

NRC Publications Archive Archives des publications du CNRC

Wagons-citernes exposés à des incendies : analyses expérimentales des conditions thermiques imposées à un wagon enveloppé d'un incendie de pétrole brut (séries d'essais 1 à 3)

Ko, Yoon; Lam, Cecilia; Gibbs, Eric; Lafrance, Pier-Simon; Weinfurter, Mark

For the publisher's version, please access the DOI link below./ Pour consulter la version de l'éditeur, utilisez le lien DOI ci-dessous.

<https://doi.org/10.4224/40002687>

NRC Publications Archive Record / Notice des Archives des publications du CNRC :

<https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=de841d8b-7782-4795-8dba-1810955ccc43>

<https://publications-cnrc.canada.ca/fra/voir/objet/?id=de841d8b-7782-4795-8dba-1810955ccc43>

Access and use of this website and the material on it are subject to the Terms and Conditions set forth at

<https://nrc-publications.canada.ca/eng/copyright>

READ THESE TERMS AND CONDITIONS CAREFULLY BEFORE USING THIS WEBSITE.

L'accès à ce site Web et l'utilisation de son contenu sont assujettis aux conditions présentées dans le site

<https://publications-cnrc.canada.ca/fra/droits>

LISEZ CES CONDITIONS ATTENTIVEMENT AVANT D'UTILISER CE SITE WEB.

Questions? Contact the NRC Publications Archive team at

PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca. If you wish to email the authors directly, please see the first page of the publication for their contact information.

Vous avez des questions? Nous pouvons vous aider. Pour communiquer directement avec un auteur, consultez la première page de la revue dans laquelle son article a été publié afin de trouver ses coordonnées. Si vous n'arrivez pas à les repérer, communiquez avec nous à PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca.

NRC·CMRC CONSTRUCTION

Wagons-citernes exposés à des incendies :

Analyses expérimentales des conditions thermiques imposées à un wagon enveloppé d'un incendie de pétrole brut (Séries d'essais 1 à 3)

Auteur(s) : Yoon Ko, Ph.D., Cecilia Lam, Ph.D., Eric Gibbs, Pier-Simon Lafrance et Mark Weinfurter

Rapport n° : A1-010647-01

Date du rapport : 7 octobre 2020

N° de contrat : A1-010647

Date du contrat :

- 3 septembre 2015 (contrat original)
- 8 janvier 2016 (modification no 1)
- 17 février 2017 (modification no 2)
- 14 septembre 2017 (modification no 3)
- 16 janvier 2018 (modification no 4)
- 28 mars 2018 (modification no 5)
- 19 juillet 2018 (modification no 6)
- 20 décembre 2018 (modification no 7)
- 17 septembre 2019 (modification no 8)
- 20 janvier 2020 (modification no 9)



© 2020 Sa Majesté la Reine du chef du Canada,
représentée par le Conseil national de recherches du Canada.

Numéro TP : TP 15465

ISBN : 978-0-660-40435-6

Catalogue : T86-69/2021F-PDF

Numéro NRC : NRCC-CONST-56440F




Wagons-citernes exposés à des incendies :

Analyses expérimentales des conditions thermiques imposées à un wagon enveloppé d'un incendie de pétrole brut

(Séries d'essais 1 à 3)

GP

Ko, Yoon

 Digitally signed by Ko, Yoon
Date: 2021.09.22 15:49:43 -04'00'

Yoon Ko, Ph.D.

Approuvé



Kashef, AH

2021.09.24 16:53:04 -04'00'

Ahmed Kashef, Ph.D.

Chef de programme

Programme de transition du Laboratoire de l'incendie
CNRC Construction

Numéro de rapport : A1-010647-01
Date du rapport : 28 Octobre 2020
Numéro de contrat : A1-010647
Date du contrat : 3 septembre 2015 (contrat original)
8 janvier 2016 (modification n° 1)
17 février 2017 (modification n° 2)
14 septembre 2017 (modification n° 3)
16 janvier 2018 (modification n° 4)
28 mars 2018 (modification n° 5)
19 juillet 2018 (modification n° 6)
20 décembre 2018 (modification n° 7)
17 septembre 2019 (modification n° 8)
20 janvier 2020 (modification n° 9)
Programme : Programme de transition du laboratoire de l'incendie

Ce rapport ne peut être reproduit en tout ou en partie sans le consentement écrit du Conseil national de recherches du Canada et du client.

Remerciements

Ce projet a été financé par Transports Canada, et les essais au feu ont été réalisés par Sandia National Laboratories. Un soutien supplémentaire a été apporté dans le cadre de la recherche sur la caractérisation du pétrole brut par le département de l'Énergie des É.-U. (US DOE) et le département des Transports des É.-U. (US DOT).

Table des matières

SOMMAIRE	1
1 Introduction	3
2 Objectif	3
3 Aperçu du projet et du rapport.....	3
4 Méthodes.....	4
4.1 Manipulation et caractérisation du combustible.....	4
4.2 Essais de réaction au feu.....	5
5 Plan de travail	5
6 Construction du calorimètre	7
7 Essais préliminaires.....	8
8 Caractérisation du combustible	9
9 Essais de réaction au feu : série 1, série 2 et série 3	12
9.1 Paramètres d'essai	12
9.2 Manipulation du combustible et systèmes d'alimentation en combustible	14
9.2.1 Heptane (essais de la série 1)	14
9.2.2 Pétrole brut de Bakken (essais de la série 2).....	14
9.2.3 Pétrole brut dilbit (série 3).....	15
9.3 Installation d'essai	15
9.4 Montage d'essai.....	15
9.5 Mesures.....	16
9.5.1 Débit thermique	16
9.5.2 Taux de combustion de la masse de combustible.....	18
9.5.3 Températures des flammes/panaches	18
9.5.4 Hauteur des flammes.....	19
9.5.5 Pouvoir émissif de la flamme par unité de surface	19
9.5.6 Flux thermique à une distance du feu	19
9.5.7 Flux thermique total vers un objet engouffré (mesures effectuées par le calorimètre)	
20	
10 Résultats des essais au feu et discussion.....	21
10.1 Comportement général du feu	21
10.2 Taux de combustion de la masse	22

10.2.1	Comportement au feu et caractéristiques du combustible.....	22
10.2.2	Impact des paramètres sur le taux de combustion de la masse.....	23
10.3	Hauteur des flammes.....	24
10.4	Débits thermiques.....	24
10.4.1	Vérification de la mesure du débit thermique.....	24
10.4.2	Débit thermique convectif et par rayonnement.....	25
10.5	Température et pouvoir émissif de la flamme par unité de surface.....	28
10.5.1	Vérification des mesures.....	28
10.5.2	Profils verticaux de la température et du pouvoir émissif de la flamme par unité de surface	28
10.5.3	Les effets des paramètres d'essai sur la température et le pouvoir émissif de la flamme par unité de surface.....	30
10.5.4	PES moyen et radiation totale émis par la flamme.....	30
10.6	Flux thermique reçu par le calorimètre.....	31
10.6.1	Variation du flux thermique en circonférence du calorimètre.....	31
10.6.2	Les effets des paramètres d'essai et des caractéristiques du combustible sur le flux thermique total vers le calorimètre.....	33
10.7	Flux thermique incident s'éloignant du feu.....	34
11	Conclusions.....	35
12	Recommandations pour une étude future.....	38
13	Références.....	41
	Supplément A, Rapport d'essai.....	43
	Supplément B, Rapport de caractérisation du pétrole brut.....	44
	Supplément C, Rapport d'essai préliminaire.....	45

Liste des Figures

Figure 1 Calorimètre instrumenté avec des thermocouples sur l'enveloppe extérieure et l'enveloppe intérieure; le centre creux devant être rempli de matériaux isolants	8
Figure 2 Graphiques du nombre de carbones de l'huile entière pour les huiles de Bakken et dilbit échantillonnées sur le site de combustion.....	11
Figure 3 Distribution de la température en fonction du point d'ébullition pour les échantillons de combustible.....	12
Figure 4 Montage d'essai.....	16
Figure 5 Instrumentation du calorimètre.....	16
Figure 6 DT (Q) et DT convectif (Q _c) mesurés dans les essais (T) à l'heptane, au Bakken et au dilbit	22
Figure 7 Les débits thermiques mesurés par calorimétrie de la consommation d'oxygène et les taux de combustion de la masse en comparaison avec les débits thermiques convectifs	25
Figure 8 Fractions de chaleur par rayonnement.....	27
Figure 9 Débit thermique par rayonnement comparé au débit thermique convectif	27
Figure 10 Températures du panache de feu à partir des mesures de la caméra IR	29
Figure 11 Variations verticales du PES avec l'élévation par rapport à la hauteur de la flamme pour l'heptane (essai 1.1) et les pétroles bruts de Bakken (essai 2.3) et dilbit (essai 3.5)	30
Figure 12 Flux thermique total [kW/m ²] mesuré par le calorimètre	32
Figure 13 Flux thermique total moyen vers le calorimètre placé à 1 m au-dessus du bac par rapport au pouvoir émissif maximal de la flamme par unité de surface	34
Figure 14 Flux thermique incident	35

Liste des tableaux

Tableau 1 Propriétés physiques	11
Tableau 2 Matrice des essais.....	13
Tableau 3 Résumé des résultats des essais	40

Nomenclature

C_p	Capacité thermique massique (kJ/kg/K)
DOE	Département de l'Énergie des États-Unis
DOT	Département des Transports des États-Unis
E_{O_2}	Débit thermique par unité de masse d'O ₂ consommée dans la réaction (MJ/kg d'O ₂)
E_{CO}	Débit thermique par unité de masse d'O ₂ consommée pour la combustion du CO au CO ₂ (MJ/kg d'O ₂)
f	Facteur de combustion incomplète
FLAME	Fire Laboratory for Accreditation of Models and Experiments
H_c	Chaleur complète de combustion (MJ/kg)
DT	Débit thermique (MW)
\dot{m}_b	Taux de combustion de la masse de combustible (kg/s)
\dot{m}_e	Débit massique du gaz mesuré dans le conduit (kg/s)
$\dot{m}_{O_2}^o$	Débit massique de l'oxygène dans l'air
IRLOM	Infrarouge à longueur d'onde moyenne
CNRC	Conseil national de recherches du Canada
Q	Débit thermique (MW)
Q_C	Débit thermique convectif (MW)
Q_r/Q_C	Ratio du DT par rayonnement au DT convectif
q_{total}	Flux thermique total (kW/m ²)
$q_{incident}$	Flux thermique incident (kW/m ²)
$q_{convection}$	Flux thermique convectif (kW/m ²)
$q_{absorbed}$	Flux thermique absorbé (kW/m ²)
$q_{emitted}$	Flux thermique émis (kW/m ²)
PEA	Plan d'échantillonnage et d'analyse du combustible
SNL	Sandia National Laboratories
ΔT	Montée en température (°C)
$T_{surface}$	Température de surface (K)
x	Facteur de combustion incomplète
X_r	Fraction de la chaleur par rayonnement
Z/l_f	Élévation relative à la hauteur de flamme

Symboles grecs

α	Absorptivité
\emptyset	Facteur d'appauvrissement en oxygène
σ	Constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$)
ε	Émissivité

Les wagons-citernes exposés au feu : Analyses expérimentales des conditions thermiques imposées à un wagon prisonnier d'un incendie de pétrole brut (Séries d'essais 1 à 3)

Auteur(s) : Yoon Ko, Ph.D., Cecilia Lam, Ph.D., Eric Gibbs, Pier-Simon Lafrance et Mark Weinfurter

SOMMAIRE

Une série d'expériences de feu en nappe de 2 m de diamètre a été réalisée afin de mieux évaluer le danger thermique comparatif entre différents pétroles bruts au cours de feux en nappe, qui pourraient se produire à la suite d'un accident dans le transport terrestre de pétroles bruts. Afin d'évaluer les conditions thermiques auxquelles un wagon-citerne pourrait être exposé, un calorimètre conçu pour simuler un wagon-citerne à l'échelle 1/10^e a été placé au-dessus d'un feu en nappe de 2 m de diamètre alimenté par de l'heptane dans les essais de la série 1, du pétrole brut de Bakken du Dakota du Nord dans les essais de la série 2 et du pétrole brut de bitume dilué (dilbit) de l'Alberta dans les essais de la série 3. Le calorimètre a été instrumenté pour mesurer le flux thermique total à différents endroits de sa surface.

Les pétroles bruts utilisés dans le programme d'essai ont été spécialement manipulés pour garantir que leur composition ne change pas au cours du programme d'essai, depuis le moment de l'acquisition du combustible jusqu'au moment de l'essai au feu. Parallèlement aux essais au feu, une étude de caractérisation du combustible a été menée pour permettre l'étude des effets du feu en fonction des propriétés du combustible.

Les comportements de combustion des combustibles ont été observés en mesurant le taux de combustion de la masse, la hauteur de la flamme et le débit thermique (DT), le pouvoir émissif de la flamme par unité de surface (PES) et les flux thermiques incidents à l'écart du feu. Dans l'ensemble, les feux d'heptane et de pétrole brut de Bakken ont montré une combustion continue et régulière tout au long de l'essai, tandis que les feux de dilbit ont montré un comportement de combustion instable, qui est principalement causé par la composition du combustible contenant une plus grande fraction d'hydrocarbures lourds que le pétrole brut de Bakken et l'heptane.

Le flux thermique total mesuré par le calorimètre a indiqué que les mesures étaient inégales autour de la circonférence du calorimètre. Le flux thermique moyen vers le calorimètre provenant des feux de pétrole brut de Bakken et dilbit était plus élevé que celui des feux d'heptane, bien que les DT mesurés des feux en nappe de pétrole brut de Bakken et dilbit étaient inférieurs à ceux des feux en nappe d'heptane. La principale raison de l'échauffement accru de l'objet en particulier par les feux de pétrole brut de Bakken et dilbit est que le flux thermique total vers l'objet est principalement affecté par l'exposition à la chaleur par rayonnement de la flamme, et les feux de pétrole brut de Bakken et dilbit ont une fraction de chaleur par rayonnement plus élevée.

L'étude a également porté sur les effets des paramètres d'essai sur les caractéristiques du feu. Ces paramètres comprennent l'effet des types de combustible, la présence et le placement d'un calorimètre dans le feu, la température du combustible d'alimentation et le fait de laisser le combustible se consumer. Les résultats indiquent qu'il n'y a pas eu d'effet significatif de la « température du combustible d'alimentation » et du fait de « laisser le combustible se consumer (c'est-à-dire une alimentation en combustible non continue) ». La température plus élevée du combustible d'alimentation a causé une augmentation de la vitesse de combustion d'environ 10 % pour les essais à l'heptane et au pétrole brut de Bakken. Pour les feux de pétrole brut dilbit, en raison du comportement de combustion non stable, l'impact du calorimètre a été difficile à saisir. Le fait de laisser le combustible se consumer, plutôt que de maintenir une profondeur de combustible constant dans le bac de la nappe, a eu un effet minimal sur les valeurs moyennes des taux de combustion de la masse de combustible et les caractéristiques générales des feux en nappe de pétrole brut de Bakken. Pour le dilbit, l'effet de la composition du combustible sur le comportement au feu a été observé dans l'alimentation continue et non

continue en combustible. Le comportement au feu non uniforme est devenu plus facile à discerner lorsqu'il n'y avait pas d'alimentation continue en combustible dans le réservoir.

1 Introduction

Transports Canada et le Conseil national de recherches du Canada (CNRC) ont mis sur pied un programme de recherche expérimentale afin de mieux évaluer le danger thermique comparatif entre différents pétroles bruts au cours de feux en nappe, qui pourraient survenir à la suite d'un accident dans le transport terrestre de pétroles bruts. Plus précisément, le programme de recherche se concentre sur l'évaluation du danger thermique présenté par l'exposition des wagons-citernes aux feux en nappe d'hydrocarbures. Les lacunes dans la compréhension du comportement de combustion des feux de pétrole brut et de leurs effets thermiques sur les wagons-citernes ont été cernées pour la première fois dans une revue de la littérature menée par le CNRC [1]. Par la suite, des essais au feu à échelle réduite ont été réalisés pour analyser expérimentalement les conditions thermiques de wagons-citernes prisonniers de feux en nappe alimentés par de l'heptane dans les essais de la série 1, du pétrole brut de Bakken du Dakota du Nord dans les essais de la série 2 et du pétrole brut dilbit de l'Alberta dans les essais de la série 3 (voir le Supplément A, Rapport d'essai). La caractérisation du combustible a également été réalisée pour permettre l'étude des effets du feu en fonction des propriétés du combustible (voir le Supplément B, Rapport de caractérisation du pétrole brut).

2 Objectif

L'objectif de la présente étude expérimentale est de caractériser expérimentalement, à échelle réduite, les conditions thermiques externes des wagons-citernes enveloppés de différents feux en nappe de pétrole brut. Deux pétroles bruts ayant des caractéristiques de combustion différentes ont été sélectionnés pour les essais au feu afin d'étudier les effets du feu en fonction des propriétés du combustible.

3 Aperçu du projet et du rapport

Les expériences ont été conçues pour simuler un wagon-citerne à l'échelle 1/10^e enveloppé d'un feu en nappe de pétrole brut. L'objectif des expériences était d'évaluer l'environnement thermique à l'extérieur du wagon-citerne et les niveaux de flux thermique vers le wagon-citerne lui-même. À ce titre, un objet cylindrique (calorimètre) représentant le wagon-citerne a été construit pour les essais au feu. Le cylindre (calorimètre) a été instrumenté pour mesurer le flux thermique total à différents endroits le long de sa surface. L'étude a également examiné les effets de certains paramètres d'essai, notamment les effets du type de combustible, la présence et l'emplacement d'un calorimètre dans le feu, la température du combustible d'alimentation et le fait de laisser le combustible se consumer dans le bac de la nappe.

Une étude préliminaire (voir le Supplément C, Rapport d'essai préliminaire) a été menée pour optimiser les méthodes d'essai initiales et pour générer un ensemble de données de base pour les essais ultérieurs. L'étude préliminaire a pris fin en raison de la fermeture et du déclassement de l'installation d'essai au feu en grandeur réelle du CNRC. Les essais expérimentaux ultérieurs ont été confiés à Sandia National Laboratories (SNL). L'étude expérimentale comprenait un total de 15 essais au feu réalisés en trois séries : série 1 (3 essais à l'heptane), série 2 (6 essais au pétrole brut de Bakken) et série 3 (6 essais au pétrole brut dilbit).

Le présent rapport se concentre sur les séries d'essais 1, 2 et 3, pour lesquelles il :

- résume le plan de travail (section 5);
- décrit la construction du calorimètre (section 6);
- illustre les essais préliminaires (section 7);
- décrit les résultats de l'étude de caractérisation du combustible (section 8), qui a été menée en parallèle avec les séries d'essais 1, 2 et 3;
- décrit les installations d'essai pour les séries 1, 2 et 3 (section 9)
- souligne les résultats des séries d'essais 1, 2 et 3 (section 10);
- présente les conclusions et les recommandations pour de futures études (sections 11 et 12).

Pour une description détaillée des tâches et des résultats, veuillez vous reporter aux suppléments A, B et C.

4 Méthodes

Des expériences ont été menées dans une installation intérieure en introduisant un objet cylindrique représentant un wagon-citerne à l'échelle 1/10^e enveloppé d'un feu en nappe de pétrole brut afin d'examiner les paramètres liés au feu affectant l'échauffement d'un wagon-citerne. Le calorimètre cylindrique a été instrumenté de telle sorte que le flux thermique total vers le calorimètre puisse être mesuré à différents endroits de sa surface.

Le pétrole brut a été acquis dans des récipients sous pression capables de préserver toutes les fractions légères du pétrole brut, et également de garantir que le pétrole brut reste dans une seule phase (liquide) pendant toute la durée du projet. Pendant les essais au feu, le pétrole brut a été transféré en continu directement du récipient sous pression vers un bac de combustible placé dans l'installation intérieure.

4.1 Manipulation et caractérisation du combustible

Le feu est une réaction chimique d'oxydation du combustible. À ce titre, le comportement de combustion d'un combustible dépend, en général, de la composition de son mélange d'hydrocarbures [1, 2]. Le pétrole brut est un mélange complexe contenant de nombreux composants hydrocarbonés différents, notamment des hydrocarbures légers de faible densité. Ces composants de fraction légère qui ont tendance à se volatiliser à des températures plus basses et à la pression atmosphérique sont d'un intérêt particulier pour cette étude car leur présence a un impact sur la caractérisation du combustible et peut avoir un impact sur le comportement global de la combustion. Par conséquent, les combustibles ont été acquis et manipulés de manière à préserver les compositions et les caractéristiques du combustible afin que les essais au feu puissent saisir les comportements de combustion (p. ex. le taux de combustion de la masse de combustible, la production de suie et le débit thermique) de chaque hydrocarbure dans son ensemble sans perdre aucun composant, y compris les fractions légères. Les paragraphes suivants décrivent la procédure utilisée dans cette étude pour assurer une manipulation et une caractérisation appropriées des combustibles;

- 1) Le pétrole brut de Bakken a été acquis, dans une citerne de transport sous pression de construction spéciale, sur le site de chargement dans le Dakota du Nord, aux États-Unis, au moyen d'une méthode de déplacement de l'eau qui permet de transférer le pétrole sans être exposé à l'air atmosphérique. Le pétrole brut dilbit a été acquis dans 12 bouteilles de propane modifiées. Le pétrole brut acquis a été stocké dans ces récipients sous pression pour conserver les composants de fraction légère jusqu'aux essais.

