

RAPPORT D'ÉTUDE

10/03/2014

N° DRA-14-133133-02917A

**Formalisation du savoir et des
outils dans le domaine des
risques majeurs
(DRA-76)**

Ω-8

Feu torche

INERIS

*maîtriser le risque |
pour un développement durable |*

Ω8

FEU TORCHE

Direction des Risques Accidentels

LISTE DE DIFFUSION

Nom	Adresse/Service	Nb
S. DUPLANTIER	Direction des Risques Accidentels	1
S. JOLLY		1
G. LEROY		1
B. TRUCHOT		1
DOC		1
DRA		10
C.PECOULT	MEDDE	3

TOTAL 18

REPERTOIRE DES MODIFICATIONS

Révision	Relecture	Application	Modifications
PROJET	Novembre 2002		Création du document
Version 1	Juin 2003	Juin 2003	Rapport final version 1 p35 : Avertissement valeur max SEP p42 : Remarque sur calcul du facteur de forme pour jets horizontaux
Version 2	Février 2014	Mars 2014	Mise à jour de l'accidentologie Complément de la liste des modèles de feu torche Aide au choix de modèle (points forts, limites)

PRÉAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

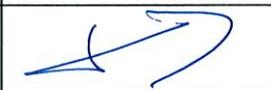
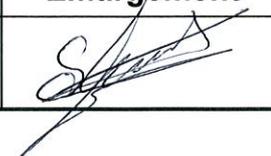
PAGE DE VALIDATION			
FEU TORCHE			
Rédaction initiale			
Auteurs	Qualité	Date	Emargement
S. JOLLY	Ingénieur Unité DIEM	16/03/2014	
G. LEROY	Ingénieur Unité DIEM	14/03/2014	
Dans le cadre de la procédure générale qualité de l'INERIS et en respect du paragraphe 14.2 du manuel qualité, ce document a fait l'objet de relectures et d'un contrôle par des vérificateurs			
Vérificateur	Qualité	Date	Emargement
B. TRUCHOT	Responsable Unité DIEM	14/3/14	
Vérificateur final	Qualité	Date	Emargement
F. PRATS	Responsable programme	14/3/14	
Approbateur	Qualité	Date	Emargement
S. DUPLANTIER	Responsable du pôle PHDS	17/3/14	

TABLE DES MATIÈRES

1. OBJECTIF ET DOMAINE D'APPLICATION.....	9
1.1 Objectif.....	9
1.2 Domaine d'application	9
1.2.1 Rappel succinct du phénomène	9
1.2.2 Démarche observée	10
2. ACCIDENTOLOGIE.....	13
2.1 Démarche	13
2.2 Analyse de l'accidentologie.....	13
2.2.1 Généralités.....	13
2.2.2 Feu torche volontaire : un moyen de prévention	14
2.2.3 Feu torche accidentel : un phénomène dévastateur	15
2.2.3.1 Origines des accidents.....	15
2.2.3.2 Causes des accidents.....	16
2.2.3.3 Conséquences des accidents	16
2.2.3.4 Moyens de protection.....	17
2.2.3.5 Accident de Ghislenghien (n°27 681) - Belgique	17
3. DESCRIPTION PHYSIQUE DU PHENOMENE	19
3.1 Généralités	19
3.2 Conditions d'occurrence d'un feu torche.....	19
3.2.1 Condition d'inflammation	21
3.2.1.1 Domaine d'inflammabilité.....	21
3.2.1.2 Energie d'inflammation	22
3.2.2 Régime d'écoulement.....	22
3.3 Nombres adimensionnels associés aux flammes de diffusion	24
3.3.1 Nombre de Froude	25
3.3.2 Nombre de Richardson	25
3.3.3 Flux de chaleur adimensionné	26
3.4 Flux thermiques	27
3.5 Impact sur l'environnement.....	28
3.5.1 Impact sur les personnes	28
3.5.2 Impact sur les structures – seuils d'effets domino.....	30

3.6 Paramètres influents	33
4. MODELISATION DES FEUX TORCHE	37
4.1 Terme source.....	37
4.1.1 Rejet gazeux	38
4.1.2 Rejet liquide	39
4.1.3 Rejet diphasique	40
4.2 Modèles empiriques et semi-empiriques de feu torche.....	40
4.2.1 Modélisation des caractéristiques géométrique de la flamme	40
4.2.1.1 Modèle de l'API RP 521.....	40
4.2.1.2 Modèle de Hawthorne.....	41
4.2.1.3 Modèle de Brzustowski	43
4.2.1.4 Modèle de Shefer.....	43
4.2.2 Prise en compte de l'influence du vent.....	45
4.2.2.1 Modèle de Brzustowski amélioré	45
4.2.2.2 Modèles de SHELL	47
4.3 Modélisation des effets thermiques	48
4.3.1 Méthodes de calcul des effets thermiques radiatifs.....	49
4.3.1.1 Méthode de la « source ponctuelle » (ou du « point source »)	49
4.3.1.2 Méthode de la « flamme solide »	52
4.3.1.3 Paramètres complémentaires	54
4.3.1.3.1 Fraction radiative	54
4.3.1.3.2 Transmissivité atmosphérique	56
4.3.2 Méthode de calcul des effets thermiques convectifs.....	57
4.4 Modèles intégraux	58
4.5 Modélisation 3D des feux torches.....	59
4.5.1 Points forts de la modélisation 3D.....	60
4.5.2 Limites de la modélisation 3D	60
4.6 Comparaison des résultats	61
4.6.1 Longueurs de flamme et flux reçus	61
4.6.2 Comparaison entre les modèles du point source et de la flamme solide ..	62
4.6.3 Influence du vent.....	63
5. CONCLUSION	65
6. GLOSSAIRE – DEFINITIONS.....	67
6.1 Glossaire.....	67

6.2 Définitions principales.....	67
7. NOMENCLATURE	73
8. BIBLIOGRAPHIE	77
9. LISTE DES ANNEXES.....	81

1. OBJECTIF ET DOMAINE D'APPLICATION

1.1 OBJECTIF

Depuis plusieurs années, le Ministère en charge de l'Environnement (actuellement, Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie) finance un programme d'études et de recherches, intitulé « Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs ».

L'objet du premier volet de ce programme est de réaliser un recueil global formalisant l'expertise de l'INERIS dans le domaine des risques accidentels. Ce recueil est constitué de différents rapports consacrés aux thèmes suivants :

- l'analyse des risques,
- les phénomènes physiques impliqués en situation accidentelle (incendie, explosion, BLEVE...),
- la maîtrise des risques d'accidents majeurs,
- les aspects méthodologiques pour la réalisation de prestations réglementaires (étude de dangers, analyse critique..).

Chacun de ces documents reçoit un identifiant propre du type « Ω -X » afin de faciliter le suivi des différentes versions éventuelles du document.

In fine, ces documents décrivant les méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels, constitueront un recueil des méthodes de travail de l'INERIS dans le domaine des risques accidentels.

1.2 DOMAINE D'APPLICATION

Le présent rapport référencé Ω -8 présente la démarche adoptée par l'INERIS pour l'étude des feux torche, un des sujets retenus dans le thème « phénomènes physiques » cité ci-dessus.

Il s'inscrit dans une démarche de valorisation du savoir-faire de l'INERIS auprès des pouvoirs publics, des industriels et du public.

Ce document constitue une révision de la version de 2003. Les principales modifications portent sur la description de nouveaux modèles de feux torches et la comparaison des résultats obtenus avec des données expérimentales. Cette comparaison permet d'établir une aide au choix de modèle en fonction des caractéristiques des feux torche considérés. Enfin, les accidents illustratifs ont été complétés par les feux torche survenus après 2003.

1.2.1 RAPPEL SUCCINCT DU PHENOMENE

Dans l'environnement industriel, les feux torche appelés également jets enflammés peuvent survenir suite à des fuites accidentelles de fluides inflammables ou à des évacuations intentionnelles de produits résiduels par l'intermédiaire de torchères.

Le système de torchère est très couramment utilisé dans l'industrie pétrolière pour évacuer sans danger d'importantes quantités de vapeurs inflammables en excès. Les torchères sont en général des feux torche contrôlés par l'industriel et qui, par conséquent, représentent peu de dangers pour l'environnement.

En revanche, les feux torche, résultat de l'inflammation de fuites accidentelles de gaz ou de liquide non contrôlées peuvent être très dévastateurs en milieu industriel. Les feux torche accidentels proviennent en général de fuites faisant suite à la rupture d'un raccord ou d'une vanne, ou bien faisant suite à la perforation d'une paroi ou à la rupture d'une canalisation. Ces fuites produisent des jets enflammés pouvant occasionner de graves avaries sur le reste de l'installation et donc, par effet domino, conduire à la propagation de l'incendie ou provoquer de nouveaux accidents tels que le phénomène de BLEVE¹ de réservoirs.

Afin de se prémunir de tels évènements, il est important de pouvoir prévoir et évaluer les conséquences associées à de tels phénomènes. Pour ce faire, il est notamment nécessaire d'estimer les caractéristiques géométriques de la flamme (longueur, largeur, décollement) et de déterminer les flux thermiques émis dans l'environnement.

1.2.2 DEMARCHE OBSERVEE

Afin de mieux cerner les risques inhérents aux feux torche et leurs conséquences, l'analyse des accidents passés constitue une source d'informations riche d'enseignements. Cette analyse permet d'identifier les principales causes et les effets de ce type d'accidents. L'accidentologie est décrite dans le chapitre 2.

Le chapitre 3 est dédié à la description physique du phénomène comme les conditions de déclenchement d'un feu torche, l'influence de la vitesse du jet sur les caractéristiques de la flamme, les différents régimes d'écoulement et enfin les conséquences thermiques d'un feu torche sur l'environnement. Les conséquences d'un feu torche sur l'environnement industriel pouvant être plus néfastes que le phénomène lui-même, les effets dominos engendrés feront l'objet d'un examen particulier. A cet égard, le chapitre 3 expose une revue bibliographique succincte des seuils critiques d'effets dominos sur les matériaux composant les structures susceptibles d'être impactées par un feu torche.

Enfin, le chapitre 4 est dédié à la modélisation du feu torche à travers la description d'une liste non exhaustive de modèles plus ou moins élaborés. Les résultats obtenus avec ces différents modèles seront ensuite comparés sur un cas simple.

Par conséquent, la démarche adoptée pour le présent rapport consacré à l'étude du phénomène de « feu torche » sera la suivante :

- chapitre 2 : accidentologie,

¹ BLEVE : Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion – Description du phénomène dans l'OMEGA 5

- chapitre 3 : description du phénomène et de ses conséquences. Seuils retenus pour les effets dominos sur les structures,
- chapitre 4 : modélisation du phénomène et comparaison des modèles

Le document est accompagné de 4 annexes :

- l'annexe 1 donne une liste d'accidents impliquant des feux torche issue de la base de données ARIA.
- les annexes 2 et 3 décrivent les modèles de feu torche élaborés par Chamberlain, Cook et Johnson.
- l'annexe 4 donne une méthode de calcul analytique des facteurs de forme basiques.

2. ACCIDENTOLOGIE

2.1 DEMARCHE

D'une manière générale, l'analyse des accidents passés est souvent riche d'enseignements. Elle permet de mettre en évidence les éléments caractéristiques d'un phénomène accidentel et particulièrement :

- les conditions d'occurrence,
- le type de produits impliqués,
- l'installation en question et son environnement,
- l'importance des conséquences associées à ce type d'accidents.

L'objet de ce chapitre est de présenter une synthèse de l'analyse d'accidents de type « feu torche » effectuée à l'aide des éléments suivants :

- listes d'accidents extraites de la base de données ARIA du BARPI (Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industrielles du MEDDE). Les listes d'accidents issues de la base ARIA sont disponibles en ANNEXE 1. Les numéros figurant dans la synthèse à suivre font référence aux accidents répertoriés dans ces annexes,
- deux articles parus dans la revue Face Au Risque (FAR) intitulés « Rupture de canalisations » et « Rupture de canalisations (II) » (respectivement n°363/mai 2000 et n°366/oct. 2000), disponibles également en ANNEXE 1.

2.2 ANALYSE DE L'ACCIDENTOLOGIE

2.2.1 GENERALITES

La liste d'accidents en ANNEXE 1 est issue d'une interrogation de la base de données ARIA du BARPI à l'aide des mots clés suivants :

- feu torche,
- feu chalumeau,
- jet enflammé,
- fuite enflammée.

Le terme « feu chalumeau » peut également être employé pour identifier un feu torche car les caractéristiques de la flamme d'un feu torche sont similaires à celles d'un brûleur industriel.

Il est à noter que l'accidentologie fournie par le BARPI en ANNEXE 1 répertorie seulement 25 accidents impliquant des feux torche alors que ce phénomène peut être à l'origine d'accidents graves en industrie chimique ou pétrolière de façon plus fréquente. Il n'est cependant pas toujours clairement identifié comme tel.

Les paragraphes suivants se donnent pour objectif de décliner les éléments généraux de l'accidentologie internationale relevés à partir de l'analyse des accidents passés.

Les accidents faisant intervenir des feux torche peuvent se classer en deux catégories :

- Dans la première catégorie, le feu torche intervient comme un moyen de contrôle utilisé pour la régulation de process (limitation des conséquences d'une fuite de substances dangereuses dans l'environnement);
- Dans la deuxième catégorie, le feu torche est un phénomène accidentel dévastateur.

2.2.2 FEU TORCHE VOLONTAIRE : UN MOYEN DE PREVENTION

Dans la première catégorie le phénomène de feu torche intervient comme un moyen technique permettant de limiter la gravité de l'accident : le feu torche agit alors en prévention d'autres accidents qui pourraient être extrêmement plus dommageables pour l'environnement tels que des explosions (UVCE²) ; par exemple pour la décompression d'installation. Ainsi, le feu torche est dans ce cas une action volontaire de sécurité. Dès lors, les risques présentés par le feu peuvent être qualifiés de risques résiduels au sens où il s'agit d'un phénomène dangereux admis pour éviter le pire. Trois exemples de ce type sont consignés dans l'ANNEXE 1.

