



Résumé de recherche – Modélisation du transfert de chaleur, de la réaction du chargement et de la décompression des wagons-citernes de pétrole brut lors d'un incendie

Transport des marchandises dangereuses | Division de la recherche scientifique

RÉSUMÉ

Ce rapport décrit la modélisation combinée du transfert de chaleur et de masse, ainsi que la modélisation des propriétés et des réactions du pétrole brut pour étudier les wagons-citernes exposés à un incendie alors qu'ils contiennent du pétrole brut. Dans le cadre de cette recherche, on explore les facteurs clés qui affectent le taux de réchauffement, la réponse thermique du chargement (c.-à-d. le pétrole brut dans le wagon-citerne), et la libération du chargement par la soupape de décharge de pression (SDP). Ces renseignements sont ensuite utilisés pour simuler des scénarios d'incident d'un wagon-citerne dans un feu en nappe afin de déterminer les variables qui ont un effet significatif sur la réaction du chargement. Les cas simulés dans cette étude considèrent les niveaux de remplissage typiques d'une gamme de pétroles bruts, de bitume dilué (dilbit) et d'un condensat dans un feu en nappe enveloppant, dans différents scénarios d'incident.

Les travaux ont été commandés par Transports Canada et réalisés par Ressources naturelles Canada/CanmetÉNERGIE – laboratoires d'Ottawa.

CONTEXTE

Étant donné la nature complexe du pétrole brut, il est difficile de prévoir la manière dont un wagon-citerne et un chargement se comporteront en cas d'incident. Cette étude se concentre sur la réaction du chargement.

En 2018-2019, des expériences de laboratoire ont été réalisées au cours desquelles des échantillons de pétrole brut ont subi un processus de distillation contrôlé afin d'étudier les propriétés et les réactions à des températures et des pressions accrues. Ce travail d'analyse du pétrole brut a été utilisé dans cette étude, et plus de détails peuvent être trouvés dans le rapport final l'Équation d'état du pétrole brut – 18 octobre 2019 [1].

Une analyse de la dynamique numérique des fluides (DNF) de ce transfert de

chaleur, du feu à la citerne et dans le chargement, a été réalisée à l'aide du logiciel ANSYS CFX. Une étude de la DNF détaillée de la SDP a également été réalisée pour déterminer les coefficients de débit appropriés de la SDP. Celles-ci sont détaillées dans l'annexe du rapport complet de cette étude.

OBJECTIFS

Voici les objectifs principaux de cette étude :

- De quelle manière le pétrole brut se comporte-t-il lorsqu'il se trouve à l'intérieur d'un wagon-citerne exposé à un feu en nappe?
- Quels facteurs, tels que le type de pétrole brut ou le niveau de remplissage du réservoir, sont importants pour la modélisation?

Ce projet fournit des éléments clés de modélisation thermodynamique pour un projet connexe qui étudie le comportement de la structure du wagon-citerne lorsqu'elle est exposée à un incendie. Dans le cadre de ces travaux, Transports Canada prévoit d'évaluer la manière dont un modèle détaillé des matériaux se compare à un modèle simplifié plus convivial pour évaluer le rendement des wagons-citernes en cas d'incendie, comme le logiciel AFFTAC (analyse des effets du feu sur les wagons-citernes).

MÉTHODES

Le modèle détaillé développé dans cette étude utilise une combinaison de modélisation de la DNF 2-D dans les logiciels ANSYS CFX, Aspen HYSYS, et

MATLAB pour modéliser un wagon-citerne dans un feu en nappe enveloppant. Un aperçu général de la manière dont les entrées et les sorties passent par les différentes étapes et logiciels, ainsi que des variables explorées dans les scénarios d'incident, est présenté sur la Figure 1.

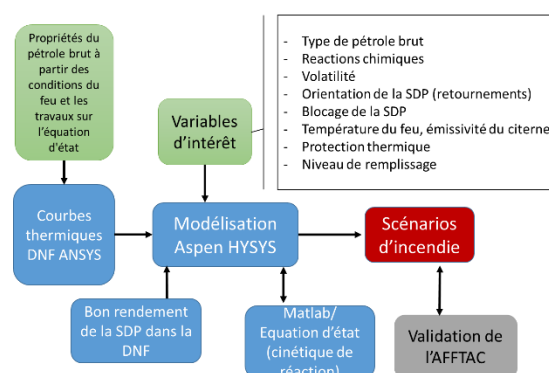


Figure 1: Aperçu général du projet. La « validation de l'AFFTAC » a été reportée à une étude ultérieure.

