



# Résumé de recherche – Analyse détaillée des données expérimentales de Sandia sur les incendies de pétrole brut

---

*Direction générale du transport des marchandises dangereuses | Division de la recherche scientifique*

---

## RÉSUMÉ

La présente étude a consisté en un examen exhaustif et en une analyse complète de 15 essais de feux en nappe de 2 m de diamètre (alimentés par de l'heptane, du pétrole brut de Bakken et du bitume dilué [dilbit]). Ces essais ont été réalisés par Sandia National Laboratories (Sandia) et font l'objet du rapport d'essai [TP 15465](#), *Wagons-citernes exposés à des incendies : Analyses expérimentales des conditions thermiques imposées à un wagon enveloppé d'un incendie de pétrole brut (tests des séries 1 à 3) – 24 mars 2021*. Les résultats expérimentaux de Sandia, moyennés dans le temps, ont été examinés et vérifiés, puis modifiés au besoin. Les données expérimentales ont ensuite été analysées plus en détail. Les caractéristiques de feu des essais de différents combustibles dans les mêmes conditions expérimentales ont également été comparées, ainsi que les mesures de l'exposition thermique d'un objet cylindrique représentant un wagon-citerne enveloppé d'un incendie.

## CONTEXTE

Le rapport TP 15465 traite de trois (3) séries d'essais de feu en nappe de 2 m de diamètre qui ont été réalisées aux Sandia National Laboratories [1]. La série 1 était l'essai à l'heptane, la série 2 sur le pétrole brut de Bakken et la série 3 sur le bitume dilué (dilbit). Ces expériences avaient pour objectifs de caractériser l'environnement thermique entourant la simulation d'un wagon-citerne à l'échelle 1:10 (appelé calorimètre) enveloppé d'un feu en nappe; d'étudier les effets de la variation du type de combustible, de la température d'alimentation du combustible (20 °C ou 60 °C), de la méthode d'alimentation en combustible (c.-à-d. laisser le combustible brûler au lieu de maintenir une profondeur de combustible constante), de la présence du calorimètre et de la hauteur du calorimètre au-dessus du combustible (centré à 0,5 m ou à 1 m au-dessus du fond du réservoir). Les paramètres de mesure comprenaient le taux de combustion du combustible, le débit thermique, la hauteur des flammes, les températures et le flux thermique. Un travail important de traitement et d'analyse

des données avait été réalisé par Sandia au sujet des trois séries d'essais. Cependant, une opportunité de suivi, sous la forme de la présente étude, s'est présentée pour vérifier indépendamment les résultats de Sandia ainsi que pour accroître la compréhension et l'impact potentiel des essais grâce à une analyse plus exhaustive des données.

## OBJECTIFS

La présente étude avait pour objectif d'évaluer la variation des conditions thermiques auxquelles un calorimètre était exposé en fonction de la source de combustible hydrocarboné d'un feu en nappe.

## MÉTHODES

L'analyse détaillée des données des incendies de pétrole brut expérimentaux de Sandia a été réalisée en :

- vérifiant les résultats (moyennés dans le temps en raison de leur nature fluctuante) des mesures thermiques présentées dans le rapport d'essai de Sandia [2];
- examinant les variations dans la distribution de la température du combustible (et autres données correspondantes) afin de mieux comprendre le comportement de combustion des combustibles testés;
- comparant les tests correspondants dans les mêmes conditions d'essai expérimentales afin de mieux comprendre les résultats des essais.

## RÉSULTATS

### Vérification des résultats moyennés dans le temps dans le rapport d'essai de Sandia

Dans le rapport de Sandia [2], chaque paramètre de mesure a été moyenné sur un intervalle de temps en raison de sa nature fluctuante. L'intervalle de temps

utilisé pour calculer la moyenne des données mesurées dans chacun des essais des séries 1 et 2 était différent pour chaque paramètre de mesure, ce qui rendait difficile de tirer des conclusions sur un essai particulier et de comparer les essais entre eux. Dans le présent travail, une seule période de moyennage temporel (c.-à-d. calcul de la moyenne dans le temps) pouvant être appliquée à tous les paramètres de mesure a donc été déterminée pour chaque essai des séries 1 et 2. Les figures 1 (a) et (b) sont des exemples de la manière dont les périodes moyennées ont été choisies, puis appliquées de manière cohérente pour toutes les autres variables.