Deux d'entre eux concernent des dérèglements d'unités dans des raffineries de pétrole qui ont déclenché un dégagement de gaz par les torchères (cas n° 19531 et 19541). La mise en marche des torchères évite ainsi de mettre en danger le reste de l'installation, le temps que le procédé retrouve une régulation correcte. A noter que la torchère doit être correctement dimensionnée, pour qu'elle fonctionne à bon escient et sans danger.

Le troisième exemple est un accident qui concernait une fuite sur une canalisation de sulfure d'hydrogène (cas n°19 917) qui s'est produite lors d'une intervention de maintenance. Les services de secours ont brûlé une partie du gaz rejeté en enflammant volontairement la fuite dans le but d'éviter la dispersion du nuage de sulfure d'hydrogène au niveau du sol. Les fumées chaudes ainsi formées ont pris une trajectoire ascendante et se sont dispersées dans l'atmosphère, limitant ainsi les effets toxiques au niveau du sol. Ainsi, sur un volume de 9 000 m³ de gaz de sulfure d'hydrogène qui se serait échappé, seuls 800 m³ se seraient dispersés à hauteur d'homme. Lorsque le feu torche est maîtrisé par les services de secours, la dispersion des gaz brûlés dans l'atmosphère peut éviter :

- une pollution notable de l'environnement au niveau du sol,
- le déplacement dans l'atmosphère d'un nuage toxique non maîtrisable pouvant potentiellement s'enflammer et générer un feu de nuage (flash-fire ou VCF³) ou une explosion (UVCE).

² UVCE : Unconfined Vapour Cloud Explosion

³ VCF : Vapour Cloud Fire

C'est pourquoi la consigne d'intervention concernant un jet enflammé est, sauf cas exceptionnels, de ne jamais souffler la flamme ce qui aurait pour conséquence de libérer des gaz inflammables et/ou toxiques. Il s'agira plutôt d'isoler la fuite.

2.2.3 FEU TORCHE ACCIDENTEL : UN PHENOMENE DEVASTATEUR

Parmi les conséquences les plus critiques liées à des feux torche survenus accidentellement, il convient de citer les pertes humaines (ouvriers, conducteurs d'engins...) et matérielles (effets dominos) entraînant généralement l'arrêt de la production sur une période plus ou moins importante. Ce type d'accidents constitue la seconde catégorie.

Le retour d'expérience fait part de feux torche accidentels survenus dans les raffineries de pétrole, les industries chimiques ou encore sur des conduites terrestres et enterrées de produits inflammables. Les feux torche peuvent donc se produire en milieu industriel (cas n° 1, n° 88, n° 7122...) et en milieu urbain (conduites de gaz de ville, cas n° 18653, n° 27681) mais également en milieu rural (fuites sur des canalisations de transport).

2.2.3.1 ORIGINES DES ACCIDENTS

Le phénomène de feu torche a pour origine un rejet de fluides combustibles, généralement à l'état gazeux ou diphasique, qui s'enflamme :

- spontanément si sa température est suffisamment élevée (cas n° 4049, 21196, 23524),
- en raison de la présence de points chauds (cas n° 6919, 8726),
- par la présence d'une étincelle liée par exemple au démarrage d'un véhicule situé à proximité (cas n° 1, 3325, 4914,...),
- par effet électrostatique (cas n°30156),
- par frottement au niveau du point de fuite dans le cas d'une fuite d'hydrogène, ce dernier ayant une Energie Minimale d'Inflammation (EMI) 14 fois plus faible que le méthane (0,02 mJ contre 0,29 mJ),
- ou encore par action de la foudre (cas n° 5678, FAR n°366).

Les produits enflammés sont divers : la liste non exhaustive s'étend des gaz tels que l'hydrogène (cas n° 88, 21196 et 25494), le propane (cas n° 1, 6919, 4914 et 30156, 27681), l'acétylène (cas n° 4049), aux liquides sous pression tels que l'huile de lubrification (cas n° 8726).

Les feux torche se produisent généralement sur des canalisations (cas n° 4914, 7128, 3325, 27681, 37747...), mais une fissure ou une perforation sur un stockage (cas n° 7122 et 6919) ou encore une vanne de purge restée ouverte (cas n° 1 et 10167) peuvent également être à l'origine d'un tel phénomène.

2.2.3.2 CAUSES DES ACCIDENTS

Les accidents répertoriés permettent d'identifier plusieurs causes de déclenchement d'un feu torche :

- la défaillance matérielle comme la corrosion de conduite (n° 3325, 4914 et 21196), des contraintes mécaniques trop fortes (n° 4914 et 21196), des fissures de soudure (n° 7122 et 8726) ou des raccordements non conformes (n°21130),
- la défaillance humaine provenant soit de travaux de maintenance et d'exploitation inhérents à la structure visée (n° 1, 10167, 18653, 25494 et 30156), soit de travaux totalement indépendants (perforation d'une canalisation par des engins de terrassement, n° 5243, 18653, FAR n°366, n° 27681),
- les agressions naturelles comme la foudre frappant une canalisation enterrée (cas n° 5678, FAR n°366),
- plus généralement, toute situation conduisant à l'apparition d'un orifice sur une canalisation ou sur une capacité sous pression.

2.2.3.3 CONSEQUENCES DES ACCIDENTS

Quelques éléments observés donnent une idée qualitative des conséquences des feux torche :

- les débits de fuite qui représentent des quantités importantes de combustible perdues (cas n° 8 726 : « chalumeau... alimenté à un débit de 250 à 300 l/min », cas n°19 917 : « La société indique qu'elle a perdu 9 000 m³ de gaz lors de l'accident en 11 h »),
- l'orientation de la flamme qui peut avoir une influence déterminante sur l'occurrence d'effets dominos (cas n° 88 : « flamme chalumeau horizontale », cas n° 8726 : « chalumeau à flamme verticale »),
- les hauteurs de flamme d'une dizaine (cas n° 5678, 3325 et 23524), de plusieurs dizaines (cas n° 88, 5243, 9516), voire de centaines de mètres (cas n°27681).
- les flux thermiques importants atteints autour du sinistre qui soulignent le caractère dévastateur du feu torche (accident n°5243 : « Les terrains sont calcinés à des distances considérables : 1400 °C à 60 m, 1100 °C à 76 m, 600 °C à 97 m, 450 °C à 125 m. », accident n°5678 : « le maïs est brûlé sur 30 m de rayon » et cas n° 4914 : « 57 bêtes [...] périssent carbonisées »).

Une des caractéristiques particulières du feu torche réside dans sa propension à entraîner des effets dominos sur les équipements alentour. A titre d'illustration, il peut être à l'origine d'une succession de phénomènes dangereux aux conséquences dévastatrices telles que :

- des BLEVE de sphères et de cigares de stockage générant des boules de feu (cas n° 1, 6919, 7122 et 7128),
- des explosions de véhicules équipés au GPL (cas n° 17776 et 18653),
- d'autres feux torche et des explosions de canalisations (cas n° 3325 et 10167),

- des explosions de capacités ayant pour conséquence des projections de missiles (fragments de canalisations, de sphères, de véhicules...) à plusieurs centaines de mètres (cas n° 1, 5243, 6919, 7122, 7128, 17776 et 27681).

2.2.3.4 MOYENS DE PROTECTION

Lors du déroulement de l'accident, des moyens de protection peuvent être mis en place par les services de secours ou même directement par les employés travaillant sur l'installation :

- refroidissement des équipements situés à proximité par des lances incendie ou des rideaux d'eau (cas n° 21196 et 23524),
- coupure de l'alimentation en produits inflammables (cas n° 88, 3325, 4049, 5243, 9516, 18653, 30156),
- mise en place d'un périmètre de sécurité (cas n°3325, 18653, 25494, 27681),
- évacuation de locaux publics tels que les écoles ou les maisons de retraite (cas n° 18653).

En pratique, l'unique moyen permettant de stopper ce phénomène dangereux est de fermer l'alimentation du combustible. Il n'y a pas d'autre moyen d'extinction si ce n'est, dans le cas d'une fuite liquide, l'explosion d'une charge pyrotechnique pour « souffler » le feu torche afin de priver la flamme d'oxygène, moyen qui a été mis en œuvre sur certains puits de pétrole en feu.

Enfin, concernant la durée des accidents, elle n'est pas systématiquement indiquée, l'importance des effets dominos engendrés en donne toutefois une indication. Elle peut varier de quelques minutes (cas n° 4049), la durée nécessaire aux services de secours pour fermer l'alimentation du produit enflammé, à plusieurs heures (cas n° 6919, 7122, 7128, 21196, 23524...) auquel cas le phénomène est susceptible de générer des effets dominos notables.

2.2.3.5 ACCIDENT DE GHISLENGHIEN (N°27 681) - BELGIQUE

Parmi les accidents de feux torches cités en ANNEXE 1, Ghislenghien en est un exemple particulièrement dévastateur qu'il est pertinent de décrire. Une violente explosion, ressentie à plusieurs km, s'est produite le 30 Juillet 2004, accompagnée d'une boule de feu qui s'est transformée ensuite en une longue torchère dont la hauteur a été évaluée entre 150 et 200 m. La durée du feu torche a été estimée à 20 min, durée nécessaire aux services de secours pour fermer l'alimentation en gaz.

La Figure 1 présente une photo de la flamme quelques minutes après l'explosion.



Figure 1 : Accident de Ghislenghien

L'explosion a créé un cratère de 10 m de diamètre et de 5 m de profondeur. Le bilan est lourd : 24 morts dont 5 pompiers et 132 blessés. La zone industrielle a été totalement dévastée sur un rayon de 200 m.

Les causes de l'accident sont liées à une agression mécanique antérieure qui aurait affaibli la paroi. Sur la base d'un rapport d'expertise, le parquet de Tournai a confirmé en Juillet 2006 l'hypothèse « d'une agression extérieure du gazoduc lors de travaux de terrassement antérieurs ».

3. DESCRIPTION PHYSIQUE DU PHENOMENE

3.1 GENERALITES

Un feu torche se caractérise [1]:

- par son aspect chimique lié aux nombreuses réactions chimiques qui s'effectuent simultanément au cours du processus de combustion entre l'oxygène de l'air (comburant) et les gaz de combustion. Ces réactions chimiques produisent généralement du dioxyde de carbone, du monoxyde de carbone, de la vapeur d'eau, des suies, et enfin des produits imbrulés.
- par la production de chaleur qui résulte des réactions chimiques exothermiques de la combustion, chaleur transmise à l'environnement sous trois formes : la diffusion, la convection et le rayonnement. Ce dernier mode de transfert thermique est particulièrement étudié dans le domaine des risques industriels.
- par le transfert de masse qui se manifeste sous deux formes : les mouvements de convection des gaz composant la flamme et les transferts de masse par diffusion (moléculaires ou turbulentes) de certaines espèces par rapport à d'autres dans le milieu de la flamme. Ce phénomène de diffusion permet le mélange intime des espèces favorisant leur contact et par conséquent les processus de combustion.

3.2 CONDITIONS D'OCCURRENCE D'UN FEU TORCHE

Lorsqu'un jet de combustible gazeux ou diphasique issu d'une fuite accidentelle ou intentionnelle liée à la défaillance d'un équipement (brèche dans une canalisation ou un réservoir, rupture guillotine ...) pénètre dans l'air ambiant au repos, le combustible se mélange à l'air par l'effet d'entraînement et de diffusion. Si ce mélange s'enflamme par l'intermédiaire d'une source d'inflammation, le feu torche prend naissance sous la forme d'une flamme de diffusion (Figure 2). Ceci revient à décrire la flamme d'un simple bec Bunsen dont la virole d'amenée d'air serait entièrement close [16].

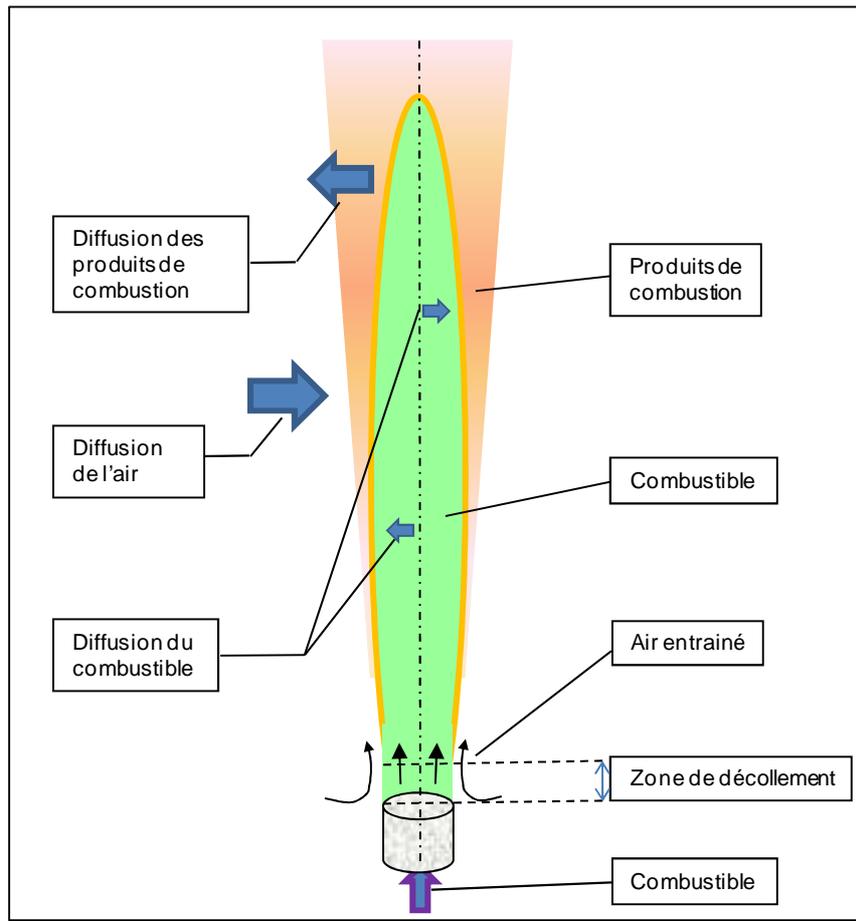


Figure 2 : Schématisation d'une flamme de diffusion

Une flamme de diffusion est définie par :

- La zone de décollement caractérisée par une absence de réaction de combustion, la concentration de combustible étant trop riche. Le phénomène est décrit dans le paragraphe 3.2.1.1 ;
- La zone de diffusion du combustible dont la forme est régie par la vitesse du combustible en sortie de brèche. Cette zone est caractérisée par une concentration élevée en combustible ;
- La zone de réactions chimiques (représentées par le trait jaune sur la Figure 2), qui séparent le milieu oxydant (l'air ambiant) situé à l'extérieur de la flamme, du milieu réducteur (le combustible) situé à l'intérieur de la flamme. Le combustible et l'air n'étant pas pré-mélangés, la combustion se produit dans la zone où comburant et combustible se mélangent dans des proportions adéquates, c'est-à-dire lorsque les concentrations du combustible dans l'air sont comprises dans le domaine d'inflammabilité du combustible ;
- La zone de diffusion des produits de combustion issus des réactions chimiques exothermiques. Ces gaz chauds, situés en aval de la flamme, prennent une trajectoire ascendante par effet de flottabilité.

