Résumé de recherche - Validation de modèles numériques d'incendies de déversements de pétrole brut

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

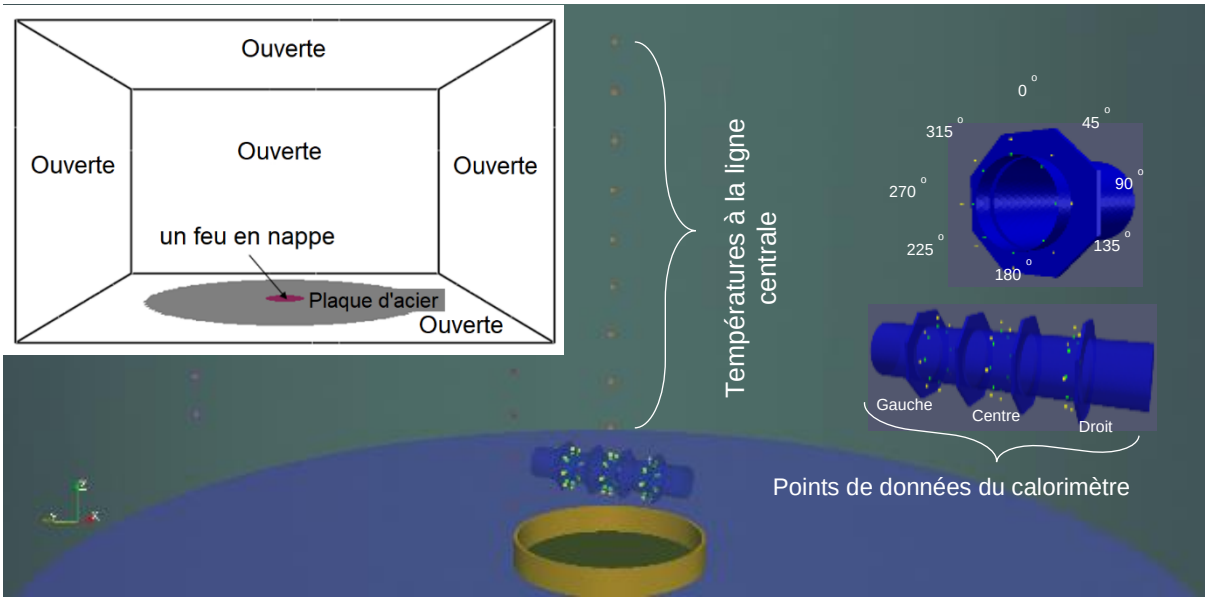

Figure 1. Domaine de calcul numérique et points de données

RÉSUMÉ

Ce travail a permis de formuler et de valider une preuve de concept de modèles numériques des feux en nappe de pétrole brut.

CONTEXTE

Depuis 2016, le Conseil national de recherches Canada (CNRC) collabore avec Transports Canada (TC) pour étudier les incidents d'incendie mettant en cause des wagons-citernes transportant du pétrole brut. Ces études ont consisté en des expériences sur un objet englouti dans des feux en nappe de pétrole brut de 2 m de diamètre à l'aide d'un calorimètre à l'échelle 1/10^{e} comme substitut d'un réel wagon-citerne dans un feu en nappe. Afin d'extrapoler les résultats de ces expériences et de mieux comprendre ces feux, le CNRC a conçu un modèle numérique pour les feux en nappe de pétrole brut. L'étape 1 visait à étudier la faisabilité de l'utilisation de deux (2) outils de modélisation à source ouverte, soit le Fire Dynamics Simulator (FDS) et Open Source Field Operation and Manipulation (OpenFOAM) pour simuler des incendies de pétrole brut. [1] Les deux (2) outils ont

produit des résultats prometteurs sur le plan de la simulation numérique d'incendies fondée sur le calcul parallèle.