Pour développer la figure 1, tout d'abord un modèle de DNF 2-D de la section transversale du réservoir (protégé thermiquement ou non) rempli d'un pétrole brut est exposé à une condition limite représentant un feu entièrement englouti à 815,6 °C, comme spécifié dans la section 8.2.7 de la norme TP 14877 [2]. Cela génère le flux de chaleur dans le chargement et la vitesse de montée de température initiale. Ces informations sont entrées dans Aspen HYSYS, ainsi que les coefficients de débit de la SDP et les propriétés du pétrole brut.

Ensuite, un réservoir avec une SDP et rempli de pétrole brut est simulé dans Aspen HYSYS en utilisant les données de la DNF. Un processus itératif avec

MATLAB est utilisé pour mettre à jour la composition changeante du pétrole brut due à l'évaporation et aux réactions chimiques lorsque le réservoir se réchauffe, la pression monte, et il se vide. Les variables d'intérêt, telles que les niveaux de remplissage ou le rendement des SDP, sont modifiées ici pour générer différents scénarios afin d'étudier la réaction du pétrole brut dans des scénarios d'incendie sur de longues durées d'exposition et de multiples décharges de pression. Le scénario de référence est défini dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Scénario de référence pour les scénarios d'incendie HYSYS.

Paramètres	Valeur initiale
Conditions initiales	105 kPa, 46,1 °C
Propriétés du feu	815,6 °C, courbe de flux de chaleur de la DNF
Propriétés de la citerne	Protection thermique (chemise en céramique), émissivité 0,9
Pression de consigne de la SDP	85 lb/po ²
Coefficient de débit de la SDP	0,828 (gaz), 0,61 (liquide)
Niveau de remplissage	93 %
Type de pétrole brut	Brut léger, avec réactions

Une fois le modèle entièrement développé, il a été validé par rapport aux données d'une expérience physique menée par le ministère des transports des États-Unis -

Federal Railroad Administration (DOT-FRA) américaine [3], au cours de laquelle un wagon-citerne à l'échelle 1/3 rempli d'eau a été exposé à un incendie. La température, la pression, et le temps de ventilation ont été pris en compte, et les résultats du modèle étaient comparables.

RÉSULTATS

Un modèle détaillé a été développé, en mesure de rendre compte de la nature complexe du pétrole brut. Il s'agit notamment des propriétés du chargement qui dépendent de la température et de la pression, des réactions chimiques, de l'évaporation et des événements de décompression, et de la manière dont ces éléments se combinent pour modifier la composition du pétrole brut au fil du temps.

Résultats du transfert de chaleur

La comparaison du modèle avec les expériences du DOT-FRA américain a confirmé que le mécanisme dominant de transfert de chaleur du feu à la citerne est le rayonnement.

Lors du réchauffement initial du chargement, le mécanisme dominant est le transfert de chaleur convectif entraîné par l'écoulement du fluide, jusqu'à 130 °C. Bien que les pétroles bruts soient généralement caractérisés par leur densité, la viscosité est beaucoup plus importante pour le transfert de chaleur. Le fluide en contact avec les parois de la citerne se réchauffe et se déplace vers l'intérieur (Figure 2), ce qui entraîne le transfert de chaleur.



