

RAYONNEMENT DES BOULES DE FEU BLEVE : ENJEUX POUR L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE

Carolina Ardila-Suarez,

Jean-Paul Lacoursière et Gervais Soucy

Mercredi le 29 octobre 2025

Ordre du jour

- I. Contexte
- II. Scénario normalisé
- III. BLEVE
- IV. Comparaison des modèles de BLEVE
- V. Recommandations (outil de criblage)
- VI. Conclusions

Contexte

PROGRAMME DE RECHERCHE – GESTION DES RISQUES TECHNOLOGIQUES

Objectif général

Mettre en place un programme de recherche sur la gestion des risques technologiques liés aux matières dangereuses, visant à développer des outils pour les acteurs du secteur.

Projet actuel

Développement d'outils de gestion des risques technologiques pour **l'aménagement du territoire et la prévention des sinistres** (ex. BLEVE, outils de criblage, recommandations).

Contexte



Les **changements climatiques**, accompagnés d'**inondations** et d'**incendies de forêt**, mettent en évidence la nécessité de repenser l'**emplacement des installations de stockage de propane**, souvent situées à proximité des zones boisées au Québec.



Le **propane** sert ici d'**exemple représentatif** pour analyser les **BLEVE**, afin d'illustrer les risques majeurs liés aux substances inflammables sous pression.



Depuis **2018**, la **RBQ** a intégré ces enjeux dans le **Code de sécurité**, exigeant une **appréciation des risques** pour toute installation de stockage ou de distribution autonome de plus de **5 000 gallons américains**.



Cette démarche s'appuie sur la **norme CAN/CSA-ISO 31000** pour promouvoir une **culture de sécurité** et une **résilience accrue des infrastructures**.

Modèles appropriés pour réaliser
les simulations intégrées aux
rapports d'appréciation des
risques requis



Assurer la cohérence des
rapports d'ingénierie



Scénario
normalisé



BLEVE (Boiling
Liquid Expanding
Vapor Explosion)

**Cette étude est essentielle pour élaborer une méthodologie
d'évaluation des risques applicable aux sites de
manutention, d'entreposage ou de distribution de propane.**

Scénario normalisé

1

Il consiste à modéliser le **rejet de la quantité maximale** d'une substance réglementée à partir du **système de réservoirs de plus grande capacité** d'une installation.

2

Des **conditions préétablies** sont utilisées pour modéliser le scénario normalisé.

3

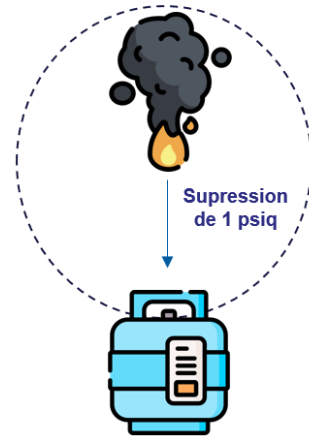
Ce scénario est également **requis dans le cadre des évaluations environnementales**.

4

Il est important de **définir l'enveloppe des impacts** en calculant **plusieurs scénarios normalisés**.

Méthode de calcul – Gaz inflammables liquéfiés (propane)

- **Les conséquences d'une explosion sont estimées** en supposant le rejet de **toute la quantité de propane** contenue dans le plus grand réservoir ou conduit d'une installation, sur une durée de 10 minutes.
- **Les distances associées à une surpression de 1 psig** ($\approx 6,9$ kPa) sont calculées pour caractériser la zone d'impact.
- **Une efficacité d'explosion de 10 % est retenue** pour refléter un scénario représentatif de ce type d'accident.
- **La méthode repose sur l'équivalent TNT**, une approche de référence pour comparer les effets d'explosions et orienter la planification des mesures de sécurité.



Scénario normalisé

Tableau 1 : Distances pour une surpression de 1 psig pour différentes capacités nominales de réservoirs

Capacité nominale en eau (USWG)	Distance jusqu'à la surpression de 1 psig (m)
500	168
1 000	211
2 000	267
5 000	363
10 000	456
30 000	658
90 000	949

Ce premier criblage, fondé uniquement sur les conséquences d'un accident, doit être complété par une analyse intégrant la probabilité de survenue de l'accident afin de déterminer une utilisation sécuritaire du sol.