Les résultats de l'étape 2 sont exposés dans le présent résumé. Les modèles numériques d'OpenFOAM et de FDS ont été validés par rapport aux résultats expérimentaux des expériences à l'échelle 1/10^{e} réalisées à l'intérieur par le CNRC aux Sandia National Laboratories (SNL) en fonction de 11 paramètres de validation à environ 100 emplacements dans le domaine numérique. Les six (6) simulations portaient sur trois (3) combustibles (l'heptane, le pétrole brut de Bakken et le pétrole brut de dilbit) dans deux (2) scénarios : l'un avec et l'autre sans calorimètre dans le domaine numérique.

OBJECTIFS

Ces travaux visaient à élaborer et à valider des modèles numériques d'incendies de pétrole brut, qui, une fois validés, pourraient être utilisés pour :

- extrapoler les résultats des expériences à échelle réduite à des incidents d'incendie à l'échelle réelle;
- simuler des feux en nappe de pétroles bruts qui n'ont pas fait l'objet d'expériences de feu en nappe;
- simuler d'autres scénarios d'incendie mettant en cause des wagons-citernes;
- fournir des conditions limites thermiques à haute résolution à d'autres groupes de recherche travaillant sur la structure de wagons-citernes ou sur le pétrole brut se trouvant à l'intérieur d'un wagon-citerne.

MÉTHODES

Les détails concernant les outils de modélisation de la dynamique numérique des fluides (DNF), soit OpenFOAM et FDS, tels que les équations résolues, les sous-modèles utilisés, la méthodologie de discrétisation, la structure du ou des fichiers d'entrée et les étapes de modélisation, se trouvent dans le document de référence [1]. Les résultats détaillés des simulations numériques et la validation par rapport aux résultats expérimentaux sont présentés et traités dans le rapport de validation complet pour ce travail de phase 2.

Six (6) simulations ont été réalisées à l'aide d'OpenFOAM et de FDS. Chaque simulation consistait en une modélisation numérique d'un test issu des expériences du CNRC-Sandia [2]. Le flux massique total du combustible a été imposé dans le cadre des simulations en fonction de la valeur expérimentale. Différents mélanges d'heptane (C_7H_{16}) et d'acétylène (C_2H_2) ont été utilisés comme substituts pour simuler de manière simplifiée le Bakken et le dilbit. La figure 1, ci-dessus, illustre le domaine de calcul numérique et les points de données auxquels les paramètres de validation ont été mesurés. Les conditions limites extérieures du domaine de calcul numérique sont indiquées dans la partie supérieure gauche de la figure. Les points de données du calorimètre sont disposés autour du calorimètre (à 0 °, 45 °, 90 °, 135 °, 180 °, 225 °, 270 ° et 315 °) dans trois (3) plans (gauche, centre et droite). Les dimensions du domaine de calcul numérique et les tailles des cellules de la maille sont indiquées dans le tableau 1. Les résultats d'une analyse de sensibilité de la maille sont présentés dans le rapport principal.

Tableau 1. Dimensions du domaine de calcul numérique et taille des cellules de la maille

Domaine de calcul numérique	Dimensions (m) / forme	
Logiciel	*OpenFOAM*	*FDS*
Limites extérieures	12(P)×8(H) cylindrique	20(longueur) ×20(largeur) × 12(hauteur) rectangulaire
Combustible	2(P) circulaire	2(P) circulaire
Calorimètre	0.33(P) ×1.8 (longueur) cylindrique	0.3×0.3×1.8 rectangulaire
Maille	**Taille des cellules (m)**	
Zone des flammes	0,02	0,05
Zone(s) de transition	0,04; 0,08	0,1
Zone extérieure	0,16	0,2

Les paramètres utilisés pour valider les modèles numériques sont la température à la ligne centrale, la température extérieure au calorimètre, la fraction de la chaleur par rayonnement, le flux thermique vers le calorimètre, la température du calorimètre, le débit thermique, la production de suie, la température aux contours, le flux thermique à vue large, le flux thermique à vue étroite et la hauteur des flammes.

RÉSULTATS

Des exemples de résultats des simulations de Bakken sont présentés dans le présent résumé de recherche. Le tableau 2 résume la gamme des résultats calculés par ordinateur de tous les paramètres de validation d'OpenFOAM et de FDS par rapport aux résultats expérimentaux réels.