- 2) Un système d'alimentation en combustible a été conçu pour les pétroles bruts de Bakken et dilbit afin de fournir un flux continu de combustible dans un bac d'essai. Il s'agit de simuler un scénario d'accident avec une fuite continue de combustible d'un wagon-citerne vers un feu en nappe. Ainsi, le combustible doit être transféré dans le bac sans être exposé à l'air atmosphérique jusqu'à ce qu'il atteigne le bac.
- 3) Les pétroles bruts acquis ont été caractérisés, et l'étude de caractérisation du combustible a été réalisée en parallèle au programme d'essais au feu pour explorer les liens potentiels entre les propriétés du combustible et son comportement au feu.

4.2 Essais de réaction au feu

Les essais de réaction au feu ont été planifiés comme suit;

- 1) Mise en place d'un wagon-citerne à l'échelle 1/10^e destiné à être introduit dans des feux en nappe pour évaluer le flux thermique total d'un wagon-citerne de pétrole brut exposé à un feu en nappe. Un objet cylindrique (calorimètre) représentant le wagon-citerne à l'échelle 1/10^e a été conçu et construit pour les essais au feu. Le calorimètre ne contenait pas de chargement et a été instrumenté de manière à ce que le flux thermique total vers le calorimètre puisse être mesuré à différents endroits de sa surface.
- 2) Organisation d'essais au feu en nappe de 2 m de diamètre avec un système d'alimentation en combustible : le calorimètre a été placé au-dessus d'un feu en nappe de 2 m de diamètre. Des tests ont été effectués pour étudier l'effet de divers paramètres sur l'échauffement de l'objet cylindrique. Les paramètres testés dans cette étude comprennent le type de combustible, le placement du calorimètre dans le feu, la température initiale du combustible, et une alimentation en combustible continue par rapport à une alimentation non continue. La section 9.1 traite de ces paramètres en détail.
- 3) Instrumentation du montage d'essai pour mesurer la température dans le feu, le rayonnement du feu, la température dans la couche de combustible, la température du calorimètre, le flux thermique sur le calorimètre, le débit thermique du feu et le taux de combustion de la masse de combustible.

5 Plan de travail

Les tâches suivantes ont été réalisées dans le cadre de ce projet :

Année 1 (année financière 2015-2016) :

- 1) Conception, construction et instrumentation du premier calorimètre cylindrique, de 0,3 m de diamètre et 1,8 m de long.
- 2) Réalisation des essais préliminaires au laboratoire de l'incendie du CNRC : trois essais (deux avec du diesel et avec de l'heptane) ont été effectués pour tester le système d'alimentation en combustible, l'instrumentation et les performances du calorimètre. De plus, du pétrole brut a été obtenu en Alberta.

Année 2 (année financière 2016-2017) :

- 1) Amélioration de la conception de l'équipement de manutention du combustible de l'année 1.
Note : la mise en œuvre de ces améliorations a été interrompue en raison du changement de site d'essai.
Préparation du pétrole brut provenant de l'Alberta de l'année 1 pour une éventuelle expédition vers un nouveau site d'essai.

Note : l'expédition a été avortée, et il était prévu d'acquérir un nouveau pétrole brut pour les essais prévus au cours de l'année 3.

Année 3 (année financière 2017-2018) :

- 1) Remise à neuf du 1^{er} calorimètre et construction du 2^e calorimètre qui sera utilisé pour les essais au feu.
- 2) Confirmation et obtention de l'accès au nouveau site d'essai (Sandia National Laboratories – SNL). En raison de la fermeture du laboratoire de l'incendie du CNRC, les essais ont été déplacés vers un nouveau site d'essai.
- 3) Obtention de l'heptane et coordination de la manutention de l'heptane et du pétrole brut de Bakken suivant les méthodes appropriées requises pour un entreposage et une livraison sécuritaire au site d'essai. Le pétrole brut provenant de l'Alberta au cours de l'année 1 n'a pas pu être utilisé pour les essais effectués au cours de l'année 3. C'est plutôt le pétrole brut de Bakken qui a été utilisé pour les essais. L'approvisionnement et le stockage du pétrole brut ont été assurés par SNL grâce à l'approbation et au financement du département de l'Énergie (DOE) et du département des Transports (DOT) des États-Unis.
- 4) Élaboration d'un plan d'essai et d'une configuration d'essai, et étalonnage de l'instrumentation.
- 5) Réalisation de 3 essais à l'heptane (série 1).
- 6) Réalisation de 6 essais au pétrole brut de Bakken (série 2).
- 7) Coordination de 3 échantillonnages et essais de combustible.
 - a. Organisation de l'acquisition d'échantillons d'heptane sur le site de combustion et de tests de la pureté et de la qualité des échantillons d'heptane.
 - b. Organisation de l'acquisition d'échantillons de pétrole brut de Bakken et d'échantillons de résidus post-essai pour les premier et dernier essais au pétrole brut; et coordination des analyses des échantillons.
- 8) Caractérisation du pétrole brut de Bakken acquis et vérification de la manipulation du combustible pour les essais, ce qui comprenait la coordination du transfert du combustible de la citerne au bac de combustible dans l'installation d'essai.
 - a. Élaboration d'un plan d'échantillonnage et d'analyse (PEA) détaillé du combustible en vue de sa caractérisation (voir la section 8 pour plus de détails). Vérification des données d'essai des sous-échantillons de combustible et réduction des données pour la caractérisation du combustible.
 - b. Coordination du transfert du combustible vers le site d'essai et participation à l'élaboration du système de manutention du combustible en consultation avec un expert de l'industrie pétrolière et gazière pour les essais au feu; vérification des performances de manutention du combustible, y compris le stockage du combustible.

Année 4 (année financière 2018-2019) :

- 1) Analyse des données des essais des séries 1 et 2.
- 2) Élaboration d'un plan d'essai détaillé et d'une configuration d'essai; et étalonnage des instruments pour la série 3.
- 3) Remise à neuf du 1^{er} calorimètre qui sera utilisé pour les essais de la série 3.
- 4) Réalisation des essais exploratoires avec trois types différents d'échantillons de dilbit. Ces essais à petite échelle ont été effectués pour évaluer les résidus et le potentiel de bouillonnement des échantillons de combustibles et pour sélectionner le combustible le plus approprié pour les essais au feu.
- 5) Élaboration d'un plan d'échantillonnage et d'analyse (PEA) détaillé du combustible en vue de sa caractérisation (voir la section 8 pour plus de détails).
 - a. Détermination du contenant le plus approprié pour le pétrole brut dilbit sélectionné.
 - b. Prélèvement des sous-échantillons de pétrole brut dilbit sur le site de combustion avant les premier et dernier essais et envoi des échantillons de pétrole à un laboratoire pour analyse.
 - c. Vérification des données des essais de sous-échantillons de combustible et réduction des données pour la caractérisation du combustible.

- 6) Réalisation de 6 essais au pétrole brut dilbit (série 3) sur le site d'essai (SNL).
- 7) Vérification de la manipulation du combustible pour les essais, ce qui comprenait la coordination du transfert du combustible des réservoirs de propane modifiés vers le bac de combustible dans l'installation d'essai.
- 8) Réalisation d'un examen de faisabilité sur la modélisation numérique de l'essai au feu de pétrole brut.

Année 5 (année financière 2019-2020) :

- 1) Réalisation des activités de clôture, y compris les éliminations et le nettoyage.
- 2) Analyse des données des essais de la série 3 en comparaison avec les séries 1 et 2.

6 Construction du calorimètre

Pour évaluer le flux thermique total dans un wagon-citerne de pétrole brut exposé à un feu en nappe, un objet cylindrique (calorimètre) représentant le wagon-citerne à l'échelle 1/10^e a été construit pour les essais au feu. Le calorimètre a un diamètre de 0,3 m et une longueur de 1,8 m. Le calorimètre ne contenait pas de chargement et a été instrumenté de manière à pouvoir mesurer le flux thermique total en divers endroits de sa surface. Des descriptions détaillées et des dessins du calorimètre sont fournis dans la section 4.6 du Supplément A et la section 2.5 du Supplément C.

Au moyen d'un concept couramment utilisé pour les dispositifs de mesure du flux thermique de type double plaque, tels que les thermomètres à flamme directionnelle (TFD), le calorimètre a été construit avec des coques doubles en acier inoxydable, et l'espace annulaire entre les coques a été rempli de matériaux isolants. Le centre creux a également été rempli de matériaux isolants (Figure 1). Des thermocouples ont été installés sur le côté non exposé de la coque extérieure et sur le côté exposé de la coque intérieure, et les températures différentielles des deux thermocouples le long d'un même rayon ont été utilisées pour calculer le flux thermique absorbé dans le calorimètre. Les détails de l'instrumentation et des calculs du flux thermique sont abordés dans la section 9.5.7.

Les performances du calorimètre ont été testées lors des essais préliminaires. Un deuxième calorimètre entièrement instrumenté a été construit pour servir de réserve en cas de défaillance du premier calorimètre. Les deux calorimètres ont été envoyés au centre d'essais pour les séries d'essais 1 à 3.



Figure 1 Calorimètre instrumenté avec des thermocouples sur l'enveloppe extérieure et l'enveloppe intérieure; le centre creux devant être rempli de matériaux isolants

7 Essais préliminaires

Deux essais préliminaires utilisant du diesel et un essai utilisant de l'heptane ont été réalisés au cours de l'exercice 2015-2016. Lors des essais préliminaires, le combustible a été mis en suspension au-dessus de l'eau à l'intérieur du bac. Les essais préliminaires avaient pour but de vérifier le fonctionnement du système d'alimentation en combustible et du calorimètre; et d'optimiser le protocole d'essai. Les détails des essais préliminaires sont fournis dans le Supplément C, Rapport d'essais préliminaires.

Le diesel (qui a été utilisé pendant les essais préliminaires comme substitut du pétrole brut) était contenu dans des barils avec des soupapes à bille dans le couvercle du baril. Les soupapes à bille ont été installées pour minimiser l'exposition du combustible à l'intérieur du baril à l'environnement ambiant. Au cours des essais, le combustible a été introduit dans le bac par le système d'alimentation en combustible au moyen d'une technique de déplacement d'eau pour retenir les fractions légères du combustible jusqu'à ce qu'il atteigne le bac d'essai. Avec des taux de débit de combustible plus faibles, le système d'alimentation en combustible a réussi à acheminer le combustible. Cependant, lorsque des débits de combustible relativement élevés ont été expérimentés, la pression du baril de combustible est devenue trop élevée, ce qui a compromis la sécurité des essais.

Dans les essais au feu de diesel, un débordement par bouillonnement a été observé, probablement en raison du substrat d'eau qui a été chauffé au-dessus de son point d'ébullition au cours de la combustion du combustible diesel flottant au-dessus de la couche d'eau.

Les essais préliminaires ont permis de conclure que :

- 1) la conception d'une commande automatique du système d'alimentation en combustible était nécessaire pour réussir les essais;
- 2) le substrat d'eau avait tendance à provoquer un débordement par bouillonnement;

- 3) un récipient/réservoir sous pression approprié devrait être utilisé comme réservoir d'exploitation pour supporter des pressions plus élevées et obtenir des débits adéquats.

Ces conclusions tirées des essais préliminaires ont permis de formuler des recommandations qui ont alimenté la planification des essais ultérieurs au feu en nappe des séries 1 à 3.

8 Caractérisation du combustible

Afin de pouvoir déterminer les effets du feu sur les propriétés du combustible, une caractérisation du combustible a été menée conjointement avec les essais au feu.

Le plan d'échantillonnage et d'analyse (PEA) du combustible a été élaboré avant le début de l'acquisition et de l'analyse des échantillons. Le Supplément B, Rapport de caractérisation du pétrole brut contient les détails du PEA. Le PEA fournit les techniques d'échantillonnage des combustibles et les techniques d'analyse en laboratoire nécessaires pour caractériser les combustibles (heptane, pétrole brut de Bakken et dilbit) qui permettent d'obtenir des résultats de laboratoire non biaisés en minimisant les risques de perte des composants de fraction légère et en permettant l'acquisition d'échantillons représentatifs de la citerne. Les méthodes sont conformes aux pratiques exemplaires actuelles basées sur des études récentes de Transport Canada. Le rapport complet des méthodes et des résultats de caractérisation du pétrole brut est inclus dans le Supplément B, Rapport de caractérisation du pétrole brut.

Dans la série 1, l'heptane a été choisi pour être testé comme base de comparaison avec les pétroles bruts en raison de la pureté de sa composition. Les échantillons d'heptane ont été analysés principalement pour une vérification de leur composition. La densité, la chaleur de combustion, le point d'éclair et le poids moléculaire moyen ont également été mesurés. Les valeurs mesurées se sont bien comparées aux valeurs de la base de données de référence.

Dans la série 2, le pétrole brut de Bakken a été utilisé pour les essais. Le Bakken est un pétrole brut léger non classique qui contient des concentrations plus élevées de gaz dissous et d'hydrocarbures légers et volatils que les pétroles bruts classiques moyens. Le chargement de la citerne de pétrole brut de Bakken, acquis par SNL à l'aide d'une citerne sous pression spécialement construite au cours de l'été 2017, a été utilisé par le département de l'Énergie (DOE) des États-Unis et le département des Transports (DOT) des États-Unis pour les essais au feu en nappe et de boule de feu de pétrole brut. Des échantillons ont été prélevés à trois moments du projet afin de garantir l'uniformité compositionnelle du pétrole brut de Bakken (c'est-à-dire de s'assurer que le pétrole brut ne subit aucun changement au fil du temps). Le premier échantillonnage de caractérisation du combustible a été effectué au site de chargement dans le cadre du projet du DOE/DOT, et deux échantillonnages post-essai ont été effectués dans le cadre de ce projet. Dans le cadre de ce projet, des échantillons de pétrole brut de Bakken ont été prélevés sur le site de combustion de SNL après homogénéisation et juste avant d'être utilisés dans le premier essai (Événement Bakken n° 4 avant l'essai 2.3) et le dernier essai (Événement Bakken n° 6 avant l'essai 2.6). Pour les analyses de la pression de vapeur et de la composition, les échantillons de Bakken ci-dessus ont été prélevés à l'aide de méthodes d'échantillonnage en cylindre fermé, conformément à la norme GPA 2174, *Obtaining Liquid Hydrocarbons Samples for Analysis by Gas Chromatography* (obtenir des échantillons d'hydrocarbures liquides pour l'analyse par chromatographie en phase gazeuse).

Pour la série 3, il a été décidé de tester un pétrole brut plus lourd afin de faire une comparaison relative avec le pétrole brut de Bakken. Le bitume dilué (dilbit) a été envisagé car il est connu pour être parmi les variétés de pétrole brut les plus lourdes transportées au Canada. Afin de choisir le type de pétrole brut dilbit le plus approprié pour ces essais au feu, des essais exploratoires à petite échelle ont été réalisés avec trois types différents de pétrole brut dilbit. Le dilbit étant un pétrole lourd, on craignait que le résidu restant après la combustion n'endommage l'équipement dans l'installation d'essai. De plus, le pétrole brut dilué peut contenir

un petit pourcentage d'eau qui pourrait entraîner un débordement par bouillonnement (éjection du combustible du bac). Ainsi, pour évaluer les résidus et le potentiel de débordement par bouillonnement, des essais exploratoires ont été réalisés en extérieur à l'aide d'un bac de 0,5 m de diamètre. Aucun des dilbits n'a présenté de débordement par bouillonnement, et le dilbit qui a produit le moins de résidus a été sélectionné pour les essais de la série 3.

Le pétrole brut dilbit a été acquis dans des récipients sous pression (réservoirs de propane modifiés de 420 livres) selon une méthode de déplacement de l'azote afin de minimiser la perte des fractions légères dans le pétrole brut. Le premier échantillonnage pour la caractérisation du combustible (dilbit n° 1) a été effectué au site de chargement par InnoTech Alberta, et deux autres échantillonnages ont été effectués dans le cadre de ce projet au site de combustion de SNL. Les deux derniers échantillons de pétrole brut dilbit ont été prélevés après homogénéisation et juste avant d'être utilisés dans le premier essai (dilbit n° 2 avant l'essai 3.1) et le dernier essai (dilbit n° 3 avant l'essai 3.6). Les échantillons de dilbit ont été prélevés à l'aide de méthodes d'échantillonnage en cylindre fermé, conformément à la norme GPA 2174, *Obtaining Liquid Hydrocarbons Samples for Analysis by Gas Chromatography*.

Des échantillons de résidus post-essai ont été prélevés dans le bac à feu en nappe après les premier et dernier essais des séries 2 et 3 pour une analyse chimique. Les analyses des échantillons de résidus ne font pas partie de l'étude actuelle.

Le tableau 1 compare les propriétés physiques de base des trois combustibles : heptane, Bakken et dilbit. Les chaleurs de combustion des trois combustibles étaient similaires, allant de 43 à 48 MJ/kg. Le bitume dilué était le combustible le plus dense testé, avec une valeur de 923,9 kg/m³. Les densités de l'heptane et du pétrole brut de Bakken étaient respectivement de 687,6 et 810,9 kg/m³. Le tableau 1 indique également le point initial d'ébullition (PI) analysé par chromatographie en phase gazeuse (CPG) (ASTM 8003 et ASTM 7169). Les analyses de la composition des combustibles et des distributions des points d'ébullition ont été réalisées conformément aux normes ASTM D8003, *Standard Test Method for Determination of Light Hydrocarbons and Cut Point Intervals in Live Crudes and Condensates by Gas Chromatography* (méthode d'essai standard pour la détermination des hydrocarbures légers et des intervalles de point de fractionnement dans les pétroles bruts et les condensats par chromatographie en phase gazeuse) et ASTM D7169, *Standard Test Method for Boiling Point Distribution of Samples with Residues Such as Crude Oils and Atmospheric and Vacuum Residues by High Temperature Gas Chromatography* (méthode d'essai standard pour la distribution de points d'ébullition d'échantillons avec des résidus comme les pétroles bruts et les résidus atmosphériques et sous vide par chromatographie en phase gazeuse à haute température). Le point initial d'ébullition (PI) déterminé par analyse par CPG est la température à laquelle 0,5 % en poids de l'échantillon a élué lors de la détermination de l'intervalle de distillation tel qu'il est défini dans la norme ASTM D7169 et la pratique recommandée API 3000. Le pétrole brut est inclus dans le champ d'application de cette méthode par CPG utilisée pour déterminer le PI.

Une description détaillée et les résultats sont fournis dans le Supplément B, Rapport de caractérisation du pétrole brut.

La figure 2 présente les compositions chimiques des échantillons de pétrole de Bakken et dilbit, qui montrent une large distribution de nombres de carbone pour les deux types. Plus particulièrement, le pétrole brut dilbit contient une fraction relativement importante de C25+, d'environ 29 % molaire (figure 2) et 60 % massique (figure 3), alors que le pétrole brut de Bakken contient environ 7 % molaire (figure 2) et 20 % massique (figure 3) de C25+. Les résultats montrent également la présence de composants de fraction légère (p. ex. de l'éthane, du méthane et jusqu'au pentane) et des hydrocarbures de faible nombre ainsi que du benzène dans les pétroles bruts de Bakken et dilbit. Les compositions de l'huile entière, y compris les fractions légères de la figure 2, ont montré peu de variation entre tous les échantillons des événements n° 4 et n° 6 pour le Bakken stocké dans la citerne de construction spéciale. De même, pour le dilbit stocké dans les réservoirs de propane modifiés, les résultats ont montré peu de variation entre tous les échantillons des événements 1 à 3.

Une gamme de points d'ébullition a été relevée pour les différents composants des combustibles. Comme le montre la figure 3, chaque composant du pétrole brut de Bakken et dilbit bout à une température différente tandis que l'heptane pur bout de manière homogène à un seul point d'ébullition de 100 °C. Plus le nombre de carbone est élevé, plus le point d'ébullition est élevé. À une température de 300 °C, le pétrole brut de Bakken bout et brûle 60 % de sa masse, mais pour brûler ces mêmes 60 % de masse, le pétrole brut dilbit doit être chauffé de 510 à 530 °C.