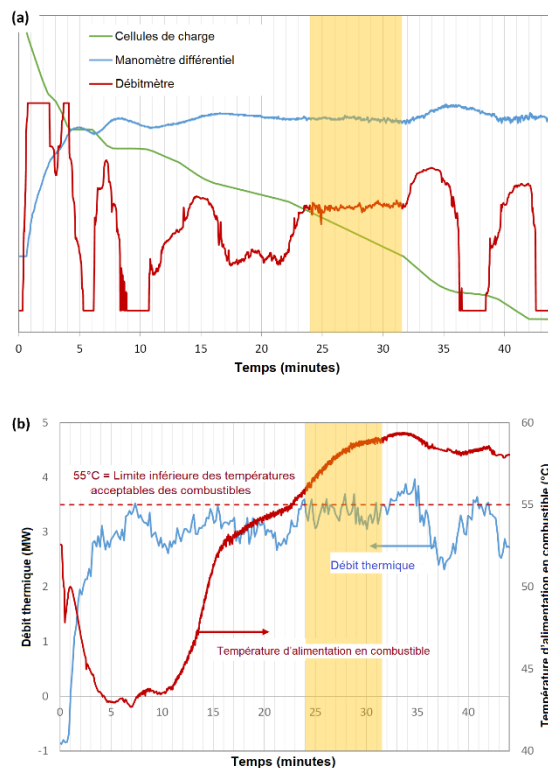


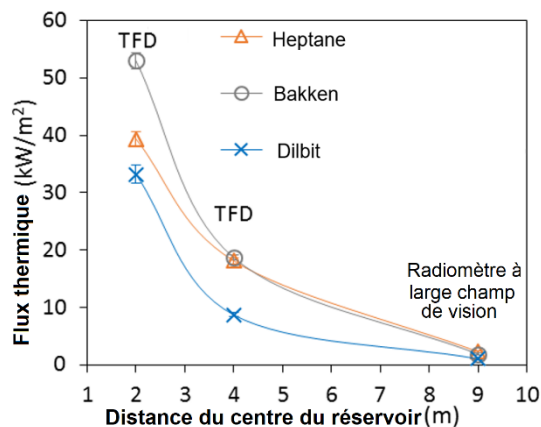
Figure 1. Exemple de période de moyennage temporel cohérente pour le test 2.4 (Bakken) indiqué en surbrillance jaune.

Pour la série 1, l'utilisation de la période de moyennage temporel déterminée a entraîné une différence de moins de 4 % par rapport aux valeurs de Sandia pour

tous les paramètres de mesure, à l'exception du flux thermique des thermomètres à flamme directionnelle, comme indiqué ci-dessous. Pour la série 2, l'utilisation de la période de moyennage temporel déterminée a généralement entraîné une différence de moins de 7 % par rapport aux valeurs de Sandia.

Le principal ajustement apporté aux séries 1 et 2, sur la base d'un examen des données de Sandia, a consisté à recalculer les valeurs du flux thermique total vers les thermomètres à flamme directionnelle (TFD) en utilisant la même méthode que pour la série 3, fournissant ainsi une base de comparaison cohérente entre toutes les séries d'essais. Cela a entraîné des différences de flux thermique total allant de 30 à 40 % pour les données des séries 1 et allant de 2 à 40 % pour les données de la série 2. La figure 2 illustre l'importance de cette différence – alors que les résultats de Sandia laissaient entendre qu'il existe une différence entre les types de combustible et le flux thermique résultant vers les TFD, les résultats du CNRC révèlent que cette différence est minime.

(a) Relevé du flux thermique vers le thermomètre à flamme directionnelle (TFD) pour l'analyse de Sandia



(b) Relevé du flux thermique vers le thermomètre à flamme directionnelle (TFD) pour la présente analyse.

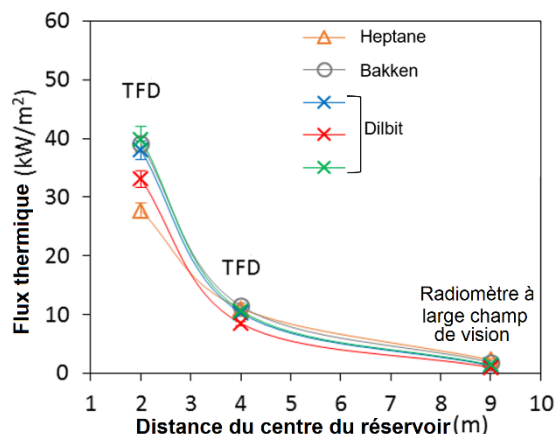


Figure 2. Flux thermique vers le thermomètre à flamme directionnelle (DFT) d'après les résultats de Sandia (a) et ceux du CNRC (b).