3.2.1 CONDITION D'INFLAMMATION

3.2.1.1 DOMAINE D'INFLAMMABILITE

Chaque produit possède un domaine d'inflammabilité spécifique [35] représenté de manière schématique par la Figure 3.

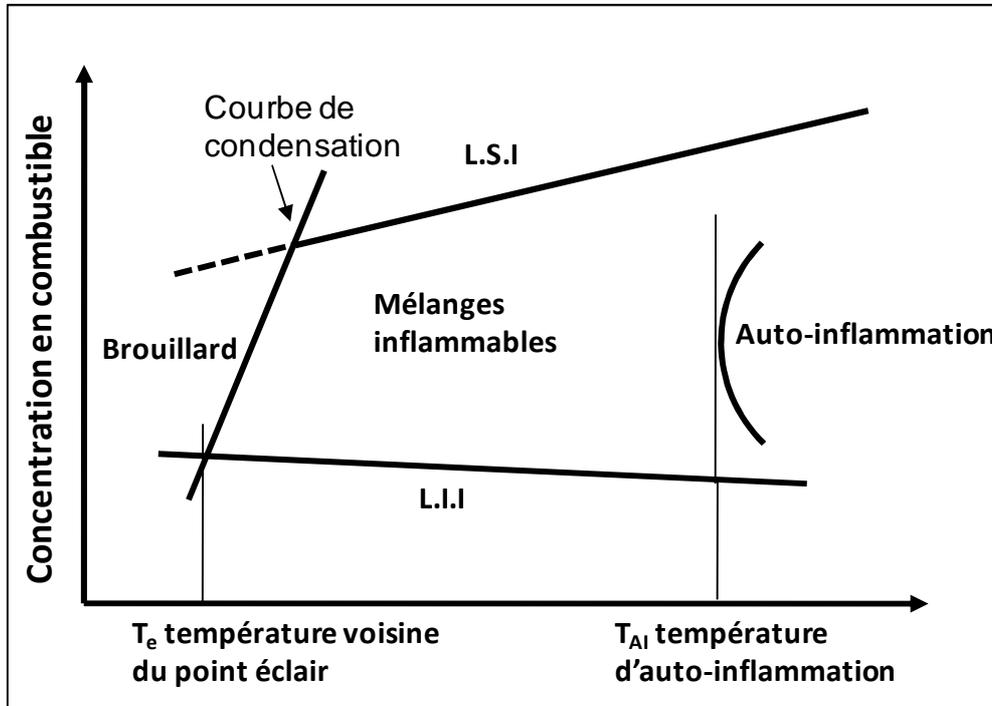


Figure 3: Représentation schématique du domaine d'inflammabilité d'après Zabetakis [35]

Ce domaine est délimité par :

- la Limite Inférieure d'Inflammabilité ou d'Explosivité (LII ou LIE) s'exprimant en % volumique de gaz dans l'air.
Au-dessous de cette limite, le mélange est trop pauvre en combustible (ou trop riche en oxygène) pour que la flamme puisse se maintenir dans le milieu gazeux,
- la Limite Supérieure d'Inflammabilité ou d'Explosivité (LSI ou LSE) s'exprimant en % volumique de gaz dans l'air.
Au-dessus de cette limite, le mélange est trop riche en combustible (ou trop pauvre en oxygène) pour que la flamme puisse se maintenir dans le milieu gazeux,
- la zone de brouillard délimitée par la courbe de condensation. Dans cette zone, le combustible sous forme gazeuse se condense en gouttelettes ce qui fait chuter la concentration en gaz disponible pour la combustion,
- la courbe d'auto-inflammation, qui correspond à une inflammation spontanée du mélange due aux températures élevées.

Il existe donc deux concentrations limites entre lesquelles le mélange combustible-air est inflammable : les Limites Inférieure et Supérieure d'Inflammabilité

(respectivement LII et LSI). La Figure 3 montre que ces deux limites varient avec la température du mélange. Plus la température augmente, plus la plage d'inflammabilité est grande et donc plus le risque d'inflammation augmente. De plus, sans source d'inflammation extérieure, le jet peut s'auto-enflammer si la température du mélange gazeux atteint la température d'auto-inflammation pour déclencher les réactions de combustion [21]. La température joue donc un rôle primordial dans le développement d'un feu torche.

La zone de décollement située à la sortie de l'orifice est une conséquence directe du domaine d'inflammabilité. Aucune combustion n'a lieu dans cette zone en raison d'une forte concentration de combustible, supérieure à la LSI et également d'un temps de mélange insuffisant. Le jet s'ouvre au fur et à mesure qu'il s'éloigne du point de fuite, alimenté par l'air entraîné ; sa concentration en combustible et sa quantité de mouvement décroissent en fonction de la distance longitudinale mais également radiale jusqu'à atteindre la zone d'inflammabilité. La flamme s'accroche alors à la périphérie du jet comme indiqué sur la Figure 2. La zone de décollement sera d'autant plus grande que la vitesse du jet est élevée en sortie d'orifice. Johnson et al [42] ont établi, à partir d'une campagne d'essais de feux torche horizontaux, une longueur de décollement directement proportionnelle à la quantité de mouvement du jet à l'origine et à la masse volumique de l'air.

3.2.1.2 ENERGIE D'INFLAMMATION

L'inflammation du mélange se produit à condition de lui fournir une certaine quantité d'énergie. Cette énergie, appelée énergie d'inflammation, peut être d'origine diverse (étincelles, flamme, foudre...) et varie selon les propriétés de la substance inflammable considérée et selon la turbulence générée par le jet. L'énergie d'inflammation d'une substance dépend en outre de la concentration en gaz inflammable dans l'air et par conséquent de la position du point d'inflammation par rapport à la brèche. A titre d'exemple, l'énergie nécessaire pour enflammer le mélange sera différente si elle est produite à proximité de la brèche ou à distance. L'énergie minimale d'inflammation correspond sensiblement à un mélange à la stœchiométrie.

Il est à noter qu'à vitesse et débit élevés, la turbulence générée dans le jet augmente l'énergie nécessaire à son inflammation.

3.2.2 REGIME D'ECOULEMENT

Le nombre de Reynolds traduit le taux de turbulence présent au sein de l'écoulement. Plus précisément, ce nombre s'interprète comme le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses.

$$\text{Re} = \frac{U_j D}{\nu} \quad (1)$$

Avec

- U_j = Vitesse du jet à l'orifice, [m/s]
- ν = Viscosité cinématique du gaz à l'orifice, [m²/s]
- D = Longueur caractéristique, [m]

Le nombre de Reynolds est généralement calculé au point d'injection, la longueur caractéristique étant le diamètre de l'orifice. Valable seulement pour les rejets

100% gazeux, ce nombre adimensionné caractérise le régime d'écoulement de la flamme.

Une flamme peut s'établir sous différents régimes d'écoulement. Elle peut être laminaire, transitoire ou pleinement turbulente. Son régime d'écoulement dépend de la vitesse du jet à l'orifice et par conséquent du nombre de Reynolds. La Figure 4 schématise la longueur de flamme et le taux de turbulence en fonction de la vitesse de sortie du jet pour un même diamètre d'orifice.

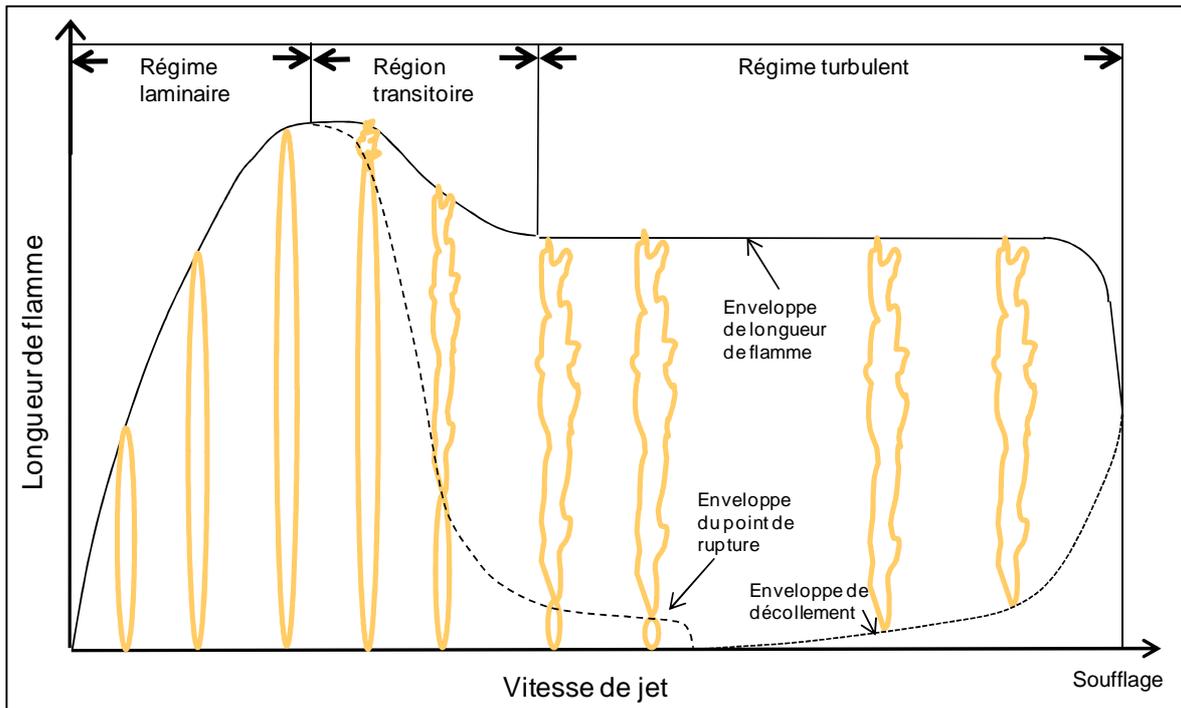


Figure 4 : Longueur de flamme d'un feu torche en fonction de la vitesse du jet (d'après Hawthorne, [22])

En régime laminaire, c'est-à-dire pour de faibles vitesses de jet, la flamme prend l'aspect d'un fuseau au contour bien défini dont la longueur augmente avec la vitesse du jet.

A partir d'une certaine vitesse seuil correspondant à la longueur maximale de flamme, l'extrémité de la flamme commence à vaciller et ce phénomène progresse dans la flamme au fur et à mesure que la vitesse du jet augmente, avec une légère diminution de la longueur de flamme. Ce comportement caractérise le régime transitoire. Cette transition entre régime laminaire et turbulent intervient pour un nombre de Reynolds supérieur à 2000. Hottel & Hawthorne [23] donnent des valeurs de ce nombre de Reynolds critique déterminant la transition entre une flamme dite « laminaire » et une autre dite « turbulente » pour différents combustibles dans le Tableau 1.

Combustible	Nombre de Reynolds critique
Hydrogène	2000
Gaz de ville	3600
Monoxyde de carbone	4900
Propane	8500
Acétylène	9500

Tableau 1 : Nombre de Reynolds critique en fonction du combustible

En régime turbulent, la flamme se décolle de l’orifice pour les raisons évoquées précédemment, à savoir qu’en sortie de brèche le temps de mélange est trop faible et la concentration en combustible supérieure à la LSE pour que le mélange s’enflamme.

La longueur de la flamme n’évolue plus en fonction de la vitesse du jet. Qualitativement, ce phénomène est lié à l’augmentation de l’entraînement d’air générée par la vitesse et la turbulence de l’écoulement ce qui induit un plissement de la flamme, une meilleure efficacité de combustion et donc une augmentation du taux de réaction [38]. Ce phénomène se produit jusqu’à la vitesse critique dite de « blow off » ou de soufflage : la turbulence dans le jet est alors trop élevée pour que la flamme ne s’accroche.

Chaque combustible possède une vitesse de jet à l’orifice à partir de laquelle la flamme n’est plus en mesure de s’accrocher à la zone de décollement. Cette vitesse est dépendante, entre autres, du diamètre du jet à l’orifice, de la vitesse de la flamme et de la masse volumique du combustible [43].

Au vu des vitesses de jet importantes liées à des pressions élevées de stockage ou de process, le régime d’écoulement des feux torches rencontrés à l’échelle industriel est généralement fortement turbulent.

3.3 NOMBRES ADIMENSIONNELS ASSOCIES AUX FLAMMES DE DIFFUSION

La vitesse du jet détermine le comportement de l’écoulement au sein de la flamme. Cet écoulement peut être dominé soit par la convection naturelle soit par la convection forcée. A titre d’exemple, un feu torche induit d’importants débits de gaz (forte convection forcée) alors qu’un feu de nappe ou de solide est plutôt dominé par la convection naturelle, la vitesse du gaz combustible étant relativement négligeable. Plusieurs nombres adimensionnels permettent de définir les flammes de diffusion.

Afin d’évaluer le paramètre qui prédomine entre les forces de flottabilité et la quantité de mouvement dans la flamme, d’une part, et entre la convection naturelle et forcée d’autre part, trois nombres adimensionnels sont décrits à la suite:

- le nombre de Froude, Fr ,
- le nombre de Richardson, Ri ,
- le flux de chaleur adimensionné.