Constat 1

Le **scénario normalisé (WCS)** est exigé par le **Règlement sur les urgences environnementales** en vertu de la **Loi canadienne sur la protection de l'environnement (1999)**, ainsi que dans le cadre des **évaluations environnementales** (pour les projets soumis à une étude d'impact).



Recommandation 1

Utiliser le **scénario normalisé** comme **premier outil de criblage** afin de déterminer si les installations de stockage pourraient entraîner des conséquences susceptibles de compromettre la **sécurité du public**, de causer des **dommages environnementaux** ou d'endommager des biens.

BLEVE – Explosion de vapeur en expansion

Le **BLEVE** n'est pas le seul accident pouvant survenir sur un site de manutention et de stockage de propane, mais il est celui qui entraîne les conséquences les plus graves.



Recommandation du modèle mathématique pour le Code de sécurité (RBQ)

PHAST v. 8.23 (version utilisée dans cette étude) propose **quatre modèles de simulation BLEVE**:

- **Martinsen BLEVE** (dynamique)
- **Roberts HSE BLEVE** (statique)
- **Roberts TNO/hybride BLEVE** (statique)
- **TNO BLEVE** (statique)



La **version 8.4** de PHAST inclut une **modélisation 3D avancée**.

Autres logiciels :

- **ALOHA v. 5.4.7** – modèle BLEVE Roberts HSE (statique)
- **EFFECTS v. 14** – modèles BLEVE TNO et TNO/Roberts hybride

Martinsen BLEVE (dynamique)

Calcule la taille initiale de la boule de feu et son mouvement vertical, tout en maintenant constante la taille de la boule de feu.

Roberts TNO/Hybrid BLEVE (statique)

Combine le rayonnement de surface de la boule de feu du modèle Roberts avec le rayon de boule de feu du modèle TNO.

Roberts HSE BLEVE (statique)

Le centre de la boule de feu est situé à une distance d'un rayon du sol. La circonférence de la boule de feu est tangente au sol.

TNO BLEVE (statique)

Le centre de la boule de feu est situé à une distance de deux fois son rayon par rapport au sol.

Boule de feu : Paramètres de simulation et comparaison des modèles

Simulation d'un scénario BLEVE réaliste pour un réservoir de propane :

- Volume : **30 000 USWG** (~40 761 kg de propane)
- **Pression maximale de service** : 250 psig
- Niveau de remplissage : **85 %**
- Pression de rupture simulée : **302,5 psig**
- Conditions météo : **vent 1,5 à 5,0 m/s**,
classes de stabilité D-F

Objectif : comprendre la taille, la durée et le rayonnement de la boule de feu selon différents modèles.