Tableau 2. Résumé des résultats des simulations calorimétriques pour le Bakken (OpenFOAM et FDS)

Paramètres de validation	Plage numérique		Plage expérimentale
Logiciel	*OF*	*FDS*	
Temp. à la ligne centrale (°C)	233-972	331-866	236-978
Temp. extérieure au calorimètre (°C)	555-1135	113-900	790-1070
Fraction de la chaleur par rayonnement	44 %	39 %	47 %
Flux thermique vers le calorimètre (kW/m²)	76-178	11,2-111	64-136
Temp. du calorimètre (°C)	479-1196	362-1161	796-1031
Débit thermique (MW)	3,77	3,95	3,6
Production de suie	15 %	-	Non précisée
Temp. aux contours (K)	750-1150	-	750-1150
Flux thermique – vue large (kW/m²)	2,6-6,5	1,5-2,5	1,9-2,4
Flux thermique – vue étroite (kW/m²)	30-143	-	15,2-90
Hauteur des flammes (m)	1,6	4,8	4,46

Pour OpenFOAM et FDS, compte tenu de la nature stochastique des incendies, les étendues du modèle numérique et celles des résultats expérimentaux concordaient

bien généralement pour ce qui est de la température à la ligne centrale, la température extérieure au calorimètre, la fraction de la chaleur par rayonnement, le flux thermique vers le calorimètre, la température du calorimètre et le débit thermique. La distribution des températures extérieures, des températures du calorimètre et du flux thermique vers le calorimètre s'est écartée davantage des résultats expérimentaux dans le modèle FDS par rapport aux résultats d'OpenFOAM. Cet écart s'explique par la capacité limitée de modéliser des surfaces courbes dans le FDS. Une sélection des paramètres est présentée dans les figures 2 à 6.

La figure 2 illustre la température moyenne des flammes au niveau de la ligne centrale et au-dessus du feu en nappe dans le cadre des expériences ainsi que des simulations d'OpenFOAM et de FDS.

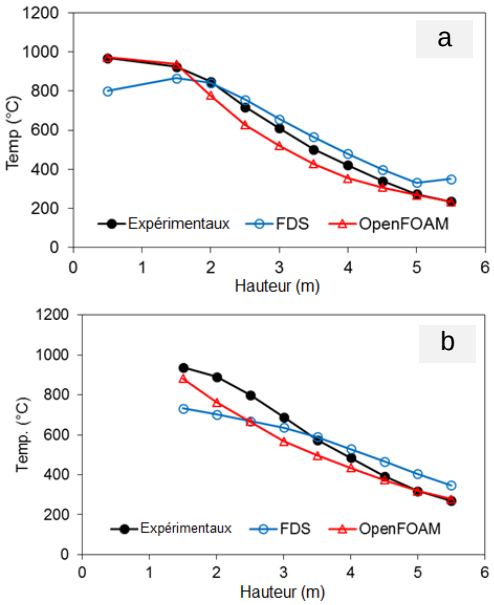

Figure 2. Température à la ligne centrale (Bakken) : a) avec calorimètre b) sans calorimètre

Les figures 3a, 3b et 3c illustrent une comparaison des résultats numériques et expérimentaux relatifs au Bakken dans OpenFOAM pour la température extérieure au calorimètre, le flux thermique vers le calorimètre et les distributions de température de la surface extérieure du calorimètre, respectivement, sur les plans gauche, central et droit.