De plus, il s'est avéré que les intervalles de temps utilisés par Sandia pour calculer la moyenne des données de débit thermique devaient être corrigés en raison d'une hypothèse invalide au sujet du taux d'échantillonnage utilisé par le système de mesure du débit thermique, ce qui a entraîné une erreur allant jusqu'à 5 % dans les valeurs du débit thermique moyennées dans le temps présentées dans les séries 1 et 2 du rapport d'essai de Sandia [2].

Pour la série 3, le rapport d'essai de Sandia [2] était fondé sur des valeurs moyennées dans le temps calculées en intégrant les données de 0 à 25 minutes après le début de l'essai au feu, puis en divisant par 25 minutes. Ces valeurs incluaient donc la période de croissance du feu immédiatement après l'allumage et étaient généralement associées à des écarts types plus importants, car les feux ne brûlaient pas de manière régulière. Dans la présente analyse, plusieurs périodes de moyennage temporel plus courtes ont été sélectionnées sur la base des conditions d'essai stables afin de permettre la quantification et l'analyse des variations dans le comportement de combustion du

dilbit. En général, les valeurs des paramètres de Sandia se sont comparées raisonnablement bien à la gamme de valeurs déterminées en utilisant les périodes de moyennage temporel plus courtes.

### **Examen du comportement de la combustion et de la distribution de la température du combustible**

En tant que carburant de référence, les essais à l'heptane ont révélé la façon dont brûle un carburant pur, à un seul composant. Comme le réservoir a été prérempli de carburant avant l'allumage, il y a eu une stratification initiale de la température dans le réservoir, qui a progressivement diminué jusqu'à ce que tout le réservoir soit à une température uniforme proche du point d'ébullition du carburant. Cette température a ensuite été maintenue jusqu'à la combustion complète du combustible.

Le pétrole brut de Bakken a semblé subir une combustion initiale préférentielle des fractions les plus légères (jusqu'à C9), comme l'indique l'augmentation d'environ 10 % du débit thermique au début de l'essai au cours duquel on a laissé le combustible se consumer sans l'alimenter. Au milieu de cet essai, une augmentation simultanée du débit thermique, une diminution des températures immédiatement au-dessus de la surface du combustible et une augmentation des températures dans la partie supérieure du panache de feu ont été observées, ce qui pourrait potentiellement être expliqué par le craquage thermique des fractions plus lourdes dans le pétrole brut libérant des vapeurs de combustible supplémentaires.

En général, les essais sur le dilbit ont présenté trois phases distinctes de combustion (figure 3).

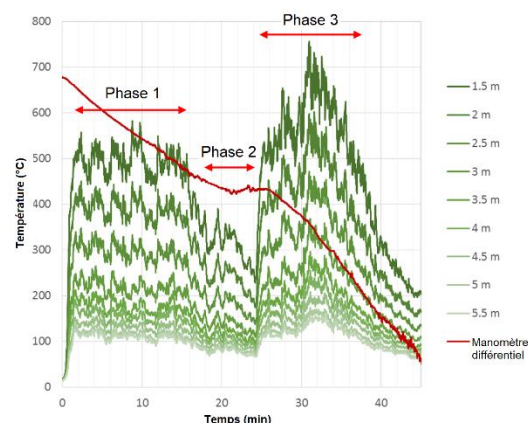


Figure 3. Trois phases de combustion pour le dilbit (essai 3.4 illustré).

La première phase était caractérisée par des niveaux modérément élevés de débit thermique, de hauteur des flammes, de températures de panache, de pouvoir émissif de la flamme par unité de surface et de flux thermique à des hauteurs supérieures au calorimètre. Cette phase semblait correspondre à des températures de combustible inférieures à environ 150 °C et à la vaporisation des fractions les plus légères (jusqu'à C9). Elle a été suivie d'une deuxième phase avec des niveaux sensiblement plus faibles des mêmes paramètres, et qui semblait correspondre à des températures de combustible augmentant jusqu'à environ 300-350 °C (avec l'existence possible de points chauds localisés supérieurs à 400 °C) et à la combustion de composants dans la gamme C10-C24. Le craquage thermique des fractions les plus lourdes (C25+) est probablement intervenu au cours de cette phase. Enfin, la troisième phase a révélé des niveaux de débit thermique, de hauteur des flammes, de température du panache, de pouvoir émissif de la flamme par unité de surface et de flux thermique (à des hauteurs supérieures au calorimètre) qui étaient similaires ou supérieurs à ceux de la première phase. Cette phase semblait correspondre à des températures de combustible supérieures à 350 °C et à la combustion des hydrocarbures plus légers

produits par le craquage thermique. Les trois phases de combustion semblaient correspondre à un processus de combustion de type distillation pour le dilbit, qui est un mélange de diluant de condensat avec des constituants légers (C4 à C9, avec un pic à C5), et de bitume avec des constituants lourds (C25+).