Tableau 1 Propriétés physiques

Méthode d'essai			Heptane	Bakken	Dilbit
Combinaison d'ASTM D8003 et d'ASTM D7169	Point initial d'ébullition	°F; °C		-44,0; -42,2	30,9; -0,6
	Point d'éclair, vase clos	°F; °C		< -22; < -30	< -22; < -30
ASTM D3828	Densité à 15 °C	kg/m ³	687,5	805,9	923,9
ASTM D5002M	Chaleur de combustion	MJ/kg	47,8	46,8	43,0

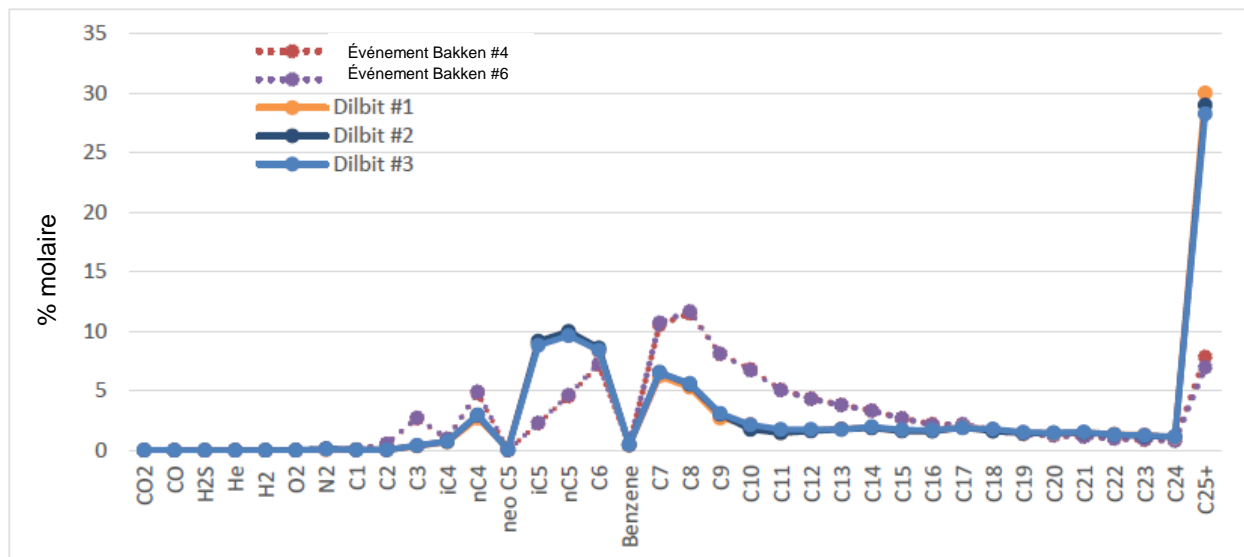


Figure 2 Graphiques du nombre de carbones de l'huile entière pour les huiles de Bakken et dilbit échantillonnées sur le site de combustion

Température, °F

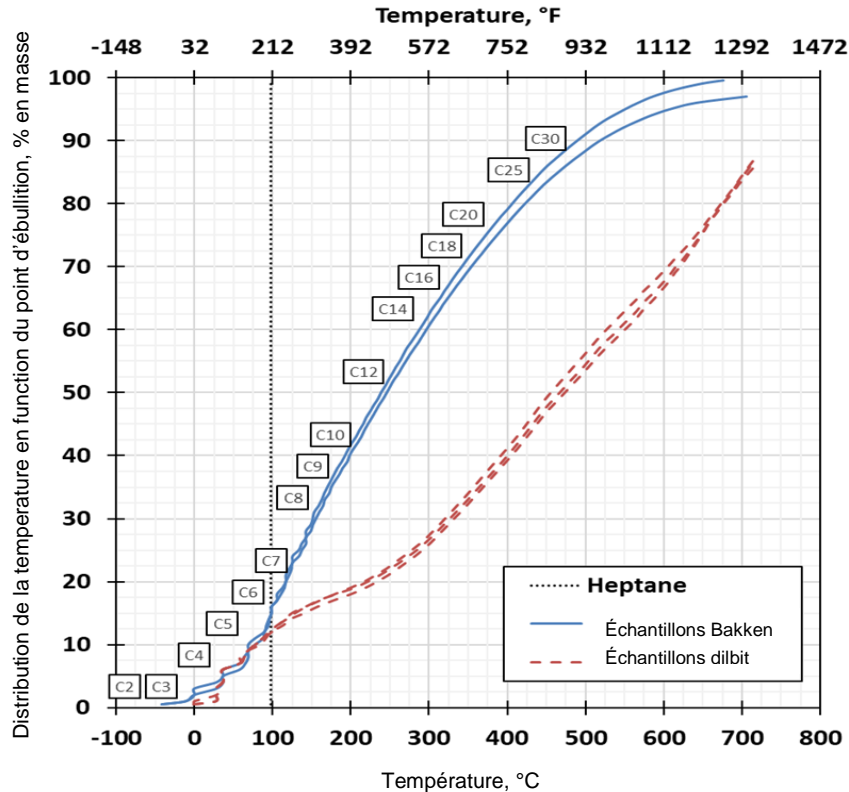


Figure 3 Distribution de la température en fonction du point d'ébullition pour les échantillons de combustible

9 Essais de réaction au feu : série 1, série 2 et série 3

Le calorimètre cylindrique, représentant un wagon-citerne à l'échelle approximative de 1/10^e, a été exposé à des feux en nappe de 2 m de diamètre. Les expériences d'incendie ont été menées à SNL pour le compte du Conseil national de recherches du Canada (CNRC). Cette section fournit une brève description des essais. La description détaillée des essais et les résultats sont fournis dans le Supplément A.

9.1 Paramètres d'essai

Des expériences de feu en nappe d'heptane (série 1) et de feu de pétrole brut (séries 2 et 3) ont été menées pour examiner les effets des paramètres suivants;

- Type de combustible : Le pétrole brut de Bakken et le pétrole brut dilbit ont été principalement étudiés. L'heptane a également été testé afin de fournir des données de base auxquelles les résultats des essais au Bakken et au dilbit pourraient être comparés.
- Méthode d'alimentation en combustible : Dans la plupart des essais, le combustible a été fourni en continu par un système d'alimentation maintenant un niveau de combustible constant dans le bac. Dans un essai de chacune des séries 2 et 3, on a laissé le pétrole brut se consumer plutôt que de maintenir un niveau de combustible constant.
- Température du combustible d'alimentation : Les deux pétroles bruts et l'heptane ont été préparés à deux températures initiales différentes de 20 °C et de 60 °C pour étudier l'effet de la température du combustible d'alimentation sur les mécanismes de combustion.

- Présence de l'objet cylindrique : L'objectif des essais était d'examiner l'exposition à la chaleur subie par un objet cylindrique englouti dans un feu en nappe. Cependant, des feux en nappe sans objet ont également été testés pour examiner l'effet de la présence de l'objet sur les caractéristiques du feu.
- Placement de l'objet cylindrique : Les essais ont été effectués avec le calorimètre à deux hauteurs différentes au-dessus de la surface du combustible.

Le tableau 2 présente la matrice des essais. Bien qu'il ait initialement été prévu que les essais soient menés dans un ordre numérique, des considérations techniques ont entraîné un réordonnement des essais. Ils ont été menés dans l'ordre où ils sont énumérés dans le tableau 2.

Tableau 2 Matrice des essais

No d'essai	Combustible	Élévation du calorimètre (m)	Échantillonnage	Température du combustible d'alimentation (°C)	Méthode d'alimentation du combustible
Série d'essai 1					
1.1	Heptane	1-m, centré	Échantillonnage du combustible	20 ± 5	Niveau constant
1.2	Heptane	Sans calorimètre	S.o.	20 ± 5	Niveau constant
1.3	Heptane	1-m, centré	S.o.	60 ± 5	Niveau constant
Série d'essai 2					
2.3	Bakken	1-m, centré	Échantillonnage du combustible pré-essai et du résidu post-essai	20 ± 5	Niveau constant
2.4	Bakken	1-m, centré	S.o.	60 ± 5	Niveau constant
2.5	Bakken	1-m, centré	S.o.	20 ± 5	Niveau constant
2.1	Bakken	Sans calorimètre	S.o.	20 ± 5	Niveau constant
2.2	Bakken	0.5-m, centré	S.o.	20 ± 5	Niveau constant
2.6	Bakken	Sans calorimètre	Échantillonnage du combustible pré-essai et du résidu post-essai	20 ± 5	Alimentation en combustible non continue, permettre de se consumer
Série d'essai 3					
3.1	Dilbit	1-m, centré	Échantillonnage du combustible pré-essai et du résidu post-essai	20 ± 5	Niveau constant
3.2	Dilbit	0.5-m, centré	S.o.	20 ± 5	Niveau constant
3.3	Dilbit	Sans calorimètre	S.o.	20 ± 5	Niveau constant
3.4	Dilbit	Sans calorimètre	S.o.	20 ± 5	Alimentation en combustible non continue, permettre de se consumer
3.5	Dilbit	1-m, centré	S.o.	20 ± 5	Niveau constant
3.6	Dilbit	1-m, centré	Échantillonnage du combustible pré-essai et du résidu post-essai	60 ± 5	Niveau constant

9.2 Manipulation du combustible et systèmes d'alimentation en combustible

9.2.1 Heptane (essais de la série 1)

Neuf barils d'heptane, chacun d'une capacité de 189,3 litres (50 gallons), ont été utilisés pour les essais au feu de série 1. Les essais au feu de la série 1 ont servi de référence pour la comparaison avec les essais au pétrole brut. L'heptane a été choisi pour cette série d'essais car c'est un combustible largement étudié et facilement disponible. Trois essais au feu en nappe d'heptane ont été réalisés avec et sans le calorimètre en place et à deux températures de combustible différentes. Les résultats des essais à l'heptane ont été comparés aux essais aux pétroles bruts de Bakken et dilbit réalisés dans les mêmes conditions afin de déterminer l'effet du type de combustible.

L'heptane était pompé des barils à travers un échangeur thermique dans le bac de combustible. Un système d'alimentation en combustible automatisé a été utilisé pour fournir le combustible en continu et maintenir un niveau de combustible constant dans le réservoir. Le taux de perte de masse de la nappe était mesuré au moyen d'un dynamomètre piézoélectrique placé sous les barils d'heptane.

9.2.2 Pétrole brut de Bakken (essais de la série 2)

Le pétrole brut de Bakken du Dakota du Nord a été utilisé dans les essais au feu de la série 2. Le pétrole brut de Bakken est un pétrole brut léger non classique issu de formations pétrolières étanches, connu pour contenir des concentrations plus élevées de gaz dissous et d'hydrocarbures légers et volatils.

Le pétrole brut de Bakken a été obtenu du Dakota du Nord par SNL au cours de l'été 2017 pour le projet de pétrole brut du DOE/DOT. Le pétrole brut de Bakken (une charge totale de 7 949 litres [2 100 gallons]) a été collecté dans une citerne sous pression, spécialement conçue par SNL pour préserver les fractions légères du pétrole. Sur le site de chargement du Dakota du Nord, une méthode de déplacement de l'eau a été utilisée pour collecter le pétrole de Bakken dans la citerne afin de s'assurer qu'il n'y a aucun contact entre le combustible et l'air pendant le chargement. En complétant le volume à l'intérieur de la citerne avec de l'eau plutôt qu'avec de l'air, la méthode de déplacement de l'eau a également permis de préserver la concentration des fractions légères du combustible et de maintenir les fractions légères à l'état liquide.

Le pétrole brut de Bakken collecté dans la citerne a été transporté sur le site des essais au feu. Un total de 2 040 litres (539 gallons) de pétrole brut de Bakken a été utilisé dans les essais de la série 2. Avant les essais, le pétrole brut de Bakken a été mélangé pour minimiser la stratification de la densité.

Parallèlement à la réalisation des essais au feu en nappe, un plan d'échantillonnage et d'analyse (PEA) des combustibles a été établi. Le PEA détaillait les méthodes d'échantillonnage et d'analyse requises pour la caractérisation des combustibles. Il prévoyait le prélèvement d'échantillons de combustible pré-essai du pétrole brut et d'échantillons des résidus post-essai pour analyse et caractérisation. Selon le PEA, des échantillons de combustible ont été prélevés sur le site de chargement et avant les premier et dernier essais afin de surveiller les changements potentiels au fil du temps dans la composition du pétrole brut stocké dans la citerne sous pression.

En injectant de l'eau dans la citerne, le pétrole brut de Bakken a été poussé hors de la citerne et acheminé à travers l'échangeur de chaleur vers le bac de combustible. Le débit de combustible a été contrôlé pour maintenir un niveau de combustible constant dans le bac. Le taux de perte de masse du combustible dans le bac a été calculé à partir du taux d'alimentation en eau de la citerne.

9.2.3 Pétrole brut dilbit (série 3)

Les essais de la série 3 ont été effectués avec du dilbit, qui a été livré dans un total de 10 réservoirs (bouteilles de propane modifiées de 420 lb [190 kg]), chacun contenant environ 360 litres (95 gallons) de pétrole brut dilbit. Dans chaque essai, un réservoir a été utilisé. Deux échantillons de dilbit pour la caractérisation du combustible ont été prélevés après homogénéisation et avant d'être utilisés dans le premier essai (essai 3.1) et le dernier essai (essai 3.6).

Le pétrole brut dilbit a été poussé hors d'un réservoir par injection d'azote comprimé dans le réservoir, et le combustible a été acheminé à travers un échangeur de chaleur vers le bac de combustible. Dans chaque essai, le système d'alimentation en combustible a fourni du dilbit pendant environ 30 minutes. Après 30 minutes, du Jet A a été projeté dans le bac pendant environ 5 à 10 minutes pour rincer le pétrole brut des lignes de transfert. Le nettoyage des conduites de combustible avec du Jet A n'a été effectué que dans les essais de la série 3 afin de faciliter les efforts de nettoyage appréhendés puisque le dilbit laissait des résidus post-essai importants par rapport au Bakken et à l'heptane.

9.3 Installation d'essai

Les essais au feu en nappe de 2 m ont été réalisés dans la cellule d'essai du Fire Laboratory for Accreditation of Models and Experiments (FLAME) de SNL, qui est de forme cylindrique, d'un diamètre de 18,3 m et d'une hauteur de 12,2 m (voir le Supplément A, figure 2-1). Cette installation est conçue pour fournir des conditions bien contrôlées avec des impacts météorologiques minimaux. L'air pour les expériences au feu est fourni par un grand système de canaux de ventilation souterrains à travers le sol, qui est fait de grilles d'acier.

L'installation FLAME dispose d'un grand système de hotte qui peut recueillir tous les produits de combustion d'un feu dans la cellule d'essai et mesurer le débit thermique (DT) selon la méthode de calorimétrie de la consommation d'oxygène.

9.4 Montage d'essai

La figure 4 montre le montage d'essai dans l'installation d'essai. Un bac de 2 m de diamètre a été placé au centre du sol dans l'installation d'essai. Le bac utilisé pour les trois séries d'essais avait une profondeur de 0,3 m (12 po), ce qui permettait d'avoir une distance entre le haut de la surface du combustible et le haut du bord du bac d'une hauteur d'environ 0,27 m (10,5 po). Dans chaque essai, la combustion du combustible était contenue dans le bac, et aucun débordement par bouillonnement n'a été observé au cours des essais. L'utilisation d'un substrat dans le bac a été évitée afin d'empêcher le débordement par bouillonnement.

Le calorimètre de 0,3 m de diamètre sur 1,8 m de longueur était centré dans le bac, au-dessus de la surface du combustible. Le calorimètre était maintenu au-dessus du bac en plaçant deux supports dans le bac. La hauteur des supports était réglable et les supports étaient conçus pour avoir un impact minimal sur le flux du combustible entrant dans le réservoir pendant les essais.

La figure 5 montre l'instrumentation du calorimètre. Des thermocouples ont été installés sur trois plans de coupe transversale (figure 5-a), et à chaque plan de mesure, des thermocouples ont été installés le long de huit directions radiales différentes (figure 5-b).

Le bac à combustible était continuellement alimenté en combustible pour s'assurer que les caractéristiques du feu incluent les effets des composants de fractions légères du combustible.

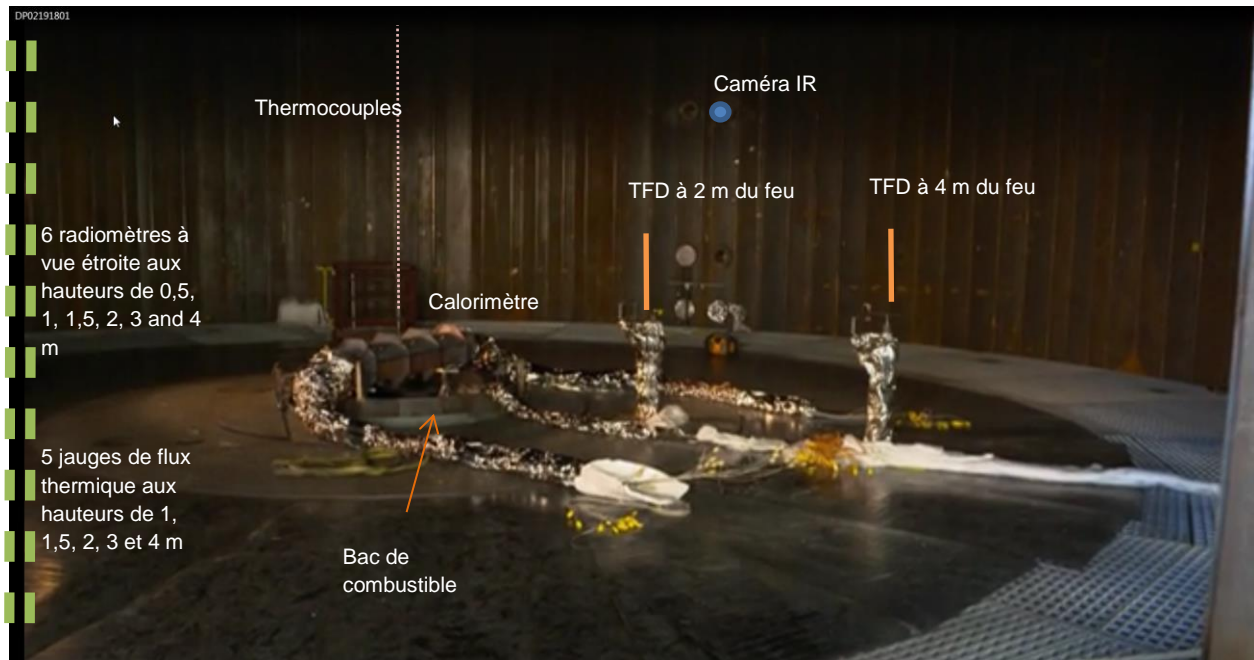


Figure 4 Montage d'essai

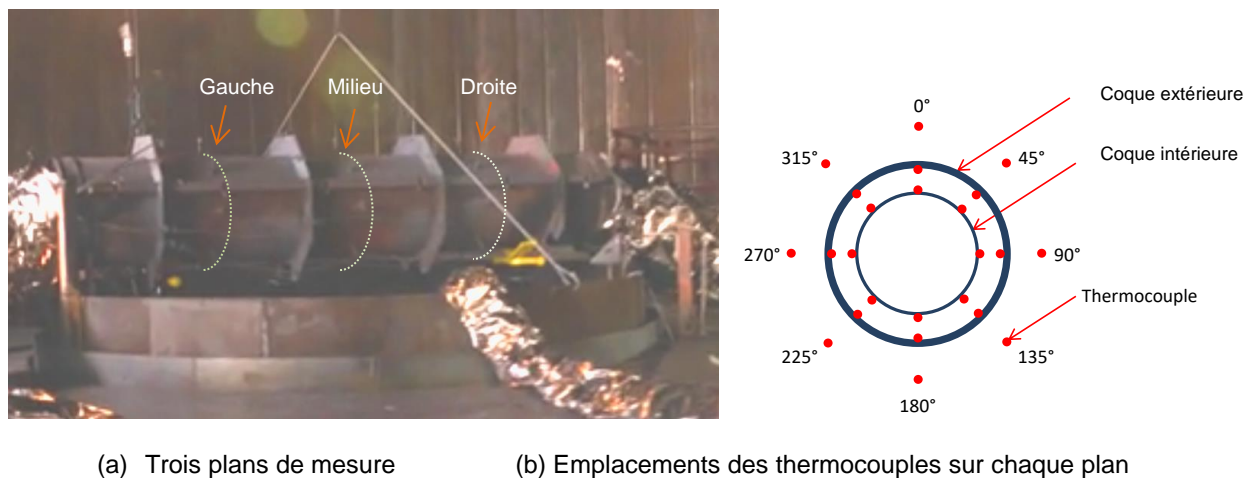


Figure 5 Instrumentation du calorimètre

9.5 Mesures

Des données sur le débit thermique (DT), le taux de combustion de la masse de combustible, la température de la flamme/du panache et la hauteur de la flamme ont été recueillies pour la caractérisation du feu. Le pouvoir émissif de la flamme par unité de surface (PES) et le flux thermique à une certaine distance du feu ont également été mesurés. À l'aide du calorimètre, le flux thermique total sur celui-ci a été estimé. La section 4 du Supplément A contient des détails sur les instruments.

9.5.1 Débit thermique

Le débit thermique (DT) est une caractéristique essentielle du feu pour décrire la taille du feu en termes de débit thermique des réactions de combustion d'un matériau [4]. Dans le cas d'un feu en nappe, le DT est proportionnel à la chaleur de combustion du combustible et au taux de combustion de la masse de combustible, qui est proportionnel à la surface de la nappe. Le DT régit la hauteur de la flamme et est également corrélée à d'autres caractéristiques du feu, tels que les flux thermiques [2, 3].