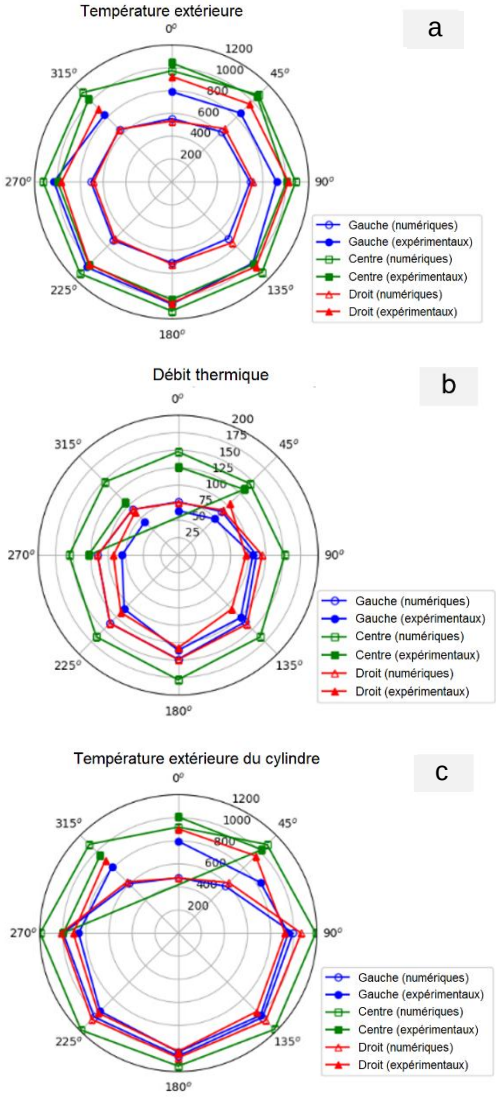

Figure 3. a) Température extérieure (°C); b) Débit thermique (kW/m²); c) Température extérieure du cylindre (°C) (Bakken)

Les figures 4a et 4b présentent les vues de dessus, de côté et de dessous de la distribution de la température du calorimètre et de la distribution du flux thermique de la simulation dans

OpenFOAM pour le Bakken. Les résultats sont cohérents avec les observations des figures 3b et 3c.

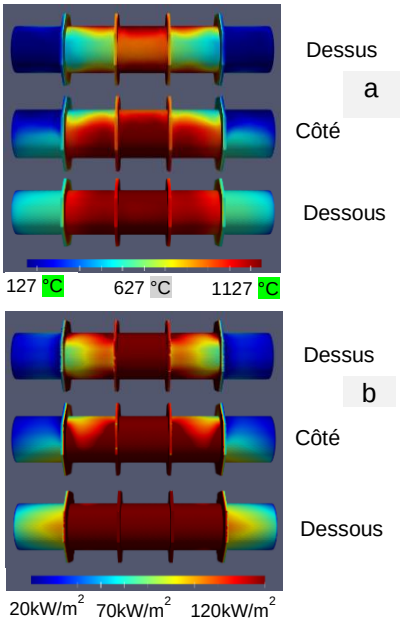

Figure 4. a) Distribution de la température du calorimètre (°C); b) Distribution du flux thermique (kW/m²) (Bakken)

La figure 5 illustre les résultats numériques et expérimentaux de la section transversale de la température extérieure du cylindre dans FDS pour le Bakken.

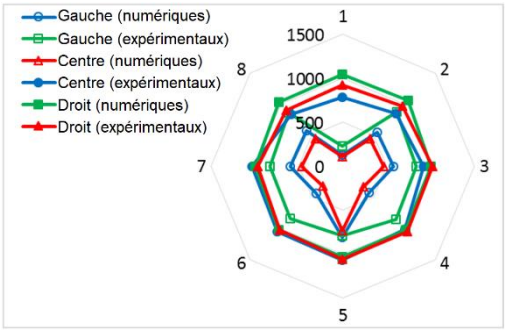

Figure 5. Température extérieure (°C) (Bakken)

La figure 6 présente la distribution de la température et du flux thermique pour le calorimètre de la simulation dans FDS pour le Bakken.

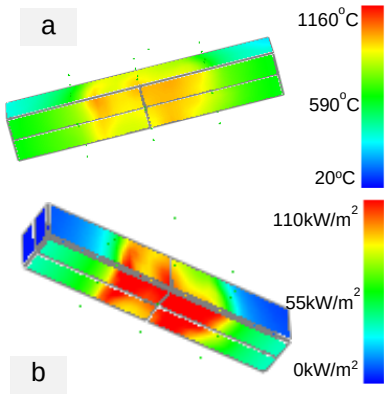

Figure 6. a) Distribution de la température du calorimètre; b) Distribution du flux thermique (Bakken), avec le plan inférieur du calorimètre orienté vers le lecteur

Chacun de ces paramètres est traité et comparé plus loin dans le rapport.

