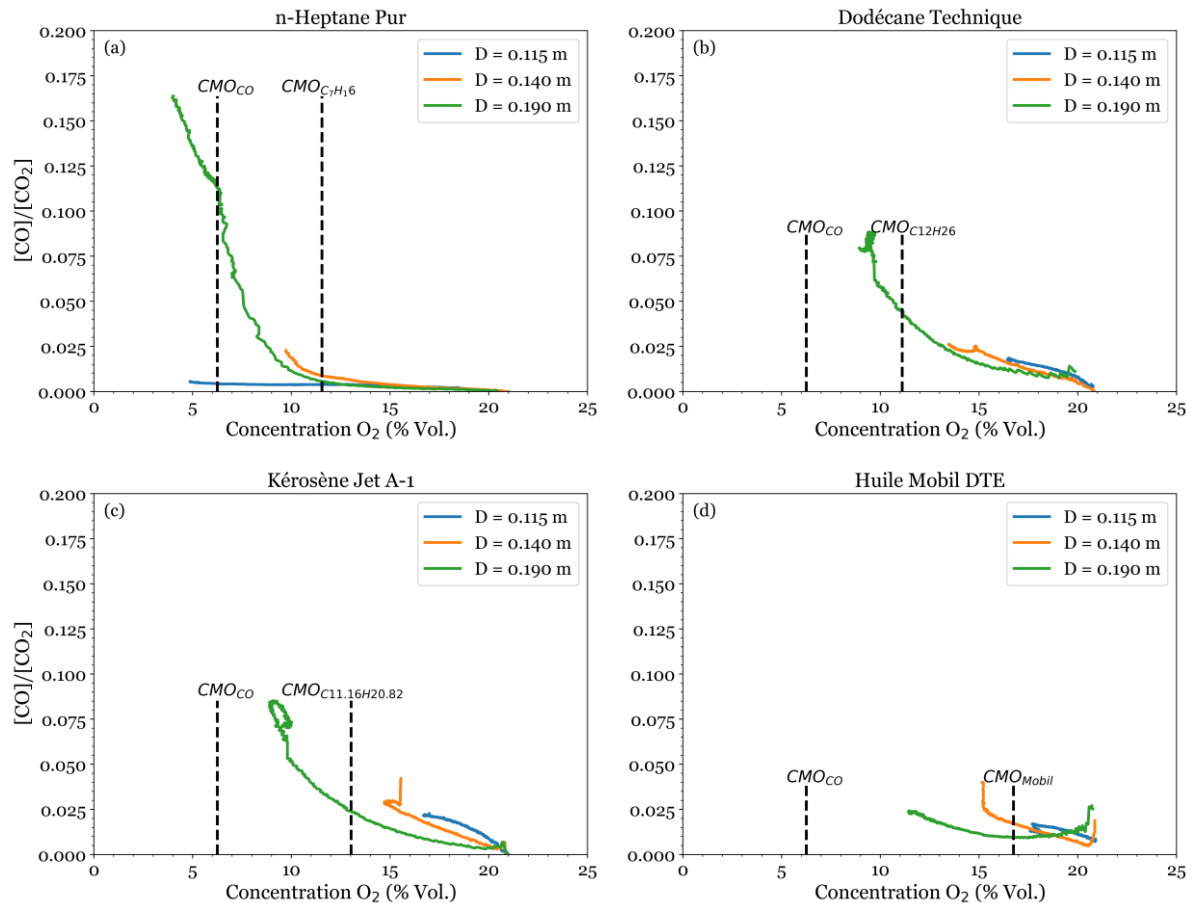


Figure 4.16 - Rapport $[CO]/[CO_2]$ en fonction de la concentration d'oxygène résiduel dans les fumées, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.

(iii) Pour une concentration d'oxygène résiduel inférieur à CMO_{CO} , seulement les feux d'heptane persistent, à partir de ce niveau. On trouve un régime de combustion très sous-ventilé. Le rapport $[CO]/[CO_2]$ augmente fortement si l'oxygène résiduel diminue.

4.5.4. Effet de la taille du bac de combustible sur le rendement de monoxyde de carbone

L'évolution temporelle du rendement de monoxyde de carbone (Y_{CO}), déterminé à l'aide de l'équation 3.6, pour les trois diamètres du bac et les quatre combustibles est illustrée sur la Figure 4.17. Comme attendu, on trouve que le rendement en CO (Y_{CO}) suit la même tendance que la concentration de CO (Figure 4.11), et donc la production de CO exprimée sous la forme de rendement (g/g) augmente avec la taille de la nappe. En fonction de la nature du combustible, le Y_{CO} a été plus important pour l'heptane, comme prévu. Le dodécane et le kérosène présentent des niveaux de Y_{CO} similaires. L'huile Mobil DTE montre le Y_{CO} le plus faible.

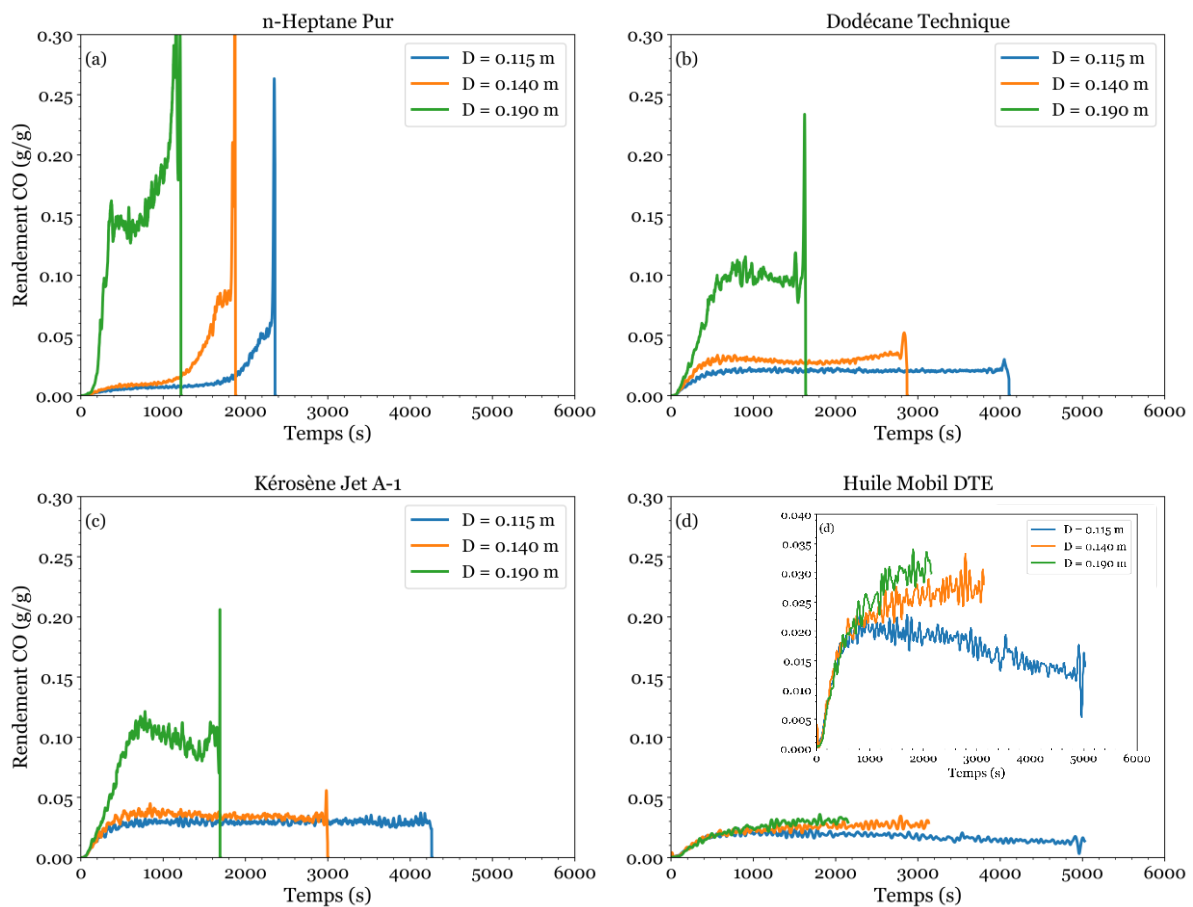


Figure 4.17 - Influence de la taille du bac sur l'évolution du rendement de monoxyde de carbone, RH de 9.67 ACPH, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.

Aux petites tailles de la nappe (0.115 et 0.14 m), après l'allumage, on observe un état quasi-stable qui dépend du type de combustible. L'heptane montre que le Y_{CO} est constant

jusqu'à environ 1200 s. Le dodécane et le kérosène montrent que le Y_{CO} est constant jusqu'à l'extinction. Pour l'huile Mobil DTE, chaque diamètre du bac présente une tendance particulière. À $D = 0.115$ m, juste après l'allumage, un maximum de Y_{CO} a été atteint, puis le Y_{CO} a progressivement diminué jusqu'à l'extinction. À $D = 0.14$ m, une augmentation constante de Y_{CO} a été observée jusqu'à l'extinction. Cependant, avec le grand bac ($D = 0.19$ m), des variations plus importantes de Y_{CO} sont observées. Il faut se rappeler qu'avec ce diamètre, certains incendies (heptane, dodécane et kérosène), se sont développés dans des conditions sous-ventilées, de sorte que la concentration de CO dans les fumées est importante et donc le Y_{CO} aussi. Ces combustibles, ont montré les tendances suivantes : une première augmentation correspondant à la montée en puissance du feu, suivie d'une augmentation plus marquée, pour l'heptane (jusqu'à environ 0.25 g/g) et une légère diminution pour le dodécane et le kérosène (jusqu'à environ 0.10 g/g). Le même comportement a été observé pour la concentration de CO (Figure 4.11).

Influence de la richesse globale (GER) sur le rendement de monoxyde de carbone

L'effet de la richesse globale (GER) sur le Y_{CO} pour les quatre combustibles est présenté sur la Figure 4.18. Les données illustrées dans la figure ne comprennent que la période de feu établi (cf. Paragraphe 4.4.1). La figure présente également les courbes de tendances décrites par Beyler (Beyler C. L., 1986) et par Gottuk (Beyler C. L., 1986; Gottuk D. T., Roby, Peatross, & Beyler, 1992) (ligne pointillée noire). Ces auteurs ont montré que la production d'espèces chimiques, exprimée sous la forme de rendement (Y_i), peut être bien corrélée avec le GER.

En considérant que le GER varie peu au cours d'un test (sauf pour l'heptane en fin de test, voir Figure 4.2). Pour chaque test, les données du Y_{CO} reportées sur la Figure 4.18 correspondent à de faibles variations du GER. Les résultats obtenus montrent que le Y_{CO} semble suivre la tendance décrite par Beyler et Gottuk et al. Les résultats du dodécane, du kérosène et de l'huile Mobil DTE indiquent que le Y_{CO} varie peu quand le GER est inférieur à 0.7, c'est-à-dire dans conditions bien ventilée. Pour l'heptane, le Y_{CO} varie au cours d'un test en même temps que le GER, et la tendance est la même que pour les essais avec les autres combustibles. L'influence d'autres paramètres sur le Y_{CO} est examinée ci-dessous.

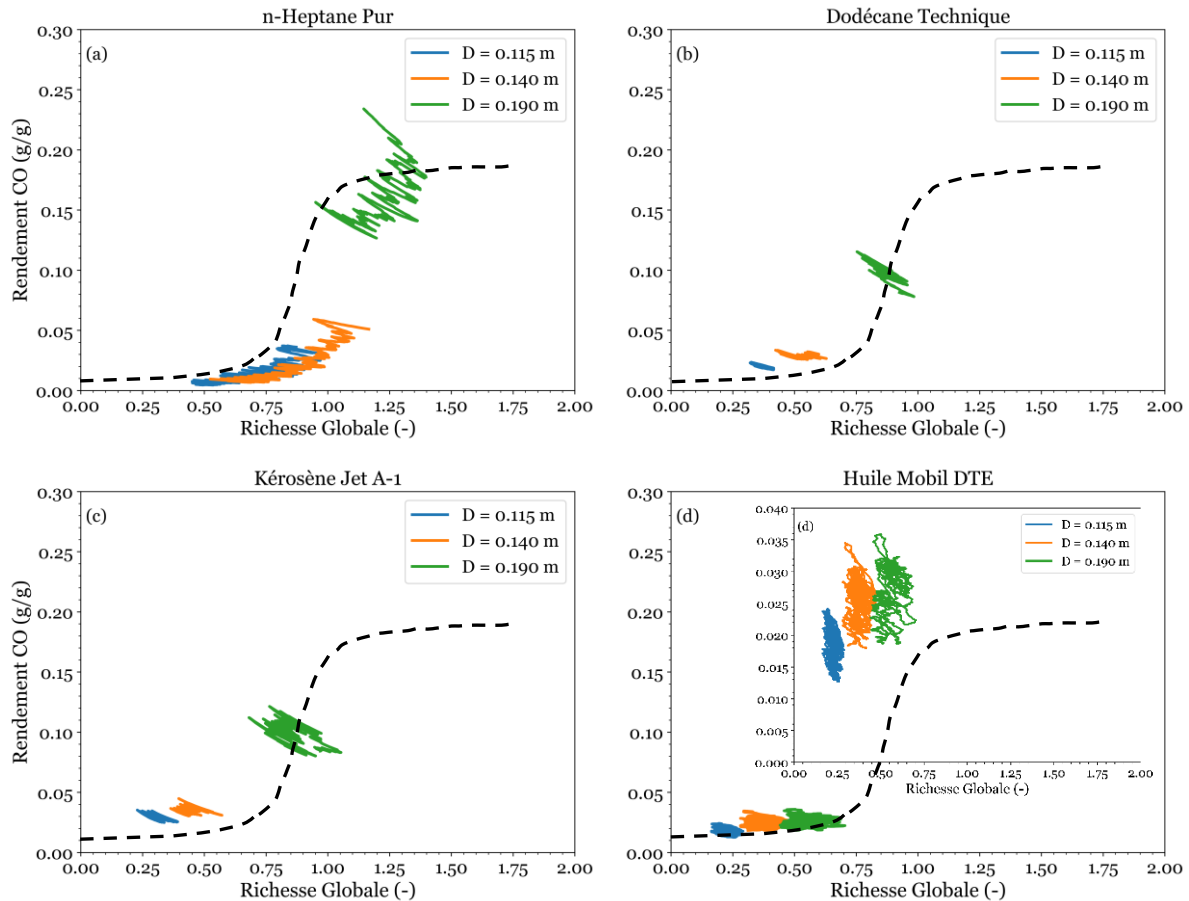


Figure 4.18 - Impact de la richesse globale sur le rendement de monoxyde de carbone pour (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. La ligne pointillée noire représente la tendance de Beyler et Gottuk.

Relation entre le rendement de monoxyde de carbone et la concentration d'oxygène

La Figure 4.19 présente le Y_{CO} en fonction de la concentration d'oxygène à la base de la flamme pour les quatre combustibles à 9.67 ACPH. Comme précisé au chapitre précédent, ces types de figures visent à comprendre l'influence de la viciation de l'air alimentant le foyer ($O_2 < 21\%$) sur la production de monoxyde de carbone lors d'incendies de compartiment mécaniquement ventilés.

Les mêmes observations qui ont été faites dans le Chapitre 3 peuvent être formulées également ici. Les résultats montrent que lorsque que la teneur en oxygène diminue de 21 % à environ 19 %, la viciation de l'air a un impact non négligeable sur la production de CO. Cependant, en dessous de 19 %, de petites variations de la concentration d'oxygène au pied de la flamme entraîneront une forte augmentation de la production de CO. Dans l'étude de l'influence du taux la ventilation (voir Figure 3.26), il a été établi que ce comportement se

produit également pour les ventilations correspondant à 9.67 et 17.8 ACPH. Par contre, pour la plus faible ventilation (à 4.83 ACPH), cette augmentation brutale apparaît lorsque la concentration de O_2 au pied de la flamme devient inférieure à 17 %. En ce qui concerne le diamètre du bac, il a été trouvé que la relation entre le Y_{CO} et l'oxygène à la base de la flamme n'est pas très sensible aux changements de diamètre, lorsqu'on passe de $D = 0.115$ m à 0.14 m. Par contre, des différences apparaissent pour le diamètre le plus grand ($D = 0.19$ m). Ceci s'explique logiquement par la ventilation de la chambre qui passe de bien ventilée à sous ventilée pour le diamètre du bac de 0.19 m.

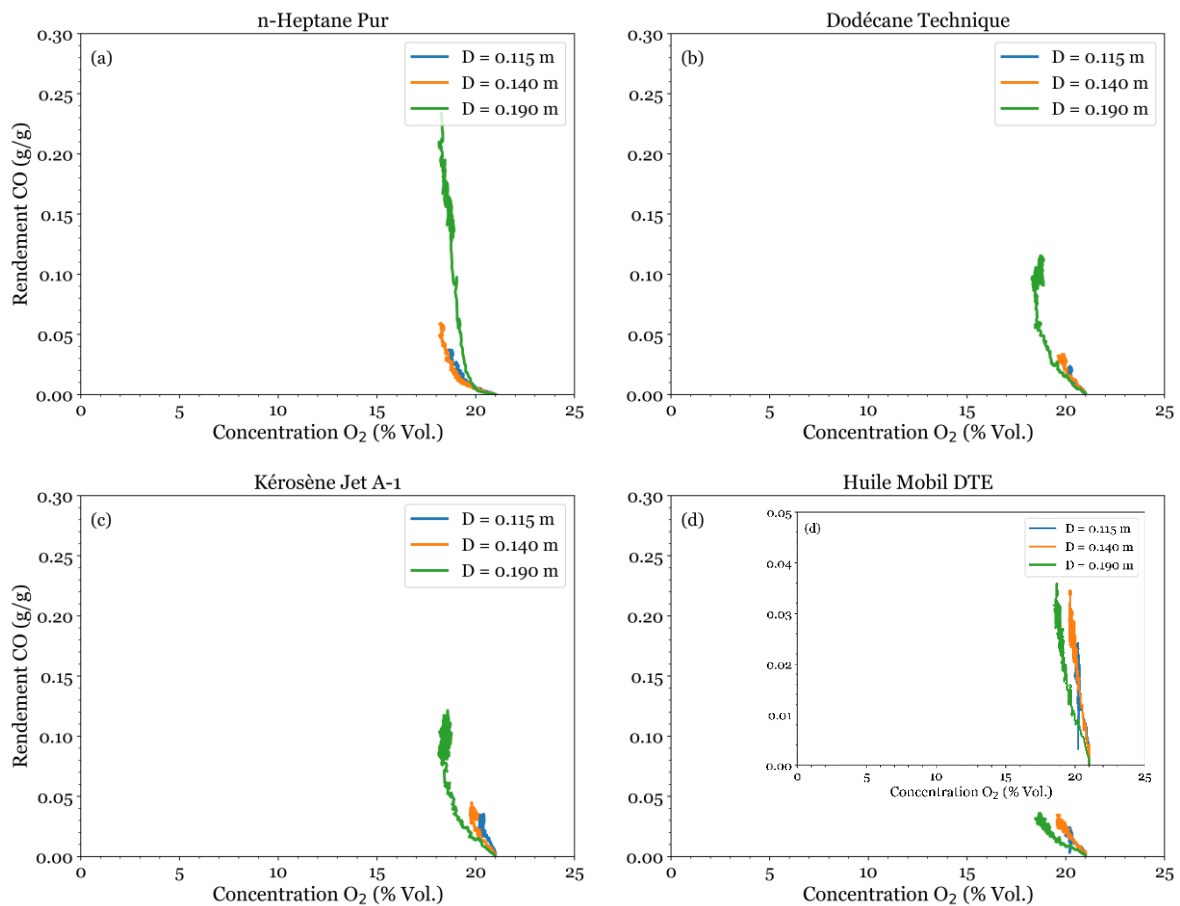


Figure 4.19 - Relation entre le rendement de monoxyde de carbone et la concentration d'oxygène à la base de la flamme, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.

La Figure 4.20 illustre cette fois-ci le Y_{CO} en fonction de la concentration d'oxygène résiduel. La figure présente également la concentration minimale d'oxygène pour chaque combustible ($CMO_{combustible}$) et pour le monoxyde de carbone (CMO_{CO}). Les résultats révèlent les mêmes tendances que la concentration de monoxyde de carbone en fonction de la concentration d'oxygène à l'extraction, comme prévu.

Dans les trois régimes, le rendement de CO augment très rapidement avec la diminution de la concentration de l'O₂ résiduel. Cela est surtout observable quand la concentration d'O₂ est inférieure à $CMO_{combustible}$, ce qui ne s'est pas toujours produit pour tous les tests. De plus, les résultats pour les combustibles lourds (Figure 4.20 – b, c et d), indiquent que dans des conditions bien ventilées (O₂ de 21 % à $CMO_{combustible}$), la formation de CO est déjà perceptible. On voit aussi que, dans cette gamme d'oxygène résiduel, il n'y a pas de corrélation claire avec le Y_{CO} , puisque les courbes varient en fonction du diamètre du bac.

Il est conclu que le GER, la concentration d'oxygène, soit à la base de la flamme ou à l'extraction, sont des paramètres qui permettent de comprendre en partie la formation de CO dans un compartiment confiné et ventilé mécaniquement. Cependant, les corrélations ne sont pas évidentes et ces paramètres ne permettent pas d'expliquer complètement la production de CO.

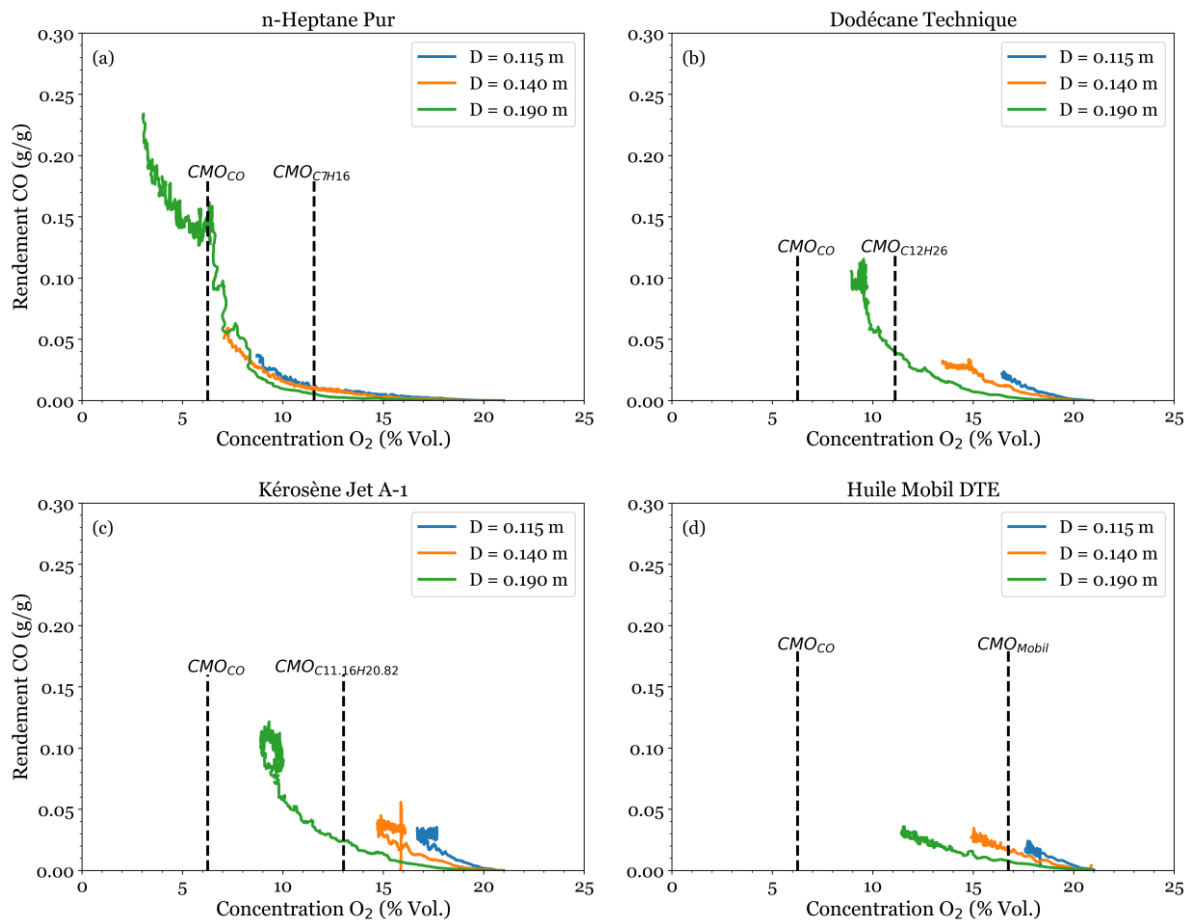


Figure 4.20 - Relation entre le rendement de monoxyde de carbone et la concentration d'oxygène à l'extraction, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.

4.6. Émissions des particules de suie en fonction de la taille du bac de combustible

Cette section est dédiée aux données relatives aux émissions de particules de suie dans les fumées, rapportées sous forme de concentration massique, de fraction volumique et de rendement en suie. L'analyse des données pour les trois diamètres du bac, sont également comparées à celles du monoxyde de carbone. Les mesures de la concentration massique des particules de suie ont été effectuées à l'aide d'une microbalance TEOM séries 1105, placée derrière la sonde de dilution du FPS, celle-ci étant réglée à un facteur de dilution d'environ 80 ± 10 .

4.6.1. Effet de la taille du bac combustible sur la concentration massique des particules de suie dans les fumées

La Figure 4.21 présente l'évolution de la concentration massique des particules de suie lors des incendies des (a) n-heptane pur, (b) dodécane technique, (c) kérosène Jet A-1, (d) huile Mobil DTE heavy medium à 9.67 ACPH. Les lignes pointillées noires représentent le lissage des données. Les résultats montrent que la concentration de suie (mg/m^3) diminue avec le diamètre de la nappe, sauf pour l'heptane, pour lequel on n'observe pas de changements importants. Si l'on revient sur les données présentées dans la Figure 4.11 concernant aux effets du diamètre du bac sur les émissions de monoxyde de carbone, les résultats permettent de confirmer les deux tendances contraires observées pour le CO et les suies :

(i) Une augmentation de la production de CO avec l'augmentation du diamètre bac, tandis que pour la concentration de suie, l'effet contraire est constaté. Cette différence peut s'expliquer par le fait qu'avec le grand diamètre du bac ($D = 0.19 \text{ m}$), les incendies se développent dans un environnement sous-ventilé, ce qui favorise la production de CO et diminue la formation de la suie. En revanche, dans le cas d'un petit bac ($D = 0.115 \text{ m}$), les incendies se développent dans un environnement suffisamment ventilé, de sorte que la production de suie est favorisée. L'existence d'une compétition chimique entre les deux produits est donc évidente.

(ii) La concentration de CO est plus forte pour l'heptane que pour le dodécane et le kérosène, alors que la concentration des suies est plus forte pour le kérosène que pour le dodécane et l'heptane. Les quatre combustibles ont été classés selon la quantité de suie produite comme suit dans l'ordre décroissant : kérosène, dodécane, huile Mobil DTE et

heptane, pour toutes les conditions étudiées. Il a été constaté que l'heptane produit les émissions de CO les plus élevées, mais la plus faible concentration de suie.

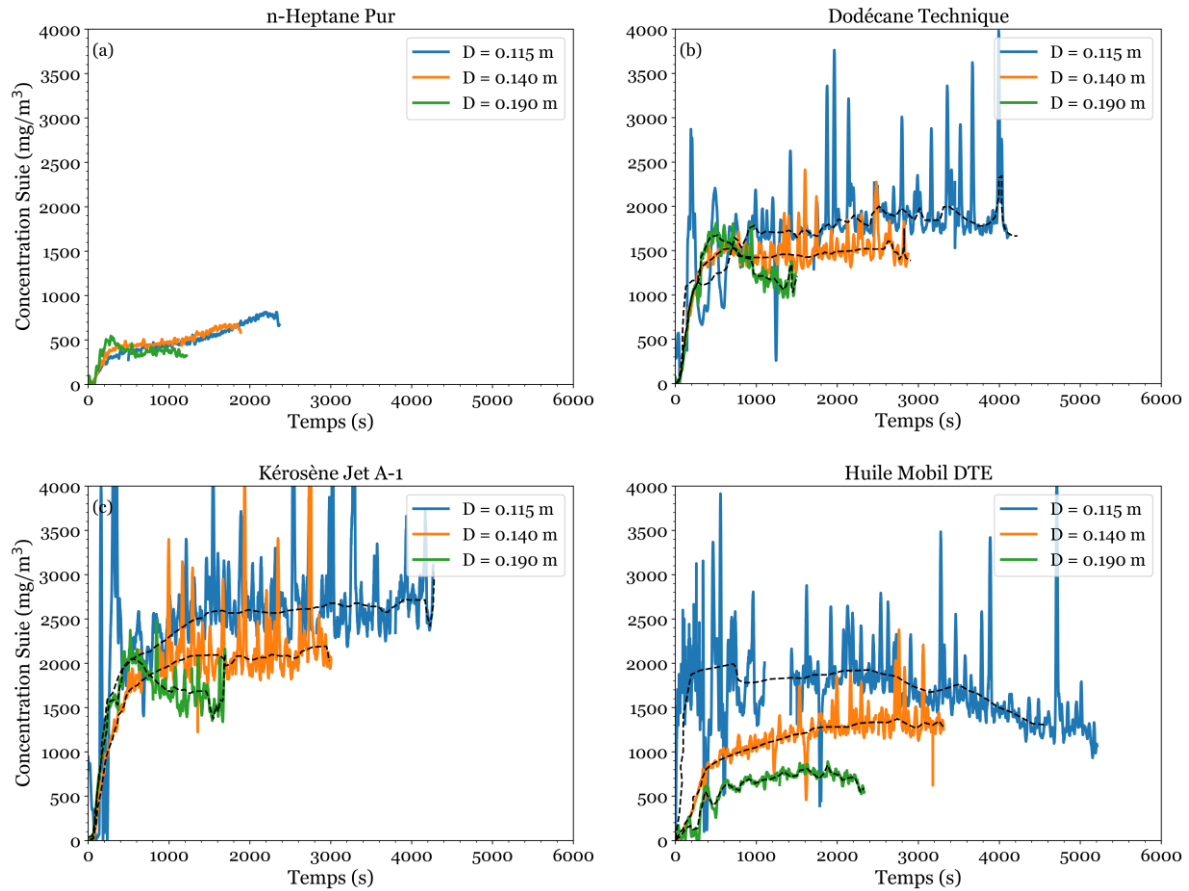


Figure 4.21 - Effet de la taille de la nappe sur la concentration massique des particules de suie dans les fumées à 9.67 ACPH. (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.

Avec les petits diamètres de bac ($D = 0.115$ m et 0.14 m), lors de l'utilisation de l'heptane, il a été constaté que les concentrations de suies augmentent progressivement sans atteindre un état stable. La concentration maximale de suie a été atteinte juste avant l'extinction. Avec le diamètre du bac de 0.19 m, la valeur maximale de la concentration de suie a été atteinte pendant les 500 premières secondes de l'incendie, puis elle a diminué pour finalement atteindre un état quasi-stable (Figure 4.21 – a). Pour le dodécane et le kérosène, avec les deux petits diamètres, la concentration de suies augmente jusqu'à environ 500 s pour ensuite rester à peu près stable jusqu'à l'extinction. À $D = 0.19$ m, un comportement similaire à celui de l'heptane a été constaté (Figure 4.21 – b et c). Le kérosène a présenté des valeurs légèrement plus importantes que le dodécane. Pour l'huile Mobil DTE, avec le diamètre de 0.115 m, la concentration de suie augmente jusqu'à environ 800 s, atteignant la valeur

maximale, puis diminue jusqu'à une valeur stable. Pour les diamètres du bac de 0.14m et 0.19 m, la concentration augmente régulièrement jusqu'à l'extinction.

4.6.2. Relation entre la concentration de suie et la concentration d'oxygène dans les fumées

La Figure 4.22 présente l'effet de la concentration d'oxygène résiduel sur la concentration de particules de suie pour les quatre combustibles. Les données présentées dans cette figure sont exprimées en fraction volumique (cf. paragraphe 3.6.2). La figure inclut également le $CMO_{\text{combustible}}$ ainsi que le CMO_{CO} , comme cela a été fait dans les paragraphes précédents. Ces deux paramètres nous permettent d'analyser les données en fonction de trois régimes de combustion.