3.3.1 NOMBRE DE FROUDE

Le nombre de Froude s'interprète comme le rapport des forces d'inertie sur les forces de pesanteur. Il se définit comme suit :

$$Fr = \frac{U^2}{gD} \tag{2}$$

Avec

- U = Vitesse du jet, m/s
- g = Accélération gravitationnelle, m/s²
- D = Dimension caractéristique du jet, m

La dimension caractéristique du jet est généralement le diamètre à l'orifice.

Les jets enflammés turbulents issus d'inflammation de fuites de conduites ou d'orifices susceptibles de se produire à échelle industrielle sont caractérisés par des nombres de Froude élevés liés aux fortes pressions de stockage ou de process mises en jeu.

Ce nombre qui permet d'évaluer l'influence des forces de flottabilité dans la flamme est généralement utilisé dans les modèles de feu torches semi-empiriques pour caractériser les dimensions de la flamme (c'est-à-dire les modèles basés en partie sur des corrélations expérimentales), modèles présentés dans le chapitre 0.

3.3.2 NOMBRE DE RICHARDSON

Ce nombre indique l'importance relative entre la convection naturelle et la convection forcée. Il s'exprime comme suit :

$$Ri = \frac{gD(\rho_0 - \rho_\infty)}{\rho_\infty U^2} \tag{3}$$

Avec

- ρ_∞ = Masse volumique de l'air ambiant, [kg/m³]
- ρ_0 = Masse volumique du combustible à l'orifice, [kg/m³]

Le lien entre le nombre de Froude et le nombre de Richardson se fait facilement :

$$Fr = \frac{\omega}{Ri} \tag{4}$$

$\omega = \frac{\rho_0 - \rho_\infty}{\rho_\infty}$ traduit l'écart des masses volumiques de l'air et du combustible à l'orifice.

Le nombre de Richardson représente les effets liés à l'évolution de la masse volumique des gaz avec la température, autrement dit il traduit le phénomène de

flottabilité dans la flamme. Ce nombre est utilisé dans certains modèles semi-empiriques pour évaluer la longueur de flamme (Cf. Chapitre 0).

3.3.3 FLUX DE CHALEUR ADIMENSIONNE

Un autre paramètre est le flux de chaleur adimensionné émis par la combustion. Il se définit comme suit :

$$\dot{Q}^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} C_{p_{\infty}} T_{\infty} \sqrt{gD} D^2} \tag{5}$$

où :

- \dot{Q} = Puissance thermique dégagée par la combustion, [W]
- $C_{p_{\infty}}$ = Capacité calorifique de l'air ambiant, [J/kg/K]
- T_{∞} = Température de l'air ambiant, [K]

Ce nombre sans dimension a été introduit par Zukoski [36] et correspond à une fonction de la racine carrée du nombre de Froude.

Finalement, le nombre de Froude et le flux de chaleur adimensionné permettent de réaliser une classification des différents types de feux et d'en estimer les caractéristiques géométriques comme la longueur de flamme. A cet égard, la Figure 5 représente le rapport longueur de flamme/diamètre d'injection en fonction simultanément du nombre de Froude et du flux de chaleur adimensionné. La longueur de flamme a été obtenue expérimentalement.

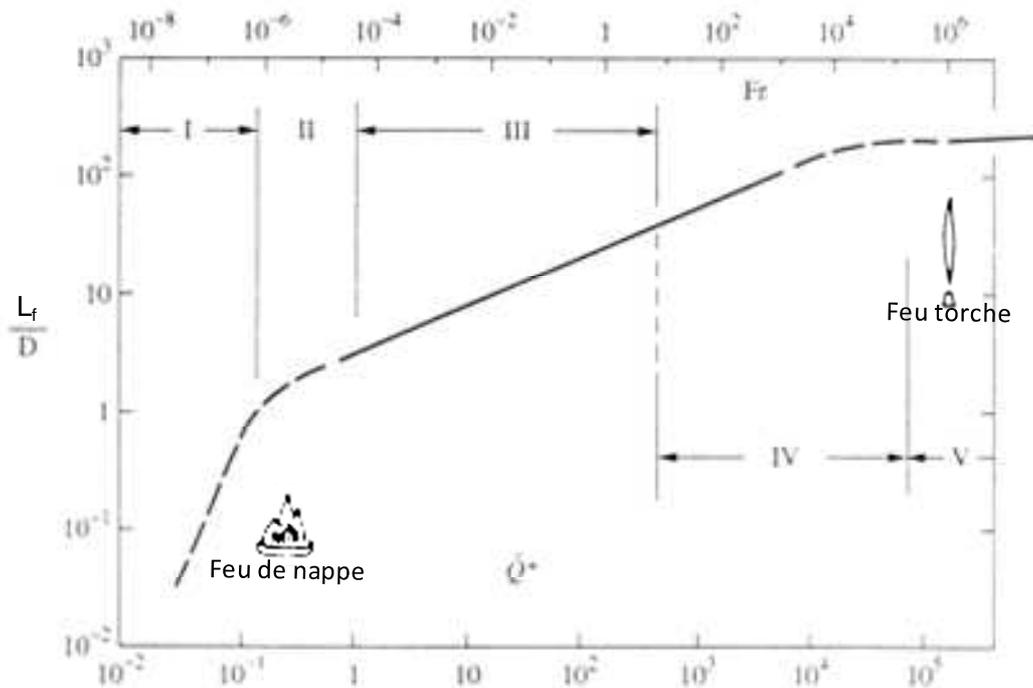


Figure 5 : Comportement de la flamme en fonction du nombre de Froude et du flux de chaleur adimensionné (d'après Zukoski, [37]).

Les régions I et II correspondent à des flammes de diffusion turbulentes dont la dynamique est plutôt dominée par la convection naturelle comme pour les feux de nappes et de solides. En revanche, les régions IV et V situées à droite du graphique correspondant aux nombres de Froude élevés se rapportent à des jets enflammés pleinement turbulents. La région centrale marque une transition entre les deux régimes.

3.4 FLUX THERMIQUES

Les effets thermiques émis par un feu torche sur son environnement dépendent principalement de la nature du combustible et de son débit au point de fuite.

Un feu torche caractérisé par une quantité de mouvement et une puissance développée élevées est susceptible d'avoir un impact dévastateur sur les cibles environnantes, même éloignées. Ses deux modes de transferts de chaleur caractéristiques sont principalement la convection forcée liée à la quantité de mouvement du jet en sortie d'orifice et le rayonnement. Ce dernier, susceptible d'impacter les cibles à distance, est une onde électromagnétique dont le spectre varie généralement des ultra-violets aux infrarouges.

La puissance totale dégagée par un feu torche s'exprime comme suit :

$$\dot{Q} = (\chi_{rad} + \chi_{conv}) \dot{m} \Delta H_c \tag{6}$$

A noter que le mode de transfert par diffusion est négligé.

Avec

χ_{rad} , χ_{conv} = Fraction radiative et convective, [-] $\chi_{rad} + \chi_{conv} = 1$

\dot{m} = Débit massique de combustible, [kg/s]

ΔH_c = Chaleur de combustion, [J/kg]

Le Tableau 2 présente un ordre de grandeur des fractions radiatives de flamme χ_{rad} pour différents types de combustibles.

Combustible	χ_{rad}	Référence
hydrogène	0,07	Schefer & al [40]
Gaz naturel	0,16	Brzustowski and Sommer [6]
Propane	0,33	Kent [41]
Butane	0,30	Brzustowski and Sommer [6]
Ethylène	0,38	Brzustowski and Sommer [6]

Tableau 2 : Ordre de grandeur de la fraction radiative de flamme pour différents combustibles

La fraction radiative émise par une flamme de diffusion turbulente est généralement inférieure à sa fraction convective. Elle varie en fonction de la nature du combustible et du taux de suies généré par la combustion. Ce taux dépend du taux de mélange dans la flamme, plus ou moins important selon la turbulence générée par la fuite. Un combustible susceptible de former une grande quantité de suie aura une fraction radiative plus élevée du fait de la propension des suies à rayonner. Le rayonnement issu d'une flamme provient essentiellement des suies incandescentes portées à haute température. A titre d'exemple, l'hydrogène peu enclin à former des suies et donc doté d'une faible fraction radiative brûle avec une flamme bleutée tandis que les hydrocarbures lourds produisent des flammes de couleur jaune provenant des particules de suies incandescentes générées par la combustion.

Lorsque la turbulence d'un jet de gaz s'accroît, autrement dit lorsque la vitesse ou le débit à l'orifice augmente, la fraction radiative du feu torche qui en résulte diminue pour deux raisons :

- d'une part, les transferts thermiques convectifs avec le milieu ambiant sont favorisés,
- d'autre part, le mélange air/gaz frais étant favorisé, la combustion plus efficace limite la formation de suies.

Dès lors, les flammes très turbulentes sont souvent caractérisées par une émissivité réduite par rapport aux flammes laminaires.

Par exemple, pour le méthane, la fraction radiative d'une flamme laminaire de diffusion représente 20 % de la puissance libérée par la combustion et se réduit à 15% lorsque la flamme devient turbulente. De même pour le propane et le butane, la fraction radiative d'une flamme laminaire de diffusion représente 30% de la puissance libérée par la combustion et se réduit à 20% lorsque la flamme devient turbulente d'après [29], [30] et [14].

L'effet est encore plus visible pour les combustibles à forte tendance de production de suies tels que l'éthylène ou l'acétylène [14].

3.5 IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT

Dans le domaine des risques industriels, les effets liés au rayonnement de la flamme sont particulièrement étudiés car ils sont susceptibles d'impacter les cibles humaines ou structurelles à distance.

3.5.1 IMPACT SUR LES PERSONNES

Les notions de seuils thermiques et de doses thermiques sont introduites dans ce paragraphe pour évaluer les distances d'effets liées à un feu torche en fonction de la puissance émise par la flamme et de la durée d'exposition des cibles.

L'estimation des effets radiatifs reçus par une population donnée exposée à un feu torche est complexe car de nombreux facteurs interviennent, dont notamment :

- l'intensité du rayonnement,
- la durée d'exposition,

- la protection apportée par les vêtements et par d'éventuels obstacles situés entre la flamme et les personnes,
- l'âge des personnes exposées.

Bien évidemment, la rapidité d'accès à des soins est également d'importance. Pour plus d'information sur le sujet, on pourra se reporter au document INERIS référencé Omega 5 [44].

Par convention, lorsque le phénomène dangereux, en l'occurrence le feu torche, est instationnaire (dépressurisation par exemple) ou a une durée inférieure à 120 s, l'approche s'effectue par dose thermique. Autrement dit, les effets thermiques dépendent d'une variable dite de charge thermique exprimée en $\phi^{4/3} \cdot t$, où ϕ est la densité de flux thermiques reçus (en kW/m²) et t la durée d'exposition à cette densité de flux (en secondes). La dose totale reçue par la cible est la somme des doses de flux radiatifs émis à chaque palier de puissance du feu torche. En revanche, l'approche par flux thermique est appliquée pour un feu torche stationnaire d'une durée supérieure à 120 s. Un feu torche est considéré comme stationnaire lorsque la durée de la phase transitoire est négligeable par rapport à la durée de la phase établie.

Pour mémoire, rappelons que dans les études réglementaires, trois seuils critiques issus de l'arrêté du 29 Septembre 2005⁴ engendrant des effets néfastes sur l'homme sont retenus :

- SEI : seuil des effets irréversibles correspondant à la zone des dangers significatifs pour la vie humaine,
- SEL : seuil des premiers effets létaux correspondant à la zone des dangers graves pour la vie humaine,
- SELS : seuil des effets létaux significatifs correspondant à la zone des dangers très graves pour la vie humaine.

Par conséquent, les seuils réglementaires retenus pour déterminer les distances d'effets liées à un feu torche se distinguent par la durée et le régime du phénomène. Ils sont présentés dans le Tableau 3.

Régime et durée du phénomène	Instationnaire ou < 120 s	Stationnaire et > 120 s
Approche	Dose thermique	Flux thermique
Unité	[(kW/m ²) ^{4/3} .s]	[kW/m ²]
	Seuils	
SEI	600	3
SEL	1000	5
SELS	1800	8

Tableau 3 : Seuils d'effets en fonction de la durée du phénomène

⁴ Arrêté du 29/09/05 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation

Remarque :

Pour un rejet de courte durée, il est convenu que le flux est émis à condition que le feu torche ait le temps de s'établir, c'est-à-dire que le front de flamme ait le temps de se déplacer de l'origine de la fuite jusqu'à la pointe du jet de combustible. Si le temps est trop court (< 3s), la flamme n'a pas le temps de s'établir et la dose reçue est alors nulle.

3.5.2 IMPACT SUR LES STRUCTURES – SEUILS D'EFFETS DOMINO

Pour les effets sur les structures, les seuils suivants sont convenus :

- 5 kW/m², seuil de destruction de vitres significatives,
- 8 kW/m², seuil des effets domino et correspondant au seuil de dégâts graves sur les structures,
- 16 kW/m², seuil d'exposition prolongée des structures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures, hors structures béton,
- 20 kW/m², seuil de tenue du béton pendant plusieurs heures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures béton,
- 200 kW/m², seuil de ruine du béton en quelques dizaines de minutes.

Pour évaluer l'impact indirect sur les personnes d'une agression thermique impactant une structure de type habitat, il s'agira d'évaluer l'augmentation de la température ambiante dans la structure liée à l'apport de chaleur par conduction.

Les installations manipulant des produits inflammables favorisent l'occurrence de feux torche du fait de la présence de canalisations et de réservoirs sous haute pression. Cependant, pour que ce type d'installation subisse de graves dommages lors de l'occurrence d'un feu torche, les flux reçus par les structures et les temps d'application doivent être nécessairement élevés (supérieurs à 10 kW/m² pour une durée d'exposition supérieure à 10 min, d'une manière générale).

Cependant, ces flux critiques dépendent de la nature même du matériau et de sa géométrie. Par exemple, pour un flux incident de 25 kW/m², le bois s'enflamme en quelques secondes alors qu'une poutrelle en acier ne subit qu'une décoloration de surface et un décollement de la peinture. Concernant la même poutrelle, la rupture ou l'effondrement survient pour un flux de 100 kW/m².