CONCLUSIONS

La modélisation numérique à l'aide d'OpenFOAM et de FDS a permis de reproduire les expériences du CNRC-Sandia sur les feux en nappe de pétrole brut. Les résultats d'OpenFOAM concordaient bien avec les résultats expérimentaux lors de la comparaison des paramètres importants. Les résultats de FDS concordaient également avec les données expérimentales. Cependant, comme FDS ne permet pas de modéliser les formes courbes, OpenFOAM a donc été considéré comme le logiciel de choix pour tout travail futur. En général, les divergences entre les résultats numériques et expérimentaux ont pu être expliquées par les incertitudes expérimentales, l'absence de la masse thermique du calorimètre dans le modèle numérique, l'absence de petits détails physiques dans le modèle numérique ou les multiples incertitudes en ce qui a trait aux paramètres d'entrée (comme l'incertitude en ce qui a trait au taux de combustion).

La température extérieure au calorimètre, le flux thermique vers le calorimètre et la température de surface du calorimètre, ont

été sous-estimés par le modèle FDS. Ces sous-estimations ont été attribuées à la géométrie cuboïde du calorimètre, à l'absence de déflecteurs dans les simulations et à l'absence d'un modèle de transfert de chaleur pour le calorimètre.

Le large éventail de points de données et de paramètres utilisés pour valider les modèles numériques et la concordance générale de leurs résultats avec les résultats expérimentaux donnent confiance dans la capacité du modèle numérique à prédire les paramètres importants affectant un wagon-citerne soumis à un feu en nappe de pétrole brut.

MESURES À VENIR

Voici les principales recommandations à l'égard des futures mesures qui pourraient se fonder sur la présente étude :

1. Développer et valider un modèle de pyrolyse pour les pétroles bruts de Bakken et le dilbit afin de prédire leur taux de combustion et leur production de suie. Un modèle prédictif calculera le taux de combustion indépendamment de la taille du feu et simulera mieux le comportement transitoire des feux de dilbit.
2. Communiquer avec d'autres groupes de projet qui modélisent le comportement du pétrole brut à l'intérieur des réservoirs et l'intégrité structurelle des réservoirs au sujet des conditions limites à haute résolution obtenues à partir des simulations numériques d'incendie.
3. Extrapoler les résultats des expériences et des modèles numériques portant sur des incidents d'incendie à petite et moyenne échelle à des incidents d'incendie plus importants en simulant des scénarios d'incendie à grande échelle.

RÉFÉRENCES

[1] : I. Gomaa, N. Elsagan, C. Lam, Y. Ko, *Evaluation of CFD Tools for Crude Oil Fire Simulations (Modeling steps in OpenFOAM and FDS)*, Conseil national de recherches Canada, 2019.

[2] : Y. Ko, C. Lam, E. Gibbs, P.-S. Lafrance et M. Weinfurter, *Wagons-citernes exposés à des incendies : Analyses expérimentales des conditions thermiques imposées à un wagon enveloppé d'un incendie de prétrole brut (tests des séries 1 à 3)*, Conseil national de recherches Canada, 2020.

Rapport : *Numerical Fire Modeling of Crude Oil Spills: Validation Report*

Auteurs : I. Gomaa, N. Elsagan, D. Duong et Y. Ko (NRC)

ISBN: 978-0-660-38586-0

Numéro de catalogue : T44-3/21-2021E-PDF

Numéro TP : 15471

REMERCIEMENTS

Ce projet a été financé par Transports Canada et réalisé par le Conseil national de recherches Canada.

Les auteurs tiennent à remercier la professeure Jennifer Wen, de l'Université de Warwick, au Royaume-Uni, pour leur avoir communiqué les codes sources des sous-modèles de combustion, de suie et de rayonnement.

COMMUNIQUER AVEC :

Pour obtenir une copie du rapport, veuillez communiquer avec nous :

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

TC.TDGScientificResearch-RecherchescientifiqueTMD.TC@tc.gc.ca

MOTS CLÉS

Feux en nappe, simulations numériques, validation de la modélisation, OpenFOAM, FDS, feu de pétrole brut.