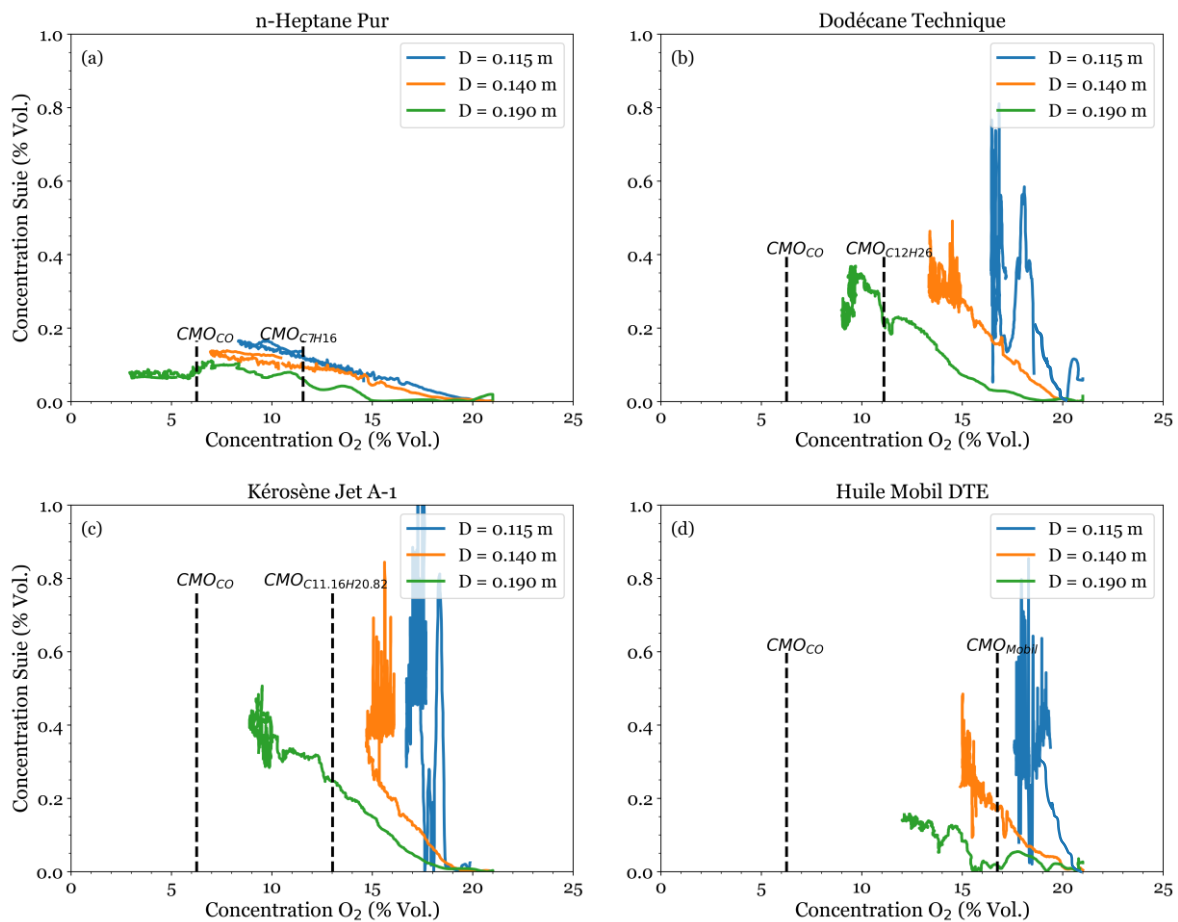


Figure 4.22 - Influence de la concentration d'oxygène à l'extraction sur la concentration de suie pour différentes tailles de nappe et combustibles, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.

Les résultats montrent que la concentration de suie augmente quand la teneur en oxygène résiduel diminue. La concentration maximale de suie observée au cours d'un test dépend aussi de la taille de la nappe. Par rapport aux résultats obtenus pour le CO (cf. Figure 4.13), la concentration maximale de suies atteinte au cours d'un test augmente si le diamètre du bac est faible, et c'est l'inverse pour le CO (cf. Figure 4.13). Pendant la période suffisamment ventilée (de 21 % à $CMO_{\text{combustible}}$), la concentration de suie augmente lorsque la concentration d'oxygène résiduel diminue. Mais contrairement aux résultats du Chapitre 3 (cf. Figure 3.29), on observe des différences dès le début des tests, alors que sur la Figure 3.29, peu de différences sont observées si $O_2 > 15\%$.

Dans le régime sous-ventilé ($O_2 < CMO_{\text{combustible}}$), plus l'oxygène résiduel diminue, plus la concentration de suie augmente, jusqu'à atteindre un plateau, comme présenté sur la Figure 4.22 par un nuage de points (cas de dodécane, de kérosène et de l'huile Mobil DTE). Si on compare les résultats du CO (Figure 4.13), on s'aperçoit que, pour ce dernier, la taille du bac a une influence minimale. Il n'a pas été observé l'effet de plateau. Dans le domaine fortement sous-ventilé ($O_2 < CMO_{\text{CO}}$), lorsque la concentration d'oxygène devient faible ($< 6.25\%$), la production de suie est ralentie et la formation de CO est favorisée. Ce comportement avait déjà été identifié dans le Chapitre 3, soulignant ainsi qu'il existe une compétition entre les productions de CO et des suies, ce qui va être discuté dans le paragraphe suivant.

4.6.3. Concentration de monoxyde de carbone en fonction de la concentration de suie pour différentes tailles de bacs

La Figure 4.23 illustre l'influence de la concentration de monoxyde de carbone sur la concentration de suie pour les quatre combustibles à 9.67 ACPH. Il est clair qu'il y a un effet de saturation sur la production de suies. Par conséquent, les observations suivantes peuvent être faites : (i) Pour les faibles valeurs de CO ou des suies, CO et suies augmentent simultanément. (ii) Pour les fortes valeurs de monoxyde de carbone, la concentration de suie n'augmente pas, elle semble rester quasi-constante, au contraire du CO qui augmente. La compétition chimique entre la production de CO et celle de suie est à l'avantage de CO. Autrement dit, l'hydrocarbure est oxydé pour former du CO et les particules de suie sont également oxydées pour former du CO. Les deux réactions privilégient la formation de CO, et comme la zone de fumées est considérée comme non réactive, la conversion du CO en CO_2 n'a pas lieu. En conséquence, il y a donc plus de production CO dans les fumées. Il convient également souligner que cette compétition existe quel que soit le diamètre du bac de combustible.

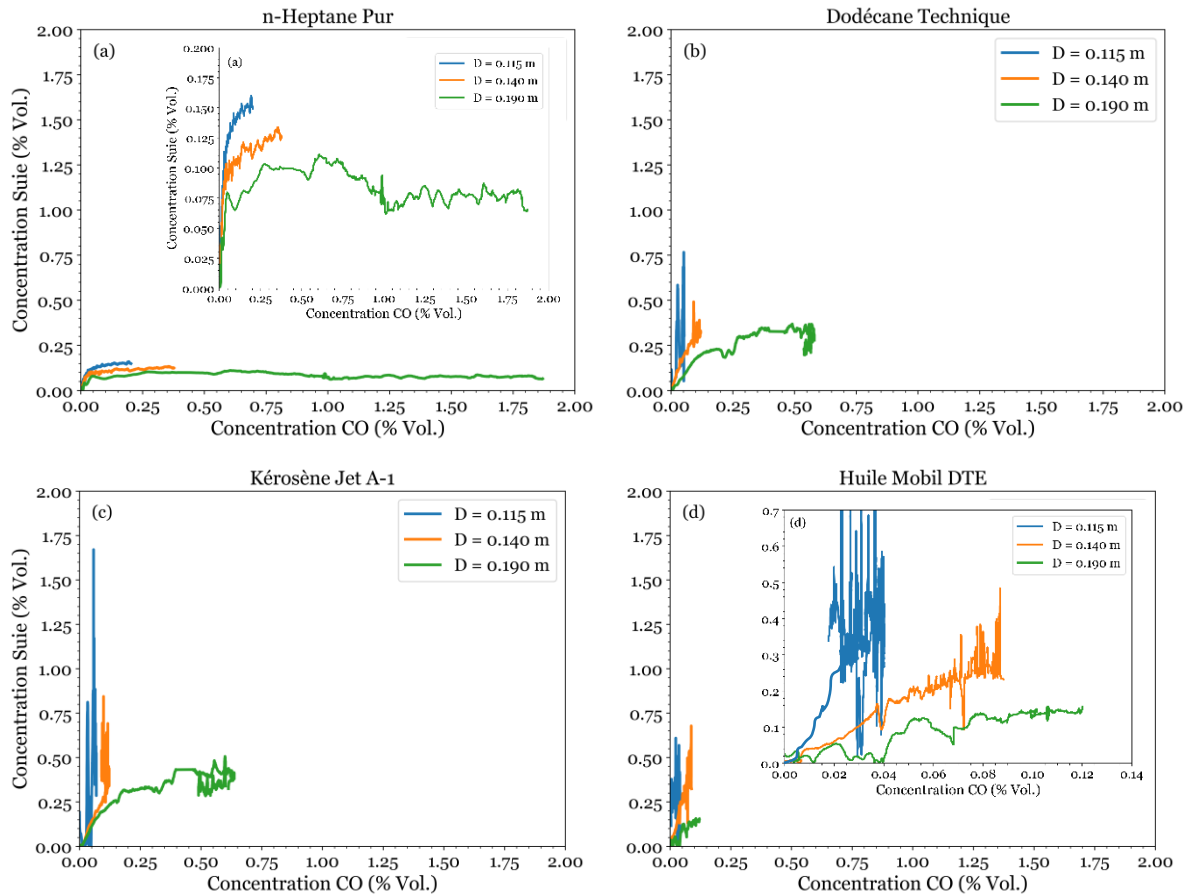


Figure 4.23 - Influence de la concentration monoxyde de carbone sur la concentration des particules de suie pour différentes tailles de nappe, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.

La compétition chimique entre la production de suie et celle du CO est à l'avantage celle-ci. Autrement dit, l'hydrocarbure est oxydé pour former du monoxyde de carbone et les particules de suie sont également oxydées pour former du monoxyde de carbone, les deux réactions privilégient la formation de monoxyde de carbone, et comme la zone de fumées est considérée non réactive, la conversion du CO à CO₂ n'a pas lieu, de sorte qu'il y a donc plus de CO dans les gaz d'échappement. Il faut aussi souligner que cette compétition existe quelques soit le diamètre du bac de combustible.

4.6.4. Émissions et rendement de suie en fonction de la taille de la nappe

La Figure 4.24 montre l'évolution temporelle du rendement en suie (Y_{Suie}) pour les quatre combustibles à 9.67 ACPH. On rappelle que le Y_{Suie} (g/g) a été déterminé par l'équation 3.9 (voir paragraphe 3.7.4). Les résultats montrent que si le diamètre du bac est faible, le Y_{Suie} est

important, c'est-à-dire que la quantité de combustible utilisée pour former les particules de suie est plus importante. Les résultats relatifs à la concentration massique ont montré les mêmes comportements (voir Figure 4.21).

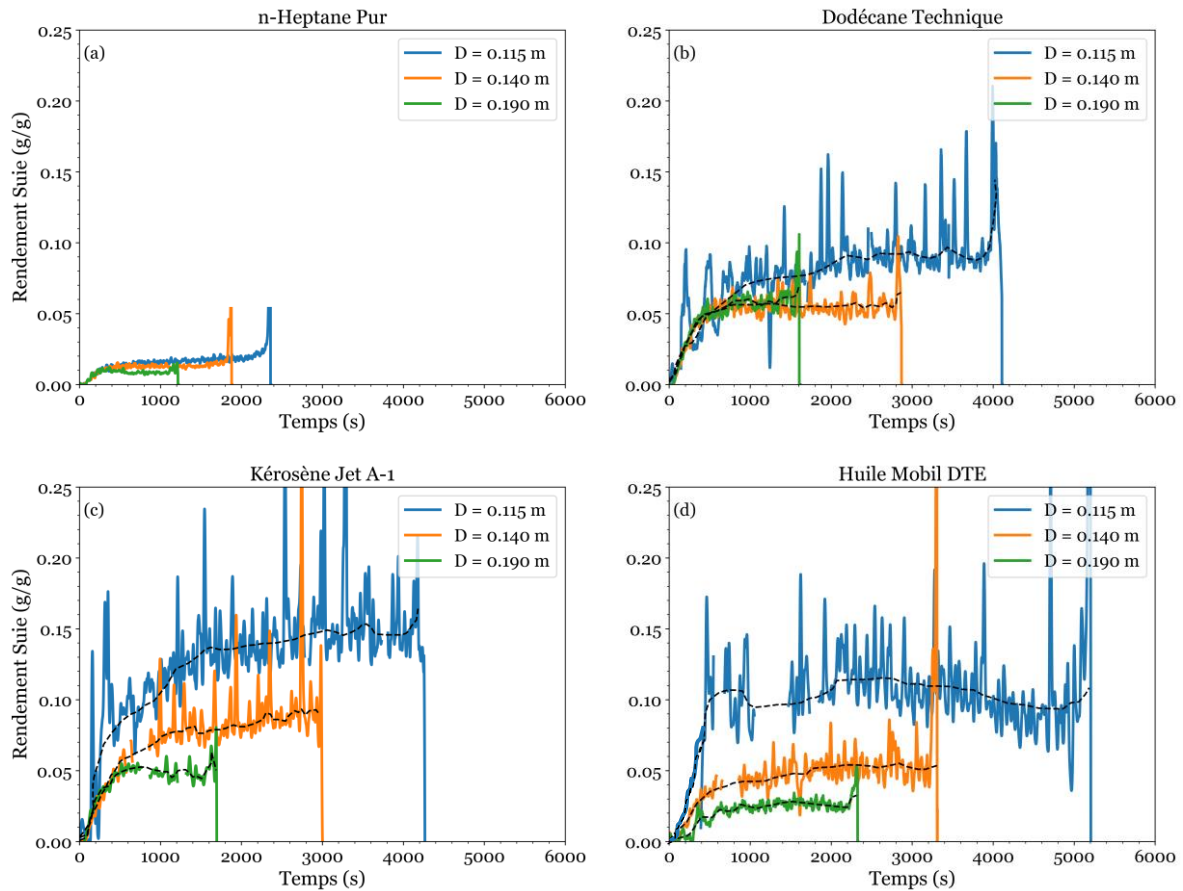


Figure 4.24 - Effet de la taille de nappe sur le rendement de suie pour, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium, à 9.67 ACPH.

En fonction du type de combustible le rendement (Y_{Suie}) sera plus ou moins important. l'heptane présente l'émission de suie la plus faible par rapport aux autres combustibles. Ce résultat est également confirmé par les données relatives au point de fumée (Tableau 2.2), étant donné que les combustibles qui produisent peu de suie ont des points de fumée élevées (Qasem, Al-Mutairi, & Jameel, 2023). Les quatre combustibles peuvent être classés par ordre décroissant en termes de Y_{Suie} : kérosène, dodécane, huile Mobil DTE et heptane. En général, les combustibles qui contiennent des groupes aromatiques et naphthéniques ont des émissions de suie élevées (Qasem, Al-Mutairi, & Jameel, 2023). Par conséquent, le kérosène et l'huile Mobil DTE présentent des niveaux de suies plus élevés que l'heptane, qui ne contient pas de

molécules aromatiques ou naphthéniques. En revanche, le comportement du dodécane n'est pas évident, car il est composé exclusivement d'isomères

Le Tableau 4.5 présente un résumé des résultats obtenus sur le rendement moyen et maximal du CO et des suies de chaque scénario d'incendie. Pour des comparaisons futures, nous avons également inclus la richesse globale. Ces données portent uniquement sur la période de feu établi (voir paragraphe 4.4.1).

Tableau 4.5 - Synthèse des rendements de CO et de suie en fonction de la taille de la nappe.

Combustibles / D (m)	Φ_g (-)	\bar{Y}_{CO} (g/g)	$Y_{CO,max.}$ (g/g)	\bar{Y}_S (g/g)	$Y_{S,max.}$ (g/g)
Heptane					
0.115	0.61	0.011	0.037	0.016	0.022
0.14	0.79	0.017	0.060	0.013	0.016
0.19	1.18	0.158	0.234	0.008	0.012
Dodécane					
0.115	0.36	0.021	0.024	0.083	0.097
0.14	0.49	0.029	0.034	0.054	0.058
0.19	0.92	0.104	0.135	0.057	0.065
Kérosène					
0.115	0.31	0.029	0.036	0.133	0.162
0.14	0.44	0.035	0.045	0.08	0.01
0.19	0.97	0.10	0.121	0.050	0.073
Huile Mobil DTE					
0.115	0.28	0.017	0.024	0.103	0.156
0.14	0.38	0.025	0.035	0.05	0.87
0.19	0.55	0.027	0.038	0.025	0.034

Rendement des particules de suie en fonction de la richesse globale (GER)

La Figure 4.25 montre la relation entre le Y_{Suie} et le GER pour les quatre combustibles à 9.67 ACPH. Pour l'analyse, comme dans le cas du CO, les résultats ne tiennent compte que la période de feu établi. Dans les conditions étudiées, le Y_{Suie} diminue à mesure que le feu devient sous-ventilé ($GER > 0.7$). Comme indiqué ci-dessus, dans des conditions bien ventilées, les incendies dans ce compartiment produisent des concentrations élevées de suie, ce qui a aussi

été constaté dans le Chapitre 3. Autrement dit, dans des conditions suffisamment ventilées, la production de suie est favorisée. De plus, il a été constaté que cette décroissance dépend également du type de combustible. À partir de la valeur stœchiométrique ($GER = 1$) la production de suie semble être constante.

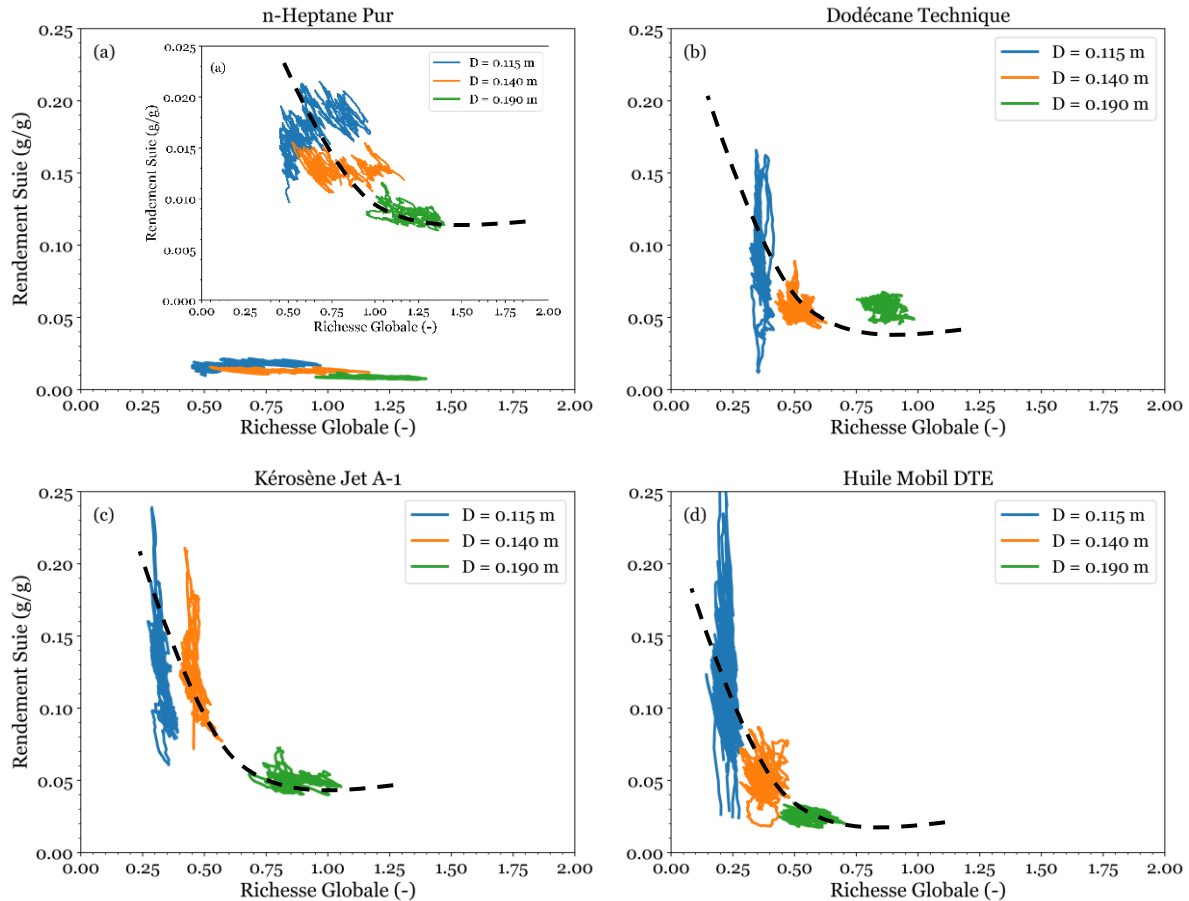


Figure 4.25 - Relation entre le rendement de suie et la richesse globale en fonction de la taille de la nappe pour (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.

De même que pour le CO , la variation du GER n'explique pas complètement la production de suie. Sur la Figure 4.25, on observe qu'à une valeur fixée du GER , il y a des variations significatives dans le rendement en suie (voir par exemple le cas de $D = 0.115$ m pour les quatre combustibles). Le rendement en suie (Y_{Suie}) dépend donc aussi d'autres paramètres. Le GER est un paramètre représentant la ventilation globale de l'enceinte, mais ne permet pas de connaître la qualité du mélange et de la combustion au niveau du foyer, qui est la zone de production des suies. Il est donc nécessaire d'examiner l'influence d'autres paramètres.

Rendement des particules de suie en fonction de la concentration d'oxygène

L'influence de la concentration d'oxygène à la base de la flamme sur le Y_{Suie} est présentée sur la Figure 4.26. La concentration d' O_2 au niveau de la flamme diminue jusqu'à environ 18 % pour l'heptane. Mais elle varie peu pour les autres combustibles et pour les diamètres de 0.115 m et 0.14 m, ce qui rend compte d'une faible viciation de l'air alimentant la flamme pour ces cas. Toutefois, on trouve que le Y_{Suie} augmente si l' O_2 disponible pour la combustion diminue. Cependant, une fois que le feu est complètement développé (feu établi), le Y_{Suie} varie fortement alors que la concentration d' O_2 au pied du foyer varie peu.

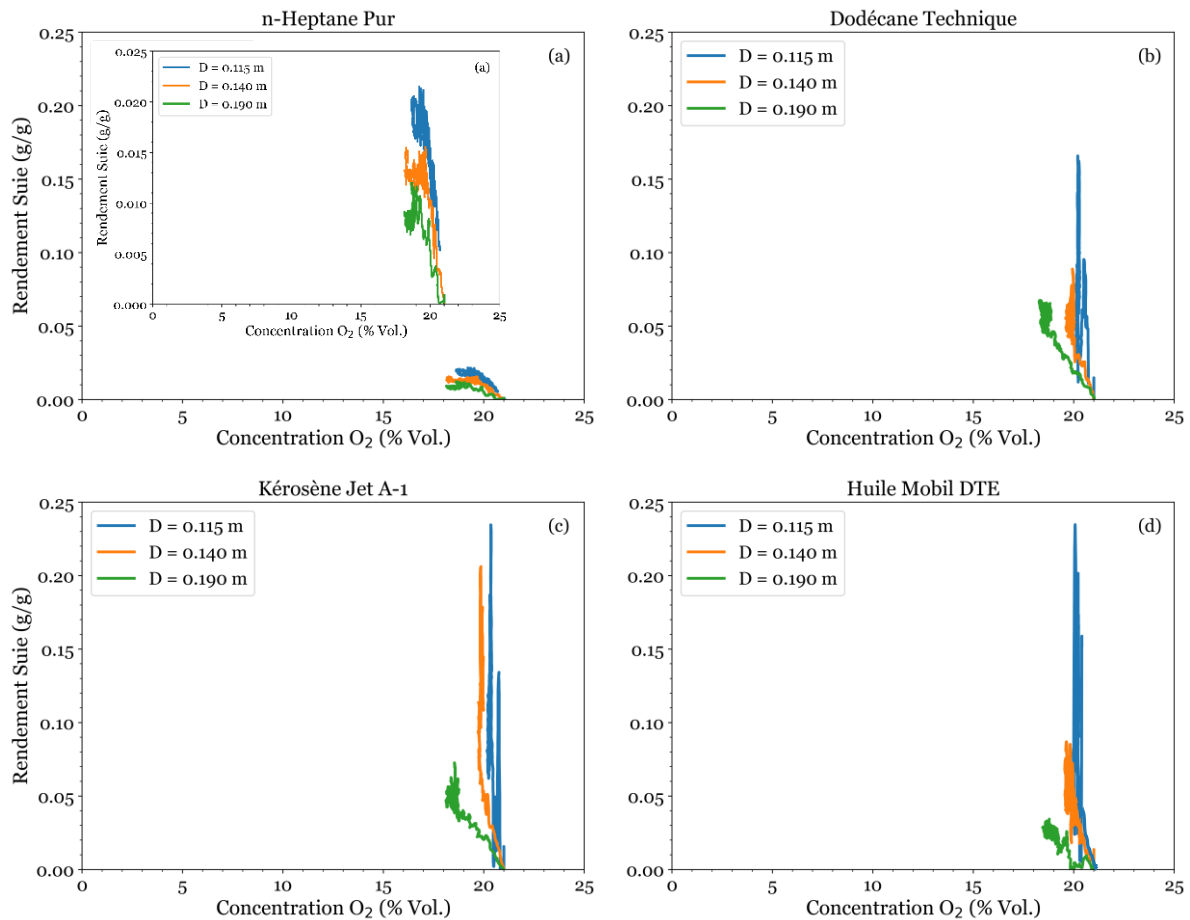


Figure 4.26 - Relation entre le rendement de suie et la concentration d'oxygène à la base de la flamme en fonction de la taille de la nappe pour (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.

La Figure 4.27 présente cette fois-ci, la relation entre le rendement en suie (Y_{Suie}) et la concentration d'oxygène résiduel (mesuré à l'extraction) pour les quatre combustibles à 9.67 ACPH. La concentration minimale d'oxygène du CO (CMO_{CO}) et du combustible ($CMO_{\text{combustible}}$) sont également représentés. Les résultats montrent que les courbes sont

cohérentes avec la Figure 4.22, c'est-à-dire qu'elles suivent la même tendance. Il a donc été trouvé un Y_{Suie} qui est d'autant plus important si l'oxygène résiduel est bas. Il a également été constaté que les courbes sont moins groupées que celles présentées ci-dessus (Figure 4.27). Comme indiqué au Chapitre 3, il n'a pas été observé une relation directe entre ces deux paramètres.

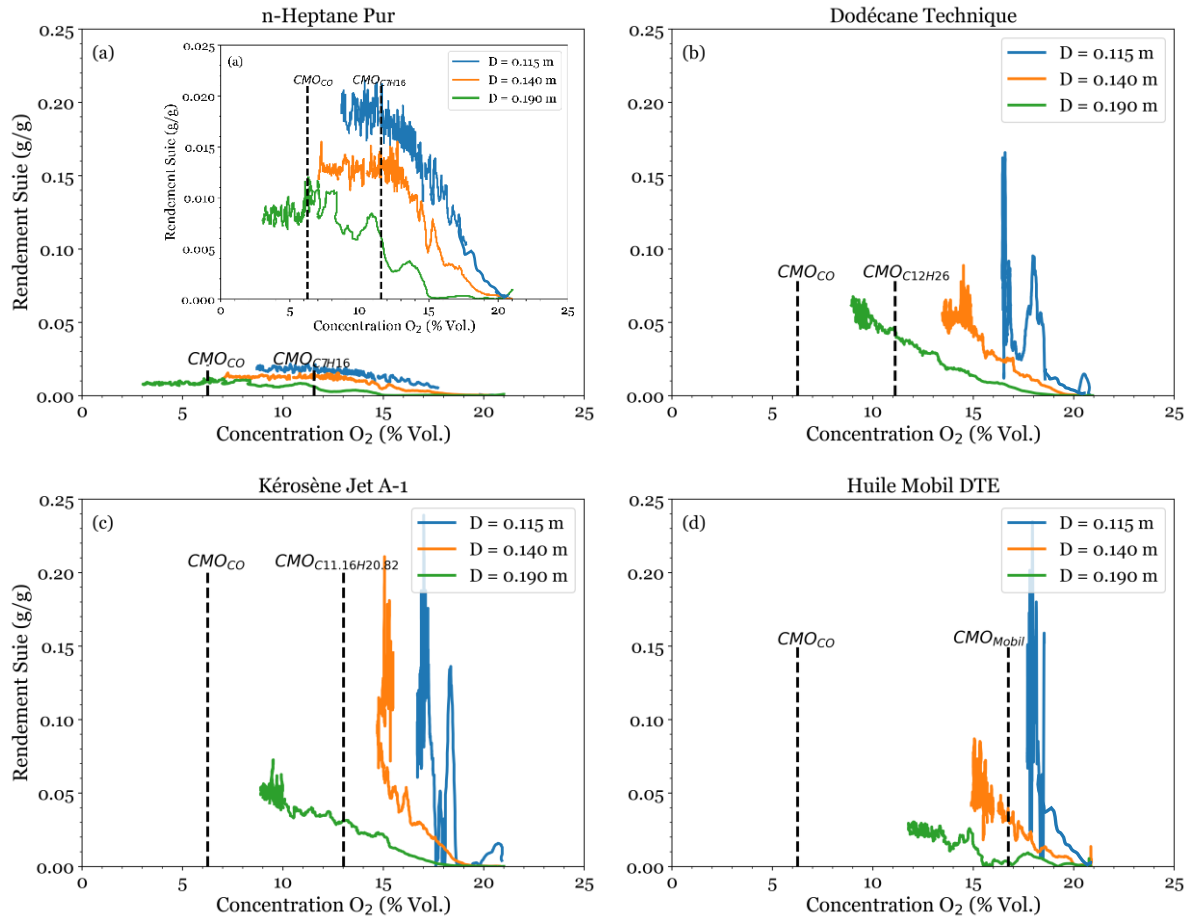


Figure 4.27 - Relation entre le rendement de suie et la concentration d'oxygène à l'extraction en fonction de la taille de la nappe pour (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.

En fonction des trois régimes identifiés sur la Figure 4.27, on peut remarquer que : si le Y_{Suie} se situe dans l'intervalle de concentration d'oxygène résiduel de 21 % à CMO_{combustible} (régime considéré bien ventilé), la production de suie n'est pas négligeable et tend à augmenter avec la diminution de l'oxygène résiduel et avec la diminution du diamètre du bac. Si le Y_{Suie} se situe à une concentration d'oxygène inférieure au CMO_{combustible}, le régime est sous-ventilé, et pourrait devenir très sous-ventilé, si la concentration d'oxygène résiduel est inférieure à CMO_{CO}. Il a été observé que le Y_{Suie} augmente avec des faibles variations de l'O₂ et aussi avec

la diminution du diamètre du bac (voir Figure 4.27 – a et d). Lorsque la concentration d'O₂ résiduel est inférieure à 6.25 %, seul le feu d'heptane à 0.19 m persiste. Il a été constaté qu'à ce niveau d'oxygène, le Y_{Suie} n'augmente plus, au contraire, il diminue puis reste quasi-constant, comme observé aussi sur la Figure 4.22.

4.6.5. Effet de la taille du bac de combustible sur la distribution de particules de suies

Pour étudier l'influence de la taille de nappe sur la granulométrie des particules de suie, l'appareil Scanning Mobility Particle Sizer « *SMPS* » (TSI, qualificateur modèle 3080 plus le conteur CPC modèle 3772) a utilisé et placé derrière la sonde de dilution du FPS.

La Figure 4.28 présente les distributions théoriques ajustées par l'équation 2.11 (loi log-normale), appliqué systématiquement aux distributions obtenues directement par le DMA (voir Annexe G) pour les quatre combustibles. La procédure pour obtenir la distribution théorique log-normale à partir des valeurs expérimentales est détaillée dans l'Annexe E. Les graphiques correspondant aux mesures relatives à chaque diamètre du bac sont présentés en Annexe G (voir Figure G. 1 à Figure G. 3). Cette distribution ajustée permet d'estimer le diamètre moyen géométrique ou le diamètre modal, l'écart-type géométrique ($\sigma_{\text{géom}}$) et la largeur à mi-hauteur (LMH) de la distribution.