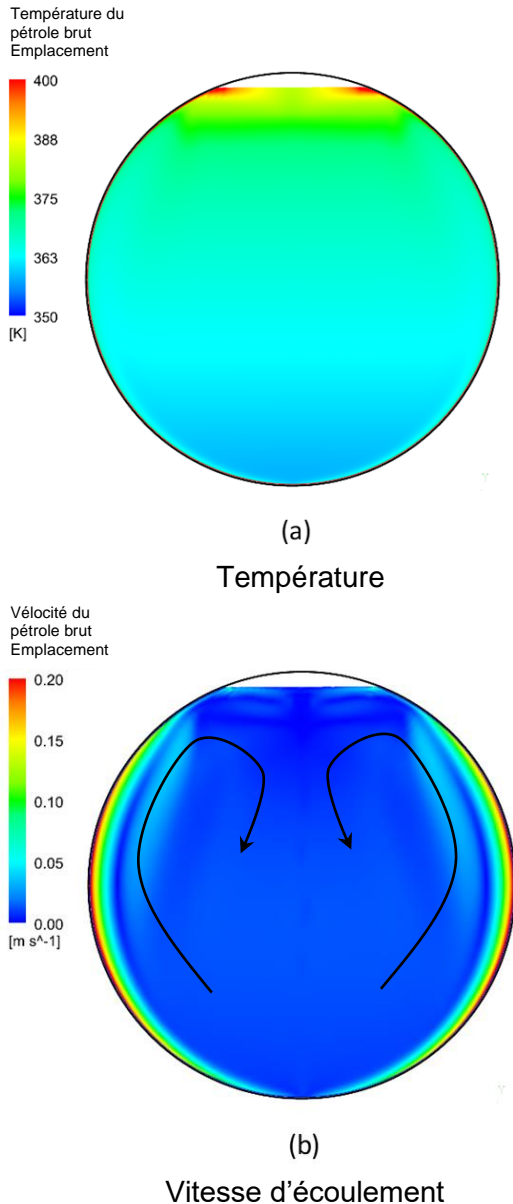


Figure 2 : Courbes de niveau en couleur pour (a) la température [K], et (b) la vitesse d'écoulement [m/s] à l'intérieur du réservoir nu pour le pétrole brut léger au moment où la pression de décharge a été atteinte.

La Figure 3 montre les courbes de pression et de flux thermique pour le

pétrole brut léger. La citerne à coque nue, non isolée, représentée en rouge, atteint la pression de décharge (85 lb/po²) en 15 minutes environ. En comparaison, la citerne thermiquement protégée, représentée en bleu, ne présente qu'une faible mise sous pression, même après une (1) heure d'exposition simulée au feu. Cette simulation suppose que la protection thermique reste intacte et ne se dégrade pas ou ne se déplace pas, ce qui peut ne pas être le cas dans la réalité.

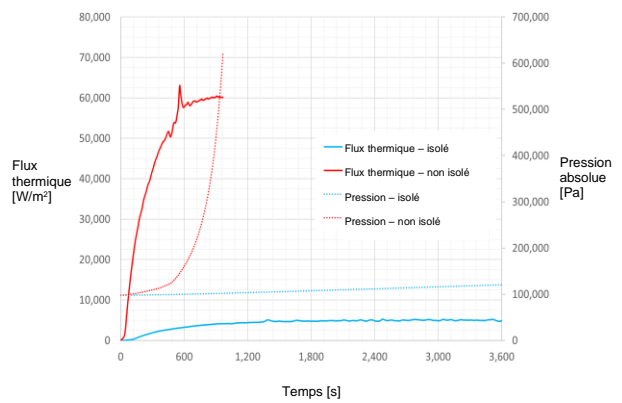


Figure 3 : Courbes de flux thermique pour le pétrole léger pour un wagon-citerne non isolé (rouge) et isolé (bleu).

Résultats de la modélisation du feu par HYSYS

Sur la base de la modélisation de wagons-citernes avec ou sans protection thermique, il a été déterminé que le craquage thermique (c.-à-d. la décomposition de longues chaînes d'hydrocarbures en composés plus petits) peut être généralement insignifiante lorsque le chargement est inférieur à 425 °C, et peut être exclu des analyses si cette température n'est pas dépassée. En outre, les températures de chargement supérieures à 425 °C ne devraient se

produire qu'en l'absence d'une isolation adéquate (c.-à-d. lorsque la citerne est nue).

Les différents niveaux de protection thermique ont entraîné des changements radicaux dans le rendement des wagons-citernes avant et après l'événement de secours initial. Les évaluations du rendement à différents niveaux d'intégrité de la protection thermique devraient être examinées afin de mieux comprendre les dispositions de protection plus « réalistes » des wagons-citernes (avant et après un incident). Le craquage thermique doit être particulièrement examiné dans les scénarios de protection thermique partielle ou nulle.

Des différences notables ont été observées pour les différents types de pétrole brut. Les bruts légers n'atteignent pas des températures liquides aussi élevées que les bruts plus lourds, car ils se vaporisent et s'échappent plus tôt, ce qui élimine périodiquement la chaleur du système.