### **Comparaisons des tests**

Parmi les essais sans calorimètre, le feu d'heptane présentait le taux de combustion et la hauteur des flammes les plus élevés, suivi du feu de Bakken, puis du feu de dilbit. Par rapport au feu d'heptane, le feu de Bakken a présenté des diminutions plus abruptes de la température du panache et du flux thermique en vue étroite avec l'augmentation de la hauteur, ce qui correspond à une hauteur des flammes plus courte. Par rapport au feu de Bakken, le feu de dilbit a présenté des amplitudes de température beaucoup plus faibles à chaque élévation le long de l'axe du panache en raison de la hauteur des flammes plus courte, ainsi que des niveaux de pouvoir émissif de la flamme par unité de surface à peine plus faibles le long de la hauteur du panache.

La présence et le placement du calorimètre à l'intérieur du feu en nappe et l'effet résultant sur le comportement des flammes étaient intéressants, car ils illustraient la façon dont un wagon-citerne peut interagir avec un feu en nappe. Parmi les essais réalisés avec le calorimètre à 1 m de hauteur, le feu d'heptane a présenté le taux de combustion et la hauteur des flammes les plus élevés, suivi du feu de Bakken, puis du feu de dilbit. Dans le feu d'heptane, des niveaux de combustion similaires (c'est-à-dire un dégagement de chaleur local) ont semblé se produire au-dessus et au-dessous du calorimètre, ce qui a entraîné des niveaux uniformes de flux thermique total autour de la surface du calorimètre. Comme les extrémités du calorimètre étaient moins complètement

englouties par les flammes dans le feu de Bakken, le flux thermique total vers le haut du calorimètre était plus faible que vers le bas dans les plans de mesure de gauche et de droite. Les données disponibles étaient insuffisantes (en raison de la défaillance des thermocouples) pour tirer des conclusions sur le plan de mesure central. Dans le feu de dilbit, la majeure partie de la combustion s'est produite sous le calorimètre, ce qui a entraîné un flux thermique total plus élevé vers le bas du calorimètre que vers le haut dans tous les plans de mesure. Dans l'ensemble, c'est dans le feu d'heptane que le calorimètre a enregistré les niveaux les plus bas de flux thermique total, car ce feu était moins épais optiquement (en raison d'une moindre production de suie) que l'un ou l'autre des feux de pétrole brut.

Parmi les essais avec le calorimètre à 0,5 m de hauteur, le feu de dilbit semblait présenter un taux de combustion inférieure à celle du feu de Bakken, en plus d'une hauteur des flammes inférieure. Une grande partie de la combustion a semblé se produire au-dessus du calorimètre dans le feu de Bakken, mais sous le calorimètre dans le feu de dilbit. Cela correspond à l'endroit où le flux thermique total le plus élevé vers le calorimètre a été mesuré au cours de chaque essai. Dans le feu de Bakken, le flux thermique total était plus élevé vers le haut du calorimètre le long du plan de mesure central que vers le bas, alors que dans le feu de dilbit, le flux thermique total semblait généralement être plus élevé vers le bas du calorimètre.

Les essais avec le calorimètre à 1 m de hauteur ont été comparés à un essai similaire réalisé par Sandia avec du pétrole brut de la Strategic Petroleum Reserve (SPR, réserve stratégique de pétrole) [3], qui avait utilisé le même diamètre de nappe. Le taux de combustion et le débit thermique du feu du SPR étaient raisonnablement similaires à ceux du feu

de Bakken. Les mesures du flux thermique en vue étroite (pouvoir émissif de la flamme par unité de surface) étaient similaires entre les feux de SPR, de dilbit et de Bakken, ce qui indique que ce paramètre n'a pas été beaucoup affecté par les différences dans la composition du pétrole brut. Le flux thermique total au bas du calorimètre était également similaire entre les feux de SPR, de dilbit et de Bakken. Toutefois, les profils de flux thermique dans le test de SPR étaient plus uniformes autour de la surface du calorimètre, probablement en raison du fait que le calorimètre dans l'essai sur le SPR était moins long et donc plus complètement englouti par le feu le long de ses plans de mesure.