Pour mémoire, ces deux valeurs critiques de flux, 100 et 25 kW/m² ont une correspondance en terme de niveaux de dommages, dénommés respectivement dommages de niveau 1 et 2 et qui ont été définis par Van Den Bosch [34] à partir de constatations visuelles de destruction de matériaux. Ils se définissent de la manière suivante :

- Dommages de niveau 1 : Inflammation des surfaces combustibles exposées au flux radiatif et/ou rupture et/ou détérioration des structures.
- Dommages de niveau 2 : Sérieuse décoloration d'une certaine partie du matériau, décollement de la peinture et/ou déformation sensible des structures.

Il est à noter que ces deux seuils critiques sont caractéristiques d'un certain type de structure et ne sont pas applicables à des systèmes particuliers tels que des

réservoirs ou des canalisations recouvertes d'une isolation thermique dans lesquelles circulent des fluides. Ces valeurs seuils peuvent être utilisées en première approximation. Cependant, par souci de précision, le problème physique doit être appréhendé plus finement en effectuant un bilan thermique sur la structure agressée.

Pour les dommages de niveau 1 et 2 de l'acier, des températures seuils peuvent être identifiées, à savoir:

- $T_{\text{niveau 1}} = 500 \text{ °C}$,
- $T_{\text{niveau 2}} = 200 \text{ °C}$.

D'ailleurs, lorsque l'acier atteint la température de dommages de niveau 1, sa résistance mécanique est diminuée de moitié.

Ces deux dernières valeurs sont en général retenues comme seuils critiques d'effets dominos pour les structures telles que les canalisations ou les capacités composées uniquement d'acier.

Concernant les réservoirs atmosphériques d'hydrocarbures, il existe dans la littérature des indications sur des valeurs limites de flux incidents permettant d'appréhender les risques de propagation d'un incendie. Ces seuils critiques et leurs conséquences sont reportés dans le tableau ci-dessous. Toutefois, il est difficile avec ces seules données de juger des dommages causés au réservoir pour des flux incidents compris entre 12 et 36 kW/m².

Flux thermique critique	Conséquences
< 8 kW/m ²	Propagation improbable sans mesure de protection particulière
< 12 kW/m ²	Propagation improbable si refroidissement important
> 36 kW/m ²	Propagation de l'incendie au réservoir même avec un système de refroidissement

Tableau 4 : Estimation du risque incendie associé au flux thermique critique reçu par un réservoir d'hydrocarbure [51]

Il serait donc souhaitable, pour traiter plus finement le cas des réservoirs atmosphériques, de réaliser un bilan thermique sur le réservoir ce qui permettrait de déterminer l'évolution temporelle de la température de la structure en tenant compte des caractéristiques du fluide présent dans le réservoir et des caractéristiques du réservoir.

L'INERIS tient à souligner que d'autres valeurs de température sont avancées, notamment dans le cadre du programme GASAFE [19] relatif aux gaz combustibles liquéfiés. La valeur retenue dans ce programme est de 427 °C « qui correspond à la température de 700 K ou 800 °F, généralement utilisées dans la littérature anglo-saxonne comme température minimale de fragilisation de l'acier ». Cette valeur est proche de celle retenue par l'INERIS concernant les effets dominos.

Toutefois, il est à noter que la majorité des équipements d'une raffinerie (capacités, fours, canalisations...) sont conçus pour fonctionner à haute température et pression. Les aciers employés sont donc des aciers résistants à des conditions de températures élevées.

Par ailleurs, dans les raffineries, afin de réduire les pertes de chaleur dans le procédé de distillation, les équipements sont très souvent isolés thermiquement, soit par des calorifuges de type laine de roche (pour les capacités, canalisations...) soit par des couches de béton réfractaire (pour les réacteurs). Il est par conséquent nécessaire de définir les températures critiques de ces matériaux isolants. Les fabricants donnent généralement une température seuil de tenue de la laine de roche de 700 °C et une température de fusion de 1100 °C [18]. Par ailleurs, un matériau tel que le béton est considéré comme réfractaire, selon Dreux [15], s'il peut résister à des températures atteignant 1 400°C.

Le Tableau 5 résume les différentes températures critiques retenues pour la modélisation des effets dominos thermiques.

Matériau	Température critique de tenue du matériau	Température critique de décoloration ou de légère déformation du matériau
Acier	500 °C	200 °C
Isolant type laine de roche	750 °C	Non définie
Couche isolante de béton réfractaire	Comprise entre 1 200 °C et 1 500 °C	Non définie

Tableau 5 : Températures critiques de différents matériaux.

Il est important de noter que les structures considérées peuvent être constituées de plusieurs épaisseurs de matériaux différents (exemple : une canalisation en acier calorifugée par de la laine de roche). Ces différentes épaisseurs se détruiront au fur et à mesure que les températures critiques de rupture de chaque matériau seront atteintes. Un bilan thermique réalisé sur la cible considérée permettra alors de déterminer l'évolution en température du ou des matériaux constituant la cible en fonction du temps et d'estimer la température critique de rupture (ou le flux critique de rupture) du système. Il s'agira également d'évaluer :

- l'impact de la présence éventuelle de gaz à l'intérieur de la structure dont l'échauffement pourrait entraîner des élévations non négligeables de pression,
- l'impact de la présence de brides particulièrement sensibles dont la rupture pourrait entraîner des fuites. Il est rappelé que leur tenue au feu est généralement plus faible d'un facteur 2 à 3 que celle du système,
- l'augmentation potentielle des contraintes mécaniques, en cas d'assemblages complexes, liée aux dilatations thermiques.

Au final, cette méthode permettra d'évaluer la vulnérabilité de la cible de façon plus précise qu'en se basant sur des seuils critiques préétablis.

A noter que le rapport d'étude INERIS [54] décrit le taux de détérioration de certains matériaux en fonction de l'intensité de l'agression thermique. Ce rapport donne aussi les principes de calcul de tenue des structures pouvant servir notamment à l'évaluation des effets dominos.

Remarque :

Dans le cas d'effets combinés concomitants thermique / surpression, il s'agira, dans les calculs de bilan thermique, de prendre en compte la diminution de la tenue mécanique des structures liée aux effets de surpression.

3.6 PARAMETRES INFLUENTS

Les différents paramètres influençant le comportement des jets enflammés sont :

- Les conditions atmosphériques (vent, stabilité atmosphérique, température ambiante, ...),
- l'orientation de la fuite,
- la hauteur du rejet,
- la présence d'obstacles dans l'environnement du jet.

Seule l'influence du vent sera détaillée dans le présent document.

Les fuites accidentelles à l'origine de feux torche se produisent généralement en milieu ouvert et sont par conséquent soumises aux conditions extérieures (température ambiante, vent, humidité relative). Le vent est un paramètre majeur qui peut modifier sensiblement la géométrie du jet enflammé et par conséquent ses effets sur l'environnement. Pour prédire au mieux les distances d'effets induites par un feu torche, il est nécessaire d'intégrer ce paramètre dans la modélisation du phénomène (Cf. chapitre 0).

La Figure 6 montre un exemple de feux torche soumis ou non au vent : le jet enflammé a tendance à se coucher et à changer de forme. Les effets thermiques induits par une flamme couchée sont potentiellement plus dévastateurs puisque l'angle solide vu par la cible en champ proche est susceptible de s'accroître et la distance séparant la flamme de la cible diminue.

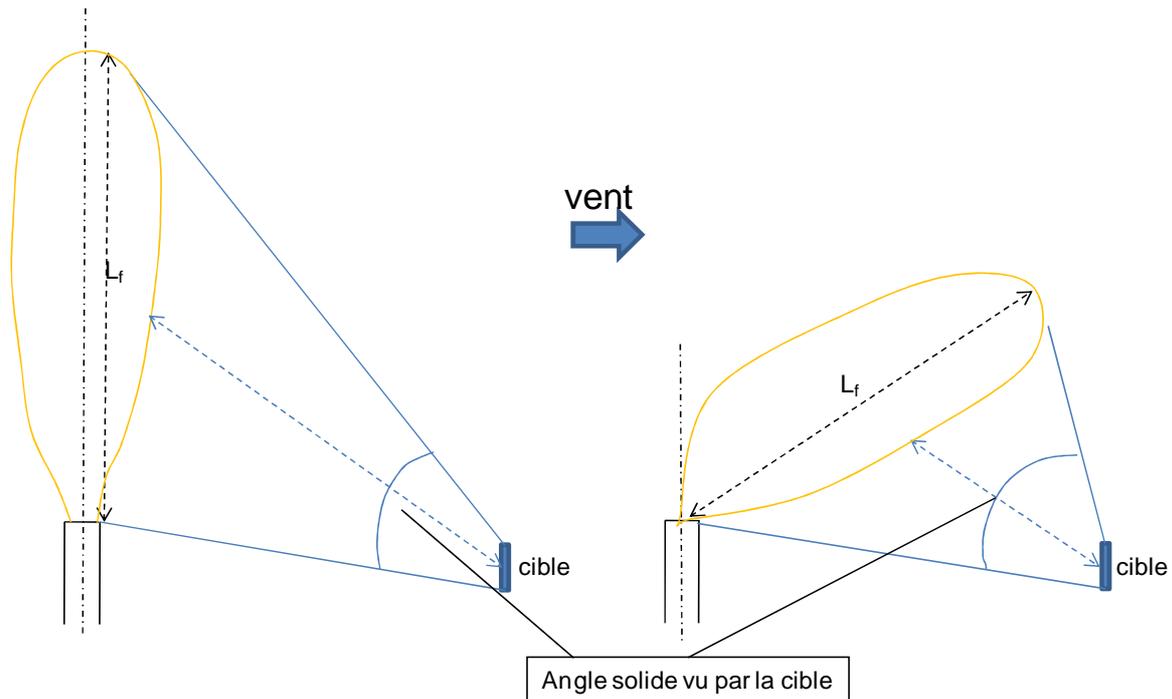


Figure 6 : Géométrie du feu torche soumis ou non à un vent

Afin d'étudier l'effet du vent sur un feu torche, Brzustowski [7] et Gollahalli [20] ont conduit une série d'essais en tunnel impliquant des flammes de diffusion d'hydrogène et de propane soumises à un écoulement d'air transversal. Ils ont pu observer que l'intensité du vent avait un impact non négligeable sur la forme de la flamme.

L'impact d'un écoulement d'air transverse à faible vitesse sur une flamme se traduit par la réduction de sa longueur ; puis au fur et à mesure que la vitesse d'écoulement d'air augmente, la longueur de flamme augmente à nouveau. Finalement, peu avant que l'extinction ou le « soufflage » de la flamme ne se produise, pour une très forte intensité de vent, la flamme tend à diminuer de nouveau jusqu'à disparaître totalement.

Ce comportement peut s'expliquer par les conditions particulières d'entraînement d'air et de stabilité de flamme générées par le vent. Initialement, un vent transversal a pour effet de créer des forces de cisaillement le long de la flamme, lorsque le jet se retrouve légèrement incliné. Ce phénomène induit un entraînement d'air plus important ainsi qu'un meilleur mélange entre le combustible et l'air. Par conséquent, la combustion est plus efficace et la longueur de flamme diminue. Lorsque la vitesse du vent augmente, l'entraînement d'air reste toujours aussi important dans la zone proche de la sortie du jet mais en revanche devient nettement plus faible dans la partie couchée de la flamme. Dans cette configuration, la longueur de flamme augmente avec la vitesse du vent par étirement. Finalement, lorsque la vitesse du vent est très élevée, la diffusion du combustible dans l'air augmente et sa concentration devient rapidement inférieure à la LIE. La longueur de flamme diminue donc de nouveau de façon critique jusqu'à l'extinction.

En général, les modèles les plus élaborés prenant en compte l'effet du vent sont simplifiés et supposent que le vent a seulement tendance à réduire la longueur du jet enflammé, l'effet d'inclinaison restant généralement prédominant.

Le chapitre suivant présente les principaux modèles de la littérature aujourd'hui utilisés qui permettent de modéliser et de mieux appréhender le phénomène de feu torche.

4. MODELISATION DES FEUX TORCHE

L'objet de ce chapitre est de présenter différents modèles, empiriques, semi-empiriques ou intégraux permettant de déterminer les caractéristiques d'un feu torche. L'application de ces modèles est illustrée à travers quelques exemples pratiques.

La description et les caractéristiques physiques des feux torche accidentels et des torchères pétrolières sont similaires à celles des jets enflammés turbulents (plus rarement, laminaires) en phase gazeuse, étudiés à l'échelle du laboratoire. Différentes études ont ainsi permis d'acquérir une bonne compréhension du phénomène et de modéliser analytiquement les différentes caractéristiques du feu torche. Lors de la fuite d'un gaz inflammable stocké sous pression, le jet libre qui en résulte, s'il s'enflamme, se transforme en feu torche qui prend la forme d'un tronc de cône.

Le paragraphe 4.1 s'attachera à décrire de manière concise la méthode de détermination du terme source, à savoir les principaux paramètres caractérisant le feu torche à sa source, tels que la vitesse, le débit du rejet ou la température au point de fuite.

La première famille de modèles se focalise sur la détermination de la longueur de flamme sous régime d'écoulement turbulent (API RP 521 [2], Hottel & Hawthorne [23], Brzustowski [6] et Brzustowski & al. [7]). Ces modèles sont décrits dans le paragraphe 4.2.1.

Puis, trois modèles semi-empiriques (Chamberlain [9], Cook [11], Johnson, [42]) plus élaborés permettant de déterminer la géométrie complète de la flamme (longueur, largeur, décollement) en fonction de l'intensité du vent sont décrits. Le modèle de Johnson, utilisé seulement pour les jets horizontaux en phase gazeuse, permet de représenter l'effet de flottabilité qui donne l'incurvation à la flamme. Ces modèles sont présentés dans le paragraphe 4.2.2.

Ensuite, à partir des caractéristiques géométriques de la flamme déterminées de manière plus ou moins complète selon le modèle utilisé, les flux radiatifs émis dans l'environnement peuvent être définis au moyen de deux méthodes, la méthode du point source et la méthode de la flamme solide, présentées dans le paragraphe 4.3.