Comme illustré dans la Figure 4.28, une distribution unimodale est observée dans tous les tests. En fonction des résultats obtenus, on observe que le fait de varier le diamètre du bac, n'affecte pas de manière significative la taille des particules de suie produites lors des incendies à un taux de ventilation fixe (9.67 ACPH). On peut donc considérer que l'effet est négligeable. Il a également trouvé, que les particules de suie qui en résultent sont de très grosses particules, même lors d'incendies avec petits diamètres du bac ($D = 0.115$ et 0.14 m). La plupart des particules ont eu un diamètre modal de 225 à 297 mn (Tableau 4.6). Loo et al. (Loo, Coppalle, Yon, & Aîné, 2016) et Ouf et al (Ouf, Vendel, Coppalle, Weill, & Yon, 2008) ont trouvé des diamètres modaux des particules comparables. Ces diamètres modaux indiquent que les particules de suie dans la couche de fumée ont des diamètres importants. On considère que ces particules correspondent à l'agglomération de particules plus petites émises par la zone de flamme. Des détections in situ dans la zone de flamme sont nécessaires pour connaître la taille réelle des particules de suie produites par la flamme. Il faut aussi rappeler que les distributions présentées sur la Figure 4.28 sont normalisées à un. Ceci permet de voir plus facilement s'il y a des différences dans la forme des distributions. Par contre, les distributions non normalisées sont différentes pour chaque diamètre du bac et type de combustible, car le nombre total de particules varie et dépend des conditions expérimentales (cf. Annexe G).

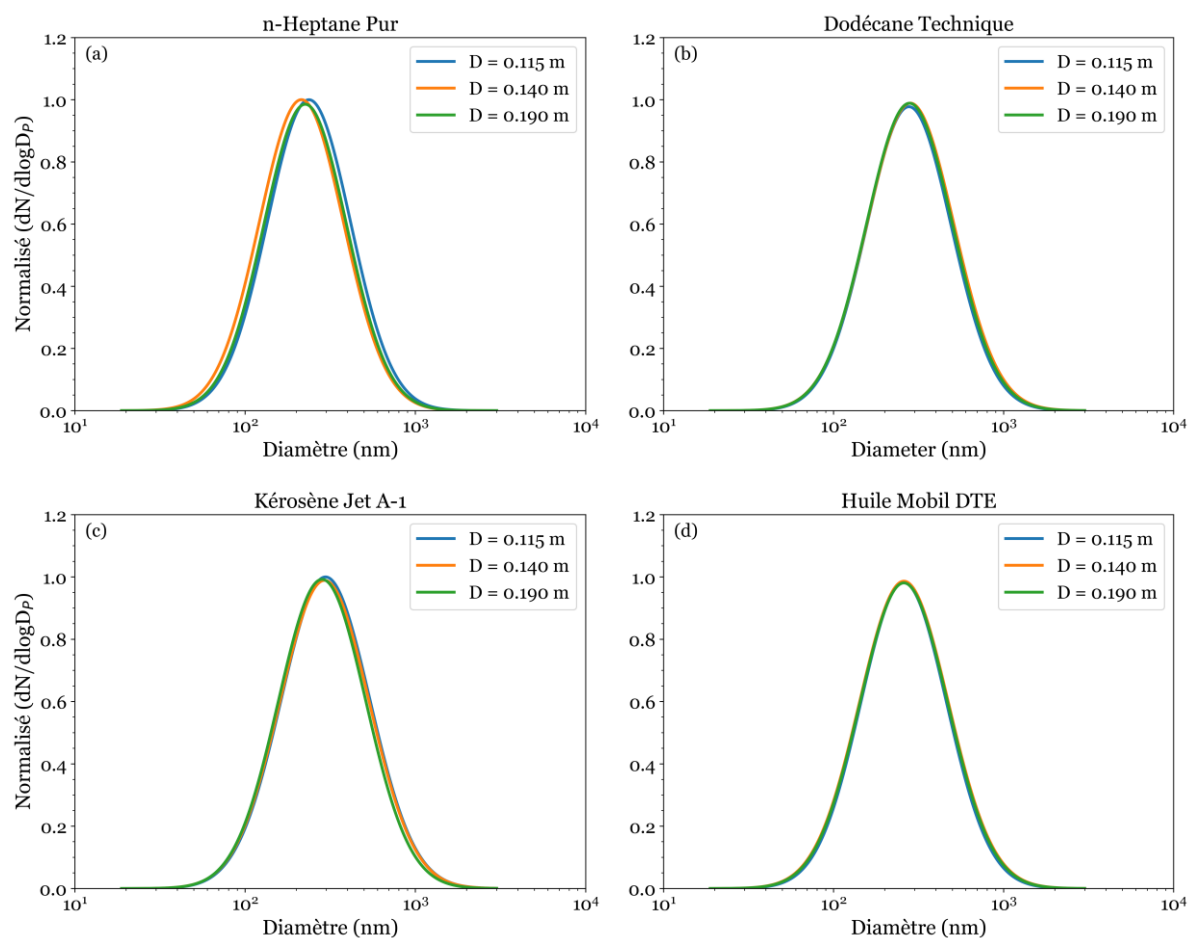


Figure 4.28 - Influence du diamètre bac de combustible sur la distribution de la taille moyenne des particules à 9.67 ACPH, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium.

Tableau 4.6 - Synthèse issues des distributions obtenues par loi log-normale loi en fonction de la taille de la nappe.

Combustibles / Diamètres (m)	D modal (nm)	Écart-type géom.	LMH (nm)
Heptane			
0.115	238	1.76	4.15
0.14	226	1.77	4.17
0.19	225	1.75	4.12
Dodécane			
0.115	280	1.81	4.26
0.14	279	1.81	4.26
0.19	280	1.79	4.22
Kérosène			
0.115	297	1.82	4.29
0.14	295	1.83	4.31
0.19	283	1.81	4.26
Huile Mobil DTE			
0.115	259	1.80	4.24
0.14	259	1.82	4.29
0.19	259	1.82	4.29

La détermination des propriétés physiques et chimiques des particules de suie est nécessaire pour obtenir une meilleure connaissance de ces particules et de leurs propriétés radiatives à des fins de sécurité incendie. La Figure 4.29 présente quatre clichés, obtenus par microscopie électronique à transmission, de particules de suie de l'huile minérale pour différents grossissements. L'huile minérale a été brûlée dans un bac de 0.19 m de diamètre et avec un taux de ventilation de 9.67 ACPH. Les images ont été réalisées par le laboratoire Groupe de Physique des Matériaux. Le prélèvement des particules a été effectué à l'intérieur du compartiment, à environ 60 cm du bord du bac de combustible.

Sur la Figure 4.29, on observe que les particules de suies sont des agrégats de petites sphérules, appelées particules primaires. Avec le cliché à plus fort grossissement (Figure 4.29 – a), on peut observer la structure interne des sphérules. Elles sont constituées de petites couches de graphite qui s'empilent de façon désordonnée, ce qui semble leur donner une structure amorphe. Avec des grossissements plus élevés, les agrégats de sphérules

apparaissent compacts pour les plus petites (Figure 4.29 – b), ou plus filamentaires pour les plus grandes (Figures 4.29 – c et d). Les images présentées dans la figure montrent une morphologie très proche de celles trouvée par Marhaba et al. (Marhaba, et al., 2019) et par Parent et al. (Parent, et al., 2016), pour de particules de suie d'avion et MiniCAST 5201. Même si la morphologie des particules dépend également du type de combustible (Ouf, 2006), les clichés trouvés sont très similaires. En accord avec ces auteurs, la composition chimique de la majeure partie des particules primaires est essentiellement celle du graphite. Cette phase se compose principalement d'hydrocarbures aliphatiques linéaires de chaîne d'environ 5 atomes de carbone.

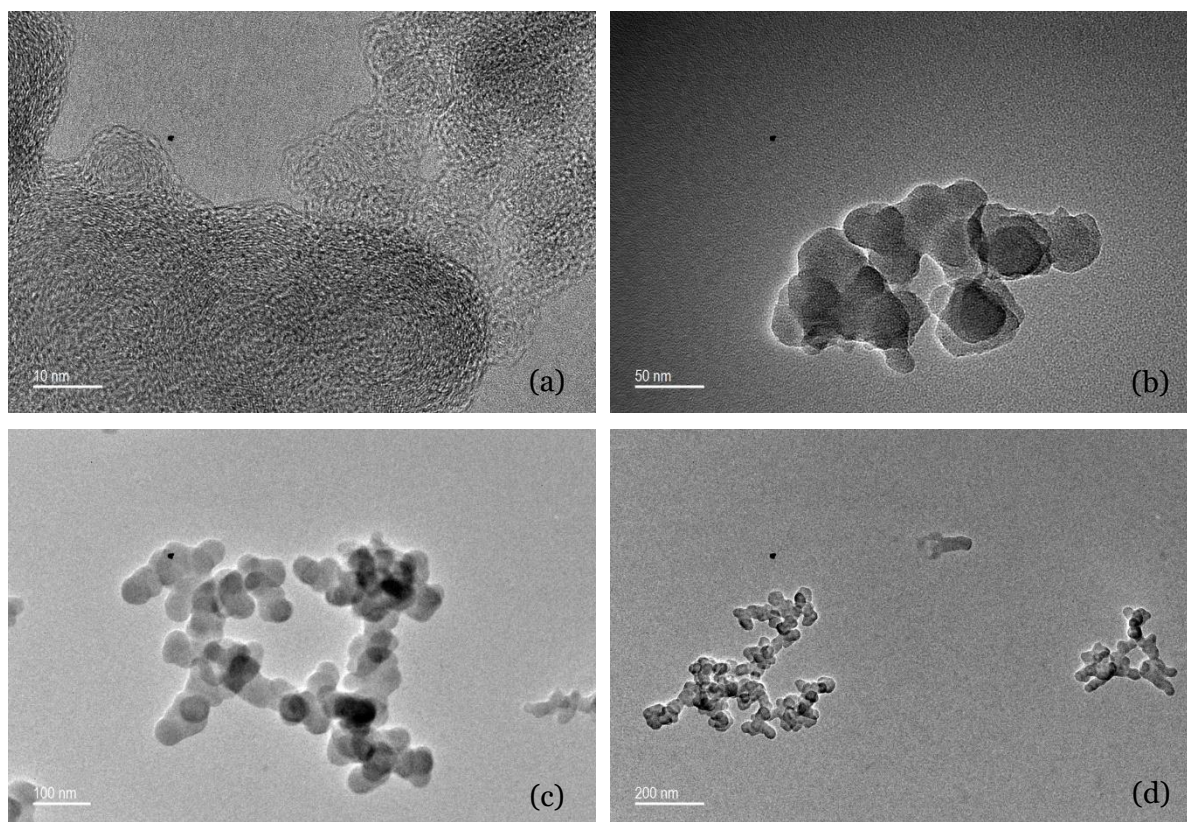


Figure 4.29 - Clichés obtenus par microscopie électronique à transmission de particules de suie de l'huile minérale pour différents grossissements, (a) 10 nm ; (b) 50 nm ; (c) 100 nm ; (d) 200 nm.

4.7. Effet de la nature du bac de combustible

L'objectif de cette section est de présenter l'influence du type de matériau du bac de combustible sur le développement des feux d'heptane et dodécane. Dans le cadre de cette étude, il a été utilisé un bac en acier et en verre de type pyrex de 0.19 m de diamètre. Les deux bacs ont la même hauteur de 90 mm (voir paragraphe 2.2.3). Le débit de ventilation a été fixé

à 9.67 ACPH. Cette configuration permet d'avoir des incendies en condition sous-ventilées. Les résultats présentés, comprennent le taux de perte de masse (MLR), la richesse globale (GER) et les concentrations d'espèces chimiques (O_2 et CO).

4.7.1. Influence de la nature du bac sur la perte de masse (MLR) et la richesse globale (GER)

Nature du bac sur le MLR

Les évolutions temporelles du MLR pour l'heptane et de dodécane sont présentées sur la Figure 4.30. L'heptane (Figure 4.30 – a) présente les tendances suivantes : une première augmentation très courte (environ 20 s), qui correspond à la montée en température du combustible et du bac, puis une diminution jusqu'à un niveau quasi-stable. Les deux types de bac ont eu un comportement similaire pendant les 400 premières secondes de l'incendie. Cependant, au-delà cette période, l'incendie avec le bac en acier a montré une augmentation très significative. Le MLR du bac en verre montre aussi une légère augmentation. Comme montré précédemment, cette croissance dans la courbe de MLR, est attribuée au rayonnement des parois et de la fumée sur le bac. Dans le cas du bac en acier, il y a aussi l'effet des parois du bac sur la surface du liquide « *dit effet du bac* ». La conductivité de l'acier peut également contribuer à l'augmentation du MLR, ce qui ajoute un transfert de chaleur convective latérale des gaz échauffés. Finalement, les deux incendies ont présenté une diminution très rapide jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de combustible.

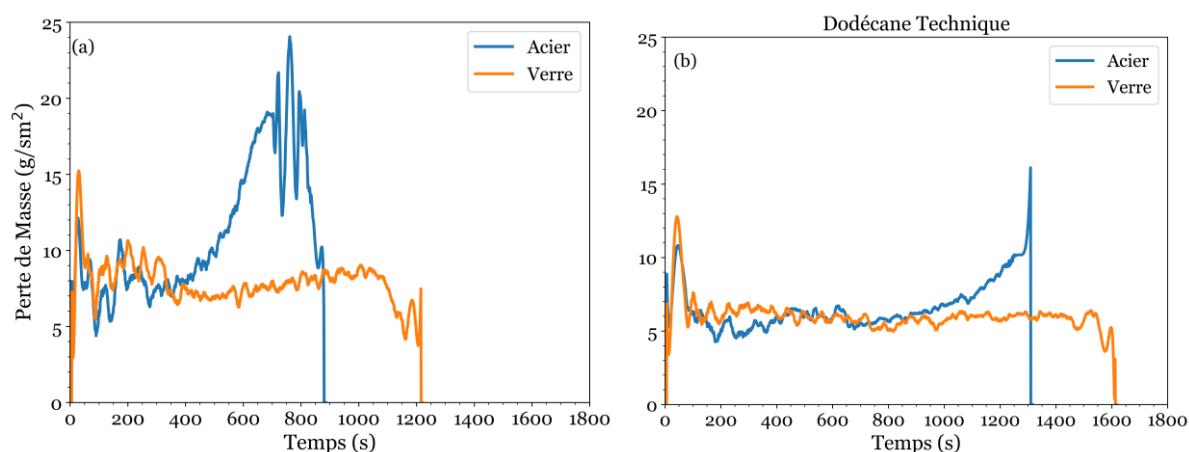


Figure 4.30 - Influence de la nature du bac de combustible sur l'évolution de la perte de masse du combustible au cours du temps, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique. Diamètre du bac de 0.19 m et 9.67 ACPH.

Pour les incendies de dodécane (Figure 4.30 – b), les mêmes observations peuvent être faites. Il a été constaté que les feux se développent de la même façon que celui d'heptane jusqu'à environ 900 s. Au-delà de 900 s, la courbe relative au bac en acier a également augmenté, mais les valeurs observées sont inférieures à celles d'heptane. Cependant, le résultat correspondant au bac en verre a montré un état quasi-stable jusqu'à l'extinction. Il a été conclu que l'utilisation d'un bac en acier ou en verre conduit au même développement de l'incendie, jusqu'à ce que le rayonnement des parois et de la fumée vers la surface du bac et du liquide augmente le taux d'évaporation du combustible. Cet effet semble renforcé dans le cas du bac acier, certainement à cause des réflexions sur les bords, l'acier ayant un coefficient de réflexion important dans l'infrarouge par rapport au verre.

Nature du bac sur le GER

La Figure 4.31 présente les évolutions temporelles de la richesse globale pour les feux d'heptane et de dodécane. Comme attendu, les résultats suivent les mêmes variations que celle de MLR. Au cours des tests et après une période quasi-stationnaire, le MLR augmente, entraînant ainsi une augmentation du GER. Lorsque le bac en acier est utilisé, les deux combustibles montrent une augmentation significative. Le GER varie de 2 à environ 3, indiquant que les incendies se développent dans un milieu fortement sous-ventilé ($GER > 1.5$). On rappelle que la pression différentielle entre l'extérieur et l'intérieur du caisson varie peu pendant ces tests. Cela signifie aussi que le débit d'air varie peu. Les fortes variations du GER au cours d'un test sont essentiellement dues à celle du MLR.

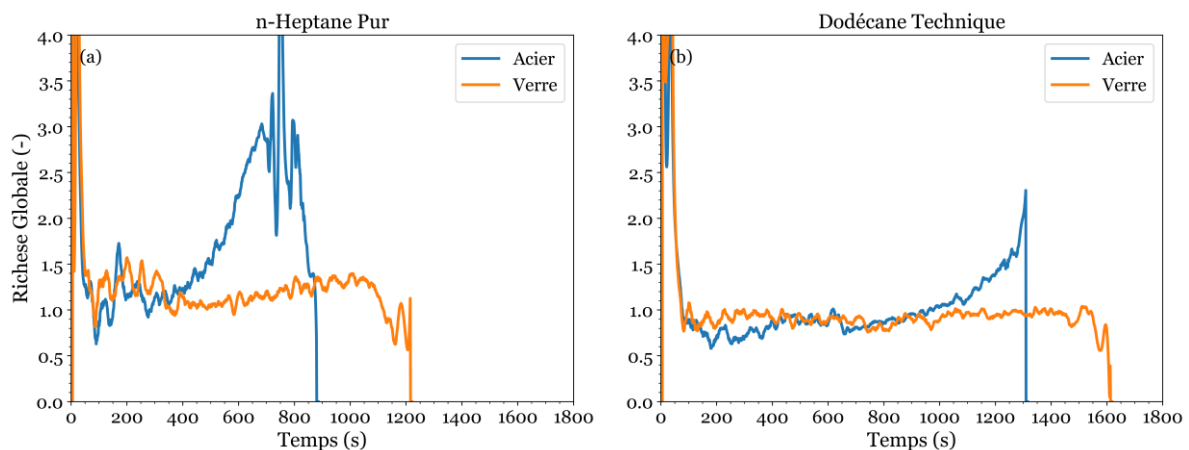


Figure 4.31 - Influence de la nature du bac de combustible sur l'évolution de la perte de masse du combustible au cours du temps. (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique. Diamètre du bac de 0.19 m et RH de 9.67 ACPH.

4.7.2. Influence de la nature du bac sur la concentration d'oxygène et monoxyde de carbone

La Figure 4.32 et la Figure 4.33 montrent l'évolution de la concentration d'oxygène résiduel et du CO dans les fumées pour l'heptane et dodécane avec le bac en acier et en verre de 0.19 m de diamètre. Les résultats entre les deux bacs sont les mêmes jusqu'à ce que le MLR du bac en acier augmente fortement. Dans ce cas, la quantité d'oxygène résiduel diminue considérablement, en atteignant même des valeurs de zéro dans le cas de l'heptane et donc la concentration de CO augmente fortement. Pour le dodécane, ces tendances sont beaucoup moins fortes. En conclusion, il n'y a pas de distinctions appréciables sur l'effet du type de bac pour l'heptane et le dodécane, jusqu'à ce que le rayonnement des parois et de la fumée vers la surface du bac et du liquide augmente le taux d'évaporation du combustible.

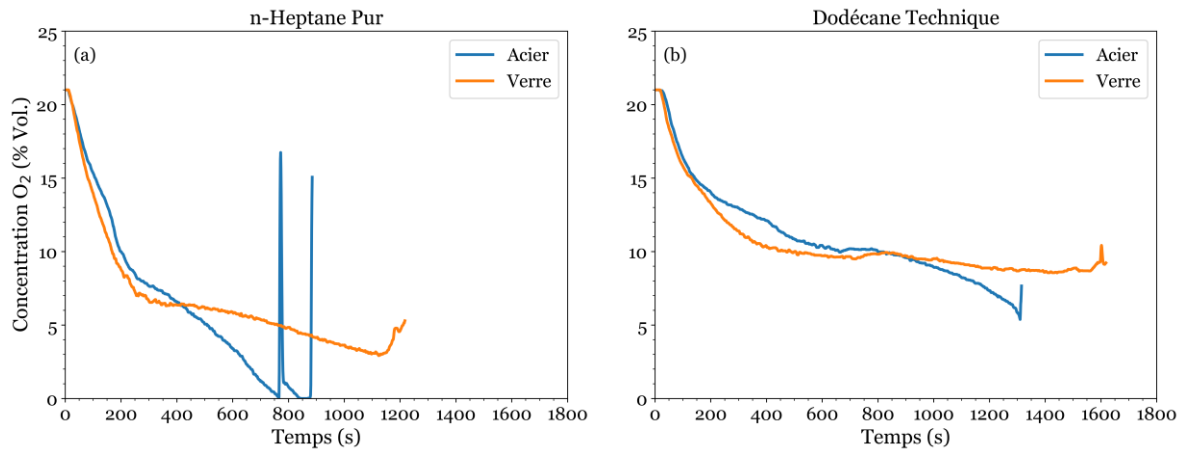


Figure 4.32 - Influence de la nature du bac sur l'évolution de la concentration d'oxygène résiduel. (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique. Diamètre du bac de 0.19 m et RH de 9.67 ACPH.

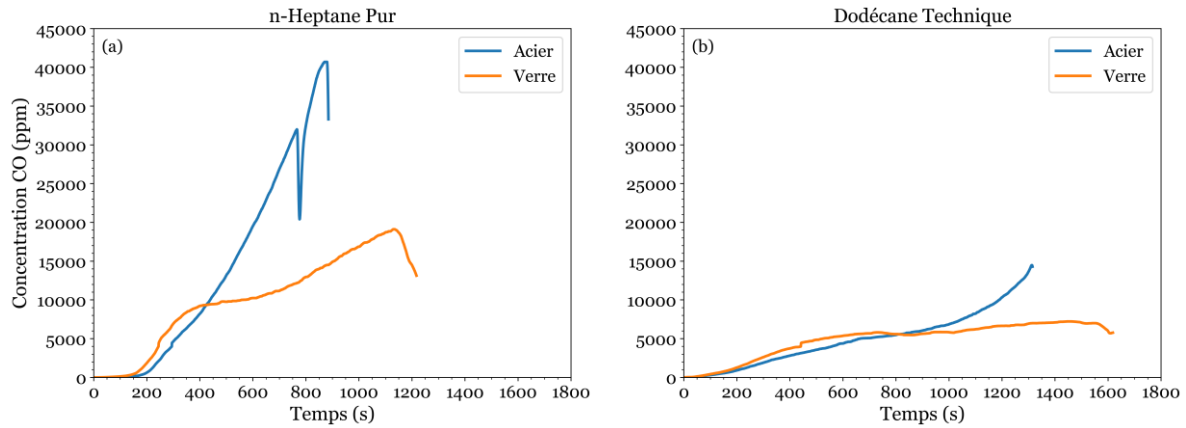


Figure 4.33 - Influence de la nature du bac de combustible sur l'évolution de la concentration CO. (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique. Diamètre du bac de 0.19 m et RH de 9.67 ACPH.

4.8. Effet de la nature du combustible

Dans ce paragraphe, les effets du type de combustible sur caractéristiques des incendies sont étudiés. En effet, dans le Chapitre 3, l'analyse a surtout porté sur l'effet de la ventilation, il est apparu plus intéressant de faire cette analyse dans ce chapitre en utilisant les résultats avec une même ventilation. Donc, il a été considéré le bac en verre pyrex de 0.19 m de diamètre, un taux de ventilation de 9.67 ACPH.

4.8.1. Effet du type de combustible sur le MLR et le GER

La Figure 4.34 illustre l'évolution temporelle du MLR (Figure 4.34 – a) et de la richesse globale (Figure 4.34 – b) pour les quatre combustibles. Sur la base de ces résultats, on trouve que plus la quantité de carbone présente dans l'hydrocarbure est faible, plus le MLR du combustible est important. Un résultat similaire a été trouvé par Loo et al. (Loo, Coppalle, Yon, & Aîné, 2016). Il est clair que l'huile Mobil DTE brûle plus lentement. Les hydrocarbures plus lourds requièrent plus d'énergie pour décomposer les molécules en composés plus simples. Deux observations importantes ont été identifiées : (i) le dodécane et le kérosène présentent des comportements très similaires. (ii) l'huile Mobil DTE a eu le développement le plus stable tout au long de l'incendie.

En ce qui concerne le GER (Figure 4.34 – b), il a aussi été constaté qu'il diminue si la quantité de carbone présente dans l'hydrocarbure augmente, comme attendu. Le débit d'air entrant au compartiment est maintenu constant (ou presque constant, car il diminue légèrement pendant les incendies). Donc, le GER est très contrôlé par le MLR, ce qui fait que

le feu d'heptane se développe sous des conditions nettement moins ventilées ($GER > 1.2$) que les autres combustibles. À l'inverse, dans les mêmes conditions expérimentales, il a été possible d'examiner des incendies qui se développent dans un milieu bien ventilé (huile Mobil DTE).

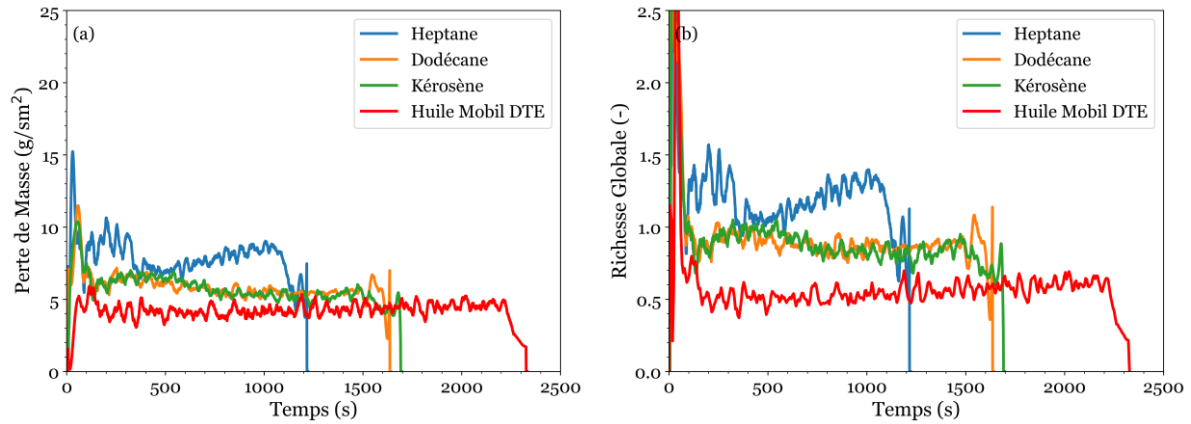


Figure 4.34 - Effet de la nature du combustible sur l'évolution de (a) la perte de masse ; (b) la richesse globale. Diamètre du bac en verre de 0.19 m à 9.67 ACPH.

4.8.2. Effet de la nature du combustible sur la température dans le compartiment

La Figure 4.35 présente une comparaison entre l'évolution de la température pour les quatre combustibles étudiés, (a) dans la zone de la flamme et (b) dans zone des fumées. Le thermocouple dans la zone de la flamme a été placé sur l'axe vertical de la flamme, à environ 20 cm du bac de combustible, alors que le thermocouple dans la zone des fumées chaudes a été placé dans un coin du compartiment, à environ 80 cm du sol.

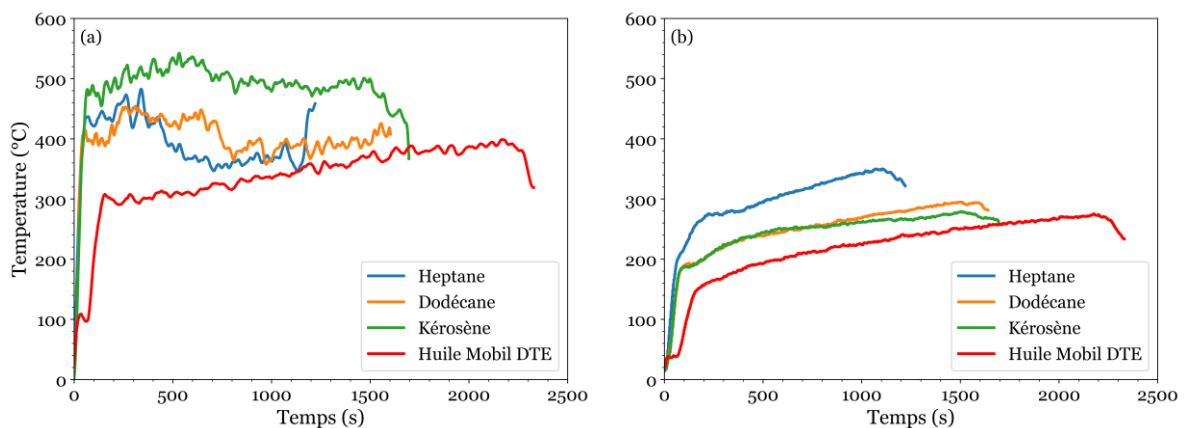


Figure 4.35 - Effet de la nature du combustible sur l'évolution de la température, (a) zone de flamme ; (b) dans les fumées. Diamètre du bac en verre de 0.19 m à 9.67 ACPH.

Comme illustré dans la Figure 4.35, la température des fumées augmente lorsque la quantité de carbone atomique diminue dans la formule chimique du composé. La température dans la fumée est plus importante pour l'heptane que pour les autres combustibles (Figure 4.35 – b). Les températures dans la couche de fumée chaude pour les quatre combustibles ont montré une augmentation continue au cours du temps, sans atteindre un état stable. Cela signifie que les fumées stockent de plus en plus de la chaleur, à cause de la diminution du stockage dans les parois. Cependant, ces comportements ne sont pas vérifiés pour la température sur l'axe central de la flamme. Il a été constaté qu'après l'allumage de l'heptane, du dodécane et du kérosène, la température sur l'axe de la flamme augmente jusqu'à atteindre un plateau, suivi d'une légère diminution, puis d'un état quasi stable. En revanche, pour l'huile Mobil DTE, une augmentation progressive de la température a été observée. Ces températures sont de l'ordre de 380 °C pour l'heptane et le dodécane, 520 °C pour le kérosène et 370 °C pour l'huile Mobil DTE. Les variations de température à une hauteur fixe dans la flamme peuvent s'expliquer par les changements qui s'opèrent dans la zone de flamme. Ceci est attesté par le changement de forme et de couleur de la flamme observés pendant les tests.

4.8.3. Influence de la nature du combustible la concentration d'oxygène et les émissions de monoxyde de carbone et de suie

La Figure 4.36 illustre l'évolution de la concentration d'oxygène résiduel et de monoxyde de carbone dans le conduit d'évacuation de fumée. Les résultats montrent que plus la quantité de carbone contenue dans l'hydrocarbure est faible, moins il existe d'oxygène dans les gaz de combustion et, plus les émissions de monoxyde de carbone sont élevées. En effet, l'heptane est le combustible qui présente le taux d'évaporation le plus élevé, avec des températures les plus fortes. On s'attendait donc à ce que la quantité d'oxygène résiduel soit la plus faible et le CO le plus élevé. En ce qui concerne les autres combustibles, le dodécane et le kérosène montrent des concentrations d'O₂ et de CO comparables. L'huile Mobil DTE, le combustible dit « *le plus lourd* », présente la plus haute quantité d'oxygène résiduel et la plus faible concentration de CO.

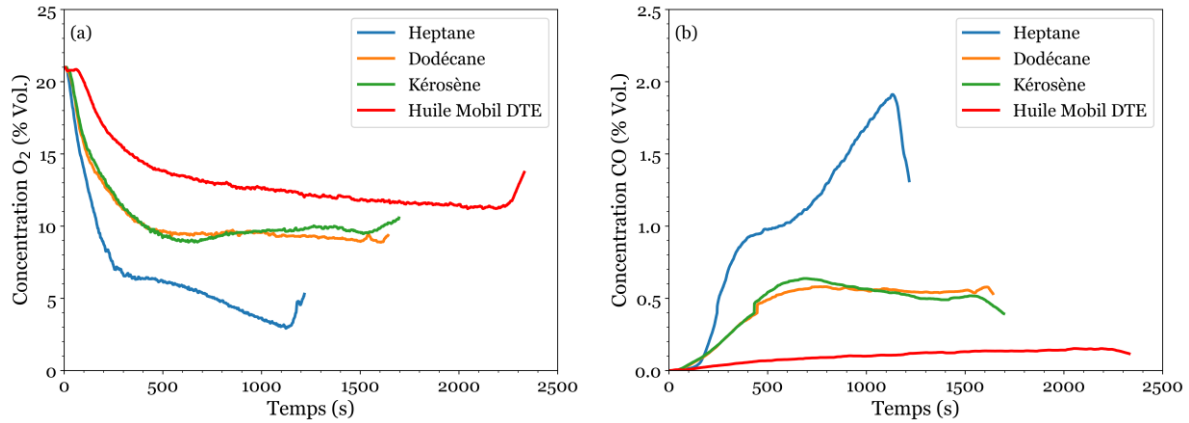


Figure 4.36 - Effet de la nature du combustible sur l'évolution de la concentration (a) oxygène résiduel ; (b) monoxyde de carbone à l'extraction. Diamètre du bac en verre de 0.19 m à 9.67 ACPH.