Des comparaisons supplémentaires ont été réalisées entre les essais des séries 1, 2 et 3 et deux autres séries d'expériences de feu en nappe réalisées précédemment aux laboratoires de Sandia. L'une des comparaisons portait sur l'effet du changement dans le diamètre du feu de 2 m à 5 m en utilisant le même pétrole brut (Bakken). Bien qu'il ait été difficile de comparer les essais de feux de 2 m et de 5 m de diamètre en raison des conditions atmosphériques différentes (l'essai sur des feux de 5 m a été réalisé à l'extérieur), le pouvoir émissif de la flamme par unité de surface s'est avéré similaire. Cela laisse entendre que les deux feux avaient une épaisseur optique similaire et donne de la crédibilité à l'utilisation de feux de 2 m de diamètre pour simuler des scénarios à plus grande échelle. Le flux thermique total moyenné dans l'espace vers le calorimètre était également similaire lorsque le calorimètre était placé dans des emplacements relatifs similaires (c'est-à-dire un rapport similaire entre l'élévation du calorimètre et le diamètre de la nappe) à l'intérieur du feu.

L'autre comparaison portait sur l'effet du changement de type de combustible, du

pétrole brut à d'autres hydrocarbures, en utilisant un feu de même taille (2 m de diamètre). Le feu d'heptane s'est avéré similaire au feu de Jet Propellant 8 (JP-8, carburéacteur) pour ce qui est du taux de combustion et de la hauteur des flammes, tandis que les feux de Bakken et de dilbit présentaient des taux de combustion et des hauteurs de flamme inférieurs. On pouvait s'y attendre, car l'heptane et le JP-8 sont respectivement un carburant pur et un carburant d'aviation hautement raffiné, tandis que le Bakken est un pétrole brut et le dilbit un mélange de bitume lourd et de condensat plus léger. Les quatre carburants sont connus pour produire des flammes de suie lorsqu'ils brûlent sous forme de feu en nappe liquide et constituent donc une base de comparaison utile.

## CONCLUSIONS

Les résultats des périodes de moyennage temporel calculées dans la présente étude correspondaient généralement à ceux du rapport d'essai de Sandia <sup>[2]</sup>. La principale exception concernait les valeurs du flux thermique total vers les thermomètres à flamme directionnelle dans les essais sur l'heptane et le Bakken. Les données sur le dilbit ont été analysées plus en détail dans le présent rapport de recherche que dans celui de Sandia <sup>[2]</sup> en utilisant plusieurs périodes de moyennage temporel de plus courte durée afin de mieux comprendre le comportement de combustion instable de ce combustible. Le tableau 1 montre certaines propriétés du feu pour chaque série traitée dans le rapport de Sandia, mais avec des détails supplémentaires pour la combustion distincte en trois phases du dilbit.

Tableau 1. Comparaison de certaines propriétés du feu pour chaque série d'essai, avec des détails supplémentaires sur la combustion en plusieurs phases du dilbit.

Propriété	Série 1 (Heptane)	Série 2 (Bakken)	Série 3 (Dilbit)
Comportement de brûlage	Stable	Stable	Sandia : Stable CNRC : Multi-phases (CNRC)
Hauteur des flammes (m)	5,6-6,8	4,3-4,5	Sandia : 3,4-3,5 CNRC : Phase 1 : 3,8 Phase 2 : 3,4 Phase 3 : 3,7
Débit thermique moyen (MW)	4,4-5,4	3,2-3,8	Sandia : 3,7* CNRC : 4,475*
Flux thermique moyen vers le calorimètre (kW/m <sup>2</sup> )	58	96	Sandia : 72 CNRC : Phase 1 : 78 Phase 2 : 79 Phase 3 : 93
Température extérieure moyenne du calorimètre (°C)	816, 864	881-993	Sandia : 773-870 CNRC : Phase 1 : 856 Phase 2 : 859 Phase 3 : 891

Les essais sur l'heptane représentaient le comportement de combustion d'un combustible pur à un seul composant. Les essais sur le Bakken ont révélé une combustion préférentielle probable des fractions les plus légères au début de l'essai, et un craquage thermique possible des fractions les plus lourdes plus tard au cours de l'essai. Les essais sur le dilbit ont révélé l'existence de trois phases de combustion, ce qui semble correspondre à un processus de combustion de type distillation.