Enfin, les grands principes du modèle intégral seront décrits dans le paragraphe 4.4 et la modélisation 3D sera abordée dans le paragraphe 4.5.

Au final, des exemples de calculs seront discutés dans le paragraphe 4.6 afin de comparer les différents modèles.

4.1 TERME SOURCE

Les modèles de feu torche ont pour données d'entrée les caractéristiques du combustible au point de rejet telles que la vitesse, le débit et la température. Ces caractéristiques sont directement dépendantes de la pression régnant au point de fuite, de la température de stockage et de la taille de fuite.

Les différents types de rejets, à savoir gazeux, liquides ou diphasiques sont rappelés dans les paragraphes suivants. Le lecteur pourra se reporter au document INERIS référencé Omega 19 [45] pour obtenir plus d'informations à ce sujet.

4.1.1 REJET GAZEUX

Le diamètre effectif D_s est un concept largement utilisé en modélisation de jet; il représente, pour un écoulement choqué, autrement dit en régime supersonique, le diamètre virtuel d'un orifice libérant de l'air de masse volumique ρ_a à un débit \dot{m} et à la vitesse u_j . Il s'écrit pour un rejet gazeux :

$$D_s = d_j \left(\frac{\rho_j}{\rho_\infty} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{4\dot{m}}{\pi\rho_\infty u_j} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

u_j = Vitesse à l'orifice, [m/s]

ρ_∞ = Masse volumique de l'air ambiant, [kg/m³]

d_j = Diamètre d'expansion, [m]

d_j est le diamètre de l'orifice considéré en régime subsonique.

A noter que le régime supersonique est généralement rencontré à l'échelle industrielle.

Par ailleurs :

$$\rho_j = \frac{P_\infty W_g}{RT_j} \quad (8)$$

ρ_j = Masse volumique du gaz à l'expansion, [kg/m³]

T_j = Température à l'expansion, [K]

R = Constante des gaz parfaits = 8,314, [J/mol K]

W_g = Masse molaire du gaz, [kg/mol]

Le paramètre D_s contient toutes les informations relatives à la fuite.

T_j et u_j sont données par les équations suivantes :

$$T_j = T_{res} \left(\frac{P_\infty}{P_{res}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (9)$$

$$u_j = M_j \left(\gamma R \frac{T_j}{W_g} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{10}$$

A noter que dans le modèle implémenté dans le logiciel Phast [52], la vitesse en sortie de zone d'expansion est limitée à 500 m/s.

Puis :

$$M_j = \left[\frac{(\gamma-1) \left(\frac{P_c}{P_\infty} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} - 2}{\gamma-1} \right]^{\frac{1}{2}} \tag{11}$$

Et

$$P_c = P_{res} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \tag{12}$$

- T_{res} = Température de stockage, [K]
- P_∞ = Pression de l'air ambiant, [Pa]
- P_{res} = Pression de stockage, [Pa]
- P_c = Pression statique, [Pa]
- γ = Ratio des chaleurs spécifiques, [-]
- M_j = Nombre de Mach à l'orifice, [-]

4.1.2 REJET LIQUIDE

Le débit massique d'un rejet accidentel de liquide issu d'une brèche en ras de parois se calcule à partir de la formule déduite du théorème de Bernoulli. Si le liquide s'écoule dans un réseau hydraulique avant d'être émis à l'air libre, les pertes de charge sont prises en compte. Le document INERIS référencé Omega 19 [45] présente les différentes équations utilisées.

A noter que les rejets 100% liquide conduisent à la formation d'un feu torche sous réserve que les gouttelettes soient suffisamment fractionnées pour générer un aérosol inflammable. En outre, les fuites liquides conduisent à la formation d'une flaque au sol susceptible de s'enflammer pour former un feu de nappe.

4.1.3 REJET DIPHASIQUE

Dans ce cas, une attention particulière doit être portée à la détermination de l'état thermodynamique du produit à la brèche. En effet, la rupture d'une canalisation contenant la phase liquide d'un fluide diphasique provoque une détente du liquide qui commence à vaporiser à l'intérieur des tuyauteries en amont de la section de fuite. Après la brèche, un jet diphasique se formera.

Il existe plusieurs approches pour évaluer le débit à la brèche que nous ne détaillerons pas ici.

Concernant le diamètre effectif de la fuite, Cook & al. [11] ont adapté le modèle de Chamberlain [9] en modifiant l'expression du diamètre effectif de la source telle que :

$$D_s = d_j \sqrt{\frac{\rho_j}{\rho_{T_{sat}, Vap}}} \quad (13)$$

Où :

$$\rho_{T_{sat}, Vap} = \text{Masse volumique du liquide à température saturante et à pression ambiante, [kg/m}^3\text{]}$$

4.2 MODELES EMPIRIQUES ET SEMI-EMPIRIQUES DE FEU TORCHE

Les différents modèles empiriques et semi-empiriques présentés dans ce document sont les modèles de :

- L'API RP 251,
- Hawthorne,
- Brzustowski,
- Shefer,
- Shell.

4.2.1 MODELISATION DES CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUE DE LA FLAMME

4.2.1.1 MODELE DE L'API RP 521

En se basant sur différents résultats expérimentaux de longueur de flamme en fonction de la puissance calorifique liée au débit de gaz à l'orifice, Figure 7, l'UFIP (Union Française des Industries Pétrolières) a mis en place la corrélation empirique suivante :

$$L_f = 2,24 \cdot 10^{-3} (\dot{Q})^{1/2} \quad \text{avec } 30 \text{ MW} \leq \dot{Q} \leq 10^4 \text{ MW} \quad (14)$$

Où :

$$\dot{Q} = \dot{m} \Delta H_c = \text{Puissance dégagée par la combustion, [J/s]}$$

- \dot{m} = Débit massique de combustible, [kg/s]
- ΔH_c = Chaleur de combustion, [J/kg]

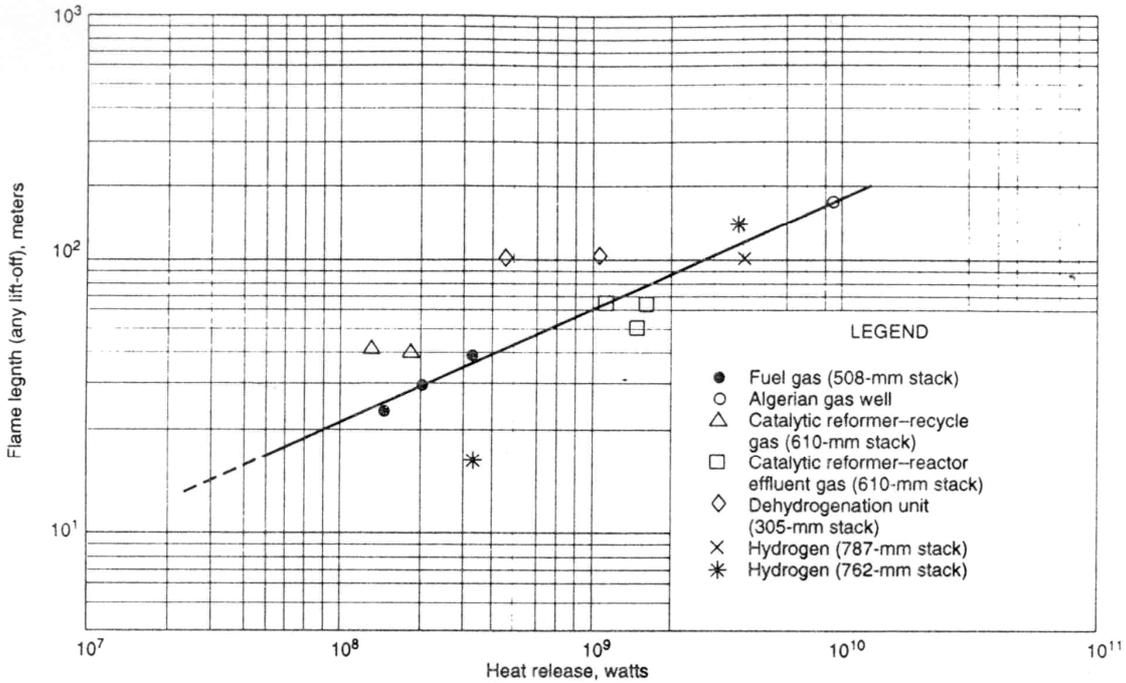


Figure 7 : Longueur de flamme en fonction de la puissance d'un feu torche (d'après [2])

Bien que le modèle de l'API RP 521 soit une corrélation basée uniquement sur l'expérimentation ne traitant que des rejets gazeux, elle permet cependant d'obtenir aisément un ordre de grandeur de la longueur de flamme à partir du débit de combustible au point de fuite. L'application de cette méthode est toutefois limitée au domaine de validité de la corrélation, établie pour des puissances de flamme comprises entre 30 et 10 000 MW, autrement dit pour des débits de gaz compris entre 1 et 250 kg/s. Ce domaine de validité couvre donc une partie des feux torche susceptibles de se produire à l'échelle industrielle.

4.2.1.2 MODELE DE HAWTHORNE

Le régime de turbulence d'un feu torche est généralement « pleinement turbulent ». Concernant ce type de flamme, les premiers essais et modèles théoriques sur les longueurs de flamme ont été développés par Hawthorne & al [22]. Ces essais ont conduit à une expression de la longueur de flamme pour les jets gazeux turbulents enflammés dans un air initialement au repos :

$$\frac{L_T}{d_j} = \frac{5,3}{C_T} \left[\frac{T_F}{\alpha_T T_j} \left(C_T + (1 - C_T) \frac{M_a}{M_f} \right) \right]^{1/2} \tag{15}$$

Où :

- L_T = Longueur de la partie turbulente de la flamme, [m]

- d_j = Diamètre du jet à l'orifice, [m]
- T_F = Température adiabatique de flamme, [K]
- T_j = Température du jet à l'orifice, [K]
- M_a, M_f = Masse molaire de l'air ambiant et du combustible, [kg/mol]
- α_T = Nombre de moles de réactifs sur le nombre de moles de produits de combustion à la stœchiométrie, [-]
- C_T = Concentration volumique de combustible dans l'air à la stœchiométrie, [-]

Cette expression s'applique aux feux torche turbulents dominés par la convection forcée (Nombre de Froude élevé). Elle donne des résultats en bon accord avec les mesures faites sur les flammes turbulentes pour un large panel de gaz (Kanury [26], Lewis & Von Elbe, [27]) et montre que la longueur de flamme est linéairement dépendante du diamètre d'injection mais indépendante du débit volumique.

Le Tableau 6 présente les paramètres C_T , α_T et T_F/T_j (paramètres intrinsèques à chaque combustible) pour quelques hydrocarbures gazeux.

Produits combustibles	C_T	α_T	T_F/T_j
Méthane	0,091	1	7,45
Ethane	0,054	0,97	7,47
Ethène	0,074	1,04	9,00
Propane	0,038	0,96	7,56
Butane	0,030	0,96	7,52

Tableau 6 : Valeurs des caractéristiques de combustion pour différents hydrocarbures (d'après SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, [33])

Les données du Tableau 6 peuvent se résumer comme suit :

- Le paramètre C_T est nettement inférieur à l'unité,
- Le paramètre α_T est approximativement égal à l'unité,
- Le ratio T_F/T_j a une valeur proche de 8 pour un rejet de combustible initialement à une température de l'ordre de 298 K.

L'équation peut se réduire à sa plus simple expression pour les principaux hydrocarbures gazeux en remplaçant les paramètres par leur valeur respective. De par ces considérations, l'équation (15) peut être approximée comme suit :

$$\frac{L_T}{d_j} = \frac{15}{C_T} \left(\frac{M_a}{M_f} \right)^{1/2} \tag{16}$$

4.2.1.3 MODELE DE BRZUSTOWSKI

Brzustowski et al [6] et [7] propose un critère sur la concentration en combustible. Selon l'auteur, cette dernière est égale à la limite inférieure d'inflammabilité au sommet des flammes de diffusion fortement turbulentes (valables pour les très hauts nombres de Reynolds de l'ordre de 10^7). Ainsi, en suivant ce critère, la longueur de flamme L_f pour des jets dominés par la convection forcée peut être calculée au moyen de l'expression suivante :

$$\frac{L_f}{d_j} = \frac{Y_{fj}}{0,32} \left(\frac{\rho_j}{\rho_a} \right)^{1/2} \left[I + \frac{M_a}{M_f} \left(\frac{I}{0.297 C_L} - I \right) \right] \quad (17)$$

- Y_{fj} = Fraction massique du combustible dans le jet à l'orifice, [-]
- ρ_j, ρ_a = Masse volumique du combustible à l'orifice et de l'air ambiant, [kg/m³]
- C_L = Concentration volumique du combustible à la LIE [-]

Par ailleurs, pour des hydrocarbures dont la valeur du C_L est proche de 5 % et celle du rapport M_a/M_f proche de l'unité, l'expression peut se simplifier de la manière suivante:

$$\frac{L_f}{d_j} = \frac{10,5}{C_L} \left(\frac{M_a}{M_f} \right)^{1/2} \quad (18)$$

A noter que l'équation (18) ressemble fortement à l'équation (16) obtenue par Hawthorne & al. [22]. Il convient de rappeler que l'équation (18) est valable uniquement pour les hydrocarbures. Il est plus prudent d'utiliser l'équation (17) pour calculer la longueur de flamme associée à des fuites de combustibles autres que les hydrocarbures.

4.2.1.4 MODELE DE SHEFER

Shefer et al [41] définissent la longueur de flamme comme suit :

$$L_f = \frac{L^* \cdot D_s}{f_s} \quad (19)$$

Où :

- L^* = Longueur de flamme adimensionnée, [-]
- f_s = Fraction massique du combustible à la stœchiométrie, [-]
- D_s = Diamètre effectif défini dans paragraphe 4.1.1, [m]

Par ailleurs, la longueur de flamme adimensionnée L^* se définit comme suit :

- pour un jet dominé par la convection naturelle ($Fr_f < 5$) :

$$L^* = \frac{13.5 Fr_f^{\frac{2}{5}}}{(1 + 0.07 Fr_f^2)^{\frac{1}{5}}} \tag{20}$$

- pour un jet dominé par la convection forcée ($Fr_f > 5$) :

$$L^* = 23 \tag{21}$$

La corrélation liant la longueur de flamme adimensionnée au nombre de Froude selon Kalghatgi [25] est présentée sur la Figure 8.