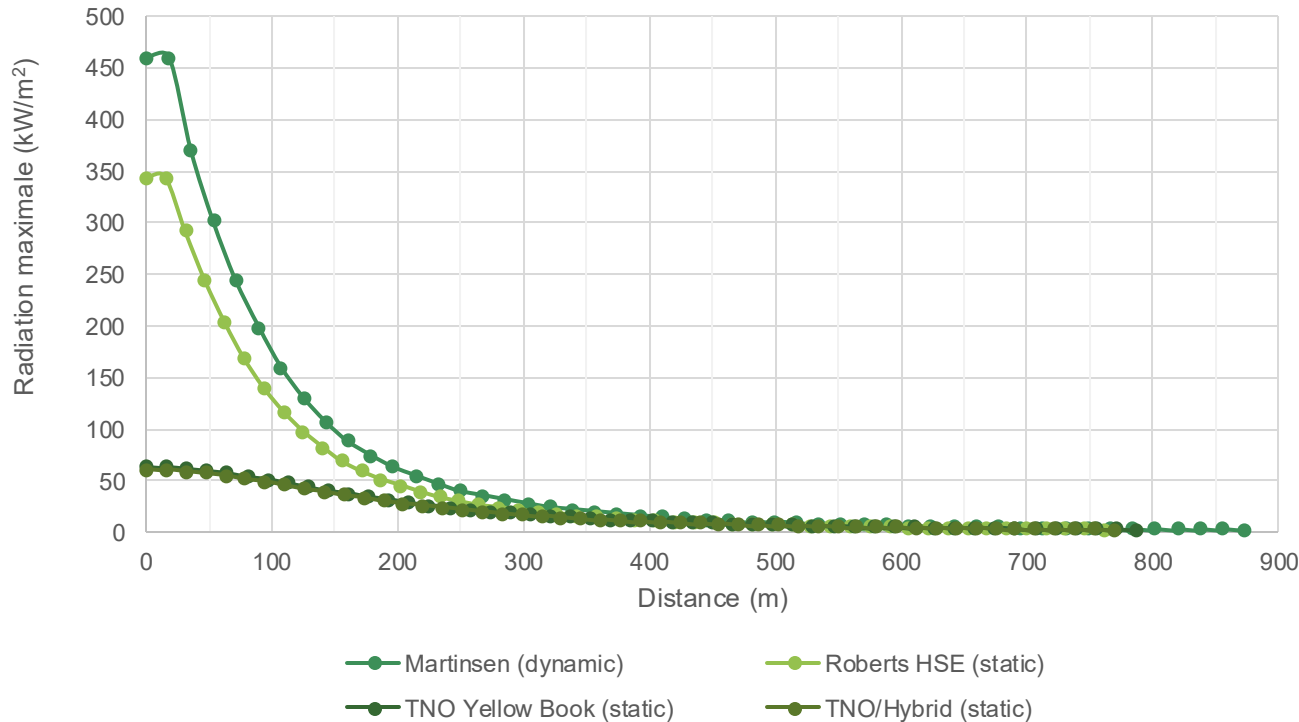
Boule de feu : Paramètres de simulation et comparaison des modèles

Tableau 2 : Propriétés de la boule de feu selon les quatre modèles

Modèle	Émittance maximale (kW/m ²)	Rayon maximal (m)	Durée totale (s)	Élévation du centre de la boule de feu (m)
Martinsen (dynamique)	460	100	13	100 et mouvement ascendant
Roberts HSE (statique)	344	100	15	100
TNO Yellow Book (statique)	353	102	14	204
TNO/Hybride (statique)	370	102	14	204

Ces données illustrent que, selon le modèle choisi, la boule de feu peut atteindre un rayon supérieur à 100 m et rester visible pendant plus de 10 secondes.

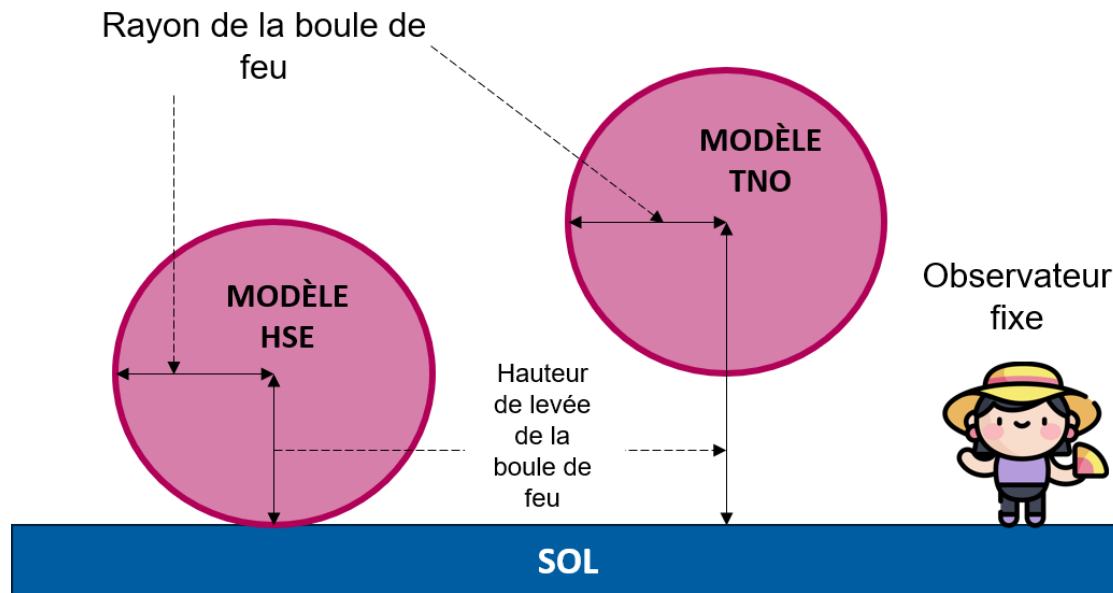
Comparaison de la radiation maximale à une hauteur de 2 m