L'influence de la nature du combustible sur les émissions de particules de suie est présentée sur Figure 4.37. L'heptane est le combustible qui produit le moins de particules de suie. La concentration massique des particules de suie (Figure 4.37 – a) montre un effet particulier, plus marqué pour le kérosène et le dodécane que pour l'huile Mobil DTE et l'heptane. Il est important de rappeler que la production de suie est généralement favorisée dans des conditions bien ventilées. Toutefois, le kérosène et le dodécane se sont développés dans un environnement sous-ventilé ($GER > 0.7$), et ont présenté la plus grande concentration de suie. Comme indiqué précédemment, le GER, qui représente la ventilation globale du compartiment, ne suffit pas pour expliquer ce qui se passe dans la zone de combustion.

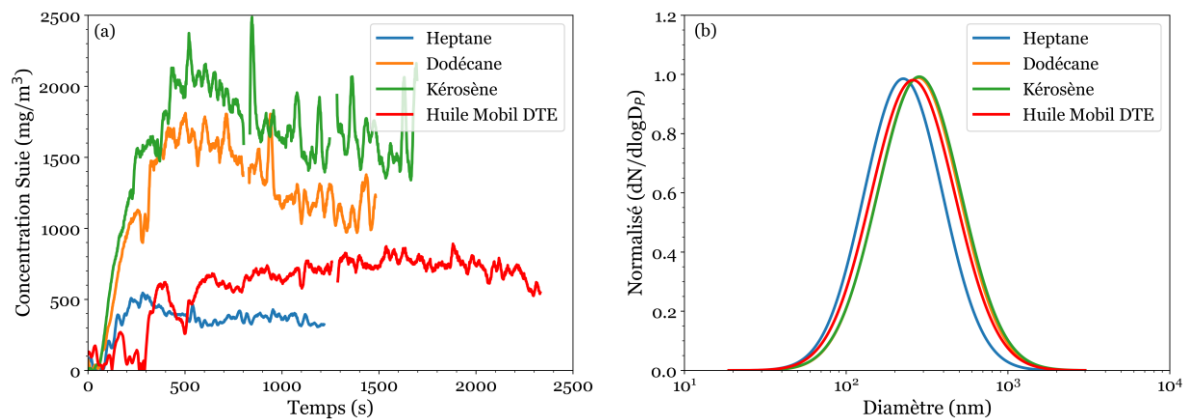


Figure 4.37 - Effet de la nature du combustible sur les particules de suie, (a) concentration massique des particules de suie ; (b) distribution moyenne de la taille des particules de suie. Diamètre du bac en verre de 0.19 m à 9.67 ACPH.

Il faut donc considérer que dans la zone de combustion, la qualité du mélange combustible/air et de la combustion au niveau du foyer, a été suffisamment ventilée pour favoriser la formation de suie. La distribution de particules de suie (Figure 4.37 – b) montre qu'il y a peu de différence entre les diamètres modaux des quatre combustibles. Le Tableau 4.6 résume les paramètres importants de ces distributions.

4.9. Conclusions

Le rôle du diamètre du bac et de la nature du combustible sur le comportement des incendies confinés et mécaniquement ventilés, ont été étudiés expérimentalement. Des mesures ont été réalisées des nappes d'heptane, de dodécane, de kérosène et de l'huile Mobil DTE. Trois diamètres de bac, 0.115, 0.14, 0.19 m ont été utilisés. Comme au Chapitre 3, les données analysées sont le taux de perte de masse, les températures, les concentrations des espèces chimiques (O_2 , CO_2 , CO et particules de suie) et la granulométrie des particules de suie. Ces mesures ont été effectuées à un taux de renouvellement horaire fixe à 9.67 ACPH.

Les paramètres expérimentaux utilisés ont permis d'étudier le développement des feux de nappe dans des conditions bien ventilées et sous-ventilées. Il a été confirmé que les incendies de combustibles liquides dans les compartiments confinés avec ventilation forcée se développent en trois phases distinctes : l'inflammation et la croissance, la période de feu établi, et l'extinction. Les résultats ont montré que le MLR (g/sm^2) de chaque type de combustible diminue légèrement à mesure que le diamètre du bac augmente, tandis le taux d'évaporation (g/s) augmente, comme attendu. Plus le diamètre du bac est grand, plus l'oxygène est consommé lors de la combustion et, par conséquent, le dégagement de chaleur et la température dans le compartiment augmentent. Cela se traduit par une forte recirculation dans la chambre de tests, et donc une alimentation de la flamme avec un air fortement vicié par les gaz de combustion. De plus, l'oxygène résiduel diminue également et les émissions de CO augmentent, se traduisant par une combustion moins efficace. Néanmoins, si le diamètre du bac est petit ($D < 0.14$ m), les conditions dans lesquelles se déroule l'incendie, favorisent les émissions de particules de suie. Il a été constaté que la variation de la taille du bac a un effet minimal sur la taille des agglomérats des particules de suie. Les résultats de l'étude de l'influence de la taille de la nappe, confirment que les particules de suie produites, suivent une distribution log-normale. Dans les conditions d'incendie étudiées, les diamètres modaux des particules de suie se situent entre 237 nm à 296 nm, ce qui indique la présence de grosses particules, favorisée par le phénomène d'agrégation dans la zone de fumée.

La nature du bac combustible (acier ou verre) et du combustible a également été étudié. Il a été trouvé que le matériau du bac a un effet minimal sur le comportement du feu, tant que l'effet du rayonnement des fumées et des parois sur la nappe reste modeste. Par contre, si cet effet apparaît, l'accroissement du MLR est plus important pour le bac en acier que pour celui en verre. En ce qui concerne la nature du combustible, il a été trouvé que si la quantité de carbone présente dans l'hydrocarbure est faible, le MLR du combustible est important. Le MLR est donc plus élevé pour l'heptane que pour les autres combustibles. L'heptane est le plus létal des combustibles en termes de toxicité en CO. Le dodécane et le kérosène présentent une production de CO moins élevée, tandis que l'huile Mobil DTE est le combustible avec la production de CO la plus faible. Par ailleurs, les niveaux d'émission de suie suivent une séquence décroissante : kérosène > dodécane > huile Mobil DTE > heptane.

Chapitre 5

Synthèse des résultats et comparaison avec ceux de la littérature

5.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de comparer certains résultats présentés dans les chapitres précédents avec ceux de la littérature. Les principaux paramètres à analyser sont le MLR, les émissions de CO et de particules de suie. Donc, on déterminera si l'oxygène au niveau de la flamme ou la richesse globale sont les paramètres les plus susceptibles d'influencer le MLR, les émissions de CO et les particules de suie lors des incendies confinés et mécaniquement ventilés à petit échelle. Le CO et les particules de suie sont des produits qui résultent de la combustion incomplète, l'oxygène disponible semble être un paramètre important. Remarque : Afin d'identifier les résultats de chaque chapitre et les présenter dans les figures suivantes, différents symboles ont été utilisés. Les symboles pleins (▲, ●, ■ et ★) représentent les données du Chapitre 3, tandis que les symboles vides (△, ○, □ et ☆) représentent les données du Chapitre 4.

5.2. Perte de masse du combustible

Comme indiqué, le MLR (g/sm^2) est un paramètre important qui contrôle l'intensité des incendies confinés. Le MLR fournit une indication sur la quantité de matière combustible qui est brûlée au cours de l'incendie, et son évolution permet de connaître les étapes de développement de l'incendie. Le MLR peut être utilisé pour déterminer la puissance de l'incendie (un paramètre clé pour examiner le danger de l'incendie), ou pour évaluer la toxicité des produits de combustion. De plus, le MLR est souvent utilisé pour valider les modèles de simulation d'incendie.

Différents auteurs ont montré que le MLR peut être corrélé soit à la richesse globale ou au diamètre du bac pour les incendies ouverts, soit à la concentration d'oxygène au pied de la flamme (Zabetakis & Burgess, 1961; Babrauskas, 1983; Peatross & Beyler, 1997; Melis & Audouin, 2008; Alibert, Coutin, Mense, Pizzo, & Porterie, 2019; Prétrel, Bouaza, & Suard, 2021). Dans cette section, on cherche donc à trouver la corrélation du MLR avec la richesse globale ou avec la concentration d'oxygène à la base de la flamme.

5.2.1. Effet de la richesse globale sur la perte de masse du combustible

La Figure 5.1 montre le MLR en fonction de la richesse globale (GER) pour les quatre combustibles, l'heptane, le dodécane, le kérosène et l'huile Mobil DTE. Les données présentées sont les valeurs expérimentales du MLR moyennées pendant la période de feu établi, et

montrées dans les Chapitres 3 et 4. Certains auteurs ont présenté des graphiques similaires pour des incendies de compartiments avec ventilation naturelle ou mécanique. Melis et Audouin (Melis & Audouin, 2008) ont montré une tendance linéaire entre le MLR et le GER lors des incendies mécaniquement ventilés. Chen et al. (Chen, Lu, & Liew, 2015) montrent que le MLR en fonction du GER lors des incendies naturellement ventilés suit une relation exponentielle décroissante.

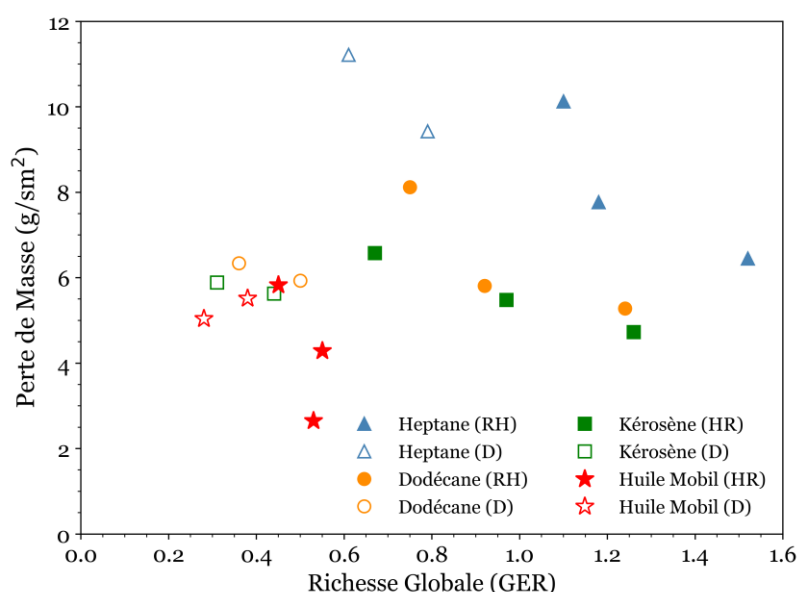


Figure 5.1 - Taux de perte de masse du combustible pendant la période de feu établi en fonction de la richesse globale (GER). ▲ △ heptane, ● ○ dodécane, ■ □ kérosène, ★ ☆ huile Mobil DTE.

Comme illustré dans la Figure 5.1, les données sont très dispersées. Il n'existe donc pas de relation évidente entre le MLR et le GER lors des incendies confinés et mécaniquement ventilés. Selon le coefficient de corrélation de Pearson, égal à 0.187, il peut être considéré que le MLR et le GER ne présentent aucune corrélation. Il faut rappeler que le MLR dépend aussi du diamètre de la nappe et de la nature du combustible, comme cela a été montré dans les Chapitres 3 et 4. Malheureusement le nombre de points obtenus en faisant varier le diamètre est trop faible pour tenter de discriminer ces résultats. Pour ce qui est de l'influence de la nature du combustible, on retrouve bien les tendances observées précédemment, à savoir que c'est l'heptane qui présente les plus fortes valeurs du MLR et l'huile Mobil DTE les plus faibles. Pour l'instant, on peut conclure que le MLR lors des incendies confinés et mécaniquement ventilés, en particulier pour ce compartiment, ne semble pas être corrélé avec le GER sauf si on fait l'analyse pour un diamètre et une combustion donnée.

5.2.2. Effet de la concentration d'oxygène sur la perte de masse du combustible

Comme il a été dit précédemment, l'oxygène disponible pour la combustion est un paramètre important. En effet, elle contrôle le dégagement de chaleur. De plus, si l'oxygène est en quantité insuffisante par rapport à la stœchiométrie ou si elle est mal mélangée aux vapeurs combustibles, il y aura une combustion incomplète et une production d'espèces toxiques. Pour quantifier cet oxygène disponible, on peut prendre la concentration en oxygène au pied de la flamme. Des corrélations ont été développées pour prédire le MLR si la concentration d'oxygène à la base de la flamme est connue. Peatross et Beyler (Peatross & Beyler, 1997), Alibert et al. (Alibert, Coutin, Mense, Pizzo, & Porterie, 2019) ont démontré que le MLR suit une relation linéaire avec la concentration d'oxygène à la base de la flamme. Une tendance similaire a également été proposée par d'autres auteurs (Melis & Audouin, 2008; Chen, et al., 2019; Prétrel, Chaaraoui, Lafdal, & Suard, 2022). La Figure 5.2. présente le MLR, normalisé par la valeur donnée par le foyer libre (MLR_{ouvert}), en fonction de la concentration d'oxygène à la base de la flamme pour les quatre types combustibles étudiés. La normalisation permet de comparer les résultats de différents combustibles en utilisant une même base de référence. La relation linéaire ($MLR/MLR_{ouvert} = 0.1[O_2] - 1.1$) proposée par Peatross et Beyler est également présentée dans la Figure 5.2 (ligne noire).

Les résultats expérimentaux actuels de l'heptane, du dodécane, du kérosène et de l'huile Mobil DTE sont également comparés à certaines données de la littérature pour d'autres types de combustibles. Comme attendu, le MLR normalisé augmente avec la concentration d'oxygène disponible. Il faut rappeler que les valeurs représentatives du MLR, reportés sur la Figure 5.2, ne sont pas forcément définies rigoureusement de la même façon. Néanmoins, les données, telles que fournies par les auteurs, sont légèrement dispersées, ce qui rend difficile la proposition d'une nouvelle relation entre le MLR normalisé et la concentration d'oxygène au pied de la flamme, et qui ne prend pas en compte le type de combustible. Cependant, si l'on considère un combustible spécifique, par exemple l'heptane, on constate que les données semblent respecter une tendance linéaire. Cette étude a trouvé une nouvelle corrélation pour l'heptane, $MLR/MLR_{ouvert} = 0.08[O_2] - 0.68$. Par ailleurs, la corrélation d'Alibert et al. (Alibert, Coutin, Mense, Pizzo, & Porterie, 2019) pour l'heptane est $MLR/MLR_{ouvert} = 0.079[O_2] - 0.7$, qui est en bonne accord avec la corrélation présentée dans cette étude.

Les résultats présentés sur la Figure 5.2 suggèrent que la relation entre le MLR et l'oxygène à la base de la flamme dépend également des autres facteurs, tels que, le taux de ventilation, la taille du bac, la nature du combustible, la taille et le type du compartiment. En ce qui concerne ces deux facteurs, il a été constaté l'existence d'une forte recirculation dans le compartiment, ce qui entraîne une viciation importante de l'air alimentant la flamme, ou ce

qui permet à une partie de l'air admise dans le caisson de sortir directement sans alimenter la zone de combustion. On a vu que la température de la fumée et le rayonnement des parois et de la fumée vers la surface du liquide peut augmenter de façon significative le MLR. Enfin, la quantité d'oxygène détectée au pied de la flamme est sensible à la position de la sonde de prélèvement de l'oxygène, car il existe des gradients horizontaux important dans cette zone.

Comme indiqué dans les Chapitres 3 et 4, les incendies s'éteignent par manque de combustible. Il existe un équilibre entre l'oxygène fourni au compartiment et l'oxygène consommé pendant la combustion. Par conséquent, la concentration limite d'oxygène (LOI) n'est jamais atteinte dans tous les essais. Les valeurs de la concentration limite d'oxygène pour les combustibles liquides sont limitées dans la littérature. Les références (Simmons & Wolfhard, 1957; Beyler C. , 2016) donnent des valeurs de LOI pour l'hexane, l'octane et le décane d'environ 13.3 % et 13.5 %. Les concentrations d'oxygène les plus faibles mesurées à la base de la flamme pour l'heptane, le dodécane et le kérosène se situent entre 14 % et 16 %, ce qui est supérieur aux valeurs précédentes.

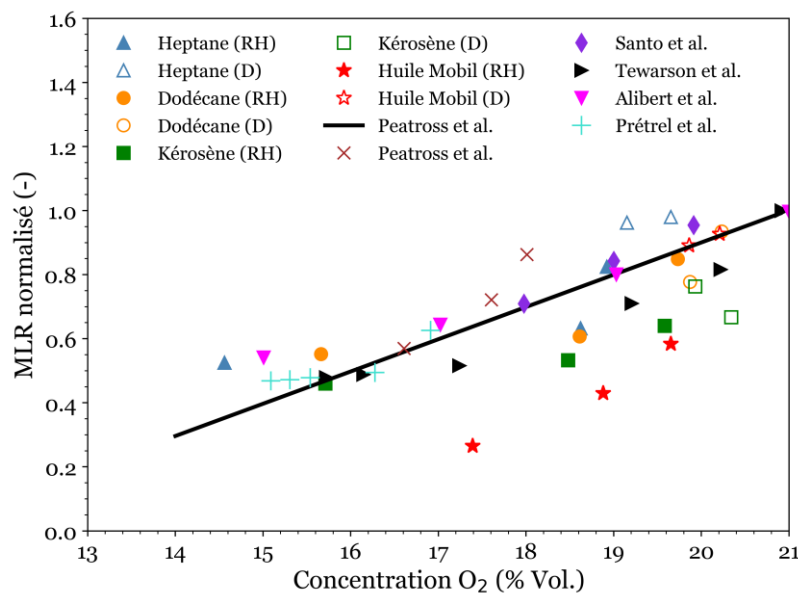


Figure 5.2 - Taux de perte de masse normalisé par la valeur donnée par le foyer libre MLR_{ouvert} en fonction de la concentration d'oxygène à la base de la flamme. ▲ ▲ heptane, ● ○ dodécane, ■ □ kérosène, ★ ☆ huile Mobil DTE. Littérature : × Diesel, D = 0.6 m (Peatross & Beyler, 1997) ; ◆ PMMA, D = 0.3 m (Santo & Tamanini, 1981) ; ► Heptane, D = 0.1 m (Tewarson A. , 2002) ; ▼ Heptane, D = 0.2 m (Alibert, Coutin, Mense, Pizzo, & Porterie, 2019) ; + Dodécane, D = 0.19 m (Prétrel, Chaaraoui, Lafdal, & Suard, 2022).

5.3. Monoxyde de carbone

En général, la production de CO est influencée par le MLR, la ventilation et la viciation de l'air au pied de la flamme. Lors d'un incendie dans un milieu confiné, la concentration d'oxygène à la base de la flamme et dans le local diminuent. Par conséquent, la formation d'une atmosphère sous-ventilée augmente le taux de gaz imbrûlés. Notamment, le CO augmente. Cette section analyse comment l'oxygène au pied de la flamme et le GER peuvent affecter la production de CO lors des incendies dans des espaces confinés. Des comparaisons avec la littérature sont également présentées. Ainsi, des comparaisons avec les résultats observés par Beyler (Beyler C. L., 1986) et Gottuk et al. (Gottuk D. T., Roby, Peatross, & Beyler, 1992) sont également effectuées.

5.3.1. Quelques points importants sur la production de CO dans un foyer sous-ventilé

La Figure 5.3 présente trois dispositifs expérimentaux qui ont été utilisés pour étudier les émissions de CO dans le cas d'un foyer sous-ventilé. (a) brûleur et hotte de Beyler (Beyler C. L., 1986), (b) compartiment naturellement ventilé de Gottuk et al. (Gottuk D. T., Roby, Peatross, & Beyler, 1992) et (c) compartiment mécaniquement ventilé (actuel). Des recherches précédentes ont montré que le taux de production de monoxyde de carbone (Rendement : Y_{CO}) peut être corrélé avec le GER (Beyler C. L., 1986; Zukoski, Morehart, Kubota, & Toner, 1991; Gottuk D. T., Roby, Peatross, & Beyler, 1992). Toutefois, une analyse plus fine a aussi établi que la production de CO peut être corrélée à la richesse du panache (Φ_p), ou à la richesse de la couche supérieure (Φ_l), ou la richesse globale (Φ_g), cette dernière s'exprimant en fonction du GER. En général, ces trois concepts sont équivalents (Zukoski, Morehart, Kubota, & Toner, 1991). Mais comme la richesse du panache (Φ_p) ou à la richesse de la couche supérieure (Φ_l) ne sont pas des paramètres facilement observables, c'est surtout avec le GER que des corrélations ont été extraites à partir des mesures obtenues avec les dispositifs de la Figure 5.3.

Cependant, il a été établi que ces corrélations Y_{CO} en fonction du GER dépendent également de la température de la couche de fumée. La température maximale dans la couche de fumée chaude atteinte dans le dispositif de Beyler a été d'environ 600 K (Figure 5.3 – a). Gottuk et al. ont réalisé leurs expériences dans un compartiment cubique de 2.2 m³ (Figure 5.3 – b). La température de la couche de fumée atteinte par les incendies de Gottuk et al. est au-dessus de 900 K. Dans la présente étude (Figure 5.3 – c), les essais ont été réalisés dans un compartiment cubique mécaniquement ventilé de 1 m³. Les températures maximales dans la couche de fumée chaude sont inférieures à 673 K (voir paragraphe 3.4.3 et 4.3.3).

En tenant compte des résultats obtenus dans ces trois types d'études, trois points doivent être mis en avant.

1. Dépendance de l'intensité de la réaction d'oxydation du CO en fonction de la température

Si, $T > 800 \text{ K}$: la conversion du CO en CO_2 ($\text{CO} + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \dots$) dans la couche de fumée peut avoir lieu (Gottuk, Roby, & Beyler, 1995).

Mais, si $\text{GER} > 1.5$: la réaction $\text{C}_x\text{H}_y + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + \dots$, favorise la formation de CO. Par contre la réaction $\text{CO} + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \dots$ n'est pas favorisé.

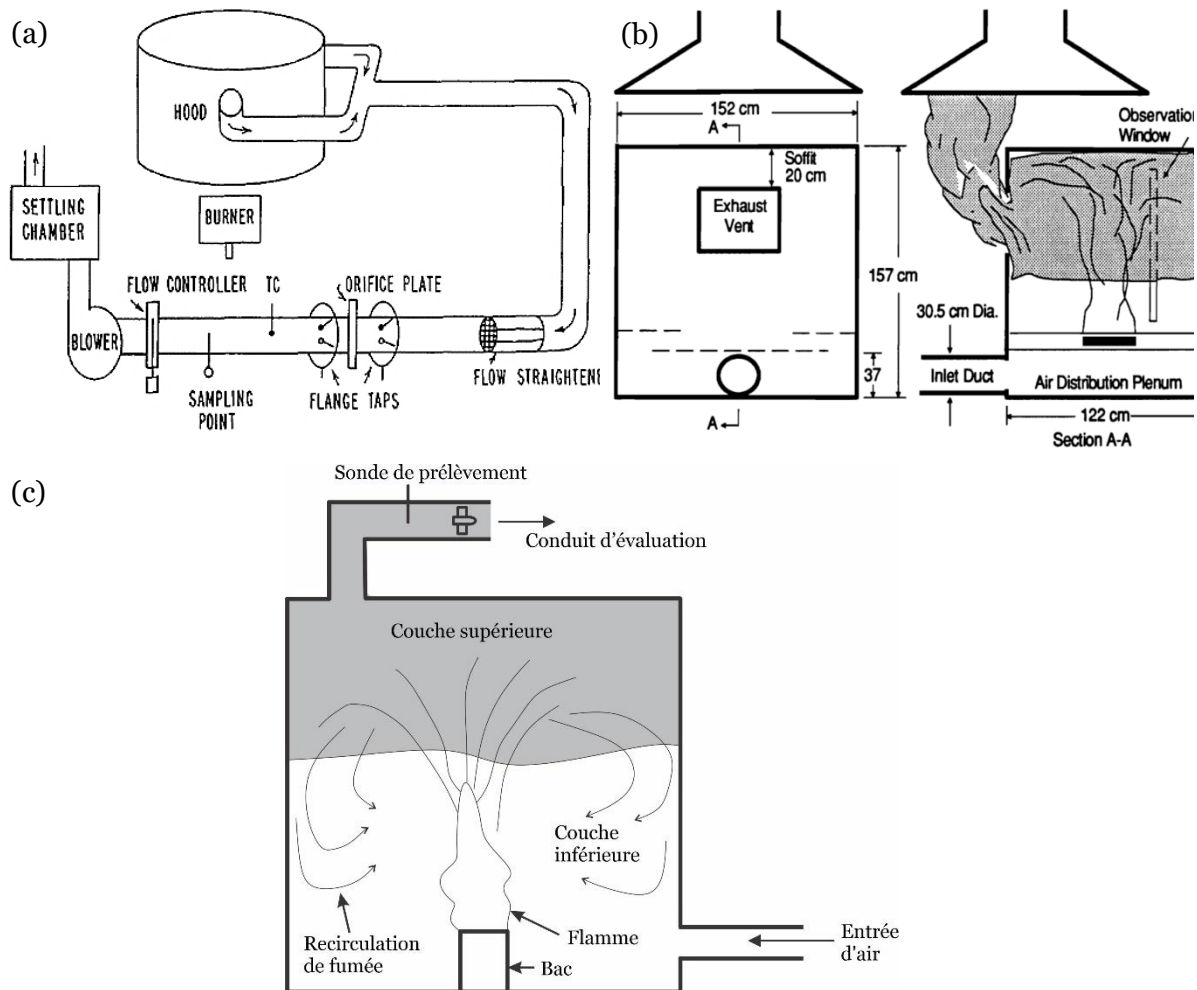


Figure 5.3 - Comparaison entre dispositifs expérimentaux. (a) bruleur et hotte (Beyler C. L., 1986) ; (b) compartiment naturellement ventilé (Gottuk D. T., Roby, Peatross, & Beyler, 1992) ; (c) compartiment mécaniquement ventilé (actuel).

2. Réactivité d'une zone de fumée chaude

Beyler et Gottuk et al. montrent que, si $T > 800$ K, le CO peut être oxydé, même si les temps de séjour sont courts ($t = 20$ s à 30 s) (Beyler C. L., 1986; Gottuk D. T., Roby, Peatross, & Beyler, 1992; Gottuk & Lattimer, 2016).

3. Résultats expérimentaux actuels

- $T \sim 473$ K à 673 K
- $GER < 1.52$
- Temps de séjour à 4.83 ACPH et 17.8 ACPH : $t = 745$ s à 202 s

Les conditions utilisées pour ce travail ont donc donné des températures dans la couche de fumée chaude relativement basses, similaires à celles obtenues dans les études Beyler (Figure 5.3 – a), mais avec des temps de séjour un peu plus longs.

Une question se pose : La viciation de l'air a-t-elle une influence

- Sur la production de CO ?
- Sur la production de particules de suie ?

Enfin, il faut rappeler que d'autres auteurs ont montré que la concentration de CO peut être corrélée avec la concentration d'oxygène résiduel dans les fumées (Lassus J. , et al., 2014).

5.3.2. *Rendement de CO et sa corrélation avec la richesse globale (GER)*

La Figure 5.4 montre le rendement de CO (Y_{CO}) en fonction du GER pour les quatre combustibles étudiés, l'heptane, le dodécane, le kérosène et l'huile Mobil DTE, ainsi que les données sur l'hexane de Beyler et Gottuk et al. Sur la base des résultats reportés sur la Figure 5.4, Beyler (Beyler C. L., 1986) et Gottuk et al. (Gottuk D. T., Roby, Peatross, & Beyler, 1992) montrent que le Y_{CO} est corrélé avec le GER. Les deux courbes en noire correspondent aux formules semi-empiriques données par Beyler et Gottuk et al (cf. Équation 1.31 et 1.32).

On rappelle que le Y_{CO} de Beyler correspond à des températures dans la couche de fumée chaude en dessous de 600 K, tandis que le Y_{CO} de Gottuk et al. correspond à des températures au-dessus de 900 K. La couche chaude est considérée comme réactive (capable de convertir le CO en CO_2) lorsque sa température dépasse 900 K (Gottuk D. T., Roby, Peatross, & Beyler, 1992). Dans le cas contraire, elle est non réactive. Si l'on considère les profils de température à l'intérieur du compartiment actuel (< 680 K), la couche supérieure de fumée peut être considérée comme une couche chimiquement non réactive. Le CO présenté dans la Figure 3.19 et la Figure 4.11 est supposé avoir été généré dans la zone de flamme.

Dans les conditions bien ventilées ($GER < 0.7$), Beyler a observé un Y_{CO} plus élevé que Gottuk et al., alors que Gottuk et al. ont trouvé un Y_{CO} plus élevé que Beyler dans des conditions sous-ventilés ($GER > 0.7$). Les résultats obtenus pour le Y_{CO} du dodécane, du kérosène et de l'huile Mobil DTE sont cohérents avec ceux de Beyler, lorsque les feux se développent dans des conditions bien ventilées. La corrélation de Beyler pourrait être utile pour déterminer le Y_{CO} (cf. Équation 1.32). En revanche, dans les mêmes conditions, les niveaux de Y_{CO} de l'heptane sont plus proches de ceux de Gottuk et al. Pour les valeurs de GER comprises entre 0.7 et 1.2, le Y_{CO} augmente progressivement. Les résultats de l'heptane, du dodécane et du kérosène se situent entre la courbe de Beyler et Gottuk et al. Notamment le dodécane et kérosène suivent la même tendance. Même si la température dans la couche de fumée chaude produite par les combustibles est relativement faible par rapport à celles de Beyler et Gottuk et al., la transition entre les deux courbes est en effet évidente. En accord avec Pitts (Pitts, 1995). Pour les valeurs supérieures à 0.7, le GER ne suffit pas pour prédire le Y_{CO} .

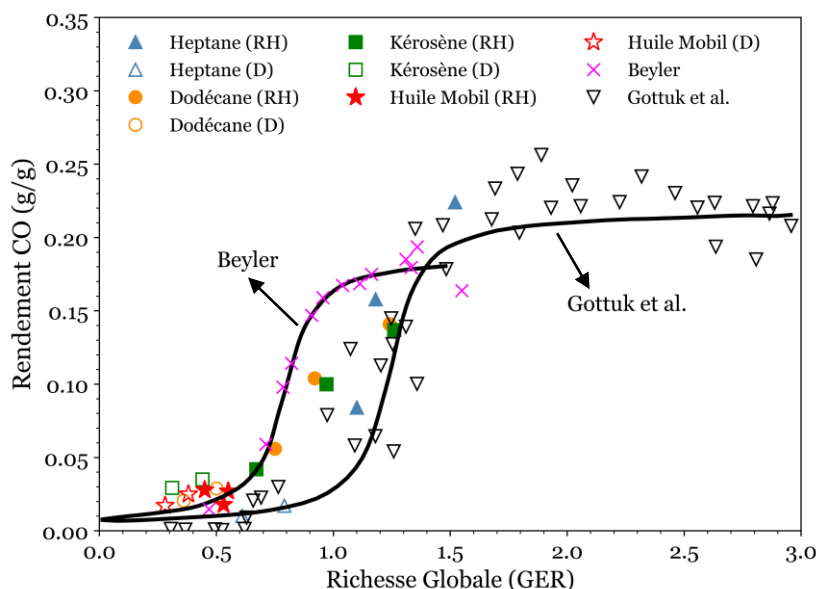


Figure 5.4 - Rendement en monoxyde de carbone (Y_{CO}) en fonction de la richesse globale (GER). \blacktriangle \triangle heptane, \bullet \circ dodécane, \blacksquare \square kérosène, \star \star huile Mobil DTE. Comparaison avec les données de Beyler (Beyler C. L., 1986) (\times) et Gottuk et al. (Gottuk D. T., Roby, Peatross, & Beyler, 1992) (∇) avec l'hexane.