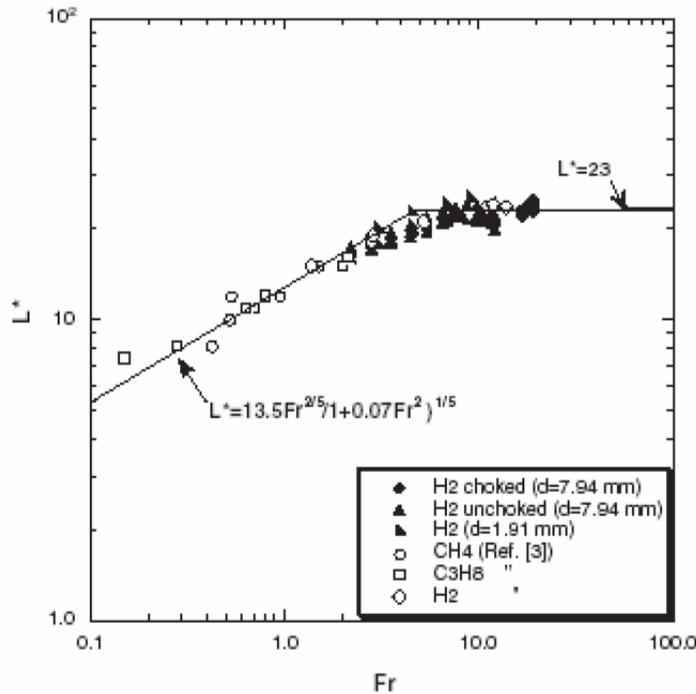


Figure 8 : Corrélation liant la longueur de flamme au nombre de Froude (d'après Kalghatgi, [25])

Enfin, le nombre de Froude de la flamme issu des travaux de Delichatsios [14] se définit à l'aide de l'expression suivante:

$$Fr_f = \frac{u_j f_s^{\frac{3}{2}}}{\left(\frac{\rho_j}{\rho_\infty}\right)^{\frac{1}{4}} \left[\left(\frac{T_f - T_\infty}{T_\infty}\right) g d_j \right]^{\frac{1}{2}}} \tag{22}$$

où :

T_f = Température adiabatique de flamme, [K]

T_∞ = Température ambiante, [K]

Il est à noter que le modèle de Shefer s’applique uniquement aux rejets 100% gazeux.

Dans son modèle, Shefer définit le diamètre de la flamme tel que :

$$l_f = \alpha L_f \tag{23}$$

Le coefficient α est égal à 0,26 pour les flammes d’hydrocarbure d’après Chamberlain [9] et a été mesuré à 0,17 pour les flammes d’hydrogène d’après Shefer [41]. A noter que ces valeurs, données à titre indicatif, peuvent être appliquées dans les autres modèles.

4.2.2 PRISE EN COMPTE DE L’INFLUENCE DU VENT

En général, les modèles semi-empiriques prenant en compte l’effet du vent sont simplifiés. Ils évaluent toutefois l’angle d’inclinaison de la flamme et sa longueur en fonction de l’intensité du vent.

4.2.2.1 MODELE DE BRZUSTOWSKI AMELIORE

En reprenant des données obtenues en tunnel et en les comparant à des tests à échelle réelle [8], Brzustowski a proposé une procédure de calcul pour déterminer les caractéristiques d’une flamme (par rapport à l’origine du jet) soumise à un vent transversal. Ces caractéristiques sont repérées sur la Figure 9.

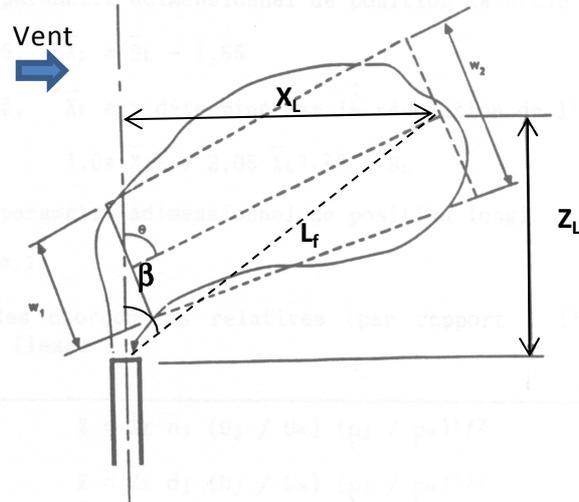


Figure 9 : Caractéristiques principales d'une flamme sous l'effet du vent

La longueur de flamme et son angle d'inclinaison par rapport à l'axe vertical sont donnés par les expressions suivantes :

$$L_f = \sqrt{X_L^2 + Z_L^2} \tag{24}$$

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{X_L}{Z_L}\right) \tag{25}$$

Les coordonnées de l'extrémité de la flamme sont alors données par les expressions suivantes.

$$X_L = \bar{X}_L d_j \left(\frac{u_j}{u_w}\right) \left(\frac{\rho_j}{\rho_a}\right)^{1/2} \tag{26}$$

$$Z_L = \bar{Z}_L d_j \left(\frac{u_j}{u_w}\right) \left(\frac{\rho_j}{\rho_a}\right)^{1/2} \tag{27}$$

Avec

$$\bar{Z}_L = 2,04 \bar{X}_L^{0,28} \tag{28}$$

Pour obtenir l'abscisse adimensionnée de la flamme \bar{X}_L , la concentration volumique de combustible adimensionnée à la LIE est nécessaire :

$$\bar{C}_L = C_L \left(\frac{u_j}{u_w}\right) \left(\frac{M_f}{M_a}\right) \tag{29}$$

où u_w est la vitesse de vent et C_L la concentration volumique à la LIE. Les autres paramètres ont déjà été décrits précédemment et gardent donc la même signification.

Le paramètre \bar{S}_L se détermine comme suit:

$$\text{Si } \bar{C}_L < 0,5 \Rightarrow \bar{S}_L = 2,04(\bar{C}_L)^{-1,03} \quad (30)$$

$$\text{Si } \bar{C}_L \geq 0,5 \Rightarrow \bar{S}_L = 2,71(\bar{C}_L)^{-0,625} \quad (31)$$

Et enfin, \bar{X}_L se détermine en résolvant les équations suivantes :

$$\text{Si } \bar{S}_L > 2,35 \Rightarrow \bar{X}_L = \bar{S}_L - 1,65 \quad (32)$$

$$\text{Si } \bar{S}_L \leq 2,35 \Rightarrow 1,04 \bar{X}_L^2 + 2,05 \bar{X}_L^{0,28} = \bar{S}_L \quad (33)$$

4.2.2.2 MODELES DE SHELL

Les modèles de « SHELL » ont été élaborés par le centre de recherche de Shell à Thornton [9], [11], [42]. Ces modèles dits « semi-empiriques » ont été validés par des essais effectués par la Société Shell sur des gaz de pétrole liquéfiés (GPL) et sur du gaz naturel [12], [13], [24], [25]. Ces tests ont été réalisés d'une part à petite échelle dans des galeries incendie et d'autre part, à l'échelle réelle directement sur site (raffineries, plate-forme offshore...).

Les modèles tiennent compte :

- de la pression et de la température de stockage du gaz,
- de la nature du gaz,
- de la température extérieure,
- du degré d'humidité,
- de l'élévation du rejet,
- de la vitesse du vent,
- de la direction du rejet et du vent,
- de l'angle entre l'axe du jet et le vent.

A travers des équations basées sur la physique et des corrélations expérimentales, les modèles permettent de définir une géométrie de flamme assimilée à un tronc de cône décollé du point de fuite.

L'enveloppe de la flamme est assimilée à un tronc de cône défini par sa longueur R_L , la largeur de ses deux bases W_1 et W_2 , et son angle d'inclinaison α par rapport à l'axe de l'orifice (Figure 10).

La Figure 10 représente le schéma général du jet enflammé et les différents paramètres calculés dans les modèles de Shell.

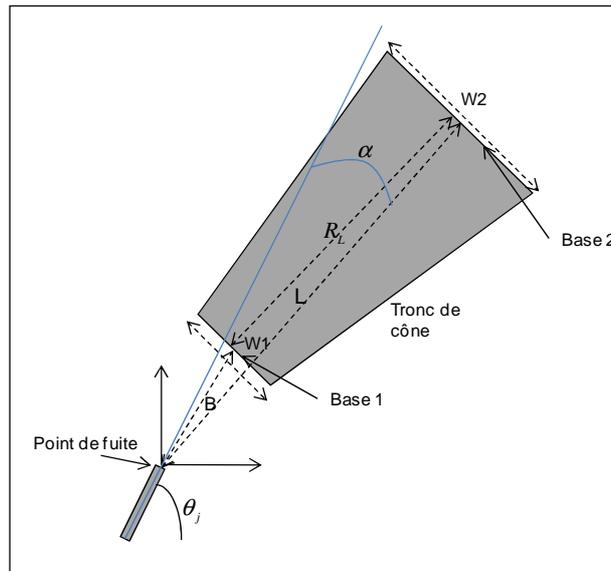


Figure 10 : Représentation schématique du jet enflammé – Modèles de Shell

Les modèles de Cook [10] et de Chamberlain [9] ont été conçus pour modéliser des rejets gazeux ou diphasiques, verticaux, horizontaux ou inclinés. Le modèle de Johnson, quant à lui, a été élaboré pour modéliser uniquement les feux torche issus de rejets horizontaux en phase gazeuse. Il prend en compte l'effet de flottabilité qui donne l'incurvation à la flamme.

Les ANNEXE 2 et ANNEXE 3 détaillent la méthodologie de calcul des caractéristiques géométriques de flamme d'après les modèles de Chamberlain, Cook et Johnson.

Les modèles de Shell identifient également la longueur de décollement de la flamme (annoté B sur la Figure 10), contrairement aux autres modèles décrits plus haut qui ne différencient pas la longueur de flamme du décollement puisque ce dernier est calculé implicitement. Ce paramètre est décrit dans les ANNEXE 2 et ANNEXE 3.

4.3 MODELISATION DES EFFETS THERMIQUES

Les effets thermiques émis par un feu torche peuvent être de deux sortes, radiatifs et convectifs.

Si la cible n'est pas impactée par le feu torche, c'est-à-dire si elle ne se trouve pas dans le proche voisinage de la flamme, elle ne sera atteinte que par un flux radiatif. En revanche, à proximité de la flamme, la cible sera susceptible d'être impactée également par le flux convectif lié à l'écoulement forcé des gaz brûlés.

Ainsi, les paragraphes suivants décrivent :

- deux méthodes de caractérisation des effets radiatifs reçus par une cible située en champ proche ou lointain par rapport à la flamme, l'une dite de la « source ponctuelle », l'autre dite de la « flamme solide »,
- une méthode permettant d'estimer le flux convectif que peut recevoir un obstacle quelconque directement impacté par le feu torche.

4.3.1 METHODES DE CALCUL DES EFFETS THERMIQUES RADIATIFS

4.3.1.1 METHODE DE LA « SOURCE PONCTUELLE » (OU DU « POINT SOURCE »)

La première méthode d'évaluation des effets thermiques radiatifs dite « du point source » (ou « source ponctuelle ») est basée sur une approche simplifiée du rayonnement et permet d'obtenir une première estimation des distances d'effets thermiques à partir de la longueur de flamme et de son inclinaison. Elle peut aussi bien être associée à un modèle simple comme le modèle empirique de l'API RP 521 à un modèle plus complexe comme ceux de SHELL. Elle consiste à assimiler la flamme à une source ponctuelle centrée sur son axe, centre géométrique du feu torche (Figure 11) et qui est supposée rayonner avec une puissance équivalente à celle de la flamme.

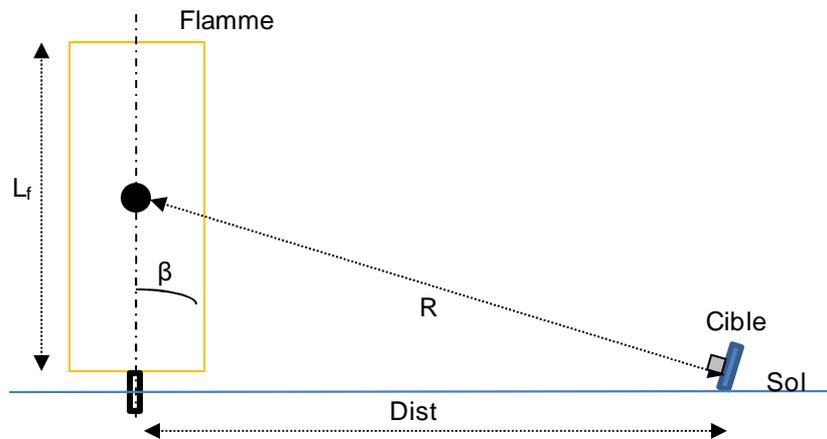


Figure 11 : Schéma illustrant le modèle du point source

La densité de flux thermique radiatif, q_c , reçue par une cible située à une distance R de la flamme et perpendiculaire au rayonnement du point source est donnée par la formule suivante :

$$q_c = \tau_a \frac{Q_r}{4 \pi R^2} = \tau_a \frac{\chi_{rad} \dot{m} \Delta H_C}{4 \pi R^2} \quad (34)$$

avec :

- q_c = Flux reçu par la cible, [W/m²]
- Q_r = Puissance rayonnée par la flamme, [W]
- R = Distance entre le centre de la flamme et la cible, [m]
- τ_a = Transmissivité atmosphérique, [-]
- χ_{rad} = Fraction radiative, [-]
- $4 \pi R^2$ = Angle solide de la sphère de rayon R centrée sur la source ponctuelle, [-]

La fraction radiative χ_{rad} peut être calculée au moyen de l'équation présentée dans le paragraphe 4.3.1.3.1.

La méthode du « point source » permettant d'évaluer les distances d'effets liées à un feu torche peut être appliquée aux différentes expressions de longueur de flamme présentées précédemment (modèles de l'API RP 521 [2], de Brzustowski [6] et [7], de Hawthorne [22] et de SHELL [9], [11] et [42]).