Dans cette étude, deux méthodes ont été utilisées pour déterminer le DT; 1) sur la base des taux de combustion de la masse de combustible mesurées pendant les essais et 2) par calorimétrie de la consommation d'oxygène.

On peut mesurer les DT (Q) sur la base des taux de combustion de la masse de combustible (\dot{m}_b) selon l'équation (éq.) 1, en utilisant la chaleur complète de combustion (H_c). La chaleur complète de combustion (H_c) est la chaleur dégagée par la combustion d'une quantité unitaire d'un combustible, souvent mesurée dans des conditions idéalisées à l'aide de la calorimétrie par bombe à oxygène (ASTM D240). La chaleur de combustion complète a été établie pour l'heptane, le pétrole brut de Bakken et le pétrole brut dilbit dans l'étude de caractérisation des combustibles (voir le Supplément B, Rapport de caractérisation du pétrole brut). Il convient de noter que la combustion dans l'air (même en abondance) comporte une certaine part de combustion incomplète. Cette combustion incomplète entraîne un débit thermique légèrement inférieur à celui d'une combustion complète; cela est dû à la génération de certaines espèces partiellement oxydées, tel que le monoxyde de carbone, ainsi que d'autres volatils non brûlés et des hydrocarbures non condensables. Ainsi, pour prendre en compte la combustion incomplète dans le feu en nappe, un facteur de combustion incomplète (x) est utilisé dans le calcul du DT basé sur le taux de combustion de la masse de combustible. Une valeur suggérée par Tewarson [5] pour l'heptane est d'environ 0,9 et l'essence est également de 0,9. Cette étude a trouvé qu'une valeur de 0,9 était appropriée pour l'heptane et le pétrole brut de Bakken, sur la base du DT calculé à l'aide de la calorimétrie de la consommation d'oxygène (voir la section 10.4). Une valeur de 0,9 a également été utilisée pour les feux en nappe de dilbit (bien que les données soient insuffisantes pour vérifier l'exactitude de cette valeur pour le dilbit).

$$Q = x H_c \dot{m}_b \quad \text{Éq. 1}$$

Des mesures supplémentaires des DT (Q) ont été effectuées sur la base de la calorimétrie de la consommation d'oxygène, qui calcule les DT du feu en mesurant la quantité d'oxygène consommée dans le processus de combustion car un niveau similaire de chaleur (E_{O_2}) est libéré par unité de masse d'oxygène consommée dans la combustion de la plupart des matériaux organiques [6]. Une équation simplifiée pour la calorimétrie de la consommation d'oxygène est donnée par l'éq. 2. La méthode de calorimétrie de la consommation d'oxygène permet d'estimer des DT plus précis et plus fiables que la méthode du taux de combustion de la masse de combustible car le calcul intègre des corrections pour une éventuelle combustion incomplète. Dans l'éq. 2, ϕ est le facteur d'appauvrissement en oxygène, et $\dot{m}_{O_2}^0$ est le débit massique d'oxygène dans l'air. Pour tenir compte de la différence (E_{CO}) de chaleur libérée en raison de la formation de monoxyde de carbone pendant le processus de combustion, la fraction (f) d'oxygène utilisée pour la formation de monoxyde de carbone est incorporée dans la méthode. La méthode nécessite une hotte et un système de conduits, qui recueillent tous les produits de combustion (fumée) et mesurent les débits de fumée et les concentrations gazeuses d'oxygène, de monoxyde de carbone et de dioxyde de carbone. L'installation FLAME était équipée d'un grand système de hotte qui était instrumenté pour mesurer les débits de fumée, les températures de fumée et les concentrations de gaz d'oxygène, de monoxyde de carbone et de dioxyde de carbone. Les données recueillies dans le système de hotte ont été utilisées pour calculer les DT. Les DT (Q) ont été évalués pour tous les essais des séries 1 et 2 mais pas pour tous les essais de la série 3 en raison de problèmes dans l'analyseur de gaz utilisé pour mesurer les concentrations de gaz dans le système de la hotte. Les équations de calcul complètes sont données dans le Supplément A, Rapport d'essai – section A.2.

$$Q = E_{O_2}(1 + f)(\phi \dot{m}_{O_2}^0) - E_{CO}f(\phi \dot{m}_{O_2}^0) \quad \text{Éq. 2}$$

Le débit thermique total d'un feu en nappe est libéré principalement sous forme de convection (c'est-à-dire le panache thermique convectif des produits de combustion) et de rayonnement [2, 4], puisque la perte par conduction est négligeable lorsqu'un état d'équilibre est atteint pour un feu en nappe.

L'analyse des portions du débit calorifique convectif et radiatif est utile pour comprendre les mécanismes de transfert de chaleur d'un feu. La fraction de l'énergie totale de combustion résultant du rayonnement thermique est particulièrement importante pour évaluer les dangers radiatifs potentiels posés par les feux en nappe d'hydrocarbures (p. ex. les flux thermiques incidents vers des objets extérieurs (voir la section 9.5.6) et vers des objets engoutis (voir la section 9.5.7)). Le transfert de chaleur vers une citerne à partir d'un feu en nappe d'hydrocarbures à grande échelle se fait principalement par rayonnement thermique, et pour les wagons-citernes à grande échelle engoutis dans le feu, le transfert de chaleur se fait à environ 90 % par rayonnement thermique et 10 % par convection [7]. Ainsi, la quantification du débit thermique par rayonnement est importante pour comprendre le transfert de chaleur vers le wagon-citerne, et donc les dangers pour celui-ci [8]. La caractérisation de la composante convective du débit thermique total devient également importante pour prédire le développement du panache et la température de la fumée.

La partie de la chaleur libérée sous forme de convection (débit thermique convectif, ou Q_c) peut être estimée sur la base de la montée en température du gaz dans le conduit puisque l'augmentation de la température du gaz est attribuée à la chaleur convective [9]. Pour les feux en nappe d'hydrocarbures jusqu'à environ quatre mètres de diamètre, la fraction de chaleur par rayonnement (X_r) se situe entre 0,30 et 0,50, et cette valeur diminue avec l'augmentation du diamètre du feu en raison de l'obscurcissement par la fumée [2]. Comme suggéré par Janssens [9], la partie convective de la chaleur peut être calculée à l'aide des données du conduit relatives au débit massique du gaz (\dot{m}_e) et à la montée en température (ΔT) du gaz, comme indiqué dans l'éq. 3, puis la fraction de la chaleur par rayonnement (X_r) peut être obtenue à l'aide du débit thermique total mesuré (Q), comme indiqué dans l'éq. 4. Dans tous les essais des séries 1 à 3, les données du conduit relatives au débit massique du gaz (\dot{m}_e) et à la montée en température (ΔT) du gaz ont été collectées de sorte que le débit thermique convectif (Q_c) a été obtenu pour chaque essai.

$$Q_c = (1 - X_r)Q = C_p \dot{m}_e \Delta T \quad \text{Éq. 3}$$

$$X_r = 1 - Q_c/Q \quad \text{Éq. 4}$$

9.5.2 Taux de combustion de la masse de combustible

Le taux de combustion de la masse de combustible a été mesuré et utilisé pour fournir une estimation secondaire du débit thermique du feu. Le taux de combustion de la masse de combustible a été déterminé sur la base du débit du combustible. Le débit du combustible a été ajusté pendant l'essai pour maintenir une hauteur constante du combustible dans le bac. La hauteur du combustible dans le bac était surveillée à l'aide d'un manomètre différentiel, et un flotteur liquide était également utilisé pour assurer un niveau de combustible constant dans le bac. Le pétrole brut de Bakken a été alimenté dans le bac en introduisant de l'eau dans le fond de la citerne sous pression, et le débit de l'eau a été mesuré par des dynamomètres piézoélectriques. Le taux de combustion de la masse du pétrole brut de Bakken a été déterminé sur la base des débits d'eau mesurés fournis à la citerne. Pour l'heptane et le pétrole brut dilbit, les taux de combustion de la masse de combustible ont été mesurés par le dynamomètre piézoélectrique placé sous les barils d'heptane et le réservoir de dilbit.

9.5.3 Températures des flammes/panaches

Une caméra infrarouge à longueur d'onde moyenne (IRLOM) a été utilisée pour mesurer la température de la flamme. La caméra infrarouge (IR) a été installée au deuxième niveau sur le mur de l'installation d'essai, comme le montre la figure 4. À cet endroit, la caméra offrait une vue de 7 m sur 4 m de l'incendie.

Les températures des flammes/panaches ont également été mesurées le long de la ligne centrale de la nappe, comme le montre la figure 4. Neuf thermocouples ont été installés au-dessus du calorimètre à un espacement de 0,5 m.

9.5.4 Hauteur des flammes

Les hauteurs des flammes ont été mesurées à l'aide de la caméra IRLOM ou de la caméra en temps réel en obtenant une image de la flamme moyennée dans le temps.

9.5.5 Pouvoir émissif de la flamme par unité de surface

Le DT total d'un feu en nappe est libéré principalement sous forme de convection (c'est-à-dire le panache thermique convectif des produits de combustion) et de rayonnement [2, 4]. La chaleur de rayonnement dans les grands incendies d'hydrocarbures est émise principalement par la suie, la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone [10]. Comme nous l'avons vu dans la section 9.5.1, afin d'analyser les dangers radiatifs entourant un incendie, il est essentiel de caractériser les propriétés radiatives de la flamme, notamment le pouvoir émissif de la flamme par unité de surface (PES). Le PES est l'intensité de l'énergie de rayonnement émise par la flamme à sa surface, qui dépend du type/de la composition du combustible, de la taille du feu, de la production de suie et de la température de la flamme. Le PES de la flamme a été mesuré à l'aide de différents dispositifs lors des essais; des radiomètres à vue étroite et un radiomètre à imagerie spectrale (caméra IR) ont été installés dans l'installation d'essai.

Six radiomètres à vue étroite ont été montés sur le mur de l'installation d'essai à une distance de 9 m (30 pi) et à des hauteurs de 0,5, 1, 1,5, 2, 3 et 4 m pour mesurer le pouvoir émissif de la flamme par unité de surface. Les radiomètres sont conçus pour être sensibles uniquement au flux thermique par rayonnement, et en raison de l'angle de vue étroit de 5,5 degrés (se traduisant par un diamètre localisé d'environ 0,8 m sur le feu), le radiomètre a le potentiel de mesurer les radiances directionnelles dans l'angle de vue sur la flamme.

Une caméra IRLOM a été utilisée comme radiomètre à imagerie spectrale pour collecter le rayonnement infrarouge avec des longueurs d'onde comprises entre 3 et 5 μm . Le rayonnement des flammes typiques à haute température est émis principalement dans cette gamme de longueurs d'onde [3]. À l'aide des données obtenues de la caméra IR, le PES a été calculé sur toute la surface de la flamme. Le Supplément A, section 4.2 et l'annexe A.3 contiennent des détails sur la caméra IR et le traitement des données pour le calcul du PES.

9.5.6 Flux thermique à une distance du feu

Les mesures du flux thermique sont importantes pour évaluer les dangers généraux d'un incendie, y compris l'analyse des dangers radiatifs entourant un incendie. Pour évaluer le niveau de flux thermique imposé aux objets situés à proximité d'un incendie, des thermomètres à flamme directionnelle (TFD) et des jauges de flux thermique total à large vue ont été utilisés. Cette mesure est utile, par exemple, pour évaluer si la flamme fournit suffisamment de chaleur rayonnante pour enflammer les objets combustibles situés à proximité. Les chaleurs rayonnantes incidentes sur une cible dépendent principalement du pouvoir émissif de la flamme et diminuent avec la distance de la flamme.

Cinq jauges de flux thermique total ont été montées sur le mur de l'installation d'essai à une distance de 9 m du centre du bac, à des hauteurs de 1, 1,5, 2, 3 et 4 m. L'angle de vue des jauges de flux thermique total était de 180 degrés, de sorte que les mesures ont été évaluées en termes de flux thermique total qui pourrait être reçu par un objet au même endroit et avec la même orientation.

Deux TFD ont été placés à une hauteur de 1 m et à des distances de 2 et 4 m du centre du bac, comme le montre la figure 4. Un TFD est constitué de deux plaques d'Inconel prises en sandwich par une couche isolante, et il mesure les températures sur la face non exposée de chaque plaque. Les températures

différentielles mesurées entre les deux plaques permettent de calculer la chaleur absorbée. Un code disponible dans le commerce, l'IHCP1D, développé par Beck [4], a été utilisé pour l'analyse de conduction thermique inverse unidimensionnelle. En utilisant la chaleur absorbée calculée avec l'IHCP1D, le flux thermique total incident à la surface de chaque dispositif a été estimé. L'annexe A.1 du Supplément A contient les détails de l'estimation du flux thermique incident total vers les TFD.

9.5.7 Flux thermique total vers un objet engouffré (mesures effectuées par le calorimètre)

Le CNRC a conçu et fabriqué deux calorimètres pour les essais au feu. Les deux calorimètres ont été instrumentés avec des thermocouples de façon à pouvoir mesurer le flux thermique à divers endroits le long de leur surface. La figure 4 montre le calorimètre placé dans le montage d'essai, et la figure 5 montre l'instrumentation du calorimètre. Les données de température recueillies à partir du calorimètre ont été utilisées pour les calculs du flux thermique total (q_{total}) sur la surface extérieure du calorimètre. Le flux thermique total (q_{total}) est transféré de la flamme à la surface du calorimètre par rayonnement ($\alpha q_{incident}$) et convection ($q_{convection}$). Ensuite, la chaleur transférée est soit absorbée ($q_{absorbed}$) dans le calorimètre, soit émise ($q_{emitted}$) par la surface chauffée du calorimètre. L'éq. 5 montre la méthode de calcul du flux thermique total (q_{total}).

$$q_{total} = \alpha q_{incident} + q_{convection} = q_{absorbed} + q_{emitted} \quad \text{Éq. 5}$$

$$\text{Où } q_{emitted} = \varepsilon \sigma T_{surface}^4$$

α = l'absorptivité

ε = l'émissivité

$T_{surface}$ = la température de surface de la coque extérieure

σ = la constante Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$)

Le calorimètre a mesuré les températures sur le côté non exposé de la coque extérieure et sur le côté exposé de la coque intérieure. Les températures différentielles mesurées entre les coques extérieure et intérieure le long du même rayon ont été utilisées pour calculer la chaleur absorbée ($q_{absorbed}$) par le calorimètre à la position de mesure. La chaleur absorbée ($q_{absorbed}$) a été calculée à chaque position de mesure par une analyse unidimensionnelle de conduction thermique inverse à l'aide d'un code disponible dans le commerce, l'IHCP1D, développé par Beck [12]. La température de surface ($T_{surface}$) du côté exposé de la coque extérieure a également été calculée à l'aide de l'IHCP1D.

En utilisant les températures de surface et une émissivité de 0,795, qui a été mesurée sur la surface du calorimètre, la chaleur par rayonnement émise ($q_{emitted}$) depuis la surface du calorimètre chauffé a été estimée. Le pouvoir émissif par rayonnement est largement proportionnel à la quatrième puissance de la température, mais il est également affecté par les caractéristiques de la surface de l'émetteur. L'émissivité décrit l'efficacité de la surface d'un matériau à émettre de l'énergie sous forme de rayonnement. Le transport par rayonnement thermique peut être décrit comme des échanges d'énergie par ondes électromagnétiques entre émetteurs et absorbeurs. Ainsi, les caractéristiques de la surface d'un matériau, telles que la rugosité/l'aspect lisse/la réflectivité, affectent l'efficacité à réfléchir et à absorber les ondes électromagnétiques. Un émetteur parfait (par exemple, un corps noir) a une émissivité de 1, et les mélanges gaz-suie ont des émissivités proches de 1.

Par la suite, le flux thermique total (q_{total}) vers le calorimètre a été estimé en faisant la somme de la chaleur absorbée ($q_{absorbed}$) et de la chaleur émise ($q_{emitted}$) depuis la surface du calorimètre. L'annexe A.1 du Supplément A présente l'équation détaillée utilisée pour le calcul du flux thermique total vers le calorimètre et les propriétés thermiques des matériaux utilisés dans les calculs. Selon les valeurs calculées du flux thermique total vers le calorimètre, les flux thermiques incidents sur la surface extérieure du calorimètre pouvaient être estimés en présumant que le flux convectif depuis la flamme vers le calorimètre ($q_{convective}$) est insignifiant

comparativement au flux thermique incident ($q_{incident}$) étant donné que le calorimètre est engouffré dans la flamme.

10 Résultats des essais au feu et discussion

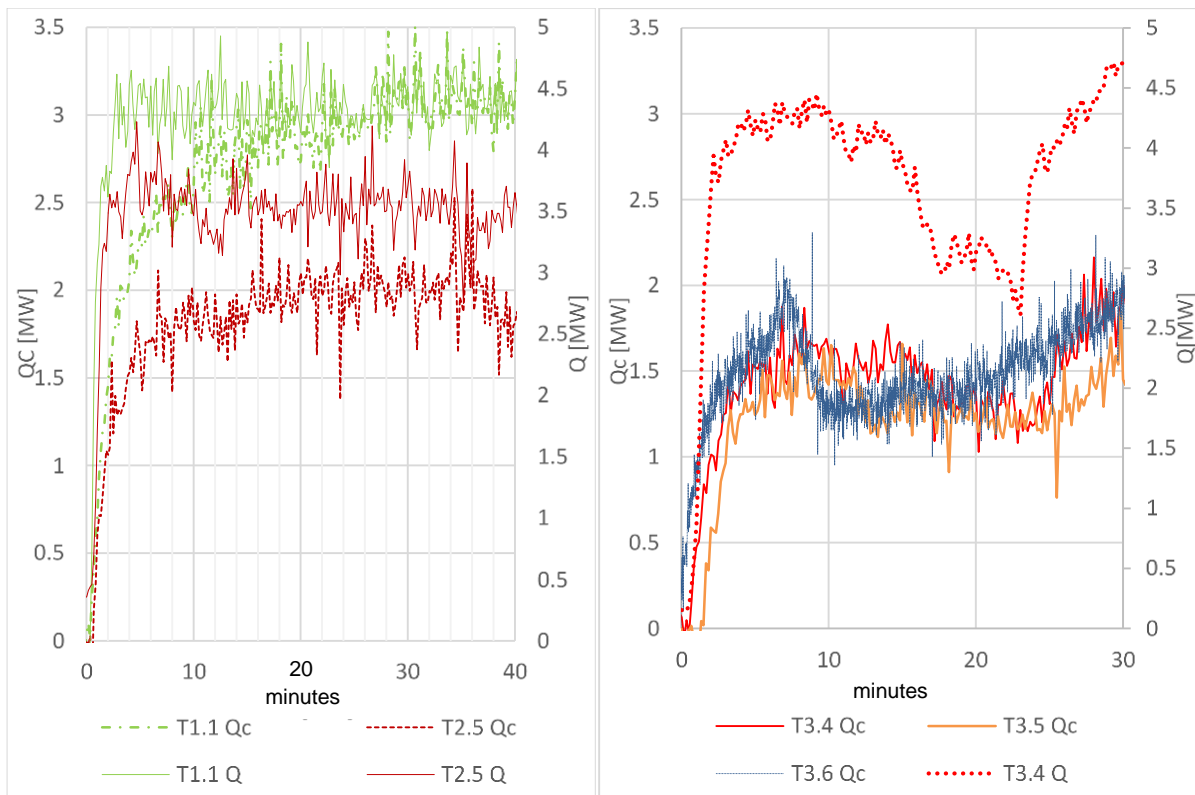
Les caractéristiques du feu, notamment le débit thermique, le taux de combustion de la masse de combustible, la hauteur des flammes et le pouvoir émissif de la flamme par unité de surface, ont été mesurées pour les feux de pétrole brut de 2 m de diamètre d'heptane, de Bakken et de dilbit dans les séries 1, 2 et 3, respectivement. Le flux thermique total reçu par le calorimètre et le flux thermique incident à l'extérieur du feu ont également été mesurés. Cette section traite des points saillants des résultats des essais et des comparaisons entre les essais équivalents pour les caractéristiques de feu mesurées. Les résultats détaillés de tous les essais des séries 1 à 3 sont fournis dans le Supplément A, Rapport d'essai. Les conclusions des résultats et les recommandations pour les analyses futures sont fournies dans les sections 11 et 12, respectivement.

10.1 Comportement général du feu

Dans l'ensemble, les feux de pétrole brut de Bakken et d'heptane ont atteint une combustion stable dans les 5 à 10 minutes suivant l'allumage et ont ensuite affiché une combustion constante tout au long de l'essai. Contrairement aux feux en nappe de Bakken et d'heptane, les feux de pétrole brut dilbit ont présenté un comportement de combustion instable dans lequel les taux de combustion ont changé au cours du temps de combustion. Par exemple, comme l'illustre la figure 6 (a), le débit thermique selon l'équation 2 (Q) et le débit thermique convectif (Q_c) selon l'éq. 3 des essais 1.1 et 2.5 (essais équivalents où chaque type de combustible avait un calorimètre à 1 m au-dessus de la surface du combustible) ont présenté une combustion continue et régulière. Des comportements de combustion régulière similaires ont été constatés dans d'autres essais à l'heptane et au Bakken (voir le Supplément A, sections 6.1 et 6.2).