À des niveaux de remplissage initiaux élevés (90 % et plus), le temps de mise sous pression est dominé par l'expansion du liquide et moins par le type de pétrole brut. Des niveaux de remplissage initiaux plus bas peuvent améliorer de manière significative le rendement des wagons-citernes dans des conditions d'incendie, comme un temps de mise sous pression plus long et une absorption de chaleur réduite du chargement. Des niveaux de remplissage très élevés peuvent entraîner une mise sous pression rapide et une plus grande probabilité que le liquide inflammable soit évacué par la SDP dans le feu en raison de l'expansion thermique du liquide.

La température de la flamme et l'émissivité de la citerne sont également importantes pour prévoir le rendement du wagon-citerne. Il convient de noter que l'émissivité des citernes pourrait être difficile à déterminer étant donné les différences potentielles de revêtement et les dépôts spécifiques au pétrole brut (suie). Le niveau de protection thermique actuellement requis par la norme TP 14877 [2], pour les wagons-citernes transportant du pétrole brut (classe 117 construite après janvier 2018) semble offrir une bonne résistance au transfert de chaleur sur une plage raisonnable de températures de flamme (815,6 °C à 1 204,4 °C) et d'émissivité de la citerne (0,8 à 1,0).

Une note sur les BLEVE

Lorsqu'un récipient contenant un liquide sous pression se brise et perd sa pression instantanément, une BLEVE (explosion due à l'expansion des vapeurs d'un liquide en ébullition) peut se produire. En examinant les courbes de saturation pour les condensats et les pétroles bruts étudiés, on a constaté que les condensats peuvent causer une BLEVE en raison de leur plage de points d'ébullition basse et étroite. La ligne noire sur Figure 4 représente une citerne contenant un condensat qui a été chauffé de 27 °C à 87 °C et a atteint une pression interne de 65 lb/po²; une rupture de la citerne dans ces conditions (avec une chute de pression suivant la direction de la flèche) ferait passer le contenu de l'état entièrement liquide à l'état entièrement vapeur instantanément. La large gamme de points d'ébullition des pétroles bruts étudiés n'a pas présenté ce comportement (Figure 5).



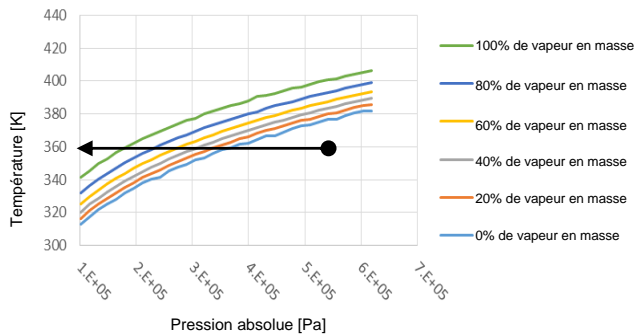


Figure 4 : Courbes de saturation du condensat étudié, montrant l'étroite gamme de points d'ébullition.

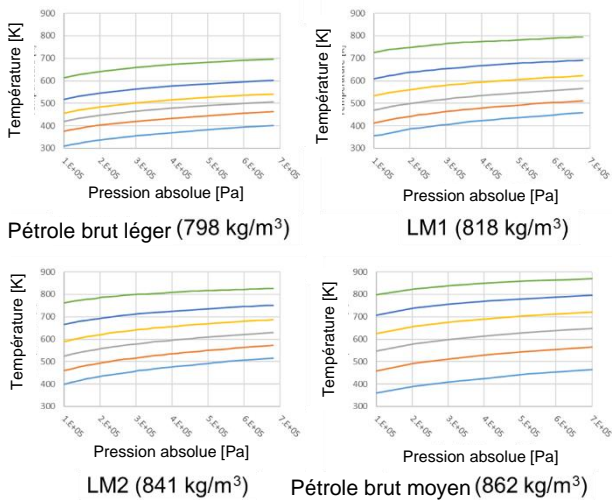


Figure 5 : Courbes de saturation pour les pétroles bruts légers et moyens montrant une large gamme de points d'ébullition pour chacun.