Lors des essais avec et sans le calorimètre à 1 m de hauteur, le feu d'heptane présentait le taux de combustion et la hauteur des flammes les plus élevés, suivi du feu de Bakken, puis du feu de dilbit. Cependant, le calorimètre a reçu les niveaux les plus bas de flux thermique total dans le feu d'heptane, car ce feu était

moins épais optiquement (en raison d'une moindre production de suie) que l'un ou l'autre des feux de pétrole brut.

La comparaison des essais avec le calorimètre à 1 m de hauteur à un essai similaire réalisé par Sandia avec du pétrole brut SPR [3] n'a révélé aucun effet clair de la composition du pétrole brut sur le flux thermique en vue étroite (pouvoir émissif de la flamme par unité de surface) ou sur le flux thermique total au fond du calorimètre.

## MESURES À VENIR

Voici des recommandations de futures recherches possibles basées sur la présente étude :

- Vérifier quand le craquage thermique commence à se produire dans la nappe de combustible et si des points chauds localisés pourraient exister pour favoriser des taux de craquage plus élevés.
- Analyser les échantillons de résidus recueillis lors des essais sur le Bakken et le dilbit pour voir si leurs caractéristiques et leur composition correspondent aux résultats de la présente étude.
- Étudier les effets sur le développement d'une zone de vapeur riche en combustible, sans combustion, immédiatement au-dessus de la surface du combustible, causée par la présence du calorimètre et par des changements dans son élévation.
- Étudier les effets d'une modification de la hauteur du rebord du réservoir de combustible sur les caractéristiques du feu.
- Étudier les niveaux de production de suie lors de la combustion de pétroles bruts de composition différente;
- Simuler expérimentalement, à l'échelle 1/10<sup>e</sup>, un scénario d'incendie typique impliquant le wagon-citerne placé à la



verticale sur le sol à l'intérieur du feu, pour comparaison avec les présents résultats.

- Étudier les effets de la mise à l'échelle sur les caractéristiques de l'incendie avant d'appliquer les résultats des présents travaux à un scénario d'incendie réaliste.

## RÉFÉRENCES

1. Y. Ko, C. Lam, E. Gibbs, P. Lafrance et M. Weinfurter. *Wagons-citernes exposés à des incendies : Analyses expérimentales des conditions thermiques imposées à un wagon enveloppé d'un incendie de pétrole brut (tests des séries 1 à 3)*, rapport du CNRC A1-010647-01, Conseil national de recherches Canada, Ottawa, ON, 2020.

2. A. Luketa, A. Cruz-Cabrera, W. Gill, S. Adey et J. Hogge. *Experimental results of 2-m heptane, Bakken crude oil, and dilbit crude oil pool fire tests performed for the National Research Council of Canada* (résultats expérimentaux d'essais de feu en nappe de 2 m d'heptane, de pétrole brut Bakken et de pétrole brut dilbit effectués pour le Conseil national de recherches du Canada), SAND2021-3206, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 2021.

3. A. Luketa, T. Blanchat, D. Lord, J. Hogge, A. Cruz-Cabrera et R. Allen, *Pool fire and fireball experiments in support of the US DOE/DOT/TC crude oil characterization research study* (expériences de feu en nappe et de boule de feu en soutien à l'étude de recherche sur la caractérisation du pétrole brut de l'US DOE/DOT/TC), SAND2019-9189, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 2019.

**Titre : Analyse détaillée des données expérimentales de Sandia sur les incendies de pétrole brut (2021)**

**Auteur : C. Lam**

**TP 15480E**

**ISBN : 978-0-660-37902-9 (PDF)  
978-0-660-37903-6 (paper)**

**Numéro de catalogue : NR24-86/2021E-PDF**

## REMERCIEMENTS

Cette analyse a été financée par Transports Canada et réalisée par le Conseil national de recherches du Canada. Les essais expérimentaux ont été réalisés par Sandia National Laboratories dans le cadre du projet TP 15465.

## COMMUNIQUER AVEC :

Pour obtenir une copie du rapport, veuillez communiquer avec :

Division de la recherche scientifique du TMD  
[TC.TDGScientificResearch-RecherchescientifiqueTMD.TC@tc.gc.ca](mailto:TC.TDGScientificResearch-RecherchescientifiqueTMD.TC@tc.gc.ca)

## MOTS CLÉS

Feu de pétrole brut, feu d'heptane, feu de dilbit, feu en nappe, wagon-citerne, calorimètre, Bakken, dilbit, feu de Bakken, débit thermique, flux thermique