En raison de la variation du taux de combustion, les DT mesurés dans les essais au dilbit ont affiché des valeurs élevées au début, puis ont diminué, suivies d'une augmentation ultérieure. Dans l'essai 3.4, à partir d'environ 10 minutes, les DT mesurés par le système de hotte (selon l'éq. 2) ont diminué de 30 %, puis ont augmenté. Le débit thermique convectif de l'essai 3.4 présentait également des profils similaires avec une diminution d'environ 30 %. Étant donné que les DT par le système de hotte (selon l'éq. 2) n'ont pas été mesurés dans les autres essais au feu de dilbit, les DT convectifs calculés (selon l'éq. 3) ont été étudiés, et un niveau similaire de diminution des DT convectifs a été constaté pour tous les essais au feu de pétrole brut dilbit. La figure 6 (b) illustre le comportement de combustion non stable dans certains des essais au dilbit. La hauteur de flamme et le PES mesurés par les radiomètres à vue étroite ont également présenté des profils similaires variant dans le temps pour les feux de pétrole brut dilbit.

La masse totale des matériaux résiduels restant dans le bac après chaque essai au feu a été mesurée dans les essais aux pétroles bruts de Bakken et dilbit. Des résidus solides secs et cassants d'une quantité totale d'environ 0,7-0,8 kg, soit 0,2-0,4 % de la masse totale de combustible fournie pour les essais, ont été trouvés après les essais au feu en nappe du pétrole de Bakken. Des quantités beaucoup plus importantes de résidus postcombustion sont restées après les essais au feu en nappe de dilbit. Des résidus solides poreux d'une quantité de 28 à 40 kg, soit 11 à 18 % de la masse totale de combustible fournie pour chaque essai, sont restés dans le bac après les essais au dilbit.



(a) Heptane et Bakken

(b) Dilbit

Figure 6 DT (Q) et DT convectif (Qc) mesurés dans les essais (T) à l'heptane, au Bakken et au dilbit

Comme nous l'avons vu, le comportement de combustion global a été affecté principalement par le type de combustible parmi les paramètres étudiés.

Les données d'essai moyennées sont résumées dans le tableau 3. Les données d'essai obtenues à partir des essais des séries 1 et 2 ont été moyennées sur la base de la période de l'état d'équilibre dans chaque essai. En raison du comportement de combustion variable dans les essais de la série 3, les données d'essai de la série 3 ont été moyennées en intégrant les données dans le temps, puis en les divisant par le même temps. Le Supplément A, Rapport d'essai, fournit des détails sur la façon et les périodes selon lesquelles ces données d'essai moyennées ont été obtenues pour chaque essai. Les sous-sections suivantes traitent de ces mesures moyennes des caractéristiques du feu (p. ex. le taux de combustion de la masse de combustible, la hauteur des flammes, le DT, la température des flammes, le PES, les mesures du calorimètre et les mesures du TFD).

10.2 Taux de combustion de la masse

10.2.1 Comportement au feu et caractéristiques du combustible

Le comportement de combustion non stable des feux en nappe dilbit est principalement dû à la composition du combustible, qui est un mélange de bitume lourd et de condensat plus léger, et qui contient une fraction plus importante d'hydrocarbures lourds que le pétrole brut de Bakken et l'heptane. Le pétrole brut de Bakken a une composition massique de C25+ d'environ 20 %, alors que le pétrole brut dilbit a une composition massique de

C25+ de 60 % (comme le montre la figure 3). Comme indiqué à la section 8, chaque composant des pétroles bruts de Bakken et dilbit bout à une température différente, contrairement à l'heptane pur (voir la figure 3). En raison de leurs différentes températures d'ébullition, les combustibles à composants multiples devraient subir des processus de vaporisation multiples, ce qui entraînerait la distillation des fractions légères et la pyrolyse progressive des fractions lourdes dans les feux en nappe. Avec une composition massique à 60 % de C25+, dont les points d'ébullition sont supérieurs à 400 °C, le feu de pétrole brut dilbit devrait subir une combustion plus progressive que le feu de pétrole brut de Bakken, dans lequel 80 % de sa masse bout et brûle dans une plage de température inférieure à 400 °C.

La variation du taux de combustion de la masse dans le temps a affecté la hauteur de la flamme et le débit thermique, qui ont affiché des profils variant dans le temps pour le dilbit. De même, le comportement variable dans le temps s'est reflété dans les mesures du PES de la flamme par les radiomètres à vue étroite (voir le Supplément A, section 6.3 et section 7.2.3). Bien qu'une analyse plus poussée soit nécessaire pour permettre de tirer des conclusions définitives, on suppose que la diminution du taux de combustion pour le dilbit est due au fait que la vaporisation des fractions lourdes nécessite le transfert de grandes quantités d'énergie au combustible dans le bac par le biais de la rétroaction thermique de la flamme. En plus de l'énergie requise pour la vaporisation des fractions lourdes, ces dernières nécessitent également l'absorption de grandes quantités d'énergie pour leur pyrolyse. Ces deux besoins en énergie ont potentiellement contribué au décalage de l'ébullition des fractions lourdes et à la chute du taux de combustion au milieu des essais.

10.2.2 Impact des paramètres sur le taux de combustion de la masse

Les taux de combustion de la masse moyens mesurés étaient de 0,03 kg/m²s pour les feux de pétrole brut de Bakken et de 0,04 kg/m²s pour les feux d'heptane sans la présence du calorimètre. Une variation importante des taux de combustion a été observée dans tous les essais au pétrole brut dilbit. Le taux de combustion moyen pour tous les essais au dilbit est de 0,02 kg/m²s, mais la valeur a varié de 0,005 à 0,060 kg/m²s (au cours de tous les essais au feu). Le taux de combustion moyen mesuré dans chaque essai est fournie dans le tableau 3, et pour les essais au dilbit, deux valeurs sont fournies pour différentes périodes au cours desquelles un taux de combustion a pu être relevé.

Lorsque le calorimètre a été placé au-dessus de la nappe, le taux de combustion de la masse a été réduit de 10 à 15 % dans les essais à l'heptane et au pétrole brut de Bakken. On sait que le taux de combustion d'un feu en nappe liquide est affecté par le retour de chaleur par rayonnement de la flamme à la surface du combustible. La réduction du taux de combustion de la masse observée dans les essais avec le calorimètre était en partie causée par l'objet cylindrique qui obstruait partiellement la rétroaction de rayonnement de la flamme vers la surface du combustible, bien que cela soit contrebalancé par le rayonnement du calorimètre chauffé vers la surface du combustible.

La température plus élevée du combustible a également augmenté le taux de combustion d'environ 10 % dans les essais à l'heptane et au pétrole brut de Bakken. Le fait de laisser le combustible se consumer n'a pas affecté le taux de combustion de la masse.

Néanmoins, l'impact de la présence du calorimètre, de la température initiale d'alimentation en combustible et des méthodes d'alimentation en combustible sur les taux de combustion n'est pas discernable en dehors de l'incertitude de mesure en raison du comportement de combustion intrinsèquement variable des feux en nappe. Il a été particulièrement difficile de déceler l'impact des paramètres d'essai dans les essais au pétrole brut dilué, en raison du taux de combustion très variable.

10.3 Hauteur des flammes

Le feu en nappe de 2 m de diamètre de pétrole brut de Bakken a établi une grande flamme au-dessus de la nappe avec une hauteur moyenne de 4,3 à 4,5 m, observée dans tous les essais de la série 2. Les hauteurs de flamme mesurées dans la série 2 (essais au pétrole brut de Bakken) étaient un peu plus courtes que les hauteurs de flamme moyennes de 5,6 à 6,8 m mesurées dans la série 1 (essais à l'heptane). Les feux en nappe de pétrole brut dilbit ont donné lieu à la flamme la plus courte parmi les combustibles testés, avec une hauteur moyenne de 3,4 à 3,6 m.

La taille des flammes des feux en nappe de pétrole brut fournit des informations utiles pour évaluer les dangers autour du feu, par exemple s'il y a ou non propagation du feu aux objets combustibles situés à proximité de la flamme. Alors que la chaleur par rayonnante incidente vers une cible dépend principalement de la distance de la flamme et du pouvoir émissif de la flamme, elle peut être mieux estimée en tenant compte de la taille et de la forme de la flamme. La flamme est souvent représentée sous la forme d'une feuille rectangulaire, d'un cylindre ou d'un cône, de sorte que les facteurs de vue/configuration approximatifs peuvent être évalués pour mieux estimer la chaleur par rayonnement incidente sur une cible.

Parmi les paramètres testés, le type de combustible a eu l'effet le plus important sur la hauteur de la flamme. Cela s'explique par le fait que la hauteur de la flamme est régie par le débit thermique, lequel dépend du taux de combustion de la masse et de la chaleur de combustion du combustible, tous deux dépendant également du type de combustible. Ce point sera discuté plus en détail ci-dessous.

10.4 Débits thermiques

10.4.1 Vérification de la mesure du débit thermique

Les DT ont été calculés par deux méthodes : (1) en mesurant le taux de combustion de la masse et (2) en analysant les produits de combustion par calorimétrie de la consommation d'oxygène. Les chaleurs maximales théoriques qui peuvent être produites par les feux en nappe ont été calculées en fonction des taux de combustion de la masse et de la chaleur complète de combustion (H_c), selon l'éq. 1 où $x = 1$. Les valeurs de débit thermique calculées en fonction du taux de combustion de la masse dans les essais au feu d'heptane et de Bakken étaient en moyenne environ 10 % supérieures aux débits thermiques calculés sur la base de la calorimétrie de la consommation d'oxygène (voir le tableau 3 pour la valeur calculée pour chaque essai et la section 7.7 du Supplément A). Cela indique que le facteur x de combustion incomplète (efficacité de la combustion) trouvé dans les essais était d'environ 0,9.

La figure 7 compare le débit thermique mesuré par les deux méthodes pour tous les essais. À l'aide des débits de fumée, les températures de fumée et les concentrations gazeuses d'oxygène, de monoxyde de carbone et de dioxyde de carbone mesurés dans le système de hotte de l'installation FLAME, les DT ont été calculés par calorimétrie de la consommation d'oxygène (eq. 2). Les DT calculées par calorimétrie de la consommation d'oxygène ont montré des tendances générales similaires entre les essais aux DT calculés au moyen des taux de combustion de la masse selon l'éq. 1 où $x = 0,9$. Il convient de noter que les données de DT obtenues à partir du système de hotte nécessitent des vérifications des biais dans les mesures de concentration d'oxygène et les calculs de DT qui en résultent. Dans l'ensemble, les deux méthodes de calcul du DT ont donné des débits thermiques comparables dans les essais à l'heptane et au pétrole brut de Bakken. Cependant, l'analyseur de gaz utilisé pour mesurer les concentrations de gaz dans le système de hotte a échoué dans tous les essais au feu de dilbit, à l'exception de l'essai 3.4. À l'aide des taux de combustion de la masse, les DT ont été calculés pour tous les essais au dilbit; toutefois, en raison des taux de combustion de la masse très variables, ces valeurs présentaient une grande incertitude (voir le Supplément A, figure 8-1).

Le débit thermique moyen mesuré dans la hotte au moyen de la calorimétrie de la consommation d'oxygène était de 3,2 à 3,8 MW pour les essais au pétrole brut de Bakken et de 4,4 à 5,4 MW pour les essais à l'heptane avec le calorimètre au-dessus. Sans calorimètre, le DT mesuré était de 5,2 MW, 3,5 à 4,8 MW et 3,7 MW pour les feux d'heptane, de Bakken et de dilbit, respectivement. Il convient de noter que le débit thermique du feu de pétrole brut dilbit ne peut être comparé équitablement à celui des feux de Bakken et d'heptane en raison de son comportement de combustion différent.

Comme indiqué à la section 10.2.2, parmi les paramètres testés, l'effet du type de combustible était le plus apparent sur la vitesse massique de combustion du combustible et, par conséquent, l'effet du type de combustible se reflétait également sur le débit thermique. Les essais au feu d'heptane ont donné lieu à un débit thermique relativement plus élevé que pour les feux de pétrole brut de Bakken et dilbit. Avec le calorimètre placé au-dessus de la nappe, le débit thermique a été réduit dans les essais à l'heptane et au pétrole brut de Bakken en raison de la réduction du taux de combustion de la masse.

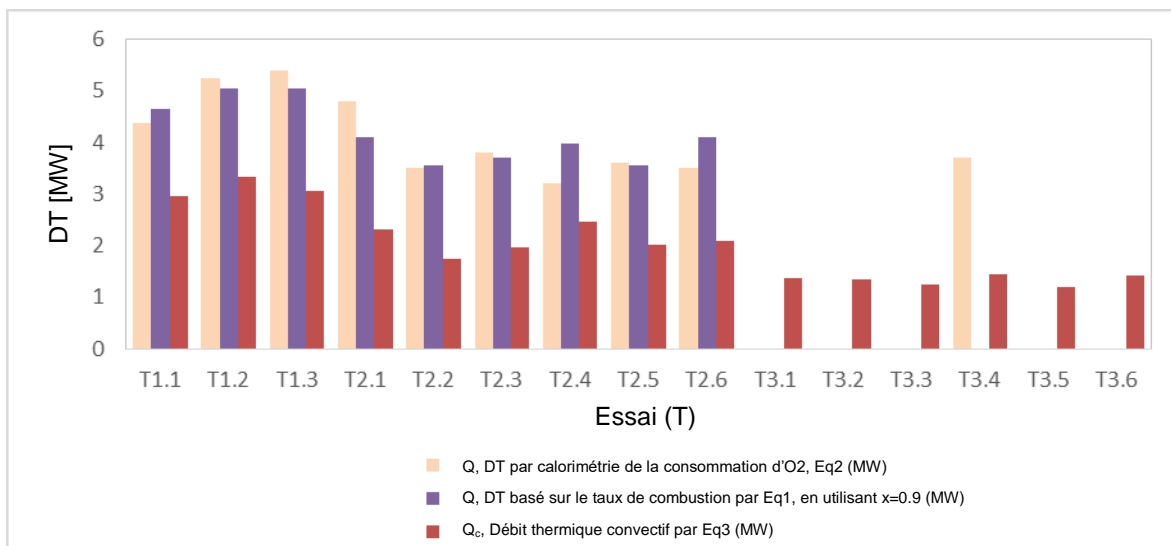


Figure 7 Les débits thermiques mesurés par calorimétrie de la consommation d'oxygène et les taux de combustion de la masse en comparaison avec les débits thermiques convectifs

(Notez que les données de débit thermique obtenues à partir du calorimètre de consommation d'oxygène nécessitent des vérifications pour les biais dans les mesures de concentration d'oxygène et les calculs de débit thermique qui en résultent. Pour la série 3, en raison de la variation du taux de combustion de la masse, les DT basés sur le taux de combustion ne sont pas indiqués).

10.4.2 Débit thermique convectif et par rayonnement

Comme nous l'avons vu à la section 9.5.1, le débit thermique total d'un feu en nappe est libéré principalement sous forme de convection et de rayonnement. La différenciation des composants radiatifs et convectifs du débit thermique d'un feu permet de mieux comprendre le transfert de chaleur de la flamme.

Les débits thermiques convectifs (Q_c) ont été calculés pour tous les essais selon l'éq. 3, qui utilise la température de la fumée et le débit massique mesurés dans le conduit. Une partie relativement conséquente de la chaleur est libérée par convection dans les essais au feu d'heptane (~60 à 65 %) et de pétrole brut de Bakken (~50 à 60 %). Dans les essais au pétrole brut dilbit, les débits thermiques convectifs mesurés étaient également conséquents entre les essais (1,2 à 1,5 MW), et la portion de chaleur libérée par convection était de

0,39, ce qui a été évalué pour l'essai 3.4 avec le débit thermique mesuré par le système de hotte. Comme le montre la figure 7, alors que les DT convectifs étaient similaires parmi les six essais au dilbit, les taux de combustion de la masse ont affiché une grande variabilité dans la série 3 (voir le tableau 3). La grande variabilité du comportement de combustion rend difficile la comparaison de la série 3 avec les séries 1 et 2.

Sur la base des débits thermiques convectifs, la fraction de chaleur par rayonnement (X_r) du débit thermique total a été calculée dans chaque essai selon les éq. 3 et 4, comme indiqué à la section 9.5.1. La figure 8 compare les fractions de chaleur par rayonnement calculées pour l'heptane et les pétroles bruts de Bakken et dilbit. La fraction de chaleur par rayonnement (X_r) de la chaleur totale dégagée par les feux de pétrole brut de Bakken était légèrement supérieure à celle des feux d'heptane. Les valeurs moyennes de X_r mesurées étaient d'environ 0,46 et 0,36 pour les essais au pétrole brut de Bakken et à l'heptane, respectivement (voir la figure 8). Alors que ces valeurs de X_r ont été calculées à l'aide du débit thermique par taux de combustion de la masse (éq. 1) dans les séries 1 et 2, le débit thermique selon l'éq. 1 n'a pas été utilisé pour la série 3 en raison du comportement de combustion variable dans le temps du pétrole brut dilbit. La valeur de X_r a été calculée pour l'essai au dilbit sur la base du débit thermique mesuré par le calorimètre à hotte, et une valeur de 0,61 a été obtenue pour l'essai 3.4. D'autres analyses de données et la confirmation de ces valeurs de X_r sont nécessaires, en particulier pour les essais au dilbit, étant donné le comportement variable dans le temps (cela est abordé plus en détail dans la section 12 pour les études futures suggérées).

La fraction de chaleur par rayonnement n'a été obtenue qu'à partir de l'essai 3.4 dans les essais au dilbit, comme le montre la figure 8, car les données du débit thermique total n'ont été mesurées par le système de hotte (éq. 2) que dans cet essai. Par conséquent, les débits thermiques radiatifs ont été estimés alternativement sur la base du PES moyenne, qui a été mesuré dans tous les essais au dilbit, plutôt que de réduire à partir du DT total par le système de hotte. Le débit thermique par rayonnement a été estimé en multipliant le PES moyen par la surface de la flamme. La surface de la flamme a été estimée en utilisant l'hypothèse de la forme rectangulaire de la flamme [13]. Dans la figure 9, les DT par rayonnement calculés basés sur les PES moyens sont tracés par rapport aux DT convectifs mesurés. Il est à noter que le débit thermique par rayonnement calculé est une valeur approximative. Ensuite, le rapport (Q_r/Q_c) entre le débit thermique par rayonnement et le débit thermique convectif a été exploré car la caractérisation du débit thermique par rayonnement et convectif est importante pour les analyses des dangers, comme discuté dans la section 9.5.1, et ces données pourraient également être utilisées pour une éventuelle modélisation numérique des feux en nappe. Les rapports (Q_r/Q_c) obtenus sont de 0,49, 0,65 et 0,76, respectivement pour les feux d'heptane et de pétroles bruts de Bakken et dilbit. On peut donc en déduire que les feux de pétrole brut dilbit et de Bakken ont libéré de plus grandes quantités de chaleur par rayonnement que les feux d'heptane, et ce parce qu'on s'attend à ce qu'ils produisent plus de suie que l'heptane pour les compositions de combustible, comme présenté dans la section 8. La composition chimique et la structure du combustible affectent la production de suie pendant le feu [2]. Comme le montre l'analyse de la composition des combustibles, les pétroles bruts de Bakken et dilbit contiennent une petite quantité de benzène et des proportions plus importantes d'hydrocarbures dont le nombre de carbones est supérieur à celui de l'heptane (voir la figure 2). Cela explique la flamme plus fuligineuse produite par les pétroles bruts puisque les principaux précurseurs de la suie, tels que les hydrocarbures polycycliques aromatiques, sont généralement formés en raison de la présence d'hydrocarbures à longue chaîne, d'aromatiques (p. ex. le benzène) et de composés insaturés dans la composition du combustible.