Pour un GER élevé ($GER \geq 1.2$), le Y_{CO} de l'heptane coïncide avec les résultats de l'hexane de Gottuk et al. Des températures plus basses dans la couche de fumée ont généré des émissions de CO du même ordre de grandeur que celles de Gottuk et al. Il est donc possible que ces niveaux de CO résultent de la recirculation et du long temps de séjour de la fumée à

l'intérieur du compartiment. En effet, lors des incendies confinés avec ventilation mécanique fixée, le GER varie très peu. Cependant, dans certaines conditions expérimentales telles que l'utilisation d'heptane à 17.8 ACPH, la production de CO augmente avec le temps sans atteindre une phase stable. Les variations du Y_{CO} à GER presque constant mettent en évidence les faiblesses du concept de GER pour prédire le Y_{CO} .

Comme montré dans la Figure 5.4, le rôle de la température de la couche de fumée n'est pas clair. Étant donné que les températures actuelles sont plus proches des températures de Beyler, on s'attend à ce que les données suivent la corrélation Beyler, ce qui n'est pas le cas. Néanmoins, il apparaît que la production de CO est sensible à la structure du combustible. Des faibles émissions de CO ont été observées pour les hydrocarbures lourds. Les émissions de CO issues des incendies confinés dépendent également de la géométrie de l'enceinte. Bryner et al. (Bryner, Johnsson, & Pitts, 1995) ont analysé les émissions de CO dans des compartiments à petite et grande échelles. Il a été montré que les niveaux de monoxyde de carbone dans le compartiment à grande échelle sont deux fois plus élevés que ceux à petites échelles. En accord avec les auteurs, ce résultat a été attribué aux températures élevées dans la couche de fumée chaude dans le compartiment à grande échelle.

5.3.3. Rendement de CO et corrélation avec l'oxygène à la base de la flamme

La Figure 5.5 présente le Y_{CO} moyenné sur la période de feu établi en fonction de la concentration d'oxygène à la base de flamme. Les résultats semblent suivre deux tendances. Pour l'heptane, le dodécane et le kérosène, le Y_{CO} tend à augmenter linéairement avec la diminution de l'oxygène à la base de la flamme. Ce qui a déjà été observé par Mulholland et al. (Mulholland, Janssens, Yusa, Twilley, & Babrauskas, 1991). La ligne noire en pointillé montre une tendance possible entre le Y_{CO} et la concentration d'oxygène à la base de la flamme pour ces trois combustibles. Pour l'huile Mobil DTE, le Y_{CO} varie peu. Pour ce combustible, la variation de la concentration en oxygène à la base de la flamme a un effet négligeable. De même que pour les résultats présentés dans le paragraphe précédent, la production de CO est corrélée à la disponibilité de l'oxygène au pied de la flamme, mais elle dépend aussi de la nature du combustible.

En comparant les combustibles, on trouve que le Y_{CO} maximal (0.23 g/g) est observé pour l'heptane avec une concentration d'oxygène d'environ 14.8 %. Le dodécane et le kérosène présentent des Y_{CO} comparables. L'huile Mobil DTE présente les valeurs les plus faibles, dans l'intervalle de concentration en oxygène de 17.4 % à 20.2 %, il a été observé un Y_{CO} d'environ 0.04 g/g. Ce combustible a un comportement distinct par rapport aux autres combustibles.

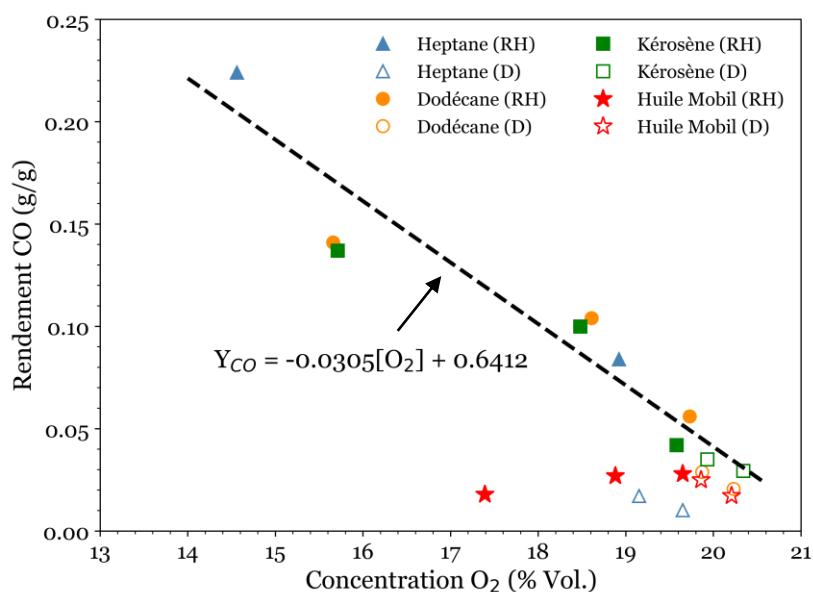


Figure 5.5 - Rendement en CO en fonction de la concentration d'oxygène à la base de la flamme. ▲ △ heptane, ● ○ dodécane, ■ □ kérosène, ★ ☆ huile Mobil DTE.

5.3.4. Rapport $[CO]/[CO_2]$ et sa corrélation avec la richesse globale (GER)

La production importante de CO est liée à une faible efficacité de la combustion dans la zone de flamme. Cela est assez bien quantifié par le rapport $[CO]/[CO_2]$. La Figure 5.6 présente le rapport $[CO]/[CO_2]$ en fonction du GER. Les données correspondent à celles des quatre combustibles et aussi à celles de Gottuk et al. (Gottuk D. T., Roby, Peatross, & Beyler, 1992) avec l'hexane, le PMMA (poly méthacrylate de méthyle acrylique), l'épicéa et le polyuréthane. Les résultats montrent que dans des conditions bien ventilées ($GER < 0.7$) et sous-ventilées ($GER > 0.7$), il existe un bon accord entre les résultats actuels et les résultats de Gottuk et al. Cependant, à $GER > 1.2$, les seuls résultats de cette étude, sont ceux de l'heptane. Il a été constaté que les données relatives à l'heptane exhibent la même tendance que celle observée pour l'hexane et le PMMA. Lors des incendies sous-ventilés, des valeurs élevées du rapport $[CO]/[CO_2]$ ont été observées par Gottuk et al, atteignant 0.48 et 0.43 pour le PMMA et l'hexane, respectivement. Pour l'heptane, dans des conditions sous-ventilées ($1.1 < GER \leq 1.5$), la valeur maximale du rapport $[CO]/[CO_2]$ est d'environ 0.15.

Il a été constaté que pour les incendies d'hexane et de PMMA, Beyler a observé des valeurs plus élevées du rapport $[CO]/[CO_2]$ pour des conditions de ventilation similaires. Cela indique que la combustion est moins complète pour ces combustibles que pour l'heptane. Il convient de noter que la ventilation du foyer joue un rôle important dans la combustion. La combustion peut être plus efficace lors des incendies confinés mécaniquement ventilés que

dans les incendies en hotte ou naturellement ventilés. Ainsi, il est important de prendre en compte les conditions de ventilation lors de l'analyse des résultats expérimentaux et de leur interprétation.

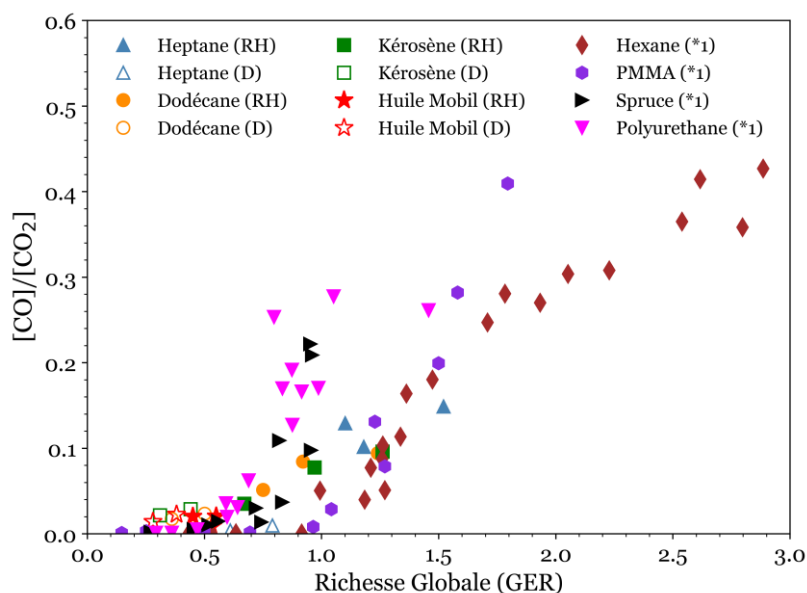


Figure 5.6 - Relation entre le rapport $[CO]/[CO_2]$ et la richesse globale (GER). ▲ △ heptane, ● ○ dodécane, ■ □ kérosène, ★ ☆ huile Mobil DTE. Les données *1 ont été récupérés de (Gottuk D. T., Roby, Peatross, & Beyler, 1992).

5.4. Particules de suie

Cette section aborde les émissions de particules de suie, ainsi que les paramètres susceptibles d'influencer la formation de suie lors des incendies confinés et mécaniquement ventilés. Il est important de trouver une corrélation qui permet d'estimer les émissions de particules de suie lors des incendies. La démarche est la même que celle déployée pour le CO. Cette section analyse comment l'oxygène au pied de la flamme et le GER peuvent affecter la production de suies lors des incendies dans des espaces confinés. Des comparaisons avec la littérature sont également présentées.

5.4.1. Rendement en suie et sa corrélation avec la richesse globale (GER)

La Figure 5.7 présente le rendement en suie (Y_s) moyenné sur la période de feu établi en fonction du GER pour les quatre combustibles étudiés. Les chapitres précédents ont montré que la production de suie dépend du GER, et aussi de la nature du combustible. Les résultats de la Figure 5.7 indiquent qu'il y a apparemment une forte diminution de Y_s avec

l'augmentation du GER, bien que les données soient limitées et assez dispersées. Dans le régime sur-ventilé ($0.2 \leq \text{GER} \leq 0.8$), on observe que le Y_s diminue à mesure que le GER augmente. Cependant, lorsque le $\text{GER} \geq 0.8$ (régimes sous-ventilés et très sous-ventilés), le Y_s est relativement constant. À faible GER, le dodécane, le kérosène et l'huile Mobil DTE présentent systématiquement des valeurs de Y_s élevées. L'heptane présente des Y_s très faibles et relativement constantes, d'environ 0.015 g/g. La ligne noire en pointillés montre la tendance entre Y_s et GER. Le Y_s tend à diminuer quasi-exponentiellement avec le GER, jusqu'à atteindre un état quasi constant. Dans une autre étude similaire à la présente, Ko et al. (Ko, et al., 2009) ont montré que pour l'heptane, le toluène et le polystyrène, le Y_s augmente avec la richesse locale. Cependant, le compartiment utilisé était ventilé naturellement et la mesure de la concentration en suies a été réalisée par gravimétrie (dépôt sur filtre), méthode qui donne des résultats avec beaucoup d'incertitudes. Pour l'heptane, les valeurs de Y_s mesurées ont été beaucoup plus élevées et la richesse locale atteignait des valeurs jusqu'à 3.5. Il faut rappeler que la richesse locale est obtenue à partir des concentrations mesurées sur toutes les espèces, alors que le GER est donné par la mesure des débits de combustible et d'air entrant.

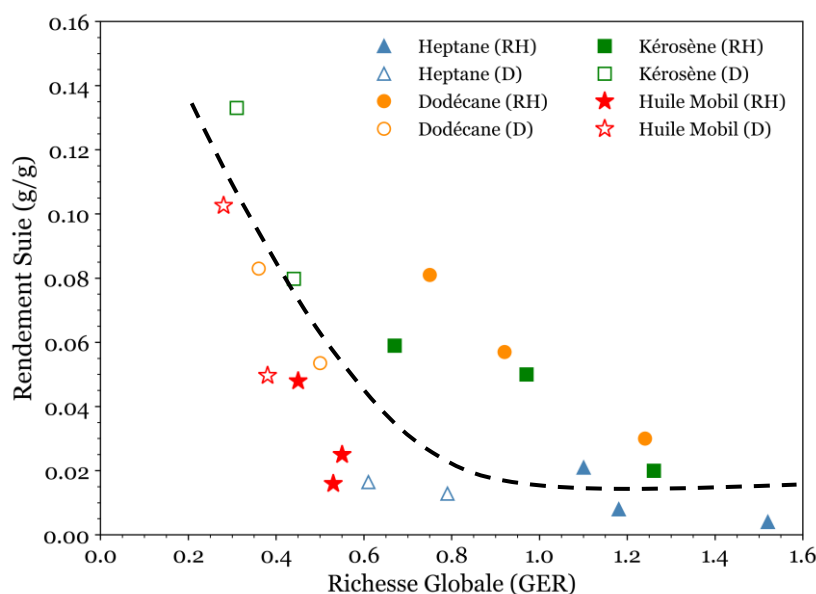


Figure 5.7 - Rendement en suie (Y_s) en fonction de la richesse globale (GER). ▲ △ heptane, ● ○ dodécane, ■ □ kérosène, ★ ☆ huile Mobil DTE.

Si l'on compare les résultats pour Y_{CO} (Figure 5.4) et ceux pour Y_s (Figure 5.7), on peut constater que, pour les résultats obtenus dans ce travail, la dispersion est plus grande dans le cas des suies par rapport au cas du CO, et que les différences entre les combustibles sont plus significatives. La Figure 5.7 ne présente pas de mesures pour un $\text{GER} < 0.3$, mais il est évident que le Y_s doit diminuer jusqu'à zéro pour un faible GER. Cependant, les résultats de la Figure

5.4 et de la Figure 5.7 soulignent que, pour $GER < 1$, il existe une forte production de suie et une faible production de CO. L'inverse est observé pour $GER > 1$. Léonard et al. (Léonard, Mulholland, Puri, & Santoro, 1994) ont également constaté cette tendance entre les productions de CO et de suie. Ils ont montré que la production maximale de suie se produit à une richesse globale inférieure à 1. En revanche, pour le CO, le maximum se produit pour une richesse globale supérieure à 1.

La Figure 5.8 présente la relation entre le rapport Y_{CO}/Y_S en fonction du GER pour les quatre combustibles étudiés. Le rapport Y_{CO}/Y_S tend à augmenter avec le GER. En général, lorsque le GER est inférieur à environ 0.8 (foyer sur-ventilé), le rapport Y_{CO}/Y_S est inférieur à 1. Cependant, pour une $GER > 0.8$ (foyer sous-ventilé), le rapport Y_{CO}/Y_S est supérieur à 1. La ligne pointillée montre la tendance entre Y_{CO}/Y_S et le GER. Le Y_{CO}/Y_S tend à augmenter exponentiellement avec le GER. Il existe peu d'études qui ont mesuré simultanément les rendements en CO et en suie dans des compartiments mécaniquement ventilés. Néanmoins, Aljumaiah et al. (Aljumaiah, Andrews, Jimenez, Duhoon, & Phylaktou, 2014) ont mesuré les rendements en CO et en suie pour des feux d'heptane et de kérosène dans un compartiment de 1.6 m³. Leurs résultats ont permis de calculer le rapport Y_{CO}/Y_S , et des valeurs > 1 ont été obtenues dans un régime sous-ventilé. De plus, pour le kérosène, le rapport Y_{CO}/Y_S semble augmenter linéairement avec le GER. Pour des incendies naturellement ventilés, Ukleja et al. (Ukleja, Delichatsios, Delichatsios, & Lee, 2008) ont trouvé des valeurs du rapport Y_{CO}/Y_S allant de 2.1 – 13.2 pour des feux de propane avec un $GER > 1$. Il est évident que le rapport Y_{CO}/Y_S augmente avec le GER. Gottuk et al. (Gottuk D. T., Roby, Peatross, & Beyler, 1992) ont utilisé un compartiment naturellement ventilé de 2.2 m³. Ils ont trouvé un rapport Y_{CO}/Y_S de 1.5 pour un $GER = 1$. En utilisant des combustibles solides dans un calorimètre à cône modifié, Mulholland et al. (Mulholland, Janssens, Yusa, Twilley, & Babrauskas, 1991) ont obtenu un rapport Y_{CO}/Y_S d'environ 0.43 dans des conditions ambiantes ($GER < 0.3$). Par ailleurs, Köylü et al. (Köylü & Faeth, 1991) ont trouvé un rapport Y_{CO}/Y_S d'environ 0.79 lors des incendies de nappes dans des conditions sur-ventilées. À partir de la littérature disponible et des résultats de la présente étude, il apparaît y avoir une production préférentielle de CO ou de suie en fonction des conditions de ventilation du foyer. Lorsque le feu est bien ventilé, la formation de suie est favorisée par rapport à celle de CO. Par contre, dans les foyers sous-ventilés, la formation de CO est favorisée par rapport à celle de suie.

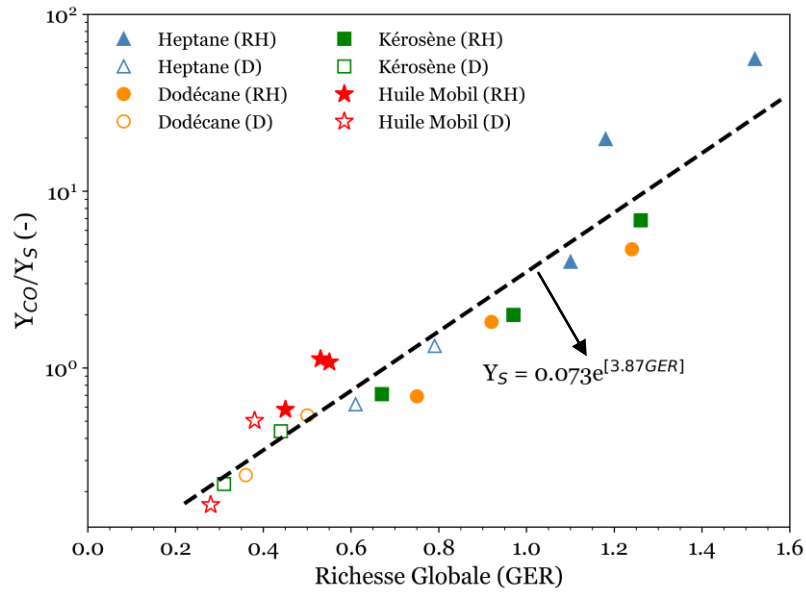


Figure 5.8 - Rapport Y_{CO}/Y_S en fonction de la richesse globale (GER). ▲ ▲ heptane, ● ● dodécane, ■ ■ kérosène, ★ ★ huile Mobil DTE.

5.4.2. Rendement en suie et sa corrélation avec l'oxygène à la base de la flamme

L'effet de la viciation de l'air sur le rendement en suie est présenté sur la Figure 5.9. La ligne pointillée représente la tendance possible entre Y_S et la concentration d'oxygène au pied de la flamme. Comme pour le CO, si l'on compare les résultats de Y_{CO} (Figure 5.4) à ceux de Y_S (Figure 5.9), on s'aperçoit aussi que la dispersion est plus grande pour les suies que pour le CO. On observe que le Y_S diminue lorsque l'oxygène disponible autour de la flamme diminue, ce qui était attendu.

En effet, l'oxygène est nécessaire pour former les particules de suie, comme expliqué dans le paragraphe 1.8.2 (Figure 1.18). Mulholland et al. (Mulholland, Janssens, Yusa, Twilley, & Babrauskas, 1991) ont également observé un comportement similaire avec du PMMA. Si on regarde plus en détails la Figure 5.9, lorsque la concentration d'oxygène diminue de 21 % à environ 18 %, on trouve que le Y_S diminue rapidement. Pour une concentration en oxygène inférieure 18 %, le Y_S semble rester presque constant. En accord avec Santo et al. (Santo & Tamanini, 1981; Santo & Delichatsios, 1984) et Melis et al. (Melis & Audouin, 2008), une variation modérée de la concentration d'oxygène au pied de la flamme (18 % à 21 %) peut avoir un impact significatif sur la production de suies dans la zone de flamme. Ce qui entraînera un changement des caractéristiques de la combustion, de l'émissivité de la flamme, du rayonnement et du taux de perte de masse. De faibles concentrations d'oxygène au pied de

flamme (augmentation de la viciation) entraînent une diminution de la production de suie et donc des flammes moins lumineuses.

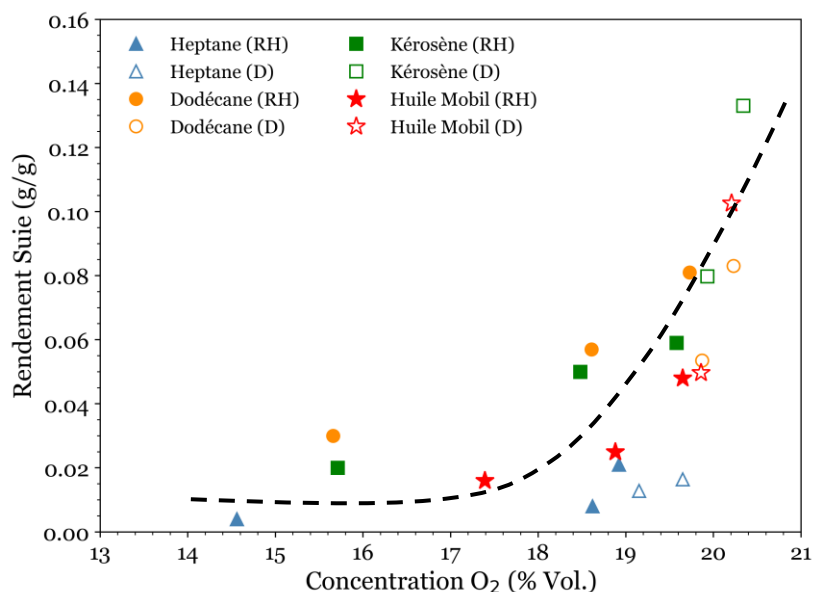


Figure 5.9 - Rendement en suie (Y_s) en fonction de la concentration d'oxygène à la base de la flamme. ▲ △ heptane, ● ○ dodécane ; ■ □ kérosène, ★ ☆ huile Mobil DTE.

5.5. Conclusions

Des expériences ont été réalisées pour analyser l'effet de la richesse globale (GER) et de la viciation de l'air autour de la flamme sur le taux de perte masse et les émissions d'espèces chimiques. En particulier, le CO et les particules de suie. Quatre combustibles ont été utilisés : le n-heptane pur, le dodécane de qualité technique, le kérosène Jet A-1 et l'huile Mobil DTE heavy medium. Il a été trouvé qu'il n'y a pas de corrélation claire entre le MLR et le GER pour ce type de configuration expérimentale. Par contre, il semble avoir une relation linéaire entre le MLR normalisé et la concentration d'oxygène au pied de la flamme. Pour les émissions de CO, la corrélation de Beyler ou celle de Gottuk et al. peuvent être utilisées dans ce compartiment à condition qu'il y ait une période de mesure stable. Les résultats montrent que dans des conditions bien-ventilées, le dodécane, le kérosène et l'huile Mobil DTE suivent la corrélation de Beyler. Alors que l'heptane suit la corrélation de Gottuk et al. Le rendement d'émission de CO augmente avec le GER, ainsi qu'avec la diminution de concentration d'oxygène à la base de la flamme. En revanche, le rendement en suie diminue. Les relations observées pour Y_s en fonction du GER, ainsi qu'entre Y_s et la concentration d'oxygène à la base de la flamme suggèrent des tendances exponentielles décroissantes.

Les résultats de la présente étude montrent qu'il y a production préférentielle de CO ou de suie en fonction des conditions de ventilation du foyer. Lorsque le feu est bien ventilé, la formation de suie est favorisée par rapport à celle de CO. Par contre, dans les foyers sous-ventilés, la formation de CO est favorisée par rapport à celle de suie. Néanmoins des recherches complémentaires sont nécessaires pour confirmer ces tendances. Il reste à répondre à la question de savoir si la couche de fumée chaude dans ce compartiment est réactive si la température est inférieure à 600 K et si le temps de séjour est long. Il serait intéressant de regarder si la viciation de l'air avec les produits de combustion explique les tendances observées sur les productions de CO et des suies. Cela pourrait se faire avec la simulation des réactions chimiques dans une flamme alimentée avec de l'air, mais aussi différentes concentrations de CO_2 , de CO, et aussi de N_2 pour voir l'effet de la température.

Conclusions générales et perspectives

Conclusions générales

Des expériences ont été menées afin d'étudier les émissions de monoxyde de carbone et de particules de suie lors des incendies dans un local mécaniquement ventilé. Les expériences ont été réalisées à petite échelle dans un compartiment de 1 m³, où quatre types de combustibles (n-heptane pur, dodécane technique, kérosène Jet A-1 et huile Mobil DTE heavy medium) ont été brûlés. Les essais ont été réalisés avec différents taux de ventilation (4.83, 9.67, et 17.8 ACPH) et pour différents diamètres de bac (0.115, 0.14, 0.19 et 0.23 m). Les taux de perte de masse et de dégagement de chaleur, les températures, les concentrations des espèces (O₂, CO₂, CO et particules de suie) et les distributions de taille des particules ont été mesurés. Les résultats montrent que les incendies mécaniquement ventilés se développent en trois phases : inflammation et croissance, période du feu établi, diminution et extinction par manque de combustible.

▪ Influence du taux de ventilation

Les résultats montrent que l'augmentation du taux de ventilation induit une augmentation des taux de perte de masse et de dégagement de chaleur. Par conséquent, les températures des fumées augmentent. Lorsque le taux de ventilation est élevé, il a été observé pour certains combustibles, qu'après la phase de feu quasi-stable, la perte de masse s'accroît. Cette augmentation est due notamment à l'effet du rayonnement des parois et de la fumée sur le bac du combustible. Les incendies se développent dans un environnement bien ventilé et la concentration d'oxygène à l'extraction est plus élevée. Les émissions de monoxyde de carbone sont réduites, tandis que les émissions de suie sont plus importantes. À l'inverse, lorsque le taux de ventilation est faible, les incendies se développent dans un environnement sous-ventilé, les émissions de monoxyde de carbone sont importantes et la production de suie est faible.

Le taux de dégagement de chaleur peut être estimé par différentes méthodes, théorique, chimique basée sur la consommation d'oxygène et thermique. La méthode théorique montre le taux de dégagement de chaleur le plus élevé. Les résultats obtenus avec la méthode de la consommation d'oxygène et la méthode thermique sont presque similaires. Cependant, entre ces deux méthodes, un écart d'environ 5 % à 20 % existe pour toutes les conditions d'essai.

- Influence du diamètre du bac de combustible

Lorsque le diamètre du bac est de plus en plus grand, la surface du combustible exposée à l'évaporation augmente, ce qui conduit à une consommation plus importante d'oxygène par la combustion, qui peut devenir incomplète. Le débit d'évaporation du combustible (g/s) et, donc, le taux de dégagement de chaleur augmentent. Les températures des fumées sont élevées. Les incendies se développent dans un environnement sous-ventilé. Par conséquent, la production de monoxyde de carbone est élevée, alors que les émissions de suies sont réduites.

Les particules de suie montrent une distribution de taille uni modale. La variation du diamètre du bac n'a pas d'influence significative sur le diamètre des particules. Par ailleurs, le diamètre des particules augmente avec le taux de ventilation. Le diamètre modal des particules de suie a été trouvé entre 150 nm et 300 nm.

- Influence de la nature du combustible

La comparaison entre les différents combustibles utilisés dans le présent travail montre que l'heptane produit les températures de fumée et les émissions de monoxyde de carbone les plus élevées. Par contre, les émissions de suie sont les plus faibles. Il a été considéré que les températures élevées étaient dues au rayonnement de la couche de fumée et des parois du compartiment sur la surface du liquide. Le dodécane et le kérosène, moins inflammables que l'heptane, ont présenté des caractéristiques de combustion comparables. Les deux combustibles montrent des températures de fumée et des émissions de monoxyde de carbone modérées. Cependant, ils présentent les émissions de suie les plus élevées. Le comportement du dodécane en matière de suie n'est pas évident car il est exclusivement composé d'isomères et ne contient pas d'espèces précurseurs de la formation de suie (par exemple HAP). L'huile Mobil DTE présente les températures de fumée et les émissions de monoxyde de carbone les plus basses. Toutefois, les émissions de suie sont modérées. L'huile Mobil DTE est composée d'huile minérale et d'un additif (2,6-di-tert-butyl-p-crésol) qui induit une stabilité thermique et chimique. Les résultats montrent que les propriétés des différents combustibles ont des répercussions significatives sur les émissions de monoxyde de carbone et de suie, ainsi que sur les températures des fumées. Il a été constaté que le monoxyde de carbone et la suie dépendent de la structure du combustible. En termes de toxicité du monoxyde de carbone, dans un incendie confiné et ventilé mécaniquement, l'heptane est le combustible le plus dangereux, tandis que l'huile Mobil DTE présente le risque le plus faible.

▪ Corrélations entre les résultats expérimentaux

Il a été trouvé que dans des conditions de bien ventilées, les données expérimentales de CO_2 correspondent bien aux résultats donnés par l'équation de réaction de combustion globale et stœchiométrique, c'est-à-dire une relation linéaire entre le CO_2 et l'oxygène consommé. Cependant, dans des conditions de sous-ventilation, une déviation par rapport à cette équation a été observée.

La perte de masse MLR, normalisée par la valeur en foyer ouvert $\text{MLR}_{\text{ouvert}}$, augmente avec la concentration d'oxygène à la base de la flamme. Les données présentent une certaine dispersion, cependant, une corrélation est proposée pour l'heptane, comme $\text{MLR}/\text{MLR}_{\text{ouvert}} = 0.08[\text{O}_2] - 0.68$. Celle-ci diffère légèrement de celle de Peatross et al. qui est $\text{MLR}/\text{MLR}_{\text{ouvert}} = 0.1[\text{O}_2] - 1.1$.

La comparaison entre le rendement en monoxyde de carbone Y_{CO} et la richesse globale a indiqué que, dans des conditions bien ventilées, les résultats pour le dodécane, le kérosène et l'huile Mobil DTE sont en accord avec la corrélation de Beyler, tandis que, pour l'heptane, les résultats suivent la corrélation de Gottuk et al. Le rendement en suie Y_s diminue puis reste quasi-constant lorsque la richesse globale augmente. Établir une corrélation unique qui ne dépende pas du type de combustible est difficile à cause de la dispersion des données expérimentales. Cependant, chaque combustible présente une tendance unique. Quand la richesse globale augmente, l'heptane montre un rendement en suie quasi constant, le dodécane et le kérosène présentent la même décroissance, l'huile Mobile DTE présente également une diminution, mais avec une pente plus forte que le dodécane et le kérosène. Le rapport des rendements Y_{CO}/Y_s en fonction de la richesse globale montre une relation exponentielle, $Y_{\text{CO}}/Y_s = 0.0736e^{(3.8688\text{GER})}$. Il apparaît qu'il existe une production préférentielle de monoxyde de carbone ou de suie en fonction des conditions de ventilation. Dans les feux bien ventilés, la production de suie est favorisée, alors que la production de monoxyde de carbone est favorisée dans les conditions sous-ventilées.

Perspectives

À l'issue de ce travail, plusieurs perspectives se dégagent pour des recherches futures :

D'abord, une étude plus exhaustive sur les émissions de polluants (monoxyde de carbone et suie) est nécessaire, en brûlant par exemple des combustibles solides tels que du bois ou du plastique. Des premiers essais, non présentés dans ce manuscrit, sur des piles de morceaux de pin ou d'OSB « *Oriented Strand Board* », ont montré des comportements très différents par rapport aux combustibles liquides. Il y a une période de flamme très intense, avec de fortes émissions de suies et de monoxyde de carbone, et ensuite une combustion lente hétérogène avec peu d'émission de suies. Le mélange de ces différents types de combustibles pourrait également fournir des informations supplémentaires sur les émissions de monoxyde de carbone et de suie pendant les incendies d'entrepôts.

Concernant ces combustibles naturels, il faudra faire des études complémentaires sur la caractérisation des particules présentes dans les fumées, qui peuvent contenir des suies mais aussi des cendres volantes. Il serait également intéressant de mesurer les gaz imbrûlés dans le cas des feux sous-ventilés, afin d'établir des corrélations entre le monoxyde de carbone et ces imbrûlés. Si ces corrélations existent, cela permettrait d'estimer ces imbrûlés, non pas par une mesure directe, qui est délicate à mettre en œuvre, mais grâce à la mesure du monoxyde de carbone dans les fumées.