- **Martinsen et Roberts HSE :** rayonnement thermique maximal plus élevé (< 300 m).
- **TNO et TNO/Hybride :** centre de boule de feu plus haut (~200 m), résultats moins pessimistes.

Figure 1 : Comparaison de la radiation maximale à une hauteur de 2 m

Positionnement de la boule de feu selon les modèles TNO et HSE



Le rayonnement thermique émis par la boule de feu peut avoir des impacts variables sur la population environnante.

Figure 2 : Positionnement de la boule de feu selon les modèles TNO et HSE (Roberts) (Adapté de PHAST).

Comparaison des niveaux de rayonnement thermique

Tableau 3 : Comparaison des niveaux de rayonnement thermique (seuils)

MODEL	25 kW/m ² (m)	12.5 kW/m ² (m)	5 kW/m ² (m)	3 kW/m ² (m)
Martinsen (dynamique)	300	420	645	820
Roberts HSE (statique)	275	390	600	760
TNO Yellow Book (statique)	225	360	595	770
TNO/Hybrid (statique)	235	373	610	785

Hymes et al., 1996 :

25 kW/m² : 10 % de probabilité de décès en cas d'exposition instantanée.

12,5 kW/m² : Niveau minimal pour faire fondre le plastique.

5 kW/m² : Douleur après 15–20 s, brûlures du 2^e degré après 30 s, du 3^e degré après 60 s.

3 kW/m² : Brûlures importantes.

Distances pour les niveaux de rayonnement thermique sélectionnés pour un réservoir de 30 000 USWG

Comparaison des niveaux de rayonnement thermique

Le modèle Martinsen prédit des distances plus importantes pour chaque niveau de rayonnement thermique par rapport aux trois autres modèles.

La charge thermique est plus pertinente car elle prend en compte la durée d'exposition du récepteur.



Constat 2

Le modèle Martinsen produit les résultats de **rayonnement thermique les plus pessimistes**, suivi des modèles Roberts HSE, TNO et TNO/Hybride.

Charge thermique

Points clés

- **Définition** : Paramètre essentiel qui prend en compte **la durée d'exposition** au rayonnement thermique.
- **Importance** : Évalue mieux les conséquences pour la population, car elle reflète l'exposition réelle lors d'une explosion ou d'une boule de feu.
- **Facteurs de sensibilité** : Impact variable selon l'âge, l'état de santé et la vulnérabilité des individus.

Seuils critiques

1800 (kW/m²)^{4/3}.s: ~ 50 % de probabilité de décès.

1000 (kW/m²)^{4/3}.s: Charge dangereuse pour une population moyenne (vêtements normaux) → brûlures graves, ~ 1 % mortalité.

500 (kW/m²)^{4/3}.s: Charge dangereuse pour populations vulnérables (enfants, personnes âgées) → brûlures graves, ~1 % mortalité.



Constat 3

Les charges thermiques de $1800 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3}\cdot\text{s}$, $1000 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3}\cdot\text{s}$ et $500 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3}\cdot\text{s}$ présentent toutes des risques mortels. **La charge thermique de $500 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3}\cdot\text{s}$ est particulièrement dangereuse pour les populations vulnérables**, y compris les enfants et les personnes âgées.