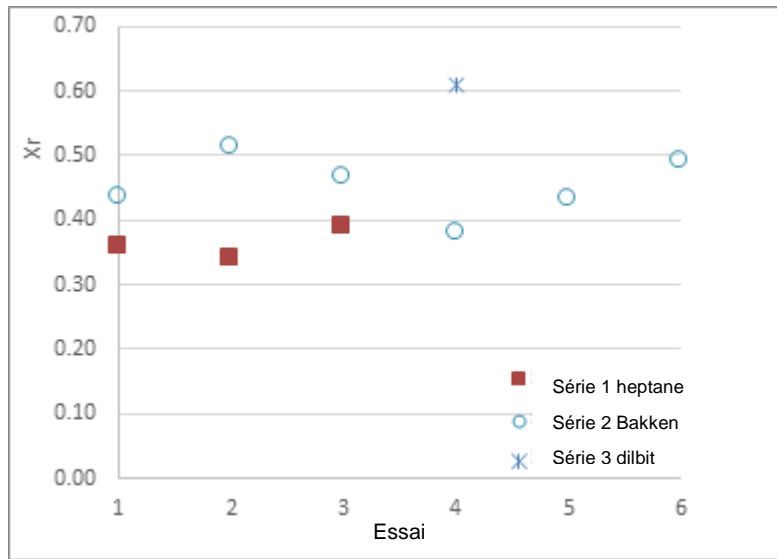


Figure 8 Fractions de chaleur par rayonnement

(Pour les séries 1 et 2, les fractions ont été obtenues pour l'éq. 3 au moyen du débit thermique (Q) obtenu sur la base des taux de combustion de la masse (eq. 1). Pour la série 3, le débit thermique (Q) mesuré par le système de hotte calorimétrique (eq. 2) a été utilisé à la place en raison de la variation des taux de combustion de la masse dans les essais de la série 3).

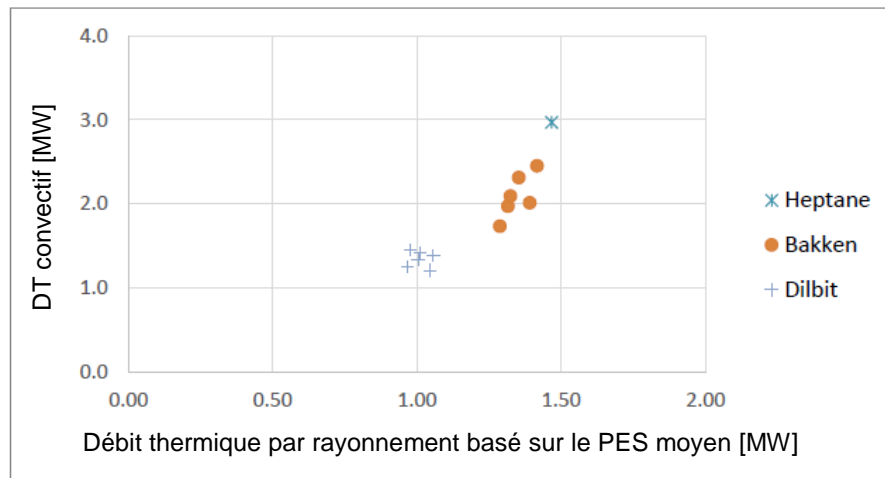


Figure 9 Débit thermique par rayonnement comparé au débit thermique convectif

10.5 Température et pouvoir émissif de la flamme par unité de surface

10.5.1 Vérification des mesures

Les températures et les pouvoir émissif de la flamme par unité de surface (PES) ont été mesurés à l'aide du radiomètre à imagerie spectrale IR (basé sur le rayonnement infrarouge balayé de la flamme). Des radiomètres à vue étroite ont également été utilisés pour mesurer les PES des flammes. Les PES réduits à partir des mesures de la caméra IR concordent assez bien avec les valeurs de PES mesurés par les radiomètres à vue étroite [5], cependant la caméra IR était plus efficace pour surveiller les profils thermiques complets des flammes. En comparaison avec les profils verticaux de PES le long de la ligne centrale de la nappe à partir des mesures de la caméra IR, les mesures localisées prises par les radiomètres à vue étroite étaient légèrement inférieures en raison de la zone de mesure relativement grande (diamètre localisé de 0,8 m) [5].

10.5.2 Profils verticaux de la température et du pouvoir émissif de la flamme par unité de surface

La figure 10 montre la température du panache de feu mesurée par la caméra IR pour les feux d'heptane, de pétrole brut de Bakken et dilbit lors de l'essai 1.1, de l'essai 2.3 et de l'essai 3.5 (essais équivalents où chaque type de combustible avait un calorimètre à 1 m au-dessus de la surface du combustible), respectivement. Comme nous l'avons vu dans la section 9.5.1, la hauteur d'une flamme étant fortement régie par le débit thermique [6], la hauteur de flamme des feux d'heptane était la plus importante parmi les combustibles testés en raison du débit thermique le plus élevé des feux d'heptane. La température des flammes au-dessus du bac est élevée pour tous les combustibles, et la température des flammes diminue avec l'augmentation de la hauteur des flammes. Le calorimètre a été placé dans les zones de haute température des flammes. Dans le Supplément A, Rapport d'essai, l'annexe A.3 montre la température et le PES mesurés d'une flamme le long de la ligne centrale de la flamme par la caméra IR, et la température maximale et le PES maximal ont été observés dans la partie inférieure de la flamme.

Comme la température d'une flamme, le PES diminue progressivement le long de la hauteur de la flamme. La figure 11 montre les profils verticaux du PES le long de l'axe de la flamme (comme on le voit dans l'image) mesurés dans les essais au feu d'heptane (essai 1.1) et de pétroles bruts de Bakken (essai 2.3) et dilbit (essai 3.5). Les profils de PES verticaux ont été tracés en fonction de l'élévation relative à la hauteur de la flamme (Z/l_f) de chacun (c'est-à-dire que l'élévation, Z , est à partir du sol, et l_f est la hauteur de la flamme), ce qui a permis des comparaisons normalisées entre les essais avec différentes hauteurs de flamme. Dans la partie inférieure de la flamme, le PES a affiché une forte augmentation avec l'élévation, montrant de faibles niveaux de PES le long de la paroi du bac de combustible et immédiatement au-dessus du haut du bac de combustible, puis atteignant rapidement la valeur maximale. Les PES maximaux le long de la ligne centrale de la flamme ont été observés dans la partie inférieure de la flamme, plus précisément à $0,16 \pm 0,01$ m/m de Z/l_f dans tous les essais aux pétroles bruts de Bakken et dilbit, à l'exception des essais avec le calorimètre à 0,5 m de hauteur. Cela suggère que la présence du calorimètre dans le feu à une hauteur de 1 m n'a pas affecté l'élévation où le PES maximal a été mesuré. Avec le calorimètre à une hauteur de 0,5 m, les PES maximaux ont été mesurés à 0,18 m/m et 0,12 m/m de Z/l_f , pour les essais au Bakken (essai 2.2) et dilbit (essai 3.2), respectivement. La valeur moyenne trouvée pour tous les feux de Bakken et les feux de dilbit était de $0,16 \pm 0,01$ m/m de Z/l_f . Pour l'essai à l'heptane (essai 1.1), les PES maximaux de la ligne centrale ont été mesurés à 0,23 m/m de Z/l_f .

Les mesures de la caméra IR sont basées sur la ligne de visée du feu vers la caméra et sont affectées par l'épaisseur optique de la flamme ainsi que par le rayonnement du calorimètre chauffé, ce qui rend difficile de tirer des conclusions sur le transfert de chaleur du feu vers le calorimètre. La variance verticale dans la partie inférieure de la flamme pourrait potentiellement affecter le flux thermique total du feu vers une cible externe, selon la taille, l'emplacement et l'orientation de la cible.

Pour tous les essais au Bakken et au dilbit, le placement vertical du calorimètre a été déterminé par rapport au profil du PES de la flamme, et les deux hauteurs de calorimètre de 0,5 m et 1,0 m utilisées dans les essais étaient relativement proches de la hauteur à laquelle le PES maximal le long de la ligne centrale de la flamme a été mesuré. Pour les essais au pétrole brut, la hauteur du calorimètre était de 0,26 m/m et 0,13 m/m de Z/l_f , pour les hauteurs de 1 m et 0,5 m, respectivement. Dans l'essai à l'heptane (essai 1.1), le calorimètre était placé à 1,0 m, soit 0,18 m/m de Z/l_f .

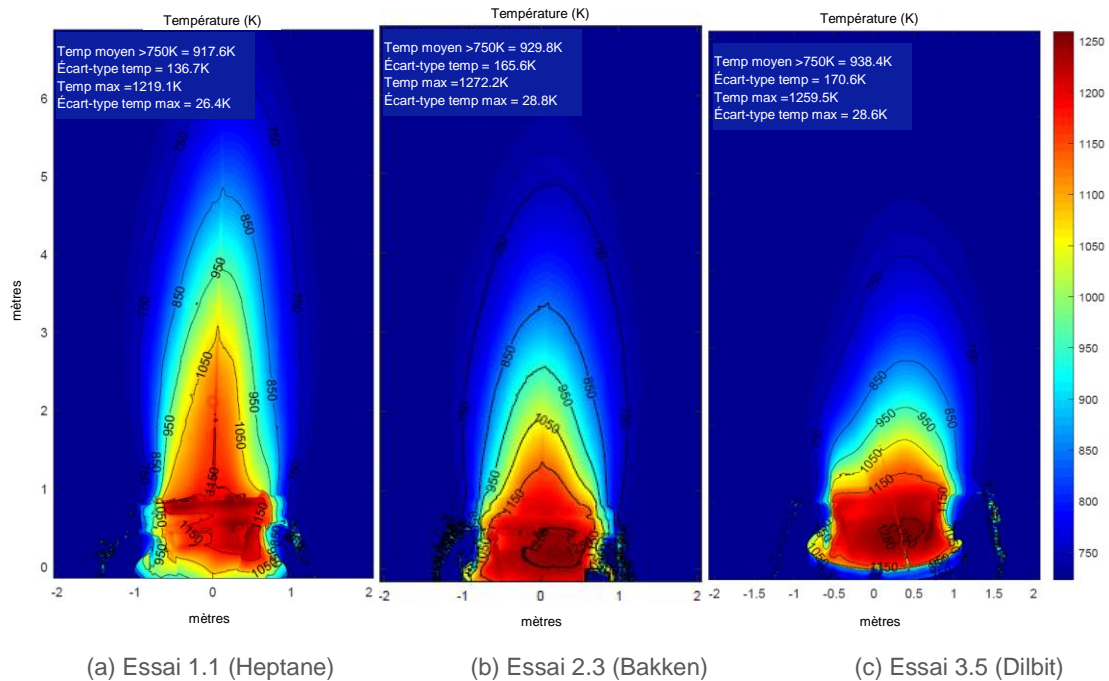


Figure 10 Températures du panache de feu à partir des mesures de la caméra IR

(La hauteur est à partir du sol dans la série 3 et à partir du haut du bac de combustible dans les essais des séries 1 et 2. Il convient également de noter que la caméra IR était placée au deuxième étage, de sorte que la vue de l'incendie était d'une hauteur d'environ 3,7 m au-dessus du sol de l'installation d'essai et que les images ne sont pas représentatives d'un plan vertical le long du panache de la flamme).

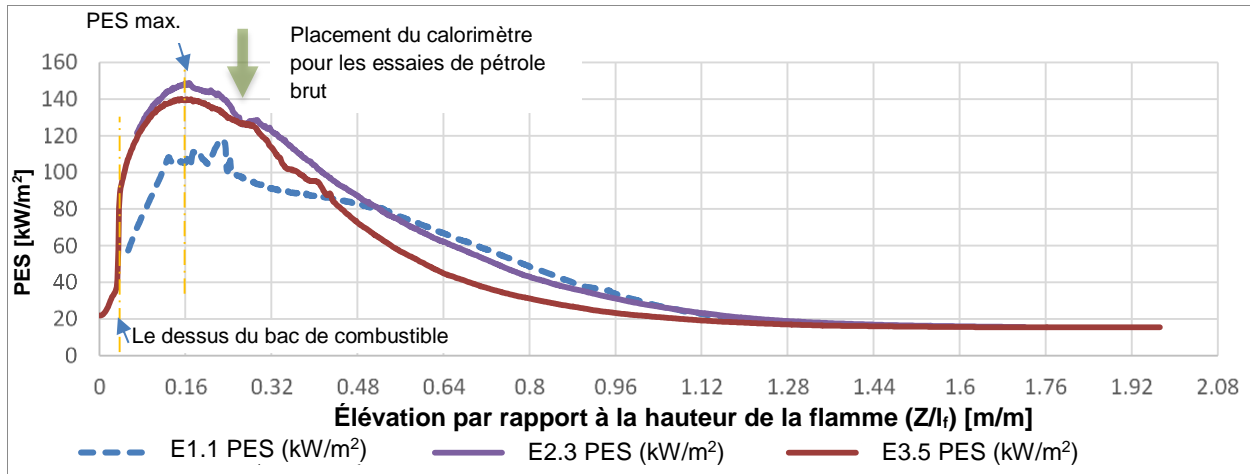


Figure 11 Variations verticales du PES avec l'élévation par rapport à la hauteur de la flamme pour l'heptane (essai 1.1) et les pétroles bruts de Bakken (essai 2.3) et dilbit (essai 3.5)

(Notez que le sol est là où $Z/l_f = 0$, et que Z et l_f sont évalués à partir de vues de caméra, ce qui n'est pas précisément représentatif d'un plan vertical dans l'installation d'essai).

10.5.3 Les effets des paramètres d'essai sur la température et le pouvoir émissif de la flamme par unité de surface

La présence du calorimètre, les températures des combustibles d'alimentation ou le maintien d'un niveau de combustible constant n'ont pas eu d'effet significatif sur les températures et les PES moyens et maximaux des flammes. La température et le PES maximaux d'une flamme varient légèrement en fonction du type de combustible. Les feux de pétroles bruts de Bakken et dilbit ont entraîné des niveaux similaires de température de flamme maximale et de PES maximal, qui étaient respectivement de 1260 à 1280 K (987 à 1007 °C) et 196 à 207 kW/m² pour les feux de Bakken et de 1230 à 1270 K (957 à 997 °C) et 173 à 194 kW/m² pour les feux de dilbit (Notez que ces valeurs maximales ne se sont pas produites le long de la ligne centrale du feu). Par rapport aux résultats de l'essai 1.1 à l'heptane avec le calorimètre à 1 m de hauteur (1220±26 K (947±26 °C) et 181±15 kW/m²), les essais correspondants aux pétroles bruts de Bakken et dilbit (2.3, 2.5, 3.1 et 3.5) ont donné lieu à un PES maximal supérieur d'environ 13 % et 7 % respectivement, ce qui n'est pas considéré comme un effet significatif. Il convient de noter que le pouvoir émissif par rayonnement, comme indiqué dans la section 9.5.7), dépend fortement de la température de l'émetteur (c'est-à-dire qu'elle est directement proportionnelle à la quatrième puissance de la température), et que par conséquent, d'infimes différences de température de la flamme peuvent entraîner des changements notables de l'émittance énergétique.

10.5.4 PES moyen et radiation totale émis par la flamme

Les PES moyens, calculés sur toute la surface de la flamme, étaient de 66±6 kW/m², 73 à 79 kW/m² (±11 kW/m² en moyenne), et 70 à 78 kW/m² (±8 kW/m² en moyenne) pour les essais à l'heptane et aux pétroles bruts de Bakken et dilbit, respectivement. Les mesures moyennes de PES légèrement plus élevées dans les essais aux pétroles bruts de Bakken et dilbit concordent avec le fait que la partie par rayonnement (X_r) du débit thermique total des feux de Bakken et de pétrole brut dilbit était plus importante que la partie par rayonnement du feu d'heptane. Ce résultat peut être attribué au panache plus suintant généré par les feux de pétrole brut de Bakken et dilbit que par les feux d'heptane. Un résultat similaire a été trouvé dans les expériences menées par Blanchat et Suo-Anttila [7]. Ils ont mesuré la production de suie et les fractions par rayonnement de feux en nappe d'alcool, d'hydrocarbures et de mélanges alcool-hydrocarbures. Dans leurs essais aux hydrocarbures

JP8 et d'heptane, des fractions par rayonnement (X_r) et des productions de suie plus élevées ont été mesurées pour les feux en nappe de JP8 que pour les feux en nappe d'heptane. Dans la plupart des combustibles à base de pétrole, le rayonnement de la suie contribue généralement plus que le rayonnement gazeux, mais cela dépend des propriétés optiques de la suie, notamment de sa composition chimique et de sa capacité d'absorption [8].

Dans l'ensemble, pour les pétroles bruts de Bakken et dilbit, la température et le PES moyen sont similaires car dans les flammes de diffusion de la suie, l'énergie de rayonnement est émise principalement par les particules de suie plutôt que par les espèces de combustion individuelles. Alors que les valeurs moyennes du PES et de la température de la flamme étaient similaires, la hauteur et le volume de la flamme différaient significativement entre les feux d'heptane et de pétroles bruts de Bakken et dilbit. On peut donc en déduire que la quantité totale d'émission de chaleur par rayonnement est approximativement proportionnelle au volume ou à la surface de la flamme du feu. Toutefois, cela ne tient pas compte des différences d'obscurcissement de la flamme par la fumée.

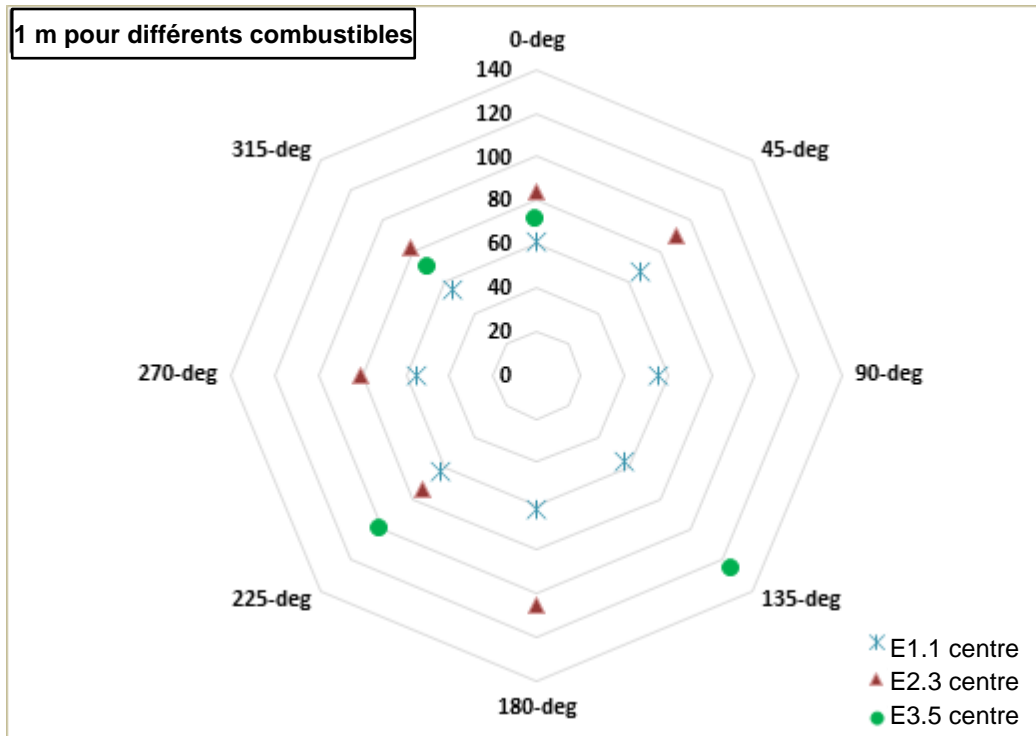
10.6 Flux thermique reçu par le calorimètre

10.6.1 Variation du flux thermique en circonférence du calorimètre

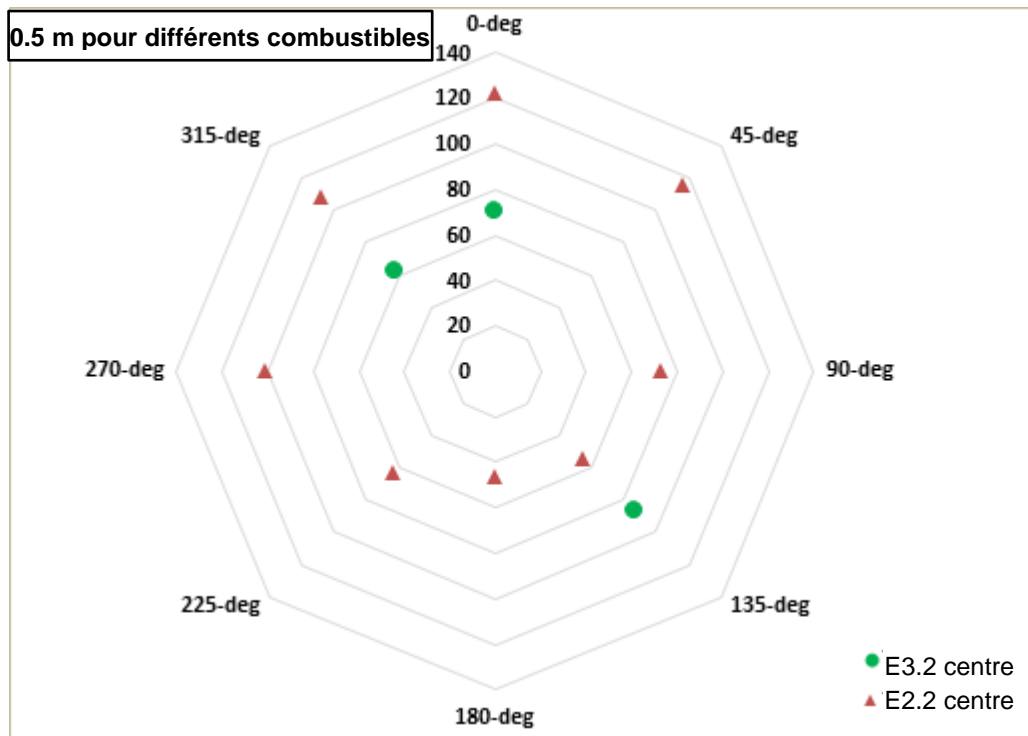
La température moyenne de la coque extérieure du calorimètre était d'environ 917 °C, 800 °C et 670 °C pour les essais au pétrole brut de Bakken, à l'heptane et au pétrole brut dilbit, respectivement. Il convient de noter que les valeurs moyennes des essais au dilbit ont été obtenues, contrairement à celles des essais à l'heptane et au Bakken, par l'intégration des données sur 0 à 25 minutes (par opposition à une période de combustion stable spécifique à l'essai), puis par la division par 25 minutes. Le flux thermique total à chaque point de mesure a été calculé selon l'éq. 5. La figure 12 compare le flux thermique total mesuré dans diverses directions radiales à travers le plan central du calorimètre, qui était placé à 1 m au-dessus de la surface du combustible d'heptane (essai 1.1), de Bakken (essai 2.3) et dilbit (essai 3.5) et à 0,5 m au-dessus de la surface du combustible de Bakken (essai 2.2) et dilbit (essai 3.2). En général, des profils circonférentiels inégaux du flux thermique total ont été constatés pour la plupart des essais. La variation du flux thermique en circonférence du calorimètre était plus distincte dans les essais au pétrole brut de Bakken et dilbit que dans les essais à l'heptane. Cette différence dans les profils circonférentiels entre les combustibles est principalement due au fait que le flux thermique total est surtout régi par les caractéristiques de la flamme entourant le calorimètre.