Il faudrait aussi analyser d'autres conditions de ventilation des foyers, par exemple l'entrée d'air au niveau du plafond, comme cela existe dans certaines installations industrielles. Il serait alors souhaitable d'analyser pour chaque dispositif de ventilation (haute ou basse) les caractéristiques des écoulements à l'intérieur du compartiment au moyen de la vélocimétrie par images de particules (PIV), permettant ainsi de visualiser les phénomènes de recirculation dans la chambre. Dans ce travail, on a vu que l'air qui alimente le foyer est viciée par les gaz de combustion apportés par ces recirculations.

Enfin, une attention particulière doit être portée à la modélisation (simulations numériques), en particulier fournir des modèles qui permettent de prédire les émissions de polluants lors des incendies mécaniquement ventilés.

Annexes

Annexe A. Protocole expérimental

Avant de commencer une expérience, il faut utiliser les équipements de protection individuelle (EPI) : masque, blouse, chaussures de sécurité, gants, lunettes de protection, etc.

La ventilation du laboratoire doit être mis en route.

- **Préparation de la configuration du compartiment**

Vérification du bac d'eau de la balance

Remplir d'eau le récipient cylindrique qui relie le compartiment à la balance. Il se trouve à l'extérieur, sous le compartiment, au-dessus de la balance (cf. Figure 2.3).

Mise en place des analyseurs de gaz

Placer les différents analyseurs de gaz (TESTO 350 et ECOM EN2) aux points de mesure souhaités. Le compartiment possède six entrées, trois sont situées sur les différentes surfaces du compartiment et trois sur le conduit d'extraction. Il faut assurer l'étanchéité entre la sonde prélèvement de chaque appareil et le compartiment, afin de garantir la mesure et l'herméticité de la chambre de combustion. De façon similaire, les entrées non utilisées au moment de l'expérience doivent être fermées correctement.

Démarrage des appareils de mesure

Raccordez les capteurs de pression, les analyseurs de gaz et les thermocouples au boîtier d'alimentation, suivi d'une mise en service. Démarrer la balance, qui se trouve sous la chambre de combustion en appuyant une fois sur le bouton bleu situé à l'avant de la balance. Il est important de savoir que la balance s'arrête automatiquement lorsque celle-ci ne détecte aucun changement de masse pendant un intervalle de cinq minutes.

Pour les mesures de particules : concentration massique et taille des particules. Installer la sonde de dilution, le FPS doit être mis en marche. Il faut configurer le facteur de dilution souhaité. Démarrer la microbalance TEOM et la pompe (de préférence garder allumé). Le SMPS doit être mis en marche (attention, le délai de démarrage est d'environ 10 minutes).

Synchronisation des appareils

Les ordinateurs et les trois analyseurs de gaz doivent être configurés simultanément (même heure, minute et secondes). Il est préférable de prendre comme référence les ordinateurs connectés au réseau Internet.

Démarrage d'acquisition et les analyseurs de gaz

ECOM EN2

Une fois l'appareil allumé, sur le menu d'analyse de gaz : choisir le type de combustible (fioul lourd, bois, propane, butane, etc.) ; attendre la calibration (environ 1 minute) ; revenir au menu et aller au traitement des données ; sélectionner le menu enregistrement des données ; sélectionner le mode de sauvegarde des données (sur le pc ou sur une carte SD) ; l'enregistrement de l'acquisition se fait automatiquement.

TESTO 350

Comme pour le dispositif ECOM, une fois la cellule de mesure allumée, attendre la mise à zéro (environ 30 s). Lancer le logiciel testo easyEmission ; choisir l'application (brûleur, moteur 1, moteur, turbine, etc.) ; sélectionner le type de gaz et le type de mesure (combustion, combustion + m/s, combustion + ΔP , etc.). Finalement, lancer l'acquisition. Une fois la mesure terminée, arrêter l'acquisition et sélectionner exporter la mesure.

Remplacer les filtres des analyseurs pour chaque expérience, principalement après les essais avec des combustibles lourds (dodécane, kérosène, huile Mobil DTE). Cette précaution évite aux pompes des appareils de fonctionner avec difficulté ou de colmater les tuyaux.

- **Mise en marche de la ventilation du compartiment**

Allumez le boîtier de commande du ventilateur et mettez sous tension. Réglez la ventilation sur la puissance désirée.

- **Démarrage du logiciel d'acquisition Labview**

Cette étape consiste à lancer le logiciel Labview. Il faut sélectionner le dossier d'enregistrement, activer le bouton pour enregistrer les tests et lancer les acquisitions.

- **Mise en place du combustible**

Déposer le combustible dans le récipient souhaité, peser la quantité initiale à l'aide d'une balance externe (pour l'interprétation future).

Placer le bac avec le combustible sur le support de la balance à l'intérieur du compartiment. Faire le zéro sur le bouton de démarrage.

- **Inflammation du combustible**

Enflammer le combustible à l'aide de la torche (chalumeau). S'il s'agit d'un combustible liquide très lourd, le combustible doit être préchauffé au moyen d'une résistance électrique avant de l'allumer.

Soit laisser le régime de combustion à l'air libre s'établir (environ 30 secondes) puis fermer la porte du compartiment. Soit fermer la porte du compartiment directement après l'allumage.

- **Arrêt de l'acquisition**

Une fois l'expérience terminée, il faut arrêter le logiciel Labview et l'enregistrement de l'acquisition se fait automatiquement en générant un fichier Excel ayant le nom, la data, le temps d'enregistrement. Arrêter complètement l'acquisition sur les analyseurs de gaz (TESTO 350 et ECOM EN2).

Annexe B. Effet de la hauteur du bac sur des incendies d'heptane

L'objectif est ici de d'évaluer l'effet de la hauteur entre la surface libre du combustible et le bord du bac. Pour cette analyse, le n-heptane pur a été considéré, car ce combustible pendant les essais a présenté un accroissement dans la courbe de perte de masse après la phase stable. Les expériences ont été réalisées avec des bacs en acier de 0.19 m de diamètre et des hauteurs variables, 22 mm, 45 mm et 90 mm (cf. paragraphe 2.2.3), le taux de ventilation sélectionné a été 9.67 ACPH.

Les figures ci-dessous illustrent l'évolution temporelle de la perte de masse du combustible par unité de surface (Figure B. 1 – a) ; la richesse globale (Figure B. 1 – b) ; la température dans la zone de flamme à environ 22 cm de la source de combustion (Figure B. 2 – a) ; la température dans la zone de fumée à environ 80 cm du sol du compartiment (Figure B. 2 – a) et quelques mesures de concentration d'espèces chimiques, oxygène (Figure B. 3 – a), monoxyde de carbone (Figure B. 3 – b), respectivement.

Les résultats montrent que la variation de la hauteur du bac a un effet négligeable pendant les 400 premières secondes. Les incendies présentent le même comportement, la perte de masse atteint des valeurs similaires, environ 8 g/sm² en moyenne (Figure B. 1 – a). Au-delà de 400 s, l'incendie à h = 90 mm montre un accroissement considérable de la perte de masse.

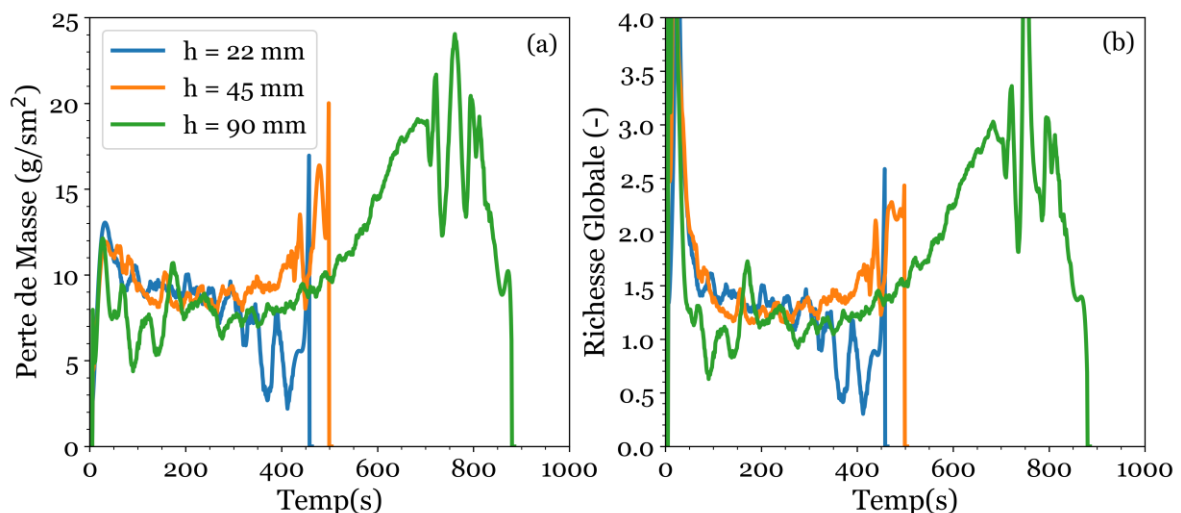


Figure B. 1 - Effets de la hauteur du bac du combustible lors des incendies de n-heptane pur ventilés mécaniquement à 9.67 ACPH, (a) Taux de perte de masse ; (b) Richesse globale.

De plus, lorsque la hauteur du bac diminue, les incendies s'éteignent par manque d'oxygène. Par conséquent, des incendies plus courts ont été observés à 22 mm et 45 mm, respectivement. Il a également été constaté que lorsqu'un bac en acier a été utilisé, le phénomène appelé « *flamme fantôme* » s'est manifesté.

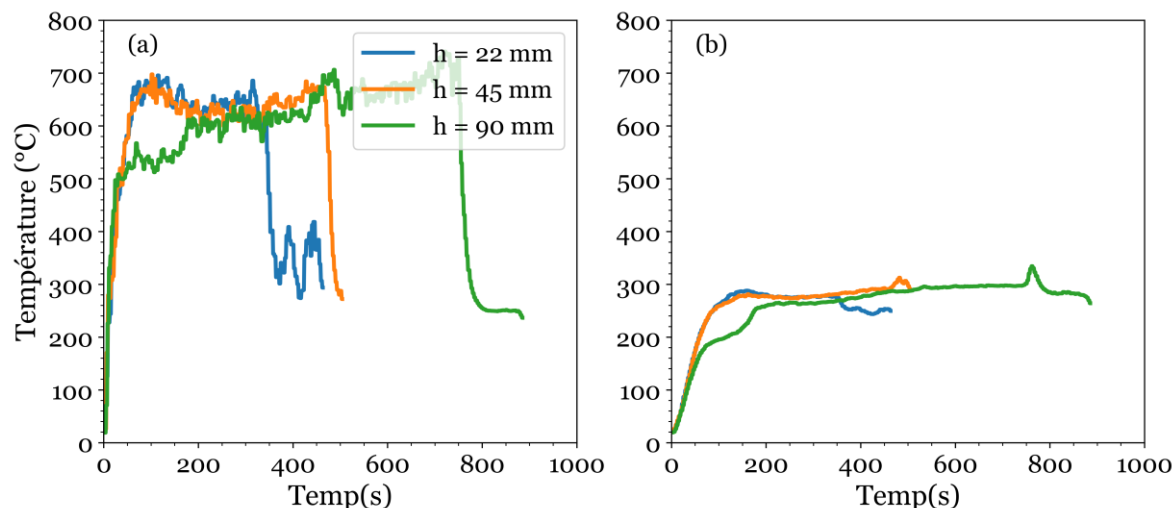


Figure B. 2 - Effets de la hauteur du bac du combustible sur la température lors des incendies de n-heptane pur ventilés mécaniquement à 9.67 ACPH, (a) Évolution de la température dans la zone de la flamme ; (b) Évolution de la température dans la zone de fumée.

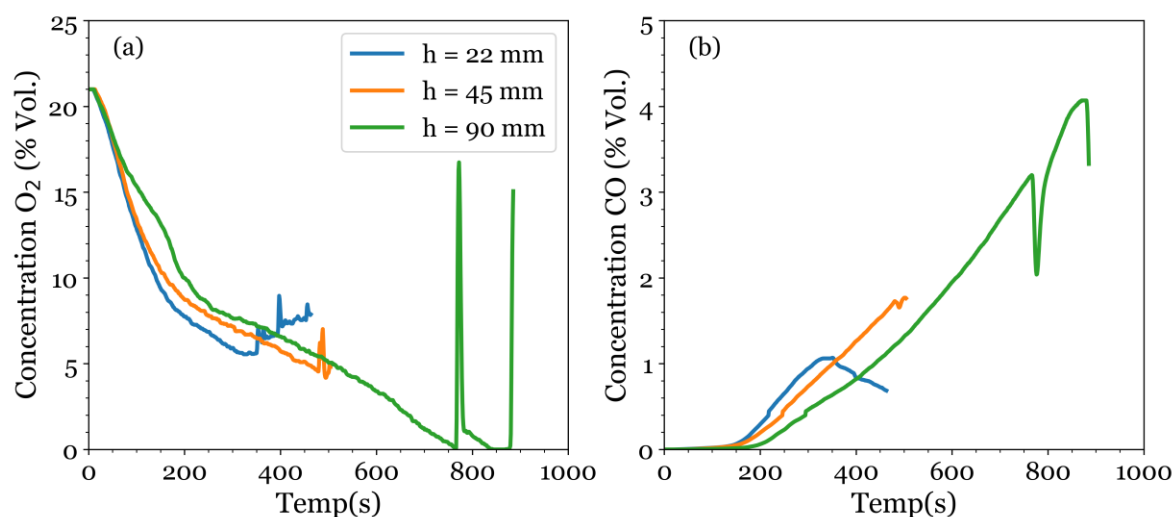


Figure B. 3 - Effets de la hauteur du bac du combustible sur la concentration d' O_2 et du CO pendant des incendies de n-heptane pur ventilés mécaniquement à 9.67 ACPH, (a) Évolution de la concentration d'oxygène ; (b) Évolution de la concentration de monoxyde de carbone dans le conduit d'évacuation du gaz.

En conclusion, ces résultats ont permis de constater que le fait de varier la hauteur du bac n'affecte que la durée de l'incendie, c'est-à-dire qu'aucune influence remarquable sur le développement de l'incendie a été observée. Les résultats ont également montré une tendance similaire à celle constatée lors de l'utilisation des bacs en verre pyrex. Mais l'apparition de flammes fantômes a été observée dans certains cas avec les bacs acier.

Annexe C. Calcul du flux rayonné par les parois verticales et le plafond sur une cible au sol

Le calcul du flux rayonné par les parois est basé sur le taux de ventilation le plus fort, RH = 17.8 ACPH, selon les données présentées de la perte masse, on a vu qu'elle augmente vers la fin du test pour l'heptane et le dodécane (Figure 3.7).

Cela peut être dû au rayonnement des parois chaudes et des fumées vers le bac. Cela ne se produirait qu'à partir d'une certaine température des fumées. Il a été trouvé que pour le RH = 17.8, la température en cours d'essai (600 s) dépasse 300 °C pour l'heptane et atteint presque cette valeur pour le dodécane. La présente annexe a donc pour objectif de calculer de façon simple les flux rayonnés. Des parois et de la fumée, pour voir s'ils sont non négligeables à partir de 300 °C / celui de la flamme.

Échange de rayonnement entre deux surfaces élémentaires :

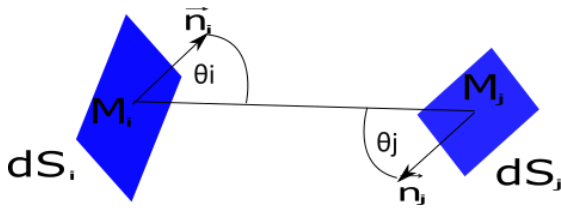


Figure C. 1 - Échange de rayonnement entre deux surfaces élémentaires.

- Flux de la paroi dS_i vers dS_j (w) :

$$\delta_{flux\ 1} = dS_i \cos \theta_i \frac{\sigma T_i^4}{\pi} \left[e^{\int_{M_i}^{M_j} \kappa_{fumee} dl} \right] \frac{dS_j \cos \theta_j}{r_{i-j}^2} \quad \text{C. 1}$$

- Flux des fumées de M_i vers M_j (w) :

$$\delta_{flux\ 2} = dS_i \cos \theta_i \left\{ \int_{M_i}^{M_j} \kappa_{fumee} \sigma T_{M,fumee}^4 \left[e^{\int_{M_i}^{M_j} \kappa_{fumee} dl} \right] dl \right\} \frac{dS_j \cos \theta_j}{\pi r_{i-j}^2} \quad \text{C. 2}$$

Intégration des échanges de rayonnement entre une surface S_i et la cible dS_c :

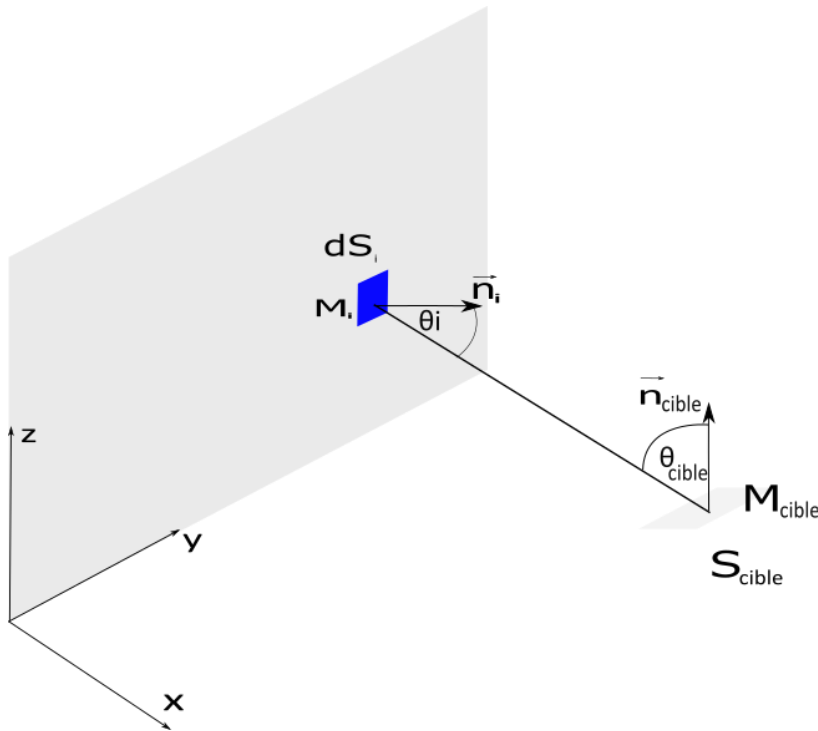


Figure C. 2 - Échanges de rayonnement entre une surface S_i et la cible dS_c .

- Flux de la paroi S_i vers S_{cible} (w/m² de cible)

$$\delta_{flux 1} = \int_{M_i} dS_i \cos \theta_i \frac{\cos \theta_{cible,i}}{r^2_{i-M_{cible}}} \varepsilon_i \frac{\sigma T_i^4}{\pi} \left[e^{\int_{M_i}^{M_{cible}} \kappa_{fume} dl} \right] \quad C. 3$$

- Flux de la paroi S_i vers S_{cible} (w/m² de cible)

$$\delta_{flux 2} = \int_{M_i} dS_i \cos \theta_i \frac{\cos \theta_{cible,i}}{r^2_{i-M_{cible}}} \left\{ \int_{M_i}^{M_{cible}} k_{fume} \frac{\sigma T_{M,fume}^4}{\pi} \left[e^{\int_M^j \kappa_{fume} dl} \right] dl \right\} \quad C. 4$$

Application : cas du caisson de 1m³ :

Valeurs choisies

Concentration massique des suies : $C_{Suie} = 1 \text{ g/m}^3$, fraction volumique f_v , avec $\rho_{suie} = 1800 \text{ kg/m}^3$, $f_v = 0.5 \cdot 10^{-6}$.

D'après le rapport du NIST, $k_{fume} = 0.5 \text{ m}^{-1}$.

Émissivité « *Ceramic fiber board* » : 0.4 à 0.8 (certainement plus proche de 0.8 que de 0.4).

Hypothèses :

- 1- Température de paroi (T_p) uniforme : $T_{p,vertical} = 250\text{ °C}$, $T_{p,horizontal} = 400\text{ °C}$,
- 2- Température de fumée (T_f) uniforme
- 3- Couche de fumée jusqu'à 20 cm au-dessus du sol.

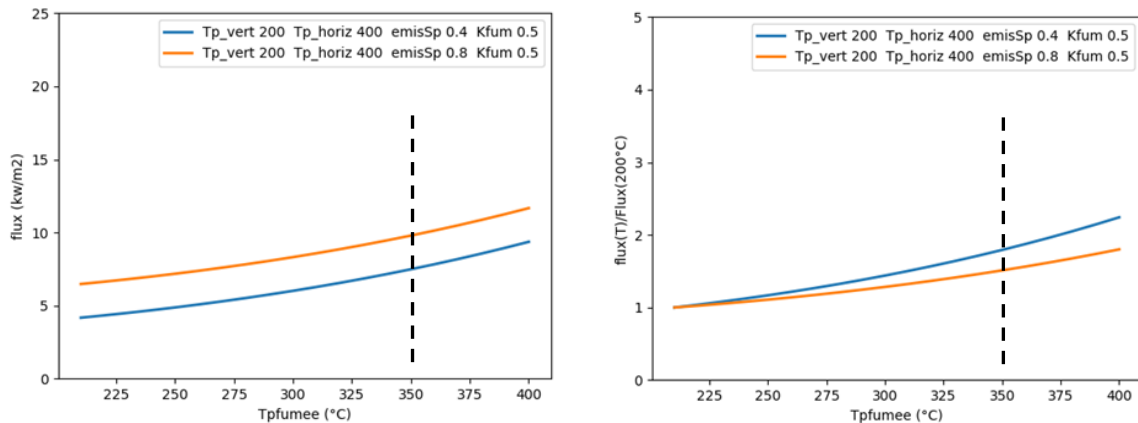


Figure C. 3 - Flux rayonné en fonction de la température de fumée, (a)

Conclusions :

Figure C. 3 : le flux apporté en plus de la flamme est de 5 à 10 kW/m², on rappelle que le flux de la flamme est d'environ ~8 kW/m².

Figure C. 3 : flux apporté à 350 °C par rapport à celui apporté à 200 °C, entre 20 et 50 % en plus. Donc, cela peut expliquer l'accroissement du MLR pour RH = 17.8 ACPH avec l'heptane et dodécane et cela ne se produirait qu'à partir d'une certaine température des fumées.

Annexe D. Influence de la discrétisation spatiale dans les intégrations

NbrdSemis=nbr de discrétisation angulaire sur la surface émettrice.

NbrdlRdebfin=nbr de discrétisation de la distance surface/cible.

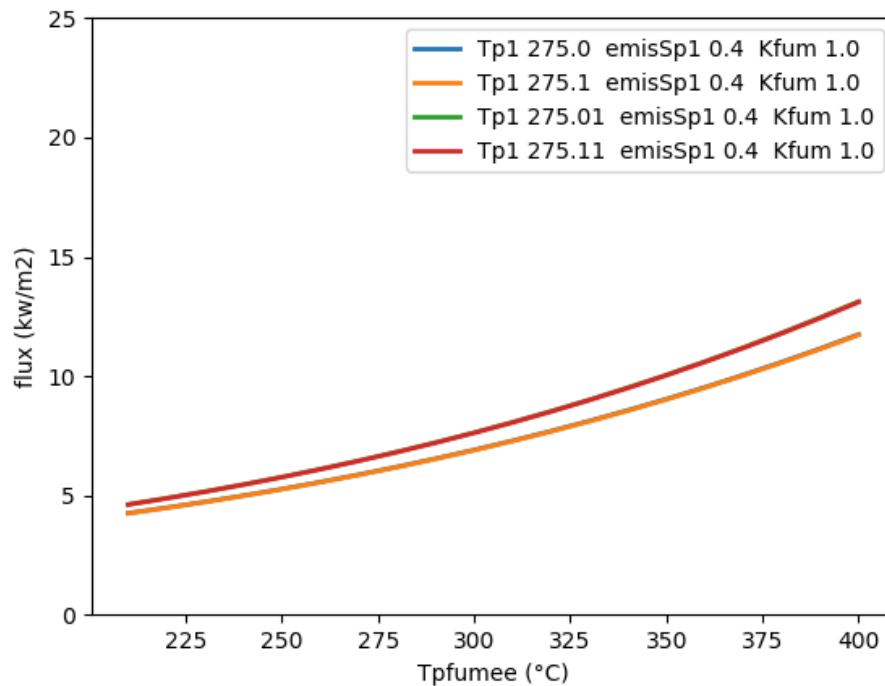


Figure D. 1 - Discrétisation spatiale.

NbrdSemis = 10 ; NbrdlRdebfin = 10 : Courbe bleue ($T_p = 275$)

NbrdSemis = 100 ; NbrdlRdebfin = 10 : Courbe orange ($T_p = 275.1$)

Courbes bleue et orange superposées

NbrdSemis = 10 ; NbrdlRdebfin = 100 : Courbe verte ($T_p = 275.01$)

NbrdSemis = 100 ; NbrdlRdebfin = 100 : Courbe rouge ($T_p = 275.11$)

Courbes verte et rouge superposées

Le résultat est sensible à la discrétisation sur la distance surface/cible et peu sur la discrétisation angulaire. Dans notre cas, NbrdSemis = 10 ; NbrdlRdebfin = 100 sont corrects.

Annexe E. Mesure du DMA sur la distribution de la taille des particules en fonction de la ventilation

Les mesures de la granulométrie de particules ont été réalisées à l'aide de l'appareil SMPS modèle 3080, placé derrière la sonde de dilution du FPS. Plus de détails sur le dispositif de prélèvement et de mesure sont donnés dans le sous-paragraphe 2.9.3. *Dans cette annexe, l'ensemble des résultats sont présentés sur la Figure E. 1 à - Distribution des tailles des particules de suie du DMA, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. RH = 17.8 ACPH et 0.19 m de diamètre du bac de combustible. Figure E. 3. Chaque figure contient les quatre combustibles, (a) n-heptane pur, (b) dodécane technique, (c) kérosène Jet A-1, (d) huile Mobil DTE heavy medium, mais à une seule condition de ventilation donnée (RH = 4.83 ACPH).*

L'appareil de mesure SMPS, ne permet pas d'effectuer des mesures en continu, de sorte qu'un nombre réduit d'échantillons a été pris au cours de chaque expérience. Les premiers échantillons (S1) ont été pris à environ 4 minutes après l'allumage du combustible et les autres si ($i > 1$) avec un intervalle d'environ 3 minutes.

Le réglage du SMPS a été le suivant : Débit « *sheat* » = 2 l/mn, débit « *aérosol* » = 0.3 l/min et débit « *sample* » = 1 l/mn. Avec ces réglages, le diamètre maximum classifié par le SMPS est de 881.7 nm. Le compteur de particules est le modèle 3772, donc le diamètre minimum détecté est égal à 18.8 nm. La gamme des mesures avec ce SMPS et les réglages associés est donc comprise entre 18.8 nm et 881.7 nm.

En fait, les incendies mécaniquement ventilés réalisés lors ce travail, ont produit des très grosses particules (agrégats de suies), avec des diamètres modaux de l'ordre de 150 à environ 315 nm (Rappel : le diamètre modal d'une distribution est le diamètre correspondant au maximum de la distribution).

Sur les figures illustrées ci-dessus, on observe que le prélèvement S1 est assez différent des autres, l'élargissement et le maximum ne sont pas les mêmes. Il a été également remarqué que pour chaque incendie spécifique, le diamètre modal reste presque constant. On peut raisonnablement supposer que, pour les échantillons Si $i > 1$, la forme des courbes de distribution reste la même, en particulier en termes de largeur et de diamètre modal. Les différences observées sont surtout visibles sur l'aire des courbes donc le nombre total de particules par unité de volume. Il a été décidé de faire la moyenne sur l'ensemble des distributions observées, excepté la distribution initiale S1 et la dernière distribution observée,

celle-ci étant parfois obtenue lors de l'extinction du foyer. Ces distributions moyennes ont également été reportée sur la Figure E. 1 à - Distribution des tailles des particules de suie du DMA, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. RH = 17.8 ACPH et 0.19 m de diamètre du bac de combustible. Figure E. 3

Le fit par une distribution log-normale est également inclus dans les figures (voir l'équation 2.11, paragraphe 2.9.3). Cette distribution est issue du « lissage » de la distribution moyenne de chaque essai, et ensuite étendue jusqu'à 3000 nm, afin de montrer le comportement de la distribution moyenne au-dessus du diamètre maximal mesuré par le SMPS. L'utilisation d'une distribution de type log-normale a permis d'obtenir l'écart-type géométrique et diamètre modal.

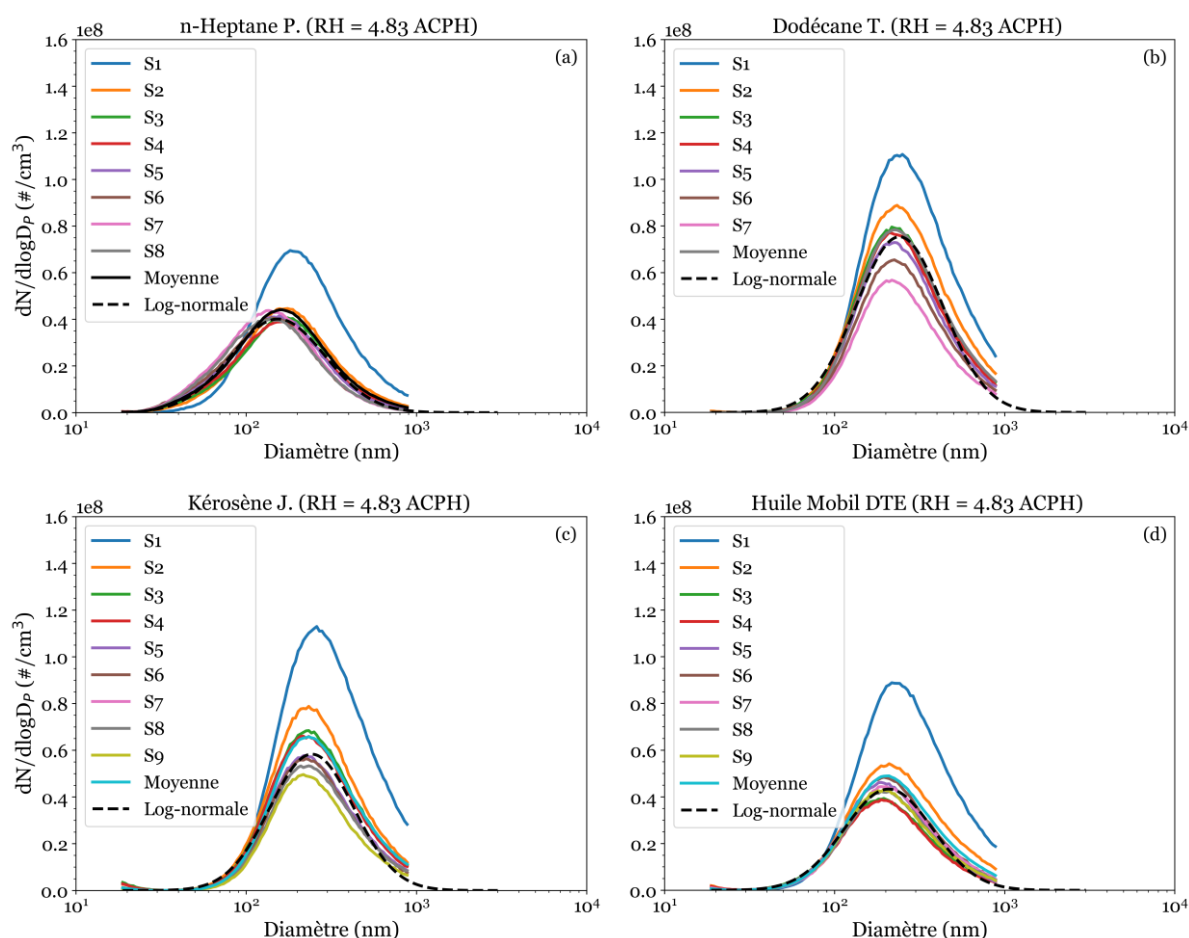


Figure E. 1 - Distribution des tailles des particules de suie du DMA, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. RH = 4.83 ACPH et 0.19 m de diamètre du bac de combustible.