Recommandation 2

Les études doivent tenir compte du fait que des charges thermiques de $1800 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3}\cdot\text{s}$, $1000 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3}\cdot\text{s}$ et $500 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3}\cdot\text{s}$ présentent toutes des risques mortels.

Charge thermique

Tableau 4 : Comparaison de la charge thermique

MODEL	1800 (kW/m ²) ^{4/3} .s (m)	1000 (kW/m ²) ^{4/3} .s (m)	500 (kW/m ²) ^{4/3} .s (m)
Martinsen (dynamique)	150	200	270
Roberts HSE (statique)	230	285	370
TNO Yellow Book (statique)	140	225	325
TNO/Hybrid (statique)	150	230	335

- **Modèle Roberts HSE** : Résultats les plus **pessimistes et conservateurs** pour tous les seuils de charge thermique.
- **Durée de boule de feu** estimée : **15 s**, supérieure aux autres modèles.
- **Modèle Martinsen** : Boule de feu **se déplaçant progressivement** et augmentant la distance avec le récepteur → **diminution de l'exposition thermique** au fil du temps.
- **Comportement de la boule de feu** : Peut être **statique ou proche du sol**; supposer un mouvement constant pour des raisons de sécurité peut être **imprudent**.



Constat 4

Le modèle Roberts HSE est le plus conservateur pour le calcul de la charge thermique, car il prend en compte à la fois le niveau de rayonnement thermique et la durée d'exposition à la boule de feu.

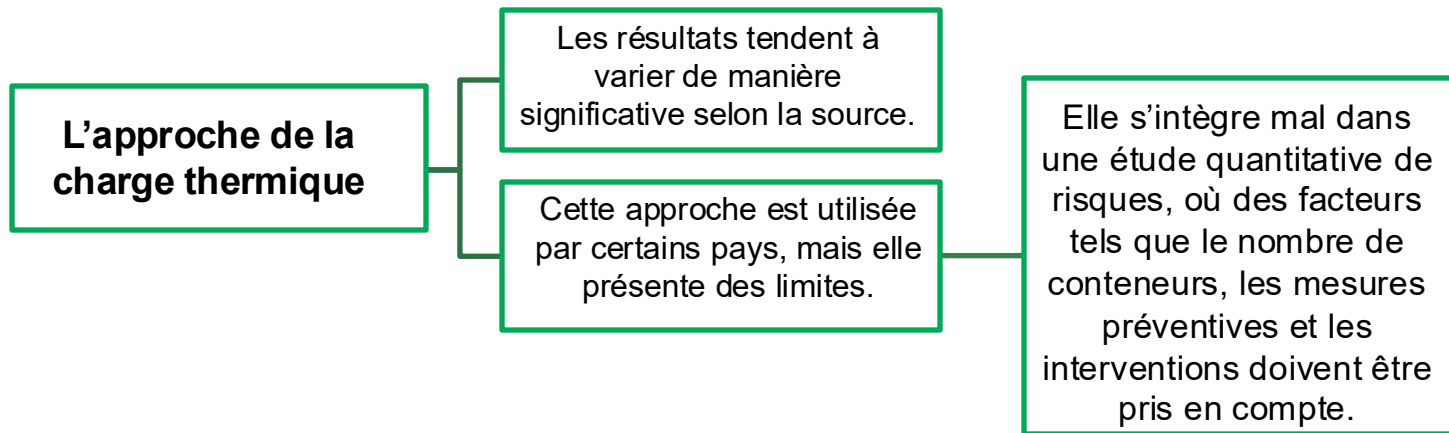


Recommandation 3

Outil de criblage : utiliser le modèle Roberts HSE (le plus conservateur) pour simuler le rayonnement et la charge thermiques après un BLEVE.

Comparaison des modèles d'équations probit

Deux approches peuvent être utilisées pour déterminer le taux de mortalité associé au rayonnement thermique d'un BLEVE.



Probit

Tableau 5. Comparaison des résultats probit.