La sensibilité du flux thermique total vers le calorimètre a été bien rendue dans les essais au Bakken. Lorsqu'il est élevé à 1 m, le calorimètre a enregistré un flux thermique total plus élevé sur la surface inférieure (180°) que sur la surface supérieure (0°). Lorsqu'il est élevé à 0,5 m, le calorimètre a mesuré un flux thermique total beaucoup plus élevé sur la surface supérieure (123 kW/m²) que sur la surface inférieure (47 kW/m²). La valeur significativement basse mesurée au bas dans l'essai 2.2 peut être attribuée à la zone de vapeur du combustible immédiatement au-dessus de la surface du combustible, qui est relativement plus froide que la zone des flammes.

De même, dans les essais au dilbit, un flux thermique nettement plus élevé a été mesuré au bas (127 kW/m²) qu'au haut (71 kW/m²) du calorimètre lorsque celui-ci était placé à 1 m au-dessus de la surface du combustible dans l'essai 3.5. Dans l'essai 3.5, la température maximale de la flamme et le PES ont été mesurés à une hauteur de 0,5 m, sous le fond du calorimètre. Lorsque le calorimètre a été placé à 0,5 m au-dessus du bac de dilbit, des valeurs légèrement plus élevées ont été mesurées au bas du calorimètre qu'au sommet.



(a) Profils transversaux du calorimètre à 1 m au-dessus de la surface du combustible



(b) Profils transversaux du calorimètre à 0,5 m au-dessus de la surface du combustible

Figure 12 Flux thermique total [kW/m²] mesuré par le calorimètre

10.6.2 Les effets des paramètres d'essai et des caractéristiques du combustible sur le flux thermique total vers le calorimètre

Le flux thermique total moyen sur toute la surface du calorimètre a été obtenu dans chaque essai. Étant donné que la chaleur totale transférée à un objet engouffré dans un grand feu en nappe d'hydrocarbures se fait principalement par rayonnement [9], nous étudions dans cette section la relation entre les mesures du calorimètre et le pouvoir émissif de la flamme. En raison d'un manque de mesures du pouvoir émissif local à l'intérieur de la flamme, le PES mesuré à la surface de la flamme a été utilisé pour la comparaison avec le transfert de chaleur total vers le calorimètre. Cependant, il convient de noter que, bien que des corrélations puissent être observées entre le PES à la surface de la flamme et le transfert thermique total vers le calorimètre, il faut tenir compte des propriétés radiatives locales à l'intérieur de la flamme (p. ex. l'absorptivité, la longueur du trajet) afin de comprendre correctement le transfert thermique du feu vers le calorimètre. Dans la figure 13, les flux thermiques totaux moyens sur la surface du calorimètre sont indiqués en fonction du PES maximal de la flamme pour les essais à 1 m de hauteur du calorimètre, car le calorimètre était placé à proximité de la hauteur où le PES maximal de la flamme a été mesuré.

Dans l'ensemble, les flux thermiques totaux moyens vers le calorimètre dans les emplacements de 1 m de hauteur (comme indiqué dans la figure 13) ainsi que de 0,5 m étaient quelque peu proportionnels aux PES maximaux mesurés, pour les combustibles testés. Il faut préciser que le flux thermique vers le calorimètre est moyenné à la fois dans le temps et sur une grande surface, tandis que le PES maximal est moyenné dans le temps mais n'est représentative que d'une petite portion de la flamme (on suppose que l'emplacement du PES maximal ne change pas beaucoup avec le temps et qu'on peut donc l'estimer à partir des images IR moyennées dans le temps). Il faut également noter que le PES est mesuré à la surface de la flamme, alors que le flux thermique total mesuré par le calorimètre s'applique à l'intérieur du feu [5]. Le flux thermique total moyen mesuré par le calorimètre dans l'essai à l'heptane était plus faible que dans les essais au Bakken et au dilbit, ce qui correspond généralement au fait que le feu d'heptane émet des PES plus faibles que les feux de Bakken et de dilbit.

La température du combustible d'alimentation chauffé et l'alimentation non continue en combustible n'ont pas eu d'impact significatif sur le flux thermique total moyen vers le calorimètre. Le placement vertical du calorimètre, cependant, a semblé affecter le flux thermique total. Lorsque le calorimètre était placé à 1 m au-dessus du bac de Bakken, les flux thermiques totaux moyens mesurés par le calorimètre étaient d'environ 94,1 à 109,5 kW/m². Lorsque le calorimètre a été placé à 0,5 m au-dessus de la surface du combustible (essai 2.2), le flux thermique total moyen vers le calorimètre a diminué à 77 kW/m², reflétant l'exposition du fond du calorimètre à la zone de vapeur plus froide et riche en combustible immédiatement au-dessus de la surface du combustible. Pour les essais au dilbit, les flux thermiques totaux moyens étaient d'environ 64 à 83 kW/m² et 67 kW/m² avec le calorimètre placé à 1 m et 0,5 m de hauteur, respectivement. Bien que les résultats de l'essai au dilbit ne soient pas aussi concluants que ceux de l'essai au Bakken et qu'ils nécessiteraient une confirmation supplémentaire, les mesures du flux thermique total peuvent également avoir été sensibles à l'emplacement vertical du calorimètre dans la flamme. Le fond du calorimètre a pu être affecté par la zone de vapeur du combustible située immédiatement au-dessus de la surface du combustible, dont les caractéristiques varient fortement en fonction du type de combustible [10, 11].

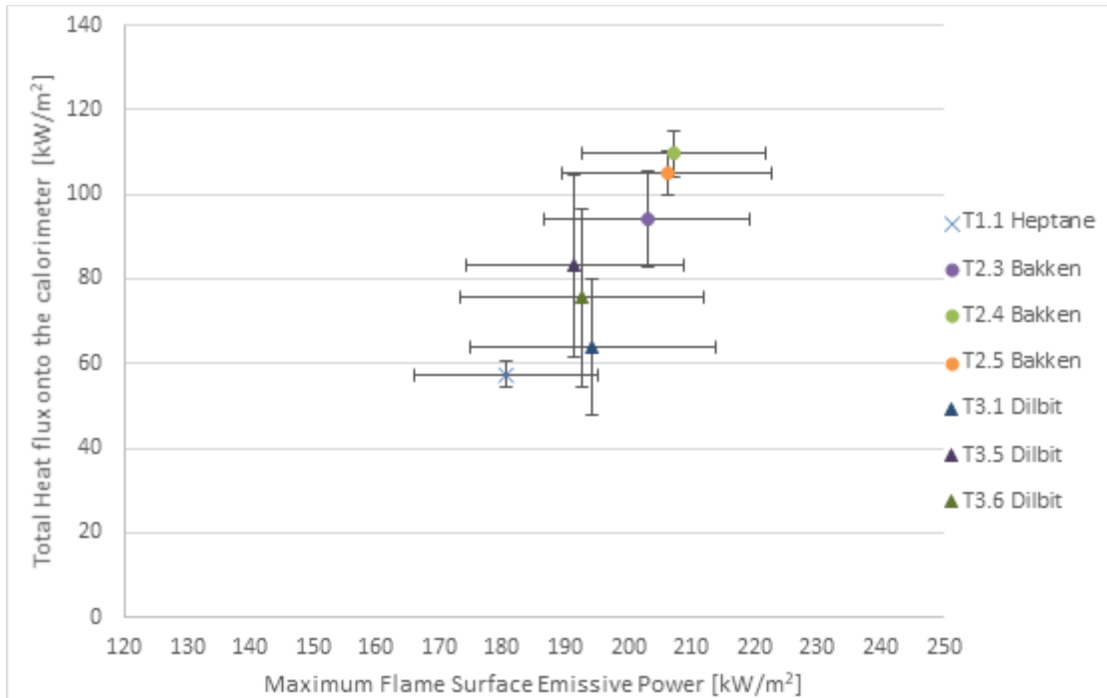


Figure 13 Flux thermique total moyen vers le calorimètre placé à 1 m au-dessus du bac par rapport au pouvoir émissif maximal de la flamme par unité de surface

(Moyenne sur les 24 emplacements de mesure en circonférence du calorimètre)

10.7 Flux thermique incident s'éloignant du feu

Les flux thermiques provenant du feu ont été mesurés à différentes distances de la nappe de combustible, afin d'évaluer les conditions thermiques autour du feu. Deux TFD ont été placés à 2 m et 4 m du centre de la nappe, à une hauteur de 1 m, pour évaluer le flux thermique incident sur la surface du TFD faisant face à la flamme. À 9 m du centre de la nappe, une jauge de flux thermique total a également été montée sur le mur de l'installation d'essai à la même hauteur de 1 m.

Les données de flux thermique incident recueillies par les deux TFD et la jauge de flux thermique à la hauteur de 1 m sont représentées sur la figure 14 en fonction de la distance de mesure. L'ampleur du flux thermique diminue à mesure que la distance entre la nappe et la cible augmente. Le flux thermique incident mesuré près du feu de pétrole brut de Bakken (à 2 m du feu) était plus élevé que celui mesuré près du feu d'heptane, principalement en raison de la chaleur par rayonnement plus élevée générée par le feu de pétrole brut de Bakken. Le flux thermique incident mesuré à 4 m (distance égale à 2 diamètres de la nappe) du feu de pétrole brut de Bakken était d'environ 19 kW/m², ce qui pourrait enflammer n'importe quel bois ou matériau plastique au même endroit (les valeurs de flux thermique critique mesurées par la méthode d'essai standard de l'ASTM E2058 pour provoquer l'inflammation du bois et des polymères sont respectivement de 10 et 10 à 15 kW/m² [12]). À la distance de 9 m (distance égale à 4,5 diamètres de la nappe), les flux thermiques incident mesurés pour les feux d'heptane et de pétroles bruts de Bakken et dilbit étaient inférieurs à 2,5 kW/m². À cet endroit, les essais au feu de pétrole brut de Bakken ont donné lieu à un flux thermique incident d'environ 2 kW/m², ce qui est la limite tenable pour les personnes vêtues normalement [13] mais supérieur au flux thermique critique de 1,7 kW/m² pour commencer à ressentir de la douleur sur la peau exposée [14]. Si l'on applique la valeur critique de 5 kW/m² suggérée pour une lutte sécuritaire contre le feu avec un équipement protégé [13], la distance la plus proche à laquelle les pompiers peuvent s'approcher d'un feu de pétrole brut de type Bakken ou similaire est d'environ 8 m pour la nappe de 2 m de diamètre. Dans l'ensemble, les essais au dilbit ont affiché

des valeurs plus faibles que les essais au Bakken et à l'heptane, et aux emplacements de 2 m et 4 m, le flux thermique incident le plus faible a été mesuré avec les feux de dilbit. Il convient de noter que les valeurs présentées pour le dilbit ont été obtenues par l'intégration temporelle de 25 minutes à partir du début de l'essai (0 minute), tandis que les valeurs pour l'heptane et le Bakken ont été moyennées sur la période de combustion en régime permanent (commençant généralement au moins 10 minutes après le début de l'essai).

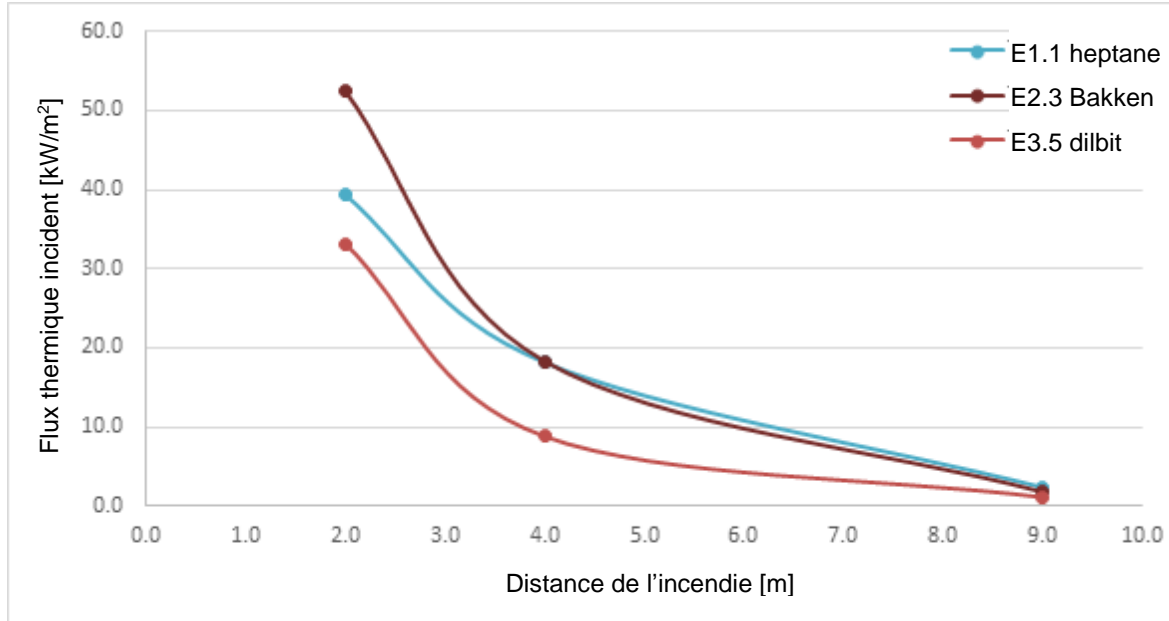


Figure 14 Flux thermique incident

11 Conclusions

Des expériences à l'échelle approximative de 1/10^e ont été menées pour examiner les effets des caractéristiques de combustion sur le chauffage d'un objet cylindrique (calorimètre), représentant un wagon-citerne prisonnier d'un feu en nappe. Des séries d'essais au feu en nappe de 2 m de diamètre ont été réalisées avec de l'heptane (série 1) et les pétroles bruts de Bakken (série 2) et dilbit (série 3) pour étudier les effets de la composition du combustible sur les caractéristiques du feu. L'étude a également examiné les effets des paramètres d'essai qui comprennent la présence et le placement d'un calorimètre engouffré dans le feu, la température du combustible d'alimentation et le fait de laisser le combustible se consumer. Les caractéristiques du feu, notamment le taux de combustion de la masse, le PES, le débit thermique, la hauteur des flammes, la température des flammes et le PES, ont été mesurées pour les feux en nappe de 2 m de diamètre.

Les hydrocarbures utilisés dans le programme d'essai ont été spécialement manipulés pour s'assurer que leur composition ne change pas au cours du programme d'essai, depuis le moment de l'acquisition du combustible jusqu'au moment de l'essai au feu. Parallèlement aux essais au feu, une étude de caractérisation des combustibles a été menée pour analyser les échantillons de combustibles et recueillir des échantillons de résidus postcombustion.

Comportement de combustion et caractéristiques du combustible

Dans l'ensemble, les feux de pétrole brut de Bakken et d'heptane ont affiché une combustion continue et régulière tout au long de l'essai, tandis que les feux de pétrole brut dilbit ont affiché un comportement de combustion instable dans lequel les vitesses de combustion ont changé au cours du temps de combustion.

Le comportement de combustion non stable des feux en nappe de dilbit est principalement dû à la composition du combustible, qui contient une fraction plus importante d'hydrocarbures lourds que le pétrole brut de Bakken et l'heptane.

La combustion des combustibles à plusieurs composants est complexe. Le processus de combustion peut généralement impliquer la vaporisation initiale des composants de fraction légère à faible point d'ébullition du combustible, puis devenir dominé par les composants de fraction lourde vers la fin de la période de combustion [1]. On s'attendrait à ce que cette variation du taux de combustion soit plus apparente pour les combustibles contenant des quantités significativement élevées de fractions lourdes, comme l'ont démontré les essais au dilbit. Avec une composition massique de 60 % de C25+, dont les points d'ébullition sont supérieurs à 400 °C, le feu de pétrole brut dilbit devrait subir des variations plus importantes de taux de combustion que le feu de pétrole brut de Bakken, dont 80 % de la masse bout et brûle dans la plage de températures inférieure à 400 °C.

Le comportement de combustion variant dans le temps observé dans les essais de pétrole brut dilbit s'est reflété dans les mesures de la hauteur de la flamme et du débit thermique, ainsi que dans les mesures de la PES de la flamme par les radiomètres à vue étroite, qui ont affiché des profils variant dans le temps similaires. En outre, une plus grande quantité de résidus restait dans chaque essai au feu dans la série au dilbit que dans la série au Bakken.

DT total, hauteur de flamme et fractions par rayonnement

Le DT moyen mesuré dans la hotte en utilisant la calorimétrie de consommation d'oxygène était de 3,2 à 3,8 MW pour les essais au pétrole brut de Bakken et de 4,4 à 5,4 MW pour les essais à l'heptane, le calorimètre étant placé au-dessus de la nappe. Le DT moyen mesuré du feu de dilbit était de 3,7 MW (essai 3.4); cependant, en raison du comportement de combustion très variable des feux de pétrole brut dilbit, le taux de combustion de la masse moyenne et le DT présentent une grande incertitude. La hauteur de la flamme au-dessus du feu en nappe de 2 m de diamètre, qui est déterminée par le DT, était de 5,6 à 6,8 m, de 4,3 à 4,5 m et de 3,4 à 3,6 m pour les feux d'heptane et de pétroles bruts de Bakken et dilbit, respectivement.

Les fractions par rayonnement deviennent importantes dans l'évaluation des dangers radiatifs potentiels posés par les feux en nappe d'hydrocarbures, qui comprennent la propagation potentielle du feu à des objets extérieurs par transfert de chaleur par rayonnement.

Les fractions par rayonnement ont été obtenues en estimant la composante convective du taux de débit thermique des feux, en la divisant par le taux de débit thermique total mesuré et en soustrayant le résultat de l'unité. Les valeurs moyennes de X_r estimées par cette méthode étaient d'environ 0,46 et 0,36 pour les essais au pétrole brut de Bakken et à l'heptane, respectivement. Pour le pétrole brut dilbit, en raison de la grande variation des DT, les valeurs X_r n'ont pas pu être évaluées pour tous les essais de la série 3, mais une valeur de 0,61 a été obtenue pour le feu en nappe dilbit avec alimentation non continue en combustible (essai 3.4), ce qui est supérieur à la valeur de 0,49 obtenue pour le feu en nappe de Bakken avec la même alimentation non continue en combustible (essai 2.6). La fraction de chaleur par rayonnement plus élevée pour le Bakken et le dilbit que pour l'heptane peut être liée au panache plus suintant généré par les feux de pétrole brut de Bakken et dilbit. Les pétroles bruts de Bakken et dilbit contiennent une petite quantité de benzène et de nombreuses fractions lourdes (voir la figure 2). En général, les précurseurs de la suie (p. ex. les hydrocarbures polycycliques aromatiques) sont formés en raison de la présence d'hydrocarbures à longue chaîne, d'aromatiques (p. ex. le benzène) et de composés insaturés dans la composition du combustible. Pour les n-alcane, la tendance au suintement augmente avec l'augmentation du nombre de carbone [15]; cependant, des études

supplémentaires sont nécessaires pour comprendre une analogie entre le rayonnement thermique de la flamme et les caractéristiques du combustible (p. ex. la composition chimique et la tendance au suintement).