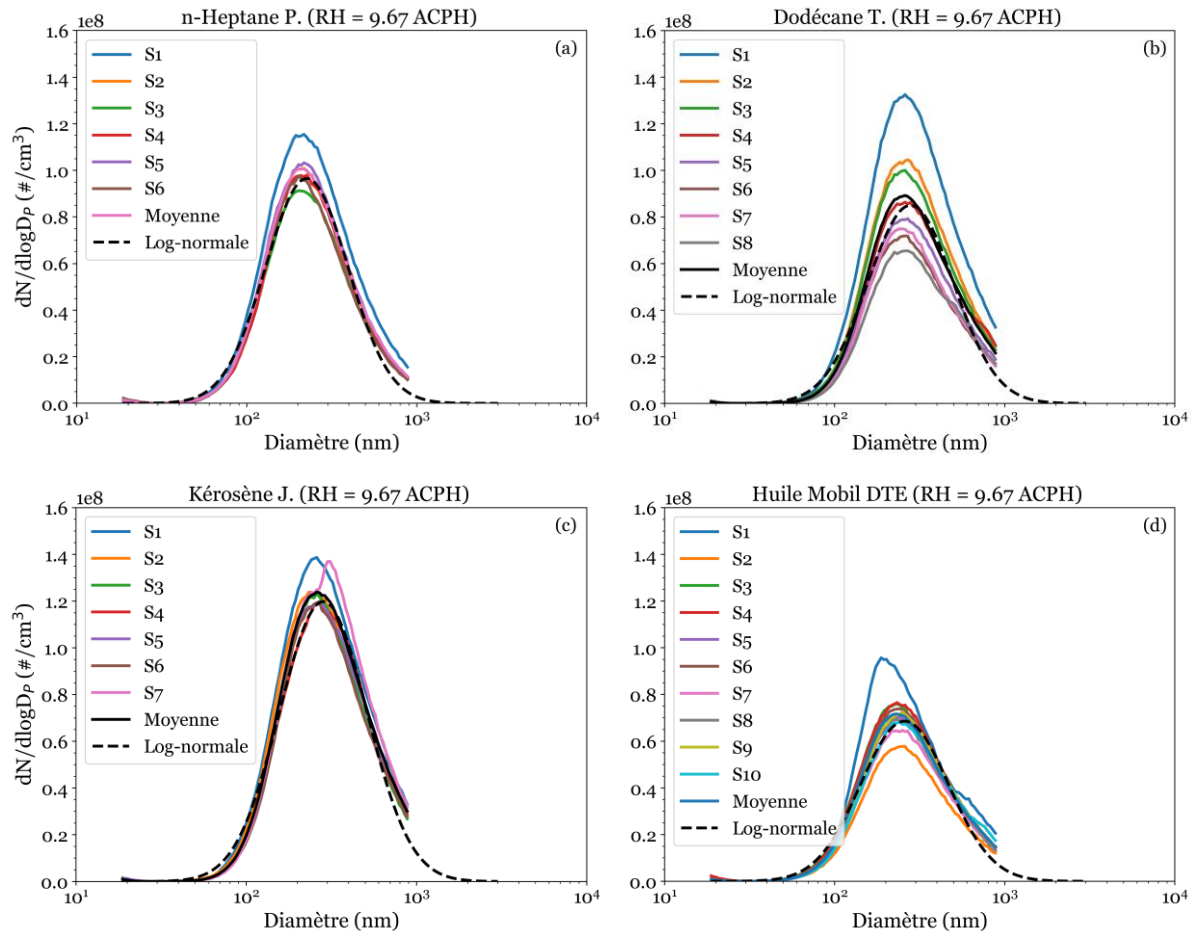


Figure E. 2 - Distribution des tailles des particules de suie du DMA, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. $RH = 9.6$ ACPH et 0.19 m de diamètre du bac de combustible.

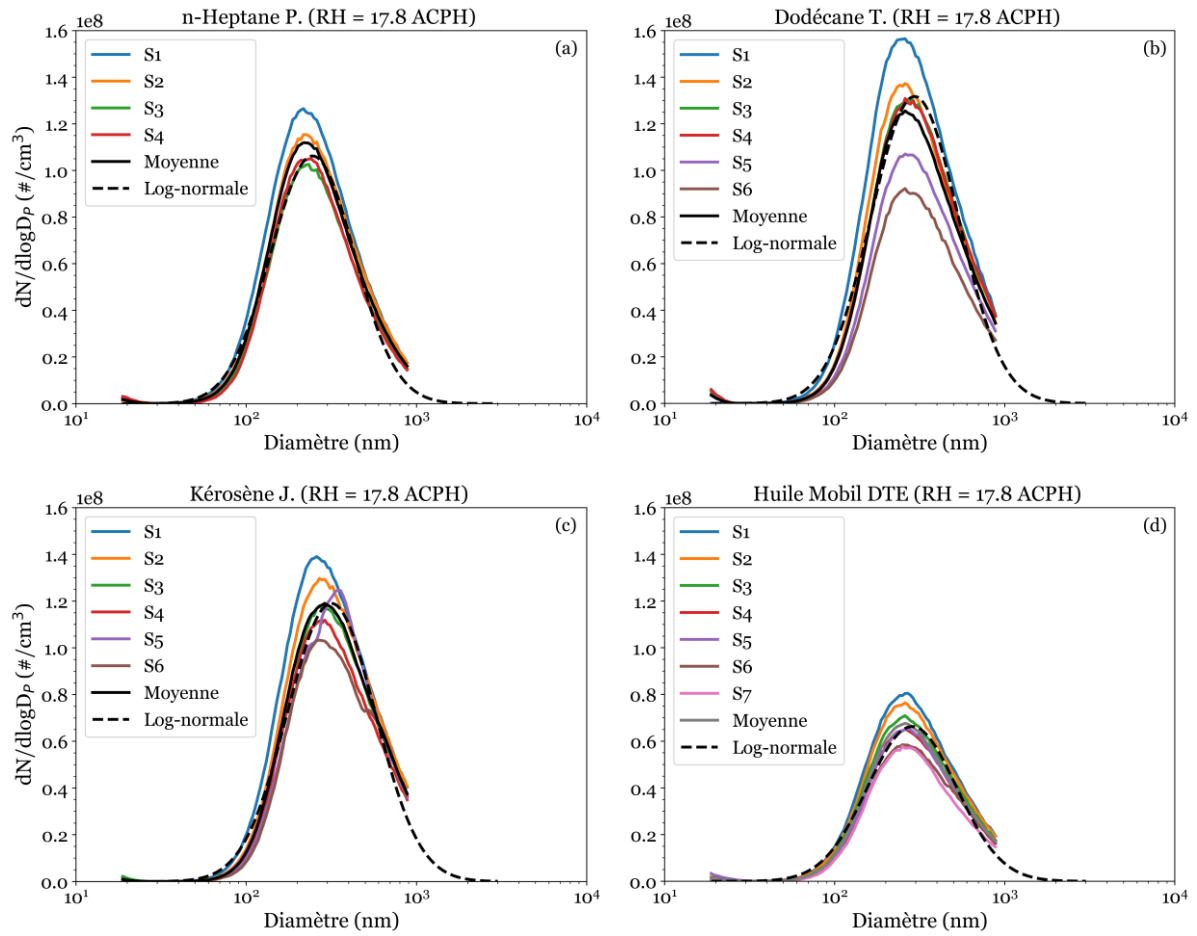


Figure E. 3 - Distribution des tailles des particules de suie du DMA, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. $RH = 17.8$ ACPH et 0.19 m de diamètre du bac de combustible.

Annexe F. Taux d'évaporation du combustible et le débit volumique de l'air entrant à 9.67 ACPH

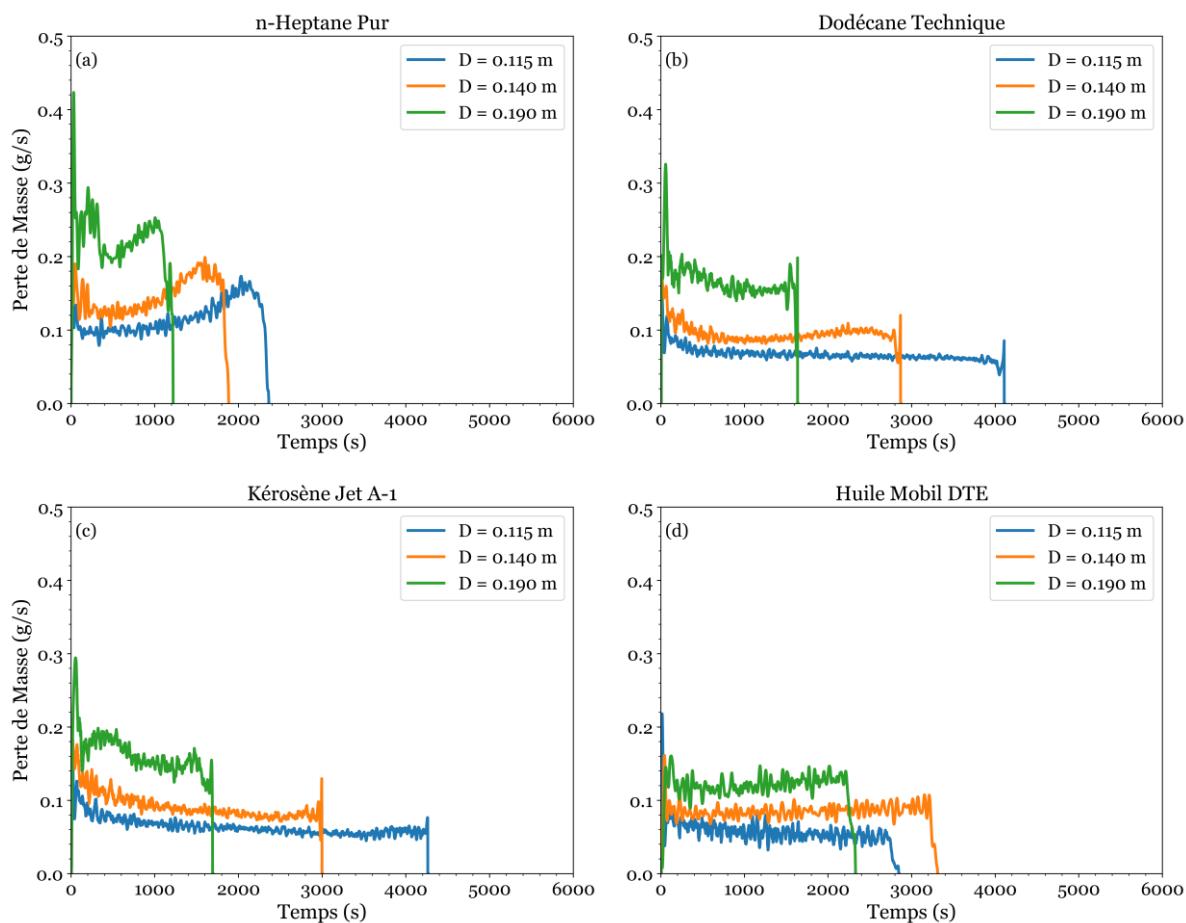


Figure F. 1 - Taux d'évaporation du combustible à 9.67 ACPH, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de 0.19 m.

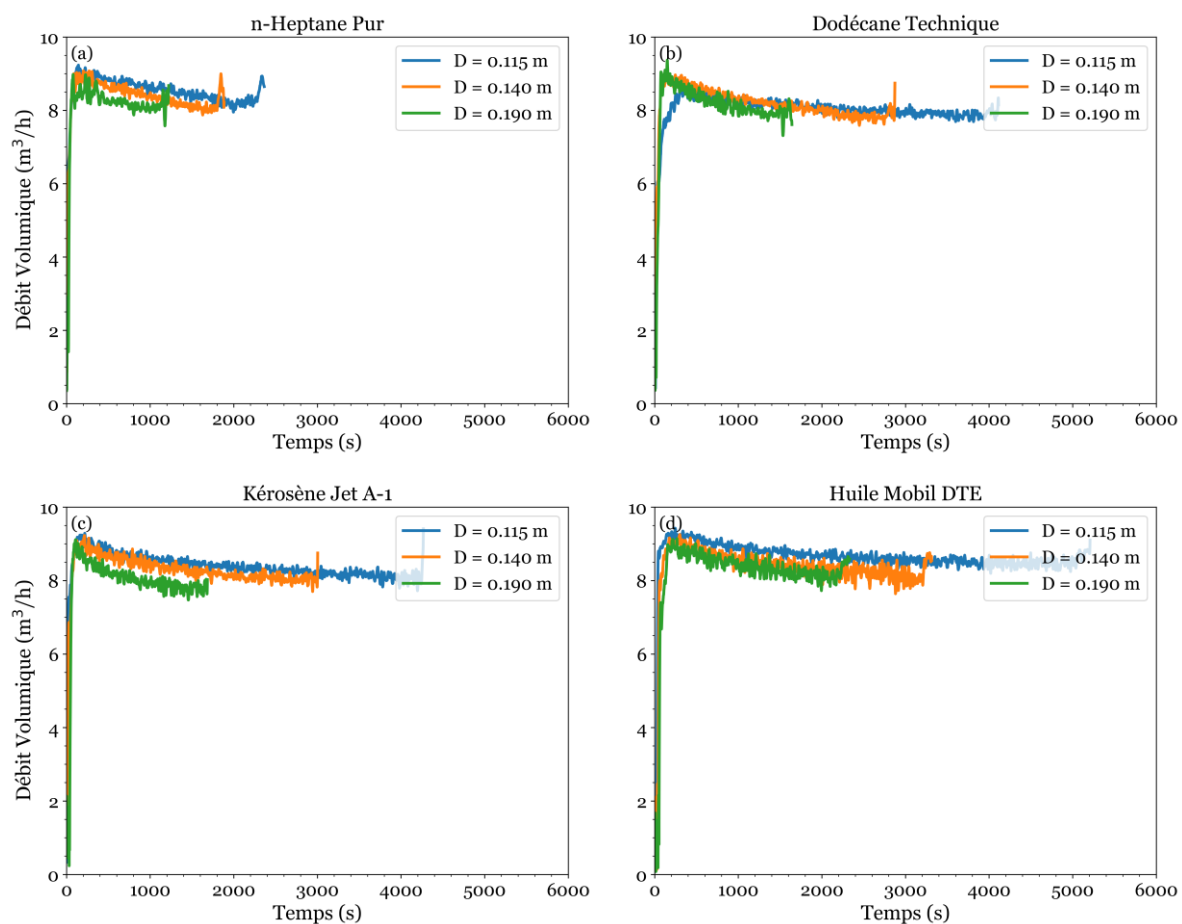


Figure F. 2 - Débit volumique de l'air entrant à 9.67 ACPH, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. Diamètre du bac de 0.19 m.

Annexe G. Mesure du DMA sur la distribution de la taille des particules en fonction de la taille de la nappe

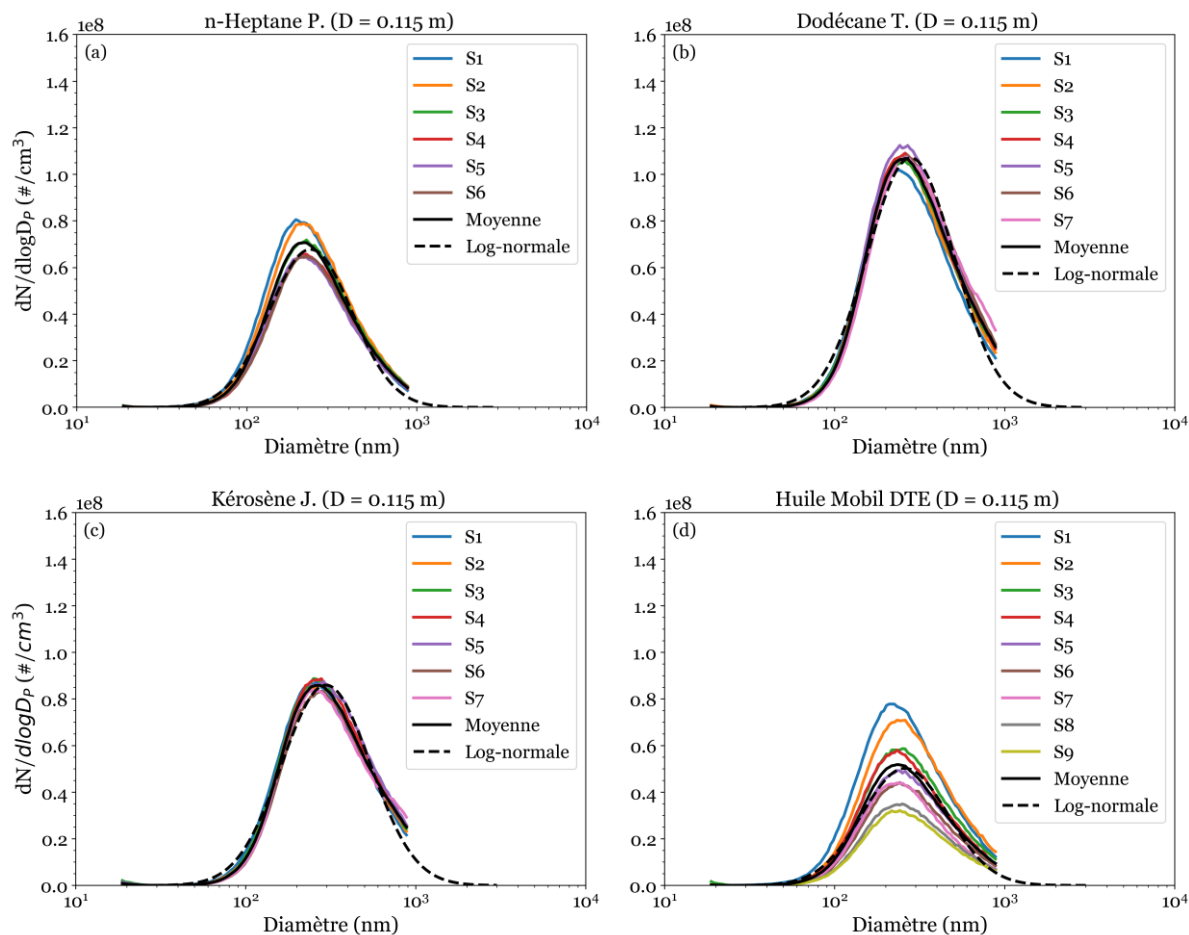


Figure G. 1 - Distribution des tailles des particules de suie du DMA, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. RH = 9.67 ACPH et 0.115 m de diamètre du bac de combustible.

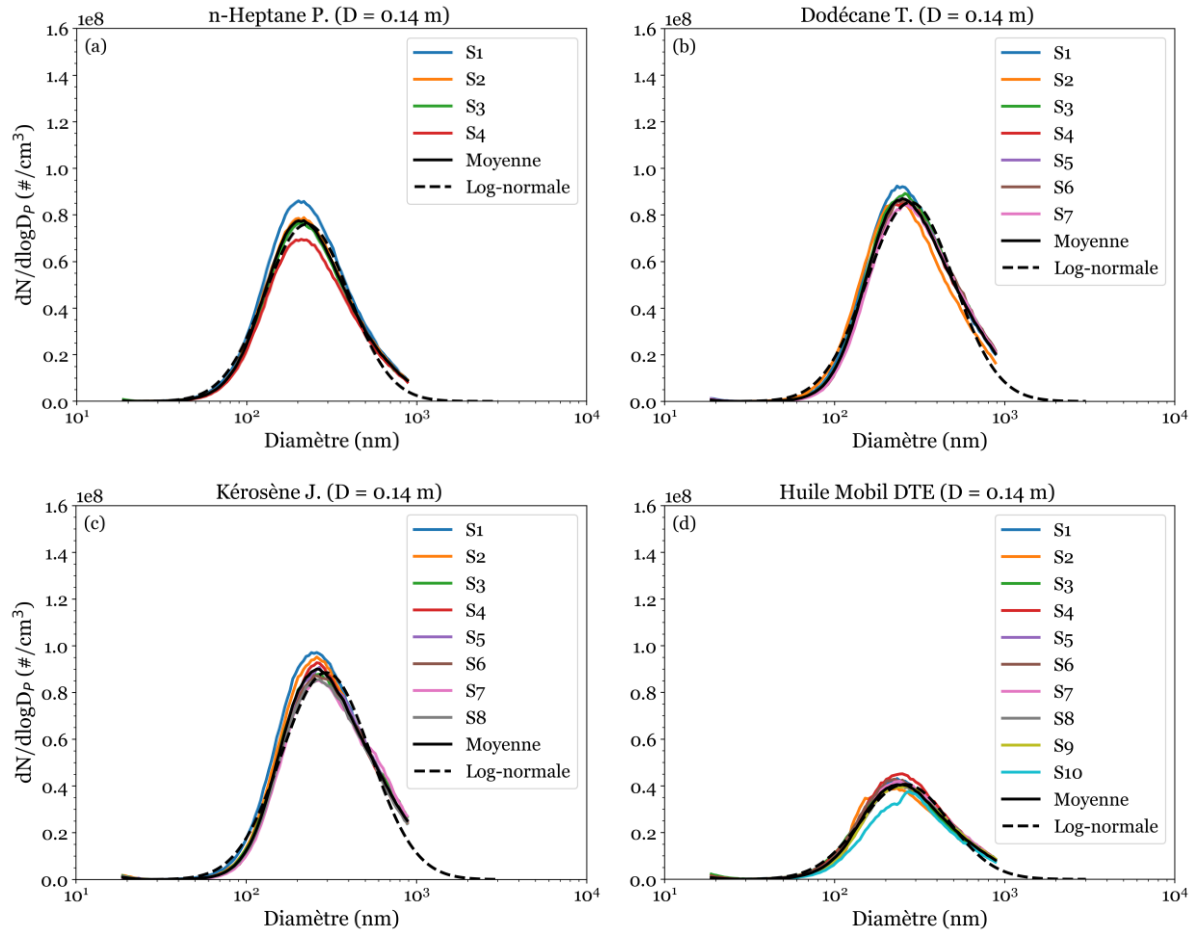


Figure G. 2 - Distribution des tailles des particules de suie du DMA, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. RH = 9.67 ACPH et 0.14 m de diamètre du bac de combustible.

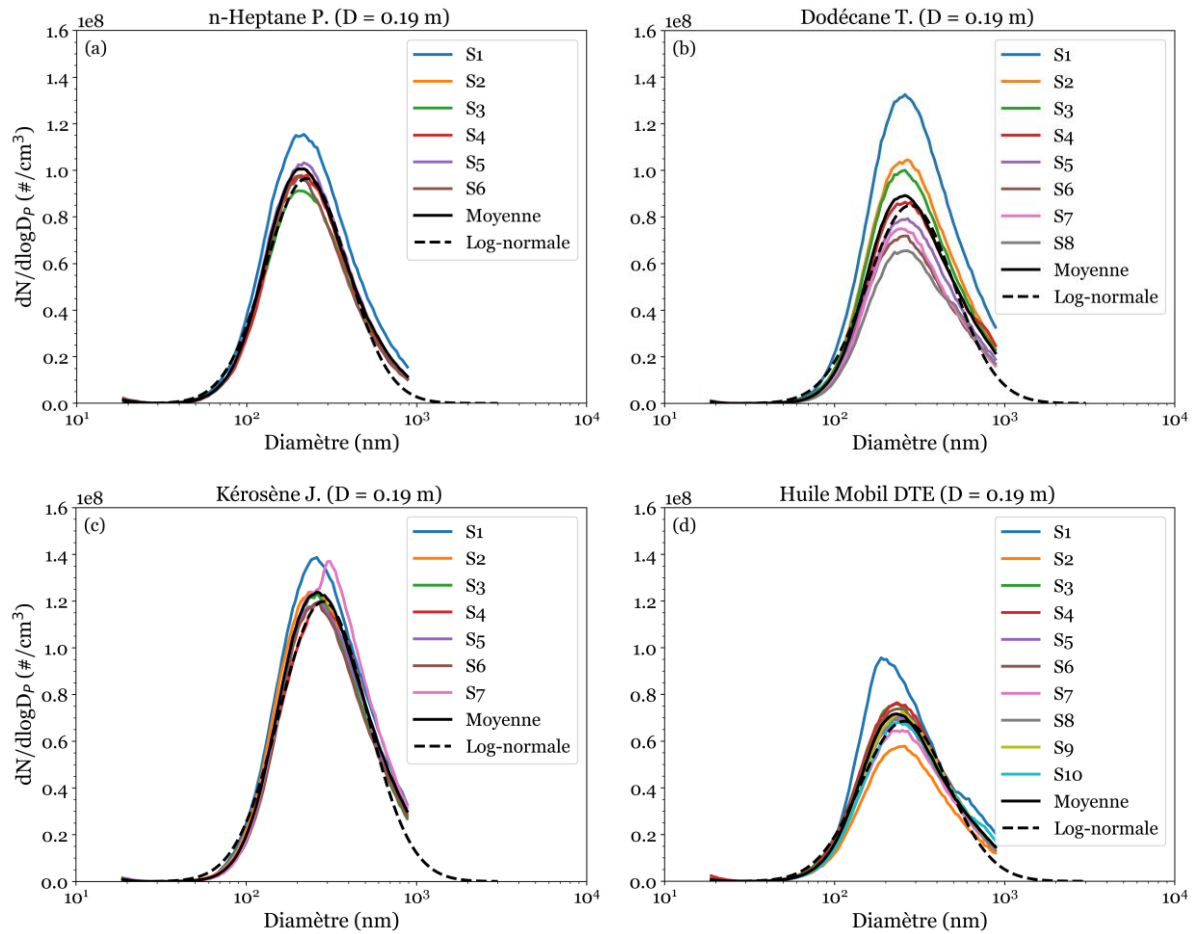


Figure G. 3 - Distribution des tailles des particules de suie du DMA, (a) n-heptane pur ; (b) dodécane technique ; (c) kérosène Jet A-1 ; (d) huile Mobil DTE heavy medium. RH = 9.67 ACPH et 0.19 m de diamètre du bac de combustible.

Références

- Acherar, L., Wang, H.-Y., Garo, J.-P., & Coudour, B. (2020, December). Impact of air intake position on fire dynamics in mechanically ventilated compartment. *Fire Safety Journal*, 118, 103210. doi:10.1016/j.firesaf.2020.103210
- Alarie, Y. (2002, January). Toxicity of Fire Smoke. *Critical Reviews in Toxicology*, 32, 259–289. doi:10.1080/20024091064246
- Alibert, D., Coutin, M., Mense, M., Pizzo, Y., & Porterie, B. (2019, March). Effect of Oxygen on the Burning Behavior of Liquid and Solid Fuels in a Large-Scale Calorimeter. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 12. doi:10.36884/jafm.12.si.29932
- Aljumaiah, O., Andrews, G., Jimenez, A., Duhoon, N., & Phylaktou, H. (2014). Fuel Volatility Effects on Pool Fires in Compartments with Low Ventilation. *Fire Safety Science*, 11, 331–345. doi:10.3801/iafss.fss.11-331
- Aljumaiah, O., Andrews, G., Mustafa, B., Al-qattan, H., Shah, V., & Phylaktou, H. (2011). Air Starved Wood Crib Compartment Fire Heat Release and Toxic Gas Yields. *Fire Safety Science*, 10, 1263–1276. doi:10.3801/iafss.fss.10-1263
- Allan, K. M., Kaminski, J. R., Bertrand, J. C., Head, J., & Sunderland, P. B. (2009, April). Laminar Smoke Points of Wax Candles. *Combustion Science and Technology*, 181, 800–811. doi:10.1080/00102200902935512
- Allen, G., Sioutas, C., Koutrakis, P., Reiss, R., Lurmann, F. W., & Roberts, P. T. (1997, June). Evaluation of the TEOM® Method for Measurement of Ambient Particulate Mass in Urban Areas. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 47, 682–689. doi:10.1080/10473289.1997.10463923
- Anderson, R. A., Watson, A. A., & Harland, W. A. (1981, July). Fire Deaths in the Glasgow Area: I General Considerations and Pathology. *Medicine, Science and the Law*, 21, 175–183. doi:10.1177/002580248102100305
- Audouin, L., Rigollet, L., Prétrel, H., Saux, W. L., & Röwekamp, M. (2013, November). OECD PRISME project: Fires in confined and ventilated nuclear-type multi-compartments - Overview and main experimental results. *Fire Safety Journal*, 62, 80–101. doi:10.1016/j.firesaf.2013.07.008

- Babrauskas, V. (1983, November). Estimating large pool fire burning rates. *Fire Technology*, 19, 251–261. doi:10.1007/bf02380810
- Babrauskas, V. (2003). *Ignition handbook : Principles and applications to fire safety engineering, fire investigation, risk management and forensic science*. (éd. Third_). Issaquah, WA Bethesda, Md: Fire Science Publishers Society of Fire Protection Engineers.
- Barakat, M., Souil, J.-M., Breillat, C., Vantelon, J.-P., Knorre, V., & Rongère, F.-X. (1998, April). Smoke data determination for various types of fuel. *Fire Safety Journal*, 30, 293–306. doi:10.1016/s0379-7112(97)00040-4
- Beji, T., & Merci, B. (2016, March). Assessment of the Burning Rate of Liquid Fuels in Confined and Mechanically-Ventilated Compartments using a Well-Stirred Reactor Approach. *Fire Technology*, 52, 469–488. doi:10.1007/s10694-014-0418-1
- Bento-Gonçalves, A., Vieira, A., Úbeda, X., & Martin, D. (2012, December). Fire and soils: Key concepts and recent advances. *Geoderma*, 191, 3–13. doi:10.1016/j.geoderma.2012.01.004
- Beyler, C. (2016). Flammability Limits of Premixed and Diffusion Flames. Dans *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (pp. 529–553). Springer New York. doi:10.1007/978-1-4939-2565-0_17
- Beyler, C. L. (1986, January). Major species production by diffusion flames in a two-layer compartment fire environment. *Fire Safety Journal*, 10, 47–56. doi:10.1016/0379-7112(86)90031-7
- Beyler, C. L. (2002). *Flammability Limits of Premixed and Diffusion Flames. SFPE handbook of fire protection engineering. Section 2, Chapter 7, Chapter 8* (éd. Third). Quincy, Massachusetts Bethesda, Maryland: National Fire Protection Association. Society of Fire Protection Engineers.
- Biteau, H., Steinhaus, T., Schemel, C., Simeoni, A., Marlair, G., Bal, N., & Torero, J. (2008). Calculation Methods for the Heat Release Rate of Materials of Unknown Composition. *Fire Safety Science*, 9, 1165–1176. doi:10.3801/iafss.fss.9-1165
- Bockhorn, H. (Éd.). (1994). *Soot Formation in Combustion*. Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-85167-4
- Bodurtha, F. (1980). *Industrial explosion prevention and protection*. New York: McGraw-Hill.