Rayonnement (kW/m ²)	Dose ([W/m ²] ^{4/3} .s)	Eisenberg		TNO	
		Probit	Mortalité (%)	Probit	Mortalité (%)
3	6.60E+05	-4.18	0.00	-2.08	0.00
5	1.30E+06	-2.43	0.00	-0.33	0.00
12.5	4.42E+06	0.70	0.00	2.79	1
25	1.11E+07	3.06	3.0	5.16	56



Constat 5

Les modèles d'Eisenberg et du TNO sont utilisés pour évaluer les conséquences du rayonnement thermique sur les individus. Le premier, basé sur le rayonnement UV d'une explosion nucléaire, conduit à des estimations plus faibles que le second, fondé sur le rayonnement IR d'un incendie d'hydrocarbures, pour une même charge thermique.



Recommandation 4

Utilisez le modèle du TNO pour déterminer la probabilité de mortalité à la suite d'une exposition à une charge thermique, car il tient compte du type de rayonnement susceptible de se produire lors d'un accident industriel.

Conclusions

Les **boules de feu lors d'un BLEVE de propane** représentent un risque thermique majeur pour les populations, les milieux naturels et les infrastructures critiques, particulièrement dans le contexte des changements climatiques, ce qui justifie l'usage d'outils de modélisation performants

Le **modèle Roberts HSE** est le plus conservateur pour l'évaluation de la charge thermique, car il tient compte à la fois de l'intensité et de la durée d'exposition, fournissant des données essentielles pour la conformité réglementaire et l'aménagement du territoire.

La charge thermique de **500 (kW/m²)^{4/3}·s** est particulièrement dangereuse pour les populations vulnérables, y compris les enfants et les personnes âgées.

Recommandations et travaux futurs

Élaborer des scénarios réalistes adaptés aux municipalités, basés sur la norme ISO 31000 et les méthodes d'appréciation ISO/IEC 31010.

But : appuyer les décisions locales en matière d'aménagement du territoire et de préparation aux sinistres technologiques.

Identifier et analyser les dangers liés aux substances inflammables sous pression (ex. propane) afin d'évaluer les zones d'impact potentielles.

But : fournir aux municipalités et aux services d'urgence des outils pour prioriser les zones à risque et planifier des mesures de prévention.

Outils de planification municipale et résilience

Utiliser les résultats des analyses BLEVE pour appuyer la planification urbaine et la gestion du territoire :

- Définir des zones à risque et orienter les usages du sol;
- Protéger les populations vulnérables;
- Renforcer la résilience des collectivités face aux accidents technologiques.

Public cible : municipalités, directions de sécurité civile, urbanistes, entre autres.

Travaux futurs

Approche intégrée pour anticiper les risques et renforcer la résilience urbaine



Évaluation de la vulnérabilité climatique (CSA Z767:24) : Identifier les phénomènes extrêmes: inondations, incendies de forêt, vagues de chaleur, etc., et évaluer leurs impacts sur les installations et les collectivités, pour orienter les décisions en aménagement du territoire.



HAZID intégré aux enjeux climatiques : Réaliser une identification structurée des dangers industriels et climatiques, afin d'anticiper les interactions entre infrastructures critiques, matières dangereuses et aléas météorologiques.



Représentation cartographique des risques (données géospatiales) : Traduire les résultats d'analyse en cartes opérationnelles pour appuyer la planification urbaine, la protection des populations vulnérables et le renforcement de la résilience des territoires.

Remerciements

Ce travail a été appuyé par le Cadre pour la prévention des sinistres du Ministère de la Sécurité publique.



Carolina Ardila-Suarez exprime sa profonde gratitude pour la bourse postdoctorale Claire-Deschênes de la Faculté de génie de l'Université de Sherbrooke.

Remerciements spéciaux à :

Geneviève Bernier
Paul-André Dastous
Olivier Drevelle

RÉFÉRENCES

CAMERON, I. & RAMAN, R. 2005. *Process systems risk management*, Elsevier.

CANUTEC 2020. *Guide des mesures d'urgences* [En Ligne]. Transport Canada, US Department of Transportation, Pipelines and Hazardous Materials Safety Administration, Secretaria de comunicaciones y transportes (Mexique). [Accédé le].