Profils de température/PES de la flamme

La température de la flamme et le PES mesurés montrent des valeurs élevées dans la partie inférieure du feu, et les valeurs diminuent progressivement le long de la hauteur de la flamme. La température et le PES maximaux mesurés sur la ligne centrale de la flamme à l'aide de la caméra IR ont été observés dans la partie inférieure de la flamme, spécifiquement pour le PES maximal à $0,16 \pm 0,01$ m/m de Z/l_f dans tous les essais aux pétroles bruts de Bakken et dilbit. Pour tous les essais à l'heptane, au Bakken et au dilbit, le calorimètre a été placé à proximité de la hauteur où la température de la flamme et le PES (sur la ligne centrale du panache) étaient maximaux. Compte tenu de la variation verticale de la température de la flamme et du PES, les flux thermiques mesurés à différents endroits de la surface du calorimètre étaient inégaux sur la circonférence du calorimètre.

Les feux d'heptane présentaient le DT le plus élevé mais la fraction par rayonnement (X_r) la plus faible et le PES maximal le plus bas. Parallèlement, le transfert thermique total moyen vers le calorimètre mesuré dans les essais à l'heptane était plus faible que dans les essais aux pétroles bruts dilbit et de Bakken. Le rayonnement thermique est émis principalement par les particules de suie plutôt que par les espèces de combustion, dans les flammes de diffusion de la suie pour la plupart des hydrocarbures. Le transfert de chaleur d'un feu à un objet engouffré se fait principalement par rayonnement thermique [7] puisque la présence de suie joue un rôle dominant dans le transport d'énergie par rayonnement. Par conséquent, en raison de leurs panaches plus chargés en suie, les feux de pétroles bruts de Bakken et dilbit ont entraîné une PES maximale plus élevée, une fraction par rayonnement (X_r) plus importante et, par conséquent, un transfert de chaleur total moyen plus élevé vers le calorimètre que les feux d'heptane.

Chauffage du calorimètre

Les flux thermiques ont été mesurés par le calorimètre à différents endroits le long de sa surface. Le chauffage du calorimètre était inégal en circonférence du calorimètre, ce qui était plus distinct dans les essais au pétrole brut de Bakken et dilbit que dans les essais à l'heptane. Les mesures du flux thermique total étaient également sensibles à la position verticale du calorimètre dans la flamme car le flux thermique total vers le calorimètre était affecté par le pouvoir émissif locale de la flamme environnante à la hauteur où le calorimètre était placé. Par exemple, le fond du calorimètre pouvait être affecté par la présence d'une zone de vapeur de combustible immédiatement au-dessus de la surface du combustible, dont les caractéristiques varient fortement en fonction du type de combustible. Pour cette raison, lorsque le calorimètre a été placé à 0,5 m au-dessus du feu de pétrole brut de Bakken, le flux thermique mesuré à sa base était beaucoup plus faible que celui à son sommet, indiquant l'impact de la zone de vapeur de combustible plus froide au bas du calorimètre.

Le flux thermique moyen vers le calorimètre provenant des feux de pétrole brut de Bakken et dilbit était plus élevé que celui des feux d'heptane, bien que les DT mesurés des feux en nappe de pétrole brut de Bakken et dilbit étaient inférieurs à ceux des feux en nappe d'heptane. Le flux thermique total moyen vers le calorimètre a montré la valeur la plus élevée dans les feux de pétrole brut de Bakken par un facteur d'environ 1,3 et 1,6 plus élevé que dans les feux de pétrole brut dilbit et d'heptane, respectivement (~ 96 kW/m² contre ~ 72 kW/m² et ~ 58 kW/m², respectivement). La principale raison de l'augmentation du chauffage du calorimètre en particulier par les feux de pétrole brut de Bakken et dilbit est que le flux thermique total vers l'objet est principalement affecté par l'exposition à la chaleur par rayonnement de la flamme, et les feux de pétrole brut de Bakken et dilbit ont une fraction de chaleur par rayonnement plus élevée. Dans l'ensemble, les flux thermiques totaux moyens vers le calorimètre étaient quelque peu proportionnels au pouvoir émissif de la flamme par unité de surface maximal mesuré de la flamme pour les combustibles testés.

Impacts des paramètres

En ce qui concerne les effets des paramètres, il n'y a pas eu d'effet significatif de la « température du combustible d'alimentation » et du fait de « laisser le combustible se consumer (c.-à-d. alimentation en combustible non continue) » sur aucun des paramètres de combustion mesurés. La température plus élevée du combustible d'alimentation a augmenté le taux de combustion d'environ 10 % pour les essais à l'heptane et au pétrole brut de Bakken, ce qui n'est pas considéré comme significatif compte tenu de la variabilité naturelle des feux. Le fait de laisser le combustible brûler, plutôt que de maintenir un niveau de combustible constant, a eu un effet minimal sur les valeurs moyennes de taux de combustion de la masse et les caractéristiques générales des feux en nappe de pétrole brut de Bakken. Pour le dilbit, l'effet de la composition du combustible sur le comportement de combustion a été observé avec l'alimentation continue et non continue en combustible. Le processus de distillation et le comportement de combustion non uniforme sont devenus plus faciles à discerner lorsqu'il n'y avait pas d'alimentation continue en combustible dans le bac de combustible. La présence et le placement du calorimètre ont eu des effets sur la vitesse de combustion et le flux thermique total de la flamme vers le calorimètre. Lorsque le calorimètre était placé au-dessus de la nappe, le taux de combustion de la masse était réduite de 10 à 15 % dans les essais au Bakken. Pour les feux de pétrole brut dilbit, en raison du comportement de combustion non stable, l'impact du calorimètre était difficile à saisir.

12 Recommandations pour une étude future

Sur la base des résultats des essais des séries 1, 2 et 3, les éléments suivants sont recommandés pour les études futures concernant les pétroles bruts.

Analyse détaillée des données de combustion et du calorimètre

Pour mieux comprendre l'exposition thermique du calorimètre engouffré dans le feu, il est recommandé d'effectuer une analyse détaillée des données obtenues à partir des trois séries d'essais. L'analyse devrait inclure l'impact du comportement de combustion variable dans le temps observé dans les essais au dilbit et les essais où l'on a laissé le combustible se consumer. En outre, les données d'essai devraient être comparées à d'autres données d'essai déjà publiées afin de cerner les différences potentielles de comportement au feu entre les pétroles bruts légers et lourds et d'autres combustibles hydrocarbonés (par exemple, l'heptane, le diesel et les carburateurs).

Les essais au dilbit ont montré un comportement de combustion variant dans le temps, potentiellement causé par un processus de vaporisation de type distillation ou d'autres processus de vaporisation non uniformes dans le temps. Une étude détaillée du comportement de combustion observé dans les trois séries d'essais permettrait de mieux comprendre les caractéristiques des feux de pétrole brut et aiderait également à élaborer un modèle de combustion à utiliser dans la modélisation numérique (voir ci-dessous). L'analyse des résidus doit être incluse pour soutenir l'investigation sur le mécanisme de combustion. L'investigation pourrait permettre de savoir si les propriétés physiques et chimiques du combustible, telles que la pression de vapeur du combustible, la densité du combustible, les compositions des fractions légères et lourdes, sont en corrélation avec les caractéristiques de combustion et les paramètres de danger.

Modélisation numérique

Les données à échelle réduite obtenues dans le cadre du programme d'essais devraient être mises à l'échelle d'un scénario d'incendie réel afin de mieux comprendre les risques associés aux wagons-citernes exposés au feu. À l'aide des outils de modélisation actuellement disponibles, les feux de pétrole brut testés dans les séries 2 et 3 peuvent être modélisés, en utilisant certaines des propriétés des combustibles obtenues lors de l'étude de caractérisation des combustibles.

Si elle est validée pour les températures du panache, le débit thermique, le taux de combustion, la hauteur de flamme, le pouvoir émissif de la flamme par unité de surface et le champ de flux thermique autour du feu, la simulation pourrait inclure le cylindre/calorimètre pour simuler le transfert de chaleur dans le calorimètre. Si elle

est validée par rapport aux données expérimentales des essais des séries 1, 2 et 3, la modélisation pourrait être utilisée pour examiner d'autres paramètres d'intérêt, comme le feu et un wagon-citerne à l'échelle réelle, la présence de vent, les changements dans la taille du feu, les changements dans l'orientation ou l'emplacement relatif du wagon-citerne, ou l'engouffrement partiel du wagon-citerne dans le feu. L'extrapolation du modèle au-delà des conditions testées dans les séries 1, 2 et 3 ne serait pas entièrement validée sans essais expérimentaux supplémentaires (en particulier s'il y a de grands changements dans les conditions limites ou l'échelle); cependant, de telles simulations fourniraient des indications raisonnables du comportement probable du feu à un coût et à un risque beaucoup plus faibles.

Tableau 3 Résumé des résultats des essais

No d'essai	Élévation du calorimètre (m)	Température du combustible d'alimentation (°C)	Méthode d'alimentation en combustible	Hauteur de flamme (m)	Taux de combustion (kg/m ² s)	Débit thermique max. théorique (MW)		Q, DT basé sur le taux de combustion selon l'éq. 1 où x=0,9 (MW)	Q, DT par calorimétrie O ₂ , éq. 2, (MW)	x, facteur de combustion incomplète	Qc, DT convectif selon l'éq. 3 (MW)	Xr, fraction de chaleur par rayonnement avec le DT selon l'éq. 1	Xc, fraction de chaleur convective, éq. 3	Caméra IR				Z/l, élévation relative pour la PES max au centre du panache (m/m)	Calorimètre				Température de flamme/du panache (°C)										Flux thermique du radiomètre à vue étroite (kW/m ²), à 9 m du feu						TFD		Jauge de flux thermique (kW/m ²) à 9 m du feu				
						Temp. Moyenne de flamme (K)	Temp. Max. de flamme (K)							Pouvoir émissif par unité de surface moyenne (kW/m ²)	Pouvoir émissif par unité de surface max. (kW/m ²)	Temp. moyenne de la coque ext. (°C)	Temp. moy. du cylindre ext. (°C)		Flux thermique absorbé (kW/m ²)	Flux thermique total (kW/m ²)	Hauteur de 0,18 m	Hauteur de 0,5 m	Hauteur de 1,5 m	Hauteur de 2,0 m	Hauteur de 2,5 m	Hauteur de 3,0 m	Hauteur de 3,5 m	Hauteur de 4,0 m	Hauteur de 4,5 m	Hauteur de 5,0 m	Hauteur de 5,5 m	Hauteur de 0,5 m	Hauteur de 1 m	Hauteur de 1,5 m	Hauteur de 2 m	Hauteur de 3 m	Hauteur de 4 m	Flux thermique au TFD (kW/m ²) à 2 m du feu	Flux thermique au TFD (kW/m ²) à 4 m du feu	Hauteur de 1 m	Hauteur de 1,5 m	Hauteur de 2 m	Hauteur de 3 m	Hauteur de 4 m	
E1.1	1	20	Continue	5.6	0.037	5.15	4.64	4.4	0.85	3.0	0.36	0.64	918	1219	66	181	0.23	797	864	-2	58	719	878	799	739	652	591	558	493	428	404	89.1	93.1	91.3	77.4	47.6	33.8	39.4	18.2	2.3	2.9	2.5	2.5	2.3	
E1.2	No	20	Continue	6.8	0.040	5.60	5.04	5.2	0.94	3.3	0.34	0.66	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	848	886	897	881	855	825	757	679	620	94.7	84.8	84.4	80.9	70.4	61.6	35.5	15.1	2.5	3.1	2.7	2.7	2.6	
E1.3	1	60	Continue	5.8	0.040	5.60	5.04	5.4	0.96	3.1	0.39	0.61	na	na	na	na	na	771	816	-2	59	660	877	835	772	698	626	591	531	460	429	88.9	92.1	96.4	85.1	53.9	38.8	44.2	17.8	2.4	3.0	2.6	2.6	2.4	
E2.1	No	20	Continue	4.5	0.030	4.56	4.10	4.8	1.05	2.3	0.44	0.56	904	1266	75	201	0.15	na	na	na	na	na	na	938	890	800	688	574	485	392	318	269	120.2	102.5	88.7	73.9	39.6	22.0	49.8	17.0	2.3	2.8	2.5	2.5	2.2
E2.2	0.5	20	Continue	4.3	0.026	3.95	3.55	3.5	0.89	1.7	0.51	0.49	923	1262	75	200	0.18	846	881	-4	77	673	na	936	904	815	714	611	529	439	356	301	99.6	105.6	86.5	66.7	31.0	16.9	33.6	15.1	2.0	2.4	2.1	2.1	1.8
E2.3	1	20	Continue	4.3	0.027	4.10	3.69	3.8	0.93	2.0	0.47	0.53	930	1272	77	203	0.17	909	975	-4	94	na	968	848	758	621	522	420	361	303	250	220	58.4	74.2	77.0	57.6	24.6	13.3	52.5	18.3	1.8	2.2	1.9	1.9	1.7
E2.4	1	60	Continue	4.5	0.029	4.41	3.96	3.2	0.73	2.5	0.38	0.62	944	1280	79	207	0.16	952	993	-5	110	na	972	926	854	727	616	505	431	349	282	244	65.1	84.1	89.1	68.2	31.3	16.4	53.8	18.8	1.9	2.4	2.1	2.1	1.9
E2.5	1	20	Continue	4.5	0.026	3.95	3.55	3.6	0.91	2.0	0.43	0.57	943	1280	77	206	0.15	946	991	-5	105	na	974	933	858	726	616	507	424	343	276	238	65.4	85.1	89.9	68.1	29.5	14.8	32.1	7.8	1.9	2.4	2.1	2.1	1.9
E2.6	No	20	Laisser se cons	4.5	0.030	4.56	4.10	3.5	0.77	2.1	0.49	0.51	901	1258	74	196	0.16	na	na	na	na	na	na	950	883	770	660	537	448	367	303	254	116.3	93.6	75.0	60.7	30.1	15.5	32.4	8.3	2.1	2.5	2.2	2.2	2.0
E3.1	1	20	Continue	3.4	0.049, 0.034	-	-	-	-	1.4	-	-	1075	1266	78	194	0.16	641	775	-13	64	na	902	397	308	238	191	164	145	128	115	107	70.7	56.1	51.6	36.9	12.0	5.5	35.2	9.5	1.1	1.4	1.2	1.0	1.0
E3.2	0.5	20	Continue	3.6	0.060, 0.023	-	-	-	-	1.3	-	-	930	1234	70	173	0.12	615	825	-14	67	875	na	422	335	263	201	173	153	135	120	111	74.2	72.5	50.4	36.0	11.4	4.9	34.2	8.5	1.1	1.4	1.2	1.1	1.1
E3.3	No	20	Continue	3.4	0.017, 0.014	-	-	-	-	1.3	-	-	913	1252	71	189	0.16	na	na	na	na	na	na	431	333	248	184	148	127	109	95	87	105.2	73.4	48.8	35.1	11.7	4.6	36.0	9.8	1.4	1.8	1.6	1.4	1.4
E3.4	No	20	Laisser se cons	3.5	0.018	-	-	3.7	-	1.5	0.61	0.39	914	1246	70	188	0.18	na	na	na	na	na	na	419	329	250	186	153	135	116	103	96	102.6	74.3	51.3	37.2	12.0	4.9	35.2	9.3	1.4	1.7	1.5	1.3	1.4
E3.5	1	20	Continue	3.6	0.015 -0.019	-	-	-	-	1.2	-	-	938	1260	73	192	0.15	708	870	-16	83	na	964	454	362	290	226	193	170	148	132	123	64.0	59.6	48.9	33.0	10.6	4.6	33.2	8.8	1.1	1.5	1.3	1.1	1.1
E3.6	1	60	Continue	3.5	0.018, 0.005-0.010	-	-	-	-	1.4	-	-	935	1251	72	193	0.15	696	773	-16	76	na	904	425	338	269	205	173	153	132	117	109	53.7	53.0	47.2	33.2	10.8	4.8	36.3	9.5	1.1	1.4	1.2	1.1	1.1

Remarque : Les valeurs présentées pour les essais des séries 1 et 2 ont été moyennées sur la période de combustion en régime permanent de chaque essai. Les données d'essai de la série 3 ont été moyennées en intégrant les données sur 0 à 25 minutes, puis en les divisant par la même durée. Le Supplément A, Rapport d'essai, fournit des détails sur la façon et les périodes selon lesquelles ces données d'essai moyennées ont été obtenues pour chaque essai.

1. Deux taux de combustion ont été fournis pour les essais 3.1, 3.2, 3.3 et 3.6 pour différentes périodes au cours desquelles un taux de combustion a pu être relevée. Pour l'essai 3.5, une plage a été fournie pour le taux de combustion car elle n'a pas pu être relevée sur une période continue.
2. Il convient de noter que les données de débit thermique obtenues par calorimétrie de consommation d'oxygène doivent être vérifiées pour éviter les biais dans les mesures de concentration d'oxygène, et que les calculs de débit thermique qui en résultent doivent être vérifiés pour correspondre au contenu énergétique total du combustible (le produit de la chaleur chimique de combustion et de la quantité totale de combustible utilisée dans chaque essai) en les comparant à l'énergie totale mesurée par les systèmes de hotte (courbes de débit thermique intégrées dans le temps).
3. Xr, les fractions de chaleur par rayonnement ont été calculées en utilisant le débit thermique de l'éq. 1 pour les essais des séries 1 et 2, et pour la série 3, Xr a été calculé pour T3.4 en utilisant le débit thermique par calorimétrie d'O₂.
4. Z/l, présenté dans le tableau est la hauteur où la PES maximale s'est produite sur les profils verticaux de la PES le long de la ligne centrale de la flamme.

13 Références

- [1] D. Drysdale. « An introduction to fire dynamics, 3rd edition » Wiley, 2011.
- [2] G. Heskestad. « Fire plumes, flame height, and air entrainment », *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, National Fire Protection Association, 2002, section 2, chapitre 1; p. 2-1 - 2-17.
- [3] R. M. Schirmer et E. C. Miller. « Radiation from jet combustor flames », 1958.
- [4] J. V. Beck. « Users Manual for IHCP1D, a Program for Calculating Surface Heat Fluxes » Beck Engineering Consultants Co., Okemos, Michigan, 1999.
- [5] Y. Ko, C. Lam, A. Luketa, D. Lord, A. Butko, C. Kirney et M. Spiess. « Tank cars engulfed in fires: heat flux measurements », *Interflam 2019*, UK, 2019.
- [6] G. Heskestad. « Luminous heights of turbulent diffusion flames », *Fire Safety Journal*, vol. 5, pp. 103-108, 1983.
- [7] T. K. Blanchat et J. Suo-Anttila. « Hydrocarbon characterization experiments in fully turbulent fires - Results and data analysis », Sadia national laboratories (SAND2010-6377), 2011.
- [8] C. L. Tien, K. Y. Lee et A. J. Stretton. « Radiation heat transfer », *SFPE handbook of fire protection engineering*, NFPA and SFPE, 2002, pp. 1-73 - 1-89.
- [9] A. Birk. « Fire testing and computer modeling of rail tank-cars engulfed in fires », Transports Canada TB14561E, 2006.
- [10] D. Rasbash. « Properties of fires of liquids », *Fuel*, vol. 31, pp. 94-107, 1956.
- [11] H. Hayasaka. « Radiative characteristics and flame structure of small-pool flames », *Fire Technology*, vol. 32, n° 14, pp. 308-322, 1996.
- [12] SFPE. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Springer, 2016.
- [13] UPTUN. « Development and Mitigation Measures: Target Criteria, Workpackage 2 D221Fire », 2008.
- [14] C. J. Wieczorek et N. A. Dembsey. « Effects of Thermal Radiation on People: Predicting 1st and 2nd Degree Skin Burns », *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 2016, pp. 2705-2737.
- [15] C. S. McEnally et L. D. Pfefferle. « Sooting tendencies of oxygenated hydrocarbons in laboratory-scale flames », *Environmental science and technologies*, pp. 45, 2498-2503, 2011.
- [16] V. Babrauskas. « Heat release rates », *SFPE handbook of Fire Protection Engineering*, National Fire Protection Association, 2002, section 3, chapitre 1; p. 3-1-3-37.

- [17] M. Janssens. « Methods and equations of fire calorimetry », *Fire Calorimetry*, DOT/FAA/CT-95/46, 1995, pp. 11-22.
- [18] C. Huggett. « Estimation of rate of heat release by means of oxygen consumption measurements », *Fire and materials*, Vol 4, NO. 2 61-65, 1980.
- [19] A. Tewarson. « Generation of heat and chemical compounds in fires », *SFPE handbook of fire protection engineering. 3rd Ed.*, 2002, chapitre 4, section 3.
- [20] C. Beyler. « Fire hazard calculations for large, open hydrocarbon fires », *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 2002.
- [21] C. L. Beyler. « Fire Hazard Calculations for Large Open Hydrocarbon Fires », *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 2016, pp. 2591-2663.
- [22] C. Lam, D. Edwards et G. Loughheed. « Rail tank cars exposed to fire: literature review of crude oil, condensate and ethanol behaviour » NRC Report A1-005795-01.1, 2015.

Supplément A, Rapport d'essai

Supplément B, Rapport de caractérisation du pétrole brut

Supplément C, Rapport d'essai préliminaire