CONCLUSIONS

Les principales conclusions relatives au transfert de chaleur sont les suivantes :

- La majorité de la chaleur du feu entre dans le réservoir sous forme de chaleur par rayonnement.
- Le transfert de chaleur initial du pétrole brut à l'intérieur d'un wagon-citerne est principalement dû à la convection, qui dépend elle-même de la viscosité du pétrole brut. Les pétroles bruts légers sont généralement moins visqueux et se réchauffent donc plus rapidement que les bruts plus lourds.
- L'espace de vapeur connaît des températures beaucoup plus élevées que le liquide, de sorte que le métal en contact avec cet espace de vapeur sera beaucoup plus chaud que le reste de la citerne.
- Lorsqu'un wagon-citerne est protégé thermiquement, le flux de chaleur dans la citerne est limité par la capacité thermique de la protection thermique, et ces citernes se réchauffent beaucoup plus lentement que les citernes sans protection thermique.
- Les condensats, en raison de leur étroite gamme de points d'ébullition, ont la possibilité théorique de subir une BLEVE, alors que les pétroles bruts n'en ont pas.

Voici les facteurs ayant un effet important sur la capacité de survie des wagons et l'impact de la modélisation :

- Protection thermique : réduit le taux d'échauffement du brut léger à moins d'un dixième de celui de la citerne nue.
- Type de pétrole brut (chargement) : les bruts plus lourds atteignent plus rapidement des températures plus élevées en raison de l'absence de ventilation; les bruts plus légers chauffent rapidement, mais se vaporisent aussi facilement, ce qui fait

que la pression du système monte plus rapidement, mais que les températures de chargement restent plus basses.

- Niveaux de remplissage : des niveaux de remplissage initiaux plus bas peuvent améliorer de manière significative le rendement des wagons-citernes dans des conditions d'incendie.
- Caractéristiques du feu : Particulièrement important pour une modélisation précise, car la chaleur du feu joue un rôle significatif sur la rapidité avec laquelle la citerne se réchauffe et se pressurise, ou plus important encore, sur la durée de survie d'une citerne dans un feu en nappe.

Vous trouverez ci-dessous les facteurs les moins importants :

- Orientation du wagon-citerne (renversement) : La SDP est capable d'empêcher la surpression même en cas de retournement; le pétrole brut liquide est évacué dans les cas où la citerne est tournée de 45° et 120°, ce qui est problématique pour un chargement inflammable, car il peut continuer à alimenter un feu en nappe.
- Blocage de la SDP : La SDP est capable d'évacuer la pression de manière adéquate même si elle est partiellement bloquée; une surpression a été constatée dans les cas de blocage à 100 % et 99,8 %.

MESURES À VENIR

Pour compléter le modèle détaillé permettant d'étudier le comportement au feu d'un wagon-citerne dans un feu en nappe, Transports Canada prévoit d'utiliser ces données sur la réaction du chargement

pour modéliser le comportement du matériau et de la structure de la citerne à l'aide d'une analyse par éléments finis. Cette étude sera publiée dans le futur.

Les résultats permettant de relever les facteurs importants lors de la modélisation du pétrole brut seront utilisés pour soutenir d'autres objectifs de recherche.

Il est possible d'appliquer une approche similaire pour modéliser d'autres chargements inflammables dans des conditions d'incendie ou d'incident lorsqu'il existe un besoin identifié de mieux comprendre les dangers et les risques associés au transport de ces types de marchandises dangereuses.

RÉFÉRENCES

1. Rapport final sur le pétrole brut d'équation – 18 octobre 2019. <https://tc.canada.ca/fr/marchandises-dangereuses/recherche-petrole-brut#Resume-Rapport-final-sur-le-petrole>
2. Norme TP 14877 – Conteneurs pour le transport de marchandises dangereuses par chemin de fer, une norme de Transports Canada <https://tc.canada.ca/fr/marchandises-dangereuses/publications/conteneurs-transport-marchandises-dangereuses-chemin-fer-norme-transports-canada>
3. Federal Railroad Administration. (2020). *Performance of Tank Car Pressure Relief Devices Under Fire Conditions*. Washington : DOT américain.

ISBN : 978-0-660-40730-2



REMERCIEMENTS

Cette étude a été mandatée par Transports Canada. Les essais expérimentaux, la modélisation et la validation du modèle ont été effectués par Ressources naturelles Canada/CanmetÉNERGIE – Ottawa. Une assistance supplémentaire a été fournie par le DOT-FRA américain.

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 :

Chargement inflammable, Pétrole brut, Modélisation de la dynamique numérique des fluides (DNF), HYSYS, Modélisation du processus, BLEVE, Cinétique de réaction, Feu en nappe, Rendement au feu, Wagon-citerne.