CCPS 1994. *Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVEs*, New York, NY : Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, c1994.

CCPS 2000. *Guidelines for chemical process quantitative risk analysis 2nd ed.*, New York, Center for Chemical Process Safety.

CCPS 2021. CCPS Glossary. 2021 ed. <https://www.aiche.org/ccps/resources/glossary>.

CRAIM 2017. *Guide de gestion des risques d'accidents technologiques majeurs, 7ème édition*, Montréal, Québec, Conseil pour la réduction des accidents majeurs.

CROWL, D. A. & LOUVAR, J. F. 2011. *Chemical process Safety, Fundamentals with Applications*.

ECCC 2020. *Directives techniques pour le Règlement sur les urgences environnementales (2019) Version 2.0*, ENVIRONNEMENT ET CHANGEMENT CLIMATIQUE CANADA.

EISENBERG, N. A., LYNCH, C. J. & BREEDING, R. J. 1975. *Vulnerability model. A simulation system for assessing damage resulting from marine spills. Final report*.

RÉFÉRENCES

- HEUDIER, L. & PROUST, C. 2017. *OMEGA 5 - Le BLEVE, phénoménologie et modélisation des effets*.
- HSE 2000. *Thermal Criteria for Vulnerable Persons* [En Ligne]. Norwich, Royaume-Uni, Crown. [Accédé le].
- HSE. 2017. *Failure Rate and Event Data for use within Risk Assessments* [En Ligne]. Repéré à: <https://www.hse.gov.uk/landuseplanning/failure-rates.pdf> [Accédé le 2021].
- HYMES, I., BOYDELL, W., PRESCOTT, B. & INSTITUTION OF CHEMICAL, E. 1996. *Thermal radiation : physiological and pathological effects*, Rugby, Institution of Chemical Engineers.
- ISO/IEC. 2020. *IEC/ISO 31010. Management du risque : Techniques d'appréciation du risque*. Genève, Suisse, International Electrotechnical Commission (IEC).
- MELCC 2002. *GUIDE-Analyse des risques d'accidents technologiques majeurs* [En Ligne]. Québec, Canada, Ministère de l'environnement du Québec. Repéré à: www.environnement.gouv.qc.ca/evaluations/documents/guide-risque-techno.pdf [Accédé le Mai 2018].
- RBQ. 2018. *Code de Sécurité Règlement d'application - Modification*. Québec, Publications Québec.
- RIVM 2009. *Reference Manual Bevi Risk Assessments version 3.2*, National Institute of Public Health and the Environment (RIVM), Bilthoven, the Netherlands.
- TNO 1995. *Methods for the determination of possible damages to people and objects resulting from releases of hazardous (Green Book)*, Pays-Bas.
- TSSA 2009. *Guidelines for the Implementation of the level 2 Risk and Safety Management Plan* [En Ligne]. Technical Standard and Safety Authority, Toronto, ON, 2009. [Accédé le].

RAYONNEMENT DES BOULES DE FEU BLEVE : ENJEUX POUR L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE

Carolina Ardila-Suarez,

Jean-Paul Lacoursière et Gervais Soucy

Mercredi le 29 octobre 2025

MÉTHODE D'ÉQUIVALENT TNT

$$D = 17 * \left(0.1 * W_f * \frac{HC_f}{HC_{TNT}} \right)^{1/3}$$

Où :

- D = Distance à la surpression de 1 psig (mètres)
- W_f = Masse de la substance inflammable (propane) (kilogrammes ou livres / 2,2)
- HC_f = Chaleur de combustion de la substance (propane) (kiloJoules par kilogramme)
(Propane : 46 333 kJoule /kg)
- HC_{TNT} = Chaleur de combustion du trinitrotoluène (TNT) (4 680 kJoules par kilogramme)
- Le facteur 17 est une constante pour les dommages associés à des surpressions de 1,0 psig résultant de l'explosion de la masse de propane. Le facteur de 0,1 représente une efficacité d'explosion de 10 pour cent.