- Bowman, C. T. (1975, January). Kinetics of pollutant formation and destruction in combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1, 33–45. doi:10.1016/0360-1285(75)90005-2
- Brohez, S., Delvosalle, C., Marlair, G., & Tewarson, A. (2000, September). The Measurement of Heat Release from Oxygen Consumption in Sooty Fires. *Journal of Fire Sciences*, 18, 327–353. doi:10.1177/073490410001800501
- Bryant, R. A. (2009, July). A comparison of gas velocity measurements in a full-scale enclosure fire. *Fire Safety Journal*, 44, 793–800. doi:10.1016/j.firesaf.2009.03.010
- Bryner, N. P., Johnsson, E. L., & Pitts, W. M. (1995, September). Scaling Compartment Fires - Reduced- and Full-Scale Enclosure Burns. *International Conference on Fire Research and Engineering (ICFRE)*.
- Burgess, M. J., & Wheeler, R. V. (1911). CCXXVIII.—The lower limit of inflammation of mixtures of the paraffin hydrocarbons with air. *Journal of the Chemical Society, Transactions*, 99, 2013–2030.
- Cetegen, B. M., Zukoski, E. E., & Kubota, T. (1984, August). Entrainment in the Near and Far Field of Fire Plumes. *Combustion Science and Technology*, 39, 305–331. doi:10.1080/00102208408923794
- Chatris, J. M., Quintela, J., Folch, J., Planas, E., Arnaldos, J., & Casal, J. (2001, July). Experimental study of burning rate in hydrocarbon pool fires. *Combustion and Flame*, 126, 1373–1383. doi:10.1016/S0010-2180(01)00262-0
- Chaudhary, A., Gupta, A., Kumar, S., & Kumar, R. (2016, July). Thermal environment induced by jatropa oil pool fire in a compartment. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 127, 2397–2415. doi:10.1007/s10973-016-5722-1
- Chaudhary, A., Gupta, A., Kumar, S., & Kumar, R. (2019, January). Pool fires of jatropa biodiesel and their blends with petroleum diesel. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 101, 175–185. doi:10.1016/j.expthermflusci.2018.10.021
- Chen, A., Zhou, L., Liu, B., & Chen, W. (2011, September). Theoretical analysis and experimental study on critical conditions of backdraft. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24, 632–637. doi:10.1016/j.jlp.2011.05.001
- Chen, J., Zhang, X., Zhao, Y., Bi, Y., Li, C., & Lu, S. (2019, July). Oxygen concentration effects on the burning behavior of small scale pool fires. *Fuel*, 247, 378–385. doi:10.1016/j.fuel.2019.03.014

- Chen, X., & Lu, S.-x. (2018). On the Analysis of Flame Pulsation and Fire Induced Vent Flow Oscillatory Behaviors in Confined Enclosures with Horizontal Openings. *Procedia Engineering*, 211, 104–112. doi:10.1016/j.proeng.2017.12.131
- Chen, X., Lu, S., & Liew, K. M. (2015, December). An investigation of horizontal opening effect on pool fire behavior in a confined compartment: A study based on global equivalence ratio. *Journal of Fire Sciences*, 34, 13–29. doi:10.1177/0734904115616275
- Chow, W. K., & Han, S. S. (2011, February). Heat release rate calculation in oxygen consumption calorimetry. *Applied Thermal Engineering*, 31, 304–310. doi:10.1016/j.applthermaleng.2010.09.010
- Coppalle, A., Loo, A., & Ainé, P. (2016, October). Pool Fire Behavior in a Small and Mechanically Ventilated Compartment. Dans *Fire Science and Technology 2015* (pp. 97–104). Springer Singapore. doi:10.1007/978-981-10-0376-9_9
- Coutin, M., Plumecocq, W., Melis, S., & Audouin, L. (2012, August). Energy balance in a confined fire compartment to assess the heat release rate of an electrical cabinet fire. *Fire Safety Journal*, 52, 34–45. doi:10.1016/j.firesaf.2012.05.002
- Debray, B., Gobeau, N., & Waymel, F. (2007, January). *Incendie en milieu confiné. Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs - Rapport d'études*. Tech. rep., Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS).
- Dong, H. Q. (2013, December). *Evaluation du risque d'inflammation des fumées riches dans un milieu confiné sous-ventilé à l'aide de la simulation numérique*. Ph.D. dissertation, ISAE-ENSMA Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique - Poitiers. Récupéré sur <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00954471>
- Emmons, H. W. (1980, January). Scientific Progress on Fire. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 12, 223–236. doi:10.1146/annurev.fl.12.010180.001255
- Fleischmann, C. M., & Chen, Z. (2013). Defining the Difference between Backdraft and Smoke Explosions. *Procedia Engineering*, 62, 324–330. doi:10.1016/j.proeng.2013.08.071
- Ganesan, P. (2020, October). Evolution of Air Quality Measuring Techniques. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 07, 122–128. doi:10.13140/RG.2.2.25586.32960
- Glassman, I. (1989, January). Soot formation in combustion processes. *Symposium (International) on Combustion*, 22, 295–311. doi:10.1016/S0082-0784(89)80036-0

- Gottuk, D. T., & Lattimer, B. Y. (2016). Effect of Combustion Conditions on Species Production. Dans *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (pp. 486–528). Springer New York. doi:10.1007/978-1-4939-2565-0_16
- Gottuk, D. T., Peatross, M. J., Farley, J. P., & Williams, F. W. (1999, November). The development and mitigation of backdraft: a real-scale shipboard study. *Fire Safety Journal*, 33, 261–282. doi:10.1016/s0379-7112(99)00033-8
- Gottuk, D. T., Roby, R. J., & Beyler, C. L. (1995, January). The role of temperature on carbon monoxide production in compartment fires. *Fire Safety Journal*, 24, 315–331. doi:10.1016/0379-7112(95)00027-5
- Gottuk, D. T., Roby, R. J., Peatross, M. J., & Beyler, C. L. (1992, January). Carbon Monoxide Production in Compartment Fires. *Journal of Fire Protection Engineering*, 4, 133–150. doi:10.1177/104239159200400402
- Grabarczyk, M., Ciesińska, W., & Porowski, R. (2016). Lower Flammability Limits - Experimental and Theoretical Determination Methods for Gaseous and Liquid Fuels. State of the Art. doi:10.5604/01.3001.0009.5021
- Graham, T. L., Makhviladze, G. M., & Roberts, J. P. (1995, October). On the theory of flashover development. *Fire Safety Journal*, 25, 229–259. doi:10.1016/0379-7112(95)00049-6
- Greenberg, J. P., Friedli, H., Guenther, A. B., Hanson, D., Harley, P., & Karl, T. (2006, January). Volatile organic emissions from the distillation and pyrolysis of vegetation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 81–91. doi:10.5194/acp-6-81-2006
- Hamins, A., Johnsson, E., Donnelly, M., & Maranghides, A. (2008, April). Energy balance in a large compartment fire. *Fire Safety Journal*, 43, 180–188. doi:10.1016/j.firesaf.2007.08.002
- Hautman, D. J., Dryer, F. L., Schug, K. P., & Glassman, I. (1981, January). A Multiple-step Overall Kinetic Mechanism for the Oxidation of Hydrocarbons. *Combustion Science and Technology*, 25, 219–235. doi:10.1080/00102208108547504
- Hwang, C.-H., Lock, A., Bundy, M., Johnsson, E., & Ko, G. H. (2010, May). Effects of Fuel Location and Distribution on Full-Scale Underventilated Compartment Fires. *Journal of Fire Sciences*, 29, 21–52. doi:10.1177/0734904110372119
- Hwang, C.-H., Lock, A., Bundy, M., Johnsson, E., & Ko, G. H. (2010, March). Studies on Fire Characteristics in Over- and Underventilated Full-scale Compartments. *Journal of Fire Sciences*, 28, 459–486. doi:10.1177/0734904110363106

- Janssens, M. L. (1991, August). Measuring rate of heat release by oxygen consumption. *Fire Technology*, 27, 234–249. doi:10.1007/bf01038449
- Jiang, F., Ye, S.-s., & Yang, J. (2002, October). Design of the exhaust system in the confinement of the HTR-10. *Nuclear Engineering and Design*, 218, 209–214. doi:10.1016/s0029-5493(02)00192-9
- Jiang, P., & Lu, S.-x. (2016). Pool Fire Mass Burning Rate and Flame Tilt Angle under Crosswind in Open Space. *Procedia Engineering*, 135, 261–274. doi:10.1016/j.proeng.2016.01.122
- Kanury, A. M. (2002). *Ignition of Liquid and Solid Fuels. SFPE handbook of fire protection engineering. Section 2, Chapter 8 and Chapter 11.* Quincy, Massachusetts Bethesda, Maryland: National Fire Protection Association Society of Fire Protection Engineers.
- Kennedy, I. M. (1997, January). Models of soot formation and oxidation. *Progress in Energy and Combustion Science*, 23, 95–132. doi:10.1016/s0360-1285(97)00007-5
- Kim, S. C., Lee, K. Y., & Hamins, A. (2019, July). Energy balance in medium-scale methanol, ethanol, and acetone pool fires. *Fire Safety Journal*, 107, 44–53. doi:10.1016/j.firesaf.2019.01.004
- Ko, G. H., Hamins, A., Bundy, M., Johnsson, E. L., Kim, S. C., & Lenhert, D. B. (2009, February). Mixture fraction analysis of combustion products in the upper layer of reduced-scale compartment fires. *Combustion and Flame*, 156, 467–476. doi:10.1016/j.combustflame.2008.08.012
- Kondo, S., Takizawa, K., Takahashi, A., Tokuhashi, K., & Sekiya, A. (2008, July). A study on flammability limits of fuel mixtures. *Journal of Hazardous Materials*, 155, 440–448. doi:10.1016/j.jhazmat.2007.11.085
- Köylü, Ü. Ö., & Faeth, G. M. (1991, October). Carbon monoxide and soot emissions from liquid-fueled buoyant turbulent diffusion flames. *Combustion and Flame*, 87, 61–76. doi:10.1016/0010-2180(91)90027-9
- Krestinin, A. V. (2000, March). Detailed modeling of soot formation in hydrocarbon pyrolysis. *Combustion and Flame*, 121, 513–524. doi:10.1016/s0010-2180(99)00167-4
- Kumar Tiwari, M., Gupta, A., Kumar, R., & Kumar Sharma, P. (2021). Experimental investigation on burning characteristics of diesel pool fires in naturally ventilated compartment. *Fire and Materials*. doi:10.1002/fam.3016

- Lahaye, J. (1990, January). Mechanisms of soot formation. *Polymer Degradation and Stability*, 30, 111–121. doi:10.1016/0141-3910(90)90121-m
- Lassus, J., Courty, L., Garo, J. P., Studer, E., Jourda, P., & Aine, P. (2014, January). Ventilation effects in confined and mechanically ventilated fires. *International Journal of Thermal Sciences*, 75, 87–94. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2013.07.015
- Lassus, J., Courty, L., Garo, J.-P., Studer, E., Jourda, P., & Aine, P. (2016, December). Estimation of species concentrations during a fire in a reduced-scale room. *Journal of Fire Sciences*, 34, 30–50. doi:10.1177/0734904115617485
- Lassus, J., Studer, E., Garo, J. P., Vantelon, J. P., Jourda, P., & Aine, P. (2010, June). Influence of Ventilation on Ignition Risk of Unburnt Gases in the Extraction Duct of Underventilated Compartment Fire. *Combustion Science and Technology*, 182, 517–528. doi:10.1080/00102200903463167
- Lattimer, B. Y., Vandsburger, U., & Roby, R. J. (1998). Carbon Monoxide Levels in Structure Fires: Effects of Wood in the Upper Layer of a Post-Flashover Compartment Fire. *Fire Technology*, 34, 325–355. doi:10.1023/a:1015366527753
- Le Chatelier, & Boudouard, O. (1898). *Limits of flammability of gaseous mixtures*. Tech. rep.
- Lei, P., Chen, C., Xu, T., Jiao, W., & Zhang, Y. (2021, December). Study on temperature variation and pulsation frequency of diesel-wetted wood powder fire with different fuel component ratios and burner diameters. *Case Studies in Thermal Engineering*, 28, 101389. doi:10.1016/j.csite.2021.101389
- Léonard, S., Mulholland, G. W., Puri, R., & Santoro, R. J. (1994, July). Generation of CO and smoke during underventilated combustion. *Combustion and Flame*, 98, 20–IN4. doi:10.1016/0010-2180(94)90195-3
- Lewis, B., & Von Elbe, G. (1948, January). Theory of flame propagation. *Proceedings of the Symposium on Combustion*, 1-2, 183–188. doi:10.1016/s1062-2888(65)80027-2
- Li, P., Liu, J., Zhang, D., Chen, G., & Wang, J. (2020, March). Experimental study of reduced pressure effect on radiation feedback to the fuel surface of pool fires. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. doi:10.1007/s10973-020-09545-7
- Liu, C., Tian, X., Zhong, M., Lin, P., Gong, Y., Yin, B., & Wang, H. (2020, September). Full-scale experimental study on fire-induced smoke propagation in large underground plant of hydropower station. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 103, 103447. doi:10.1016/j.tust.2020.103447

- Ljubas, D., Krpan, H., & Matanović, I. (2010). Influence of engine oils dilution by fuels on their viscosity, flash point and fire point. *Nafta: exploration, production, processing, petrochemistry*.
- Lock, A., Bundy, M., Johnsson, E. L., Hamins, A., Ko, G. H., Hwang, C., . . . Harris, R. H. (2008). *Experimental study of the effects of fuel type, fuel distribution and vent size on full-scale underventilated compartment fires in an ISO 9705 room*. National Institute of Standards and Technology. doi:10.6028/nist.tn.1603
- Loo, A. S.-X., Coppalle, A., Yon, J., & Aîné, P. (2016, April). Time-dependent smoke yield and mass loss of pool fires in a reduced-scale mechanically ventilated compartment. *Fire Safety Journal*, 81, 32–43. doi:10.1016/j.firesaf.2016.01.006
- Lucassen, A., Beyer, M., & Zakel, S. (2019, November). Initial assessment of the determination procedure for the lower explosion point under elevated pressures. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 62, 103923. doi:10.1016/j.jlp.2019.103923
- Lyon, R. E., & Quintiere, J. G. (2007, December). Criteria for piloted ignition of combustible solids. *Combustion and Flame*, 151, 551–559. doi:10.1016/j.combustflame.2007.07.020
- Magnognou, B., Garo, J. P., Coudour, B., & Wang, H. Y. (2017, July). Risk analysis of unburnt gas ignition in an exhaust system connected to a confined and mechanically ventilated enclosure fire. *Fire Safety Journal*, 91, 291–302. doi:10.1016/j.firesaf.2017.03.036
- Mahallawy, F. M. (2002). *Fundamentals and technology of combustion*. Amsterdam Boston: Elsevier.
- Manescau, B., Courty, L., Acherar, L., Coudour, B., Wang, H.-Y., & Garo, J.-P. (2020, December). Effects of ventilation conditions and procedures during a fire in a reduced-scale room. *Process Safety and Environmental Protection*, 144, 263–272. doi:10.1016/j.psep.2020.07.035
- Manescau, B., Wang, H.-Y., Coudour, B., & Garo, J. P. (2018, November). Experimental Study about the Influence of Heat Tightness of an Enclosure Fire on Ignition Risk of Unburnt Gases in a Connected Exhaust System. *Journal of Physics: Conference Series*, 1107, 042001. doi:10.1088/1742-6596/1107/4/042001
- Manescau, B., Wang, H.-Y., Coudour, B., & Garo, J. P. (2019, October). Influence of heat tightness of an enclosure fire on ignition risk of unburnt gases in a connected exhaust

- system – An experimental study. *Fire Safety Journal*, 109, 102867. doi:10.1016/j.firesaf.2019.102867
- Manescau, B., Wang, H.-Y., Garo, J. P., Coudour, B., & Acherar, L. (2022, January). Impact of Fuel Type on Fire Dynamics in Mechanically Ventilated Compartment as a Consequence of Closing Inlet Vent. *Fire Technology*, 58, 1509–1544. doi:10.1007/s10694-021-01204-z
- Mansurov, Z. A. (2005, November). Soot Formation in Combustion Processes (Review). *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 41, 727–744. doi:10.1007/s10573-005-0083-2
- Mao, J., Xi, Y. H., Bai, G., Fan, H. M., & Ji, H. Z. (2011, May). A model experimental study on backdraught in tunnel fires. *Fire Safety Journal*, 46, 164–177. doi:10.1016/j.firesaf.2011.01.005
- Marhaba, I., Ferry, D., Laffon, C., Regier, T. Z., Ouf, F.-X., & Parent, P. (2019, June). Aircraft and MiniCAST soot at the nanoscale. *Combustion and Flame*, 204, 278–289. doi:10.1016/j.combustflame.2019.03.018
- Matsuyama, K., Okinaga, S., Hattori, Y., & Suto, H. (2016, October). Experimental Study on Fire Behavior in a Compartment Under Mechanical Ventilated Conditions: The Effects of Air Inlet Position. Dans *Fire Science and Technology 2015* (pp. 111–119). Springer Singapore. doi:10.1007/978-981-10-0376-9_11
- Maugendre, M. (2009, December). *Etude des particules de suie dans les flammes de kérosène et de diester*. Ph.D. dissertation, INSA de Rouen. Récupéré sur <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00925554>
- McCaffrey, B. J. (1979, October). *Purely buoyant diffusion flames : Some experimental results*. National Bureau of Standards. doi:10.6028/nbs.ir.79-1910
- McCaffrey, B. J., & Heskestad, G. (1976, February). A robust bidirectional low-velocity probe for flame and fire application. *Combustion and Flame*, 26, 125–127. doi:10.1016/0010-2180(76)90062-6
- Melis, S., & Audouin, L. (2008). Effects of vitiation on the heat release rate in mechanically-ventilated compartment fires. *Fire Safety Science*, 9, 931–942. doi:10.3801/iafss.fss.9-931

- Melis, S., & Audouin, L. (2008). Effects of vitiation on the heat release rate in mechanically-ventilated compartment fires. *Fire Safety Science*, 9, 931–942. doi:10.3801/IAFSS.FSS.9-931
- Mense, M., Pizzo, Y., Prétrel, H., Lallemand, C., & Porterie, B. (2019, September). Experimental and numerical study on low-frequency oscillating behaviour of liquid pool fires in a small-scale mechanically-ventilated compartment. *Fire Safety Journal*, 108, 102824. doi:10.1016/j.firesaf.2019.102824
- Michelsen, H. A., Colket, M. B., Bengtsson, P.-E., D'Anna, A., Desgroux, P., Haynes, B. S., . . . Wang, H. (2020, September). A Review of Terminology Used to Describe Soot Formation and Evolution under Combustion and Pyrolytic Conditions. *ACS Nano*, 14, 12470–12490. doi:10.1021/acsnano.0c06226
- Morehart, J. H. (1991). *Species produced in fires burning in two-layered and homogeneous vitiated environments*. Ph.D. dissertation, California Institute of Technology.
- Morehart, J. H., Zukoski, E. E., & Kubota, T. (1992, January). Chemical species produced in fires near the limit of flammability. *Fire Safety Journal*, 19, 177–188. doi:10.1016/0379-7112(92)90032-8
- Mulholland, G., Janssens, M., Yusa, S., Twilley, W., & Babrauskas, V. (1991). The Effect Of Oxygen Concentration On CO And Smoke Produced By Flames. *Fire Safety Science*, 3, 585–594. doi:10.3801/iafss.fss.3-585
- Nasr, A., Suard, S., El-Rabii, H., Garo, J. P., Gay, L., & Rigollet, L. (2013, August). Heat feedback to the fuel surface of a pool fire in an enclosure. *Fire Safety Journal*, 60, 56–63. doi:10.1016/j.firesaf.2012.12.005
- Ogemdi, I. K. (2019). Combustion of Wood by Pyrolysis: A Review. *International Journal of Atmospheric and Oceanic Sciences*, 3, 1. doi:10.11648/j.ijaos.20190301.11
- Ouf, F.-X. (2006, January). *Caractérisation des aérosols émis lors d'un incendie*. phdthesis, Faculté des sciences et techniques de l'université de Rouen, France.
- Ouf, F.-X., Vendel, J., Coppalle, A., Weill, M., & Yon, J. (2008, February). Characterization of Soot Particles in the Plumes of Over-Ventilated Diffusion Flames. *Combustion Science and Technology*, 180, 674–698. doi:10.1080/00102200701839154
- Oztekin, E. S., Crowley, S. B., Lyon, R. E., Stoliarov, S. I., Patel, P., & Hull, T. R. (2012, April). Sources of variability in fire test data: A case study on poly(aryl ether ether ketone)

- (PEEK). *Combustion and Flame*, 159, 1720–1731. doi:10.1016/j.combustflame.2011.11.009
- Parent, P., Laffon, C., Marhaba, I., Ferry, D., Regier, T. Z., Ortega, I. K., . . . Focsa, C. (2016, May). Nanoscale characterization of aircraft soot: A high-resolution transmission electron microscopy, Raman spectroscopy, X-ray photoelectron and near-edge X-ray absorption spectroscopy study. *Carbon*, 101, 86–100. doi:10.1016/j.carbon.2016.01.040
- Parker, W. J. (1984, September). Calculations of the Heat Release Rate by Oxygen Consumption for Various Applications. *Journal of Fire Sciences*, 2, 380–395. doi:10.1177/073490418400200505
- Pearson, A., Most, J.-M., & Drysdale, D. (2007, January). Behaviour of a confined fire located in an unventilated zone. *Proceedings of the Combustion Institute*, 31, 2529–2536. doi:10.1016/j.proci.2006.08.019
- Peatross, M., & Beyler, C. (1997). Ventilation Effects On Compartment Fire Characterization. *Fire Safety Science*, 5, 403–414. doi:10.3801/iafss.fss.5-403
- Pitts, W. M. (1995). The global equivalence ratio concept and the formation mechanisms of carbon monoxide in enclosure fires. *Progress in Energy and Combustion Science*, 21, 197–237. doi:10.1016/0360-1285(95)00004-2
- Pitts, W. M., Johnsson, E. L., & Bryner, N. P. (1994). Carbon monoxide formation in fires by high-temperature anaerobic wood pyrolysis. *Symposium (International) on Combustion*, 25, 1455–1462. doi:10.1016/s0082-0784(06)80789-7
- Porto, M. P., Porto, L. C., Koury, R. N., Soares, E. W., Coelho, F. G., & Machado, L. (2013, October). A case study on thrust bearing failures at the SÃO SIMÃO hydroelectric power plant. *Case Studies in Thermal Engineering*, 1, 1–6. doi:10.1016/j.csite.2013.07.001
- Prétre, H., Bouaza, L., & Suard, S. (2021, March). Multi-scale analysis of the under-ventilated combustion regime for the case of a fire event in a confined and mechanically ventilated compartment. *Fire Safety Journal*, 120, 103069. doi:10.1016/j.firesaf.2020.103069
- Prétre, H., Bouaza, L., & Suard, S. (2021). Multi-scale analysis of the under-ventilated combustion regime for the case of a fire event in a confined and mechanically ventilated compartment. *Fire Safety Journal*, 120, 103069.

- Prétrel, H., Chaaraoui, N., Lafdal, B., & Suard, S. (2022, January). Effect of environmental conditions on fire combustion regimes in mechanically-ventilated compartments. *Fire Safety Journal*, 127, 103493. doi:10.1016/j.firesaf.2021.103493
- Prétrel, H., Querre, P., & Forestier, M. (2005). Experimental Study Of Burning Rate Behaviour In Confined And Ventilated Fire Compartments. *Fire Safety Science*, 8, 1217–1228. doi:10.3801/IAFSS.FSS.8-1217
- Prétrel, H., Saux, W. L., & Audouin, L. (2012, August). Pressure variations induced by a pool fire in a well-confined and force-ventilated compartment. *Fire Safety Journal*, 52, 11–24. doi:10.1016/j.firesaf.2012.04.005
- Prétrel, H., Saux, W. L., & Audouin, L. (2013, July). Experimental determination of fire heat release rate with OC and CDG calorimetry for ventilated compartments fire scenario. *Fire and Materials*, 38, 474–506. doi:10.1002/fam.2193
- Puri, R., & Santoro, R. (1991). The Role Of Soot Particle Formation On The Production Of Carbon Monoxide In Fires. *Fire Safety Science*, 3, 595–604. doi:10.3801/iafss.fss.3-595
- Qasem, M. A., Al-Mutairi, E. M., & Jameel, A. G. (2023, January). Smoke point prediction of oxygenated fuels using neural networks. *Fuel*, 332, 126026. doi:10.1016/j.fuel.2022.126026
- Rasoulipour, S., Delichatsios, M., Fleischmann, C., & Chen, Z. (2020, September). Experimental investigation of underventilated fires in enclosures with two front vertical openings and occurrence of smoke explosions. *Fire Safety Journal*, 116, 103176. doi:10.1016/j.firesaf.2020.103176
- Rew, P. J., Hulbert, W. G., & Deaves, D. M. (1997, May). Modelling of Thermal Radiation From External Hydrocarbon Pool Fires. *Process Safety and Environmental Protection*, 75, 81–89. doi:10.1205/095758297528841
- Sahu, D., Jain, S., Gupta, A., & Kumar, S. (2019, October). Experimental studies on different liquid pool fires inside the compartment. *Fire Safety Journal*, 109, 102858. doi:10.1016/j.firesaf.2019.102858
- Sahu, D., Kumar, S., Jain, S., & Gupta, A. (2016, October). Full scale experimental and numerical studies on effect of ventilation in an enclosure diesel pool fire. *Building Simulation*, 10, 351–364. doi:10.1007/s12273-016-0328-x

- Santo, G., & Delichatsios, M. A. (1984, January). Effects of vitiated air on radiation and completeness of combustion in propane pool fires. *Fire Safety Journal*, 7, 159–164. doi:10.1016/0379-7112(84)90036-5
- Santo, G., & Tamanini, F. (1981). Influence of oxygen depletion on the radiative properties of PMMA flames. *Symposium (International) on Combustion*, 18, 619–631. doi:10.1016/s0082-0784(81)80067-7
- Saux, W. L., Pretrel, H., Lucchesi, C., & Guillou, P. (2008). Experimental study of the fire mass loss rate in confined and mechanically ventilated multi-room scenarios. *Fire Safety Science*, 9, 943–954. doi:10.3801/iafss.fss.9-943
- Savitzky, A., & Golay, M. J. (1964, July). Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. *Analytical Chemistry*, 36, 1627–1639. doi:10.1021/ac60214a047
- Simmons, R. F., & Wolfhard, H. G. (1957, June). Some limiting oxygen concentrations for diffusion flames in air diluted with nitrogen. *Combustion and Flame*, 1, 155–161. doi:10.1016/0010-2180(57)90042-1
- Stern-Gottfried, J., Rein, G., Bisby, L. A., & Torero, J. L. (2010, June). Experimental review of the homogeneous temperature assumption in post-flashover compartment fires. *Fire Safety Journal*, 45, 249–261. doi:10.1016/j.firesaf.2010.03.007
- Takeda, H., & Akita, K. (1981). Critical phenomenon in compartment fires with liquid fuels. *Symposium (International) on Combustion*, 18, 519–527. doi:10.1016/s0082-0784(81)80057-4
- Tao, Y., Lu, K., Chen, X., Mao, S., Ding, Y., & Zhao, Y. (2020, March). Experimental investigation on the temperature profile of large scale RP – 5 aviation kerosene pool fire in an open space. *Fuel*, 264, 116852. doi:10.1016/j.fuel.2019.116852
- Tewarson, A. (1994, July). Flammability Parameters of Materials: Ignition, Combustion, and Fire Propagation. *Journal of Fire Sciences*, 12, 329–356. doi:10.1177/073490419401200401
- Tewarson, A. (2002). *Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires. SFPE handbook of fire protection engineering, Section 3, Chapter 4* (éd. Third). Quincy, Massachusetts Bethesda, Maryland: National Fire Protection Association Society of Fire Protection Engineers.

- Tewarson, A. (2008). Smoke Emissions In Fires. *Proceedings of the Ninth International Symposium*, (pp. 1153–1164).
- Tewarson, A., & Steciak, J. (1983, November). Fire ventilation. *Combustion and Flame*, 53, 123–134. doi:10.1016/0010-2180(83)90011-1
- Thomas, P. (2004, February). SFPE Classic Paper Review: Fire Behavior in Rooms by Kunio Kawagoe. *Journal of Fire Protection Engineering*, 14, 5–8. doi:10.1177/1042391504039408
- Thomson, M., & Mitra, T. (2018, September). A radical approach to soot formation. *Science*, 361, 978–979. doi:10.1126/science.aau5941
- Thornton, W. M. (1917, February). XV. The relation of oxygen to the heat of combustion of organic compounds. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 33, 196–203. doi:10.1080/14786440208635627
- Tiwari, M. K., Gupta, A., Kumar, R., & Sharma, P. K. (2020, June). Effects of elevated pool fire in a naturally ventilated compartment. *Thermal Analysis and Calorimetry*, 146, 341–353. doi:10.1007/s10973-020-09954-8
- Tortajada-Genaro, L.-A., & Borrás, E. (2011). Temperature effect of tapered element oscillating microbalance (TEOM) system measuring semi-volatile organic particulate matter. *Journal of Environmental Monitoring*, 13, 1017. doi:10.1039/coem00451k
- Tsai, L. C., & Chiu, C. W. (2013, May). Full-scale experimental studies for backdraft using solid materials. *Process Safety and Environmental Protection*, 91, 202–212. doi:10.1016/j.psep.2012.05.007
- Tsuchiya, Y. (1982). Methods of determining heat release rate: State-of-the-art. *Fire Safety Journal*, 5, 49–57. doi:10.1016/0379-7112(82)90006-6
- Tsuchiya, Y., & Mathieu, J. (1991). Heat, Co And Smoke Release Rates Of Plywood Under A Depleted Oxygen Atmosphere: An Experimental Study Using An Osu Heat Release Rate Apparatus. *Fire Safety Science*, 3, 605–614. doi:10.3801/iafss.fss.3-605
- Turns, S. (2000). *An introduction to combustion : concepts and applications*. Boston: WCB/McGraw-Hill.
- Ukleja, S. (2012, May). *Production of smoke and carbon monoxide in underventilated enclosure fires*. phdthesis, University of Ulster. Récupéré sur <http://hdl.handle.net/10919/22022>

- Ukleja, S., Delichatsios, M., Delichatsios, M., & Lee, Y. (2008). Carbon monoxide and smoke production downstream of a compartment for underventilated fires. *Fire Safety Science*, 9, 849–860. doi:10.3801/iafss.fss.9-849
- Utiskul, Y., Quintiere, J. G., Rangwala, A. S., Ringwelski, B. A., Wakatsuki, K., & Naruse, T. (2005, June). Compartment fire phenomena under limited ventilation. *Fire Safety Journal*, 40, 367–390. doi:10.1016/j.firesaf.2005.02.002
- Utiskul, Y., Quintiere, J. G., Rangwala, A. S., Ringwelski, B. A., Wakatsuki, K., & Naruse, T. (2005, June). Compartment fire phenomena under limited ventilation. *Fire Safety Journal*, 40, 367–390. doi:10.1016/j.firesaf.2005.02.002
- Van den Schoor, F., & Verplaetsen, F. (2007, September). The upper flammability limit of methane/hydrogen/air mixtures at elevated pressures and temperatures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32, 2548–2552. doi:10.1016/j.ijhydene.2006.10.053
- Venderbosch, R. H., & Prins, W. (2010, March). Fast pyrolysis technology development. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 4, 178–208. doi:10.1002/bbb.205
- Vondou, F. M., Abbe, C. V., Zaida, J. T., Mvogo, P. O., & Mouangue, R. (2021, February). Experimental Study of the Effect of Confining on the Development of Fire in a Closed Compartment. (B. Shaw, Éd.) *Journal of Combustion*, 2021, 1–10. doi:10.1155/2021/6662830
- Wang, J., Cui, X., Zhang, R., Xie, Q., Zhang, S., & Shi, L. (2021, August). Study on the mass loss rate of liquid pool fire in a well-confined ship cabin. *International Journal of Thermal Sciences*, 166, 106984. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2021.106984
- Wang, Y., & Chung, S. H. (2019, September). Soot formation in laminar counterflow flames. *Progress in Energy and Combustion Science*, 74, 152–238. doi:10.1016/j.pecs.2019.05.003
- Weng, W. G., & Fan, W. C. (2003, January). Critical condition of backdraft in compartment fires: a reduced-scale experimental study. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 16, 19–26. doi:10.1016/s0950-4230(02)00088-8
- Wieczorek, C. J., Vandsburger, U., & Floyd, J. E. (2004, August). Evaluating the Global Equivalence Ratio Concept for Compartment Fires: Part II-Limitations for Correlating Species Yields. *Journal of Fire Protection Engineering*, 14, 175–197. doi:10.1177/1042391504041471

- Wu, Y., Modica, V., Yu, X., & Grisch, F. (2018, January). Experimental Investigation of Laminar Flame Speed Measurement for Kerosene Fuels: Jet A-1, Surrogate Fuel, and Its Pure Components. *Energy & Fuels*, 32, 2332–2343. doi:10.1021/acs.energyfuels.7b02731
- Yuen, A. C., Yeoh, G. H., Timchenko, V., Chen, T. B., Chan, Q. N., Wang, C., & Li, D. D. (2017, December). Comparison of detailed soot formation models for sooty and non-sooty flames in an under-ventilated ISO room. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 115, 717–729. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.08.074
- Zabetakis, M. G. (1965, January). *Flammability characteristics of combustible gases and vapors*. Bureau of Mines Washington DC. doi:10.2172/7328370
- Zabetakis, M. G., & Burgess, D. S. (1961). *Research on the hazards associated with the production and handling of liquid hydrogen*. Calinornia Institute of Technology. US Department of the Interior, Bureau of Mines. US Department of the Interior, Bureau of Mines.
- Zabetakis, M. G., & Burgess, D. S. (1961). *Research on the hazards associated with the production and handling of liquid hydrogen* (Vol. 5707). US Department of the Interior, Bureau of Mines.
- Zhang, T., Wang, Z., Wong, H. Y., Tam, W. C., Huang, X., & Xiao, F. (2022, June). Real-time forecast of compartment fire and flashover based on deep learning. *Fire Safety Journal*, 130, 103579. doi:10.1016/j.firesaf.2022.103579
- Zukoski, E. E., Morehart, J. H., Kubota, T., & Toner, S. J. (1991, February). Species production and heat release rates in two-layered natural gas fires. *Combustion and Flame*, 83, 325–332. doi:10.1016/0010-2180(91)90079-q
- Zukoski, E. E., Tone, S. J., Morehart, J. H., & Kubota, T. (1989). Combustion processes in two-layered configurations. *Fire Safety Science - Proceedings of the Second International Symposium*, 295-304.