Les torchères de raffinerie sont en général verticales. En revanche, les feux torche accidentels peuvent être inclinés dû à l'inclinaison de la brèche ou bien à l'action du vent sur la flamme (Figure 12).

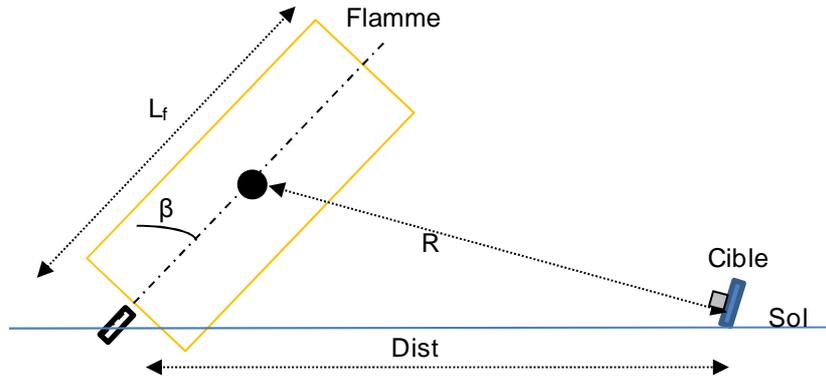


Figure 12 : Configuration pour le modèle du point source

C'est pourquoi, les formules de distances d'effets seront exprimées, entre autres, en fonction de l'angle d'inclinaison β de la flamme.

En appliquant la méthode de la source ponctuelle, les distances d'effets thermiques associées aux flux critiques pour l'homme en fonction de la longueur de flamme et le débit de combustible s'écrivent alors d'une manière générale :

$$Dist = \frac{L_f}{2} \sin \beta + \left(A_{seuil} \chi_{rad} \tau_a (\dot{m} \Delta H_c) - \frac{L_f^2}{4} \cos^2 \beta \right)^{\frac{1}{2}} \tag{35}$$

La valeur du coefficient A_{seuil} en fonction des flux critiques pour l'homme est présentée dans le Tableau 7.

Seuil (kW/m ²)	Coefficient A_{seuil}
3 (SEI)	$2,65 \cdot 10^{-5}$
5 (SEL)	$1,59 \cdot 10^{-5}$
8 (SELS)	$9,95 \cdot 10^{-6}$

Tableau 7 : Coefficient A_{seuil} en fonction des flux critiques pour l'homme

Les distances d'effets sont comptées à partir de la brèche pour une cible située à la même altitude.

Associée au modèle de l'API RP 521, l'équation (35) peut alors s'exprimer comme une fonction de la puissance calorifique $\dot{Q} = \dot{m} \Delta H_c$ telles que :

$$Dist_{SEI} = \left[1,12 \cdot 10^{-3} \sin \beta + 5,15 \cdot 10^{-3} (\chi_{rad} \tau_a - 0,047 \cos^2 \beta)^{1/2} \right] (\dot{m} \Delta H_c)^{1/2} \quad (36)$$

$$Dist_{SEL1\%} = \left[1,12 \cdot 10^{-3} \sin \beta + 3,99 \cdot 10^{-3} (\chi_{rad} \tau_a - 0,079 \cos^2 \beta)^{1/2} \right] (\dot{m} \Delta H_c)^{1/2} \quad (37)$$

$$Dist_{SEL5\%} = \left[1,12 \cdot 10^{-3} \sin \beta + 3,15 \cdot 10^{-3} (\chi_{rad} \tau_a - 0,126 \cos^2 \beta)^{1/2} \right] (\dot{m} \Delta H_c)^{1/2} \quad (38)$$

où :

\dot{m} = débit de gaz (kg/s),

ΔH_c = chaleur de combustion du gaz rejeté (J/kg).

Les expressions (36 et (37) et (38) peuvent se simplifier en supposant que :

- le facteur d'atténuation τ_a est égal à l'unité (hypothèse majorante),
- la fraction radiative χ_{rad} est prise à 30 %,
- le feu torche est horizontal ou vertical.

Pour un feu torche horizontal ou vertical, les distances d'effets maximales deviennent alors, pour une cible située au sol :

$$Dist = B_{seuil} (\dot{m} \Delta H_c)^{1/2}$$

Le Tableau 8 présente les différentes valeurs de B_{seuil} en fonction du seuil d'effets et de l'orientation du jet.

Orientation du rejet		Horizontal	Vertical
Seuil d'effets	SEI	$4 \cdot 10^{-3}$	$2,59 \cdot 10^{-3}$
	SEL 1%	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$1,88 \cdot 10^{-3}$
	SEL 5%	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$1,32 \cdot 10^{-3}$

Tableau 8 : Coefficient B_{seuil}

Remarque :

La méthode du « point source » est très largement utilisée pour les raffineries « on-shore ». Toutefois, cette méthode n'est valable que pour obtenir des ordres de grandeur en champ suffisamment lointain et est limitée pour les installations dont les dimensions sont réduites ou pour lesquelles les effets en champ proche doivent être étudiés. Pour une évaluation plus précise et plus complète des effets thermiques (sur l'homme et sur les structures), la méthode dite « de la flamme solide » présentée dans le paragraphe 4.3.1.2 sera préférée.

Dans des travaux plus récents, Shefer et al [41] ont proposé une corrélation de flux radiatifs applicable sur les flammes de gaz naturel et les flammes d'hydrogène. Les flux radiatifs sont reliés à la position axiale et radiale de la cible par rapport à la flamme, au débit de gaz et à la fraction radiative par l'intermédiaire du flux radiatif normalisé C^* en utilisant une méthode améliorée de la source ponctuelle:

$$C^*(x/L_f) = \frac{4\pi \text{Dist}^2 q_a(x/L_f)}{\chi_{rad} \dot{Q}} \tag{39}$$

Avec

x = Position axiale, m

Dist = Distance séparant l'axe de la flamme à la cible, m

Le profil du nombre C^* est donné par le graphe de la Figure 13.

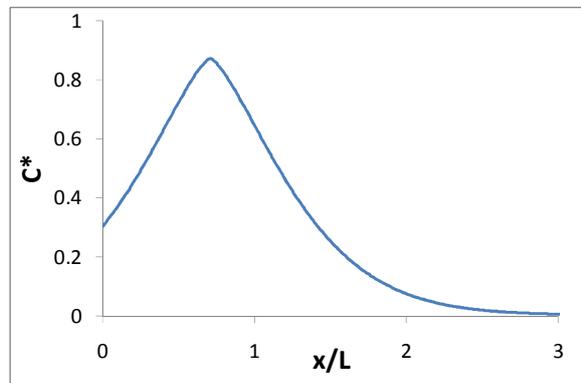


Figure 13 : Evolution axiale du flux radiatif normalisé C^*

Cette méthode de la source ponctuelle améliorée prend en compte la position de la cible par rapport à l'axe de la flamme.

4.3.1.2 METHODE DE LA « FLAMME SOLIDE »

Pour une évaluation plus précise et plus complète des effets thermiques (sur l'homme et sur les structures) en champ proche, la seconde méthode dite « de la flamme solide » est préférée, couplée à un modèle définissant de façon complète la géométrie de la flamme : longueur, largeur et inclinaison du tronc de cône et décollement de la flamme. Seuls les modèles de SHELL, parmi ceux cités précédemment, permettent d'obtenir les caractéristiques géométriques complètes de la flamme et par conséquent, peuvent être associés à la méthode de la « flamme solide » pour déterminer de façon plus précise les distances d'effets thermiques.

Afin de calculer, par la méthode « de la flamme solide », les flux radiatifs incidents reçus par une cible à distance, la flamme est assimilée à un volume de géométrie simple (cylindre, parallélépipède rectangle...) dont les surfaces rayonnent uniformément. Dans le cas d'un feu torche, la flamme est assimilée à un tronc de cône de pouvoir émissif uniforme. La démarche de calcul du flux radiatif est similaire à celle retenue pour les feux de nappe [5].

Les flux radiatifs reçus à distance par une cible se définissent sous la forme suivante :

$$q_c = SEP.F_{view}.\tau_a \tag{40}$$

Où :

- q_c = Flux reçu par la cible, [W/m²]
- SEP = Pouvoir émissif de la flamme, [W/m²]
- F_{view} = Facteur de vue, [-]
- τ_a = Transmissivité atmosphérique, [-]

Le pouvoir émissif de la flamme (appelé *SEP* dans la littérature anglo-saxonne pour « Surface Emissive Power ») correspond à la quantité de chaleur rayonnée par unité de surface de flamme et se définit comme la fraction rayonnée de la puissance totale réellement dégagée par la combustion rapportée à la surface totale de flamme. Il s'exprime alors en fonction de la puissance thermique totale libérée par la combustion, \dot{Q} , de la fraction radiative, χ_{rad} et de la surface de l'enveloppe de la flamme A_{env} .

$$SEP = \frac{\chi_{rad} \dot{Q}}{A_{env}} \tag{41}$$

Le pouvoir émissif surfacique est une donnée primordiale nécessaire au calcul des distances d'effets thermiques radiatifs par la méthode dite « de la flamme solide ».

A noter que pour de forts débits ou de fortes pressions de jet, la valeur du pouvoir émissif peut atteindre plusieurs centaines de kW/m² et devenir dans certains cas physiquement incohérente (modèle validé expérimentalement pour de faibles débits et de faibles pressions). Afin de pallier à ce problème, une valeur seuil est généralement imposée. Dans le logiciel PHAST [52] par exemple, il est proposé une valeur maximale de 400 kW/m², valeur qui peut sembler physiquement acceptable et qui est généralement majorante. Il conviendra toutefois de vérifier la cohérence du pouvoir émissif calculé en appliquant la loi de Stefan-Boltzmann :

$$SEP = \sigma T_f^4$$

Avec :

- SEP = Pouvoir émissif de la flamme, [kW/m²]
- σ = Constante de Stefan-Boltzmann [=5,67E⁻⁸ W.m⁻².K⁻⁴]

T_f = Température de flamme, [K]

Le facteur de vue F_{view} correspond à l'angle solide sous lequel la cible voit la flamme (Figure 14).

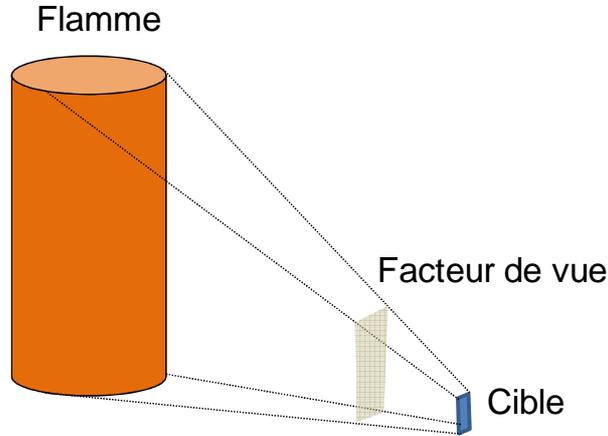


Figure 14 : Facteur de vue entre une cible et une flamme

Ce paramètre s'obtient analytiquement lorsque la flamme est assimilée à une forme simple, telle qu'un cylindre ou un parallélépipède. En revanche, pour des formes géométriques plus complexes telles que des troncs de cône, l'approche analytique devient complexe et une approche numérique est généralement préférée. Les différentes méthodes permettant de déterminer le facteur de vue sont décrites plus en détail dans l'ANNEXE 4.

4.3.1.3 PARAMETRES COMPLEMENTAIRES

Les paramètres complémentaires décrits dans ce paragraphe sont :

- la fraction radiative χ_{rad} ,
- la transmissivité atmosphérique τ_a .

4.3.1.3.1 FRACTION RADIATIVE

Dans le modèle de SHELL, la fraction radiative χ_{rad} était déterminée initialement au moyen d'une loi empirique prenant uniquement en compte la vitesse du jet au point de fuite u_j [9] :

$$\chi_{rad} = 0.21e^{(-0.00323u_j)} + 0.11 \tag{42}$$

Cook & al [11] ont apporté des modifications à cette corrélation en incluant dans la formule la masse molaire du produit mis en jeu :

$$\begin{aligned} \chi_{rad} &= 0.21e^{(-0.00323u_j)} + 0.11 & M_w < 21 \\ \chi_{rad} &= (0.21e^{(-0.00323u_j)} + 0.11)\sqrt{\frac{M_w}{21}} & 21 \leq M_w \leq 60 \\ \chi_{rad} &= 1.69 \times 0.21e^{(-0.00323u_j)} + 0.11 & M_w > 60 \end{aligned} \quad (43)$$

A noter que cette approche n'est pas toujours vérifiée par l'expérimentation. Patej [46] a montré par exemple que la fraction radiative d'une flamme d'éthylène était supérieure à celle d'une flamme de propane, bien que le propane ait une masse molaire supérieure (44 contre 28 g/mol). Le calcul de la fraction radiative pourrait ainsi se baser sur la propension du produit à former des suies, comme explicité dans le paragraphe 3.4.

Johnson [42] a proposé une autre variante de la fraction radiative, en différenciant le flux émis par le coté de la flamme et par ses deux extrémités :

$$\chi_{rad}^S = (1 - e^{-0.4W_2})(0.21e^{-0.00323u_j} + 0.14) \quad (44)$$

$$\chi_{rad}^{END} = (1 - e^{-0.4R_L})(0.21e^{-0.00323u_j} + 0.14) \quad (45)$$

Avec

- W_2 = Diamètre de la base supérieure du tronc de cône, [m]
- R_L = Longueur du tronc de cône, [m]
- χ_{rad}^S = Flux émis par la surface latérale de la flamme, [kW/m²]
- χ_{rad}^{END} = Flux émis par les deux bases de la flamme, [kW/m²]

Enfin, Shefer [40] propose un modèle prenant en compte le temps de résidence de la flamme. L'équation suivante a été validée pour des rejets d'hydrogène et de méthane.

$$\chi_{rad} = 0.00851 \log(\tau_f a_p T_f^4) - 1.16 \quad (46)$$

Avec :

- τ_f = Temps de résidence de la flamme, [ms]
- a_p = Coefficient d'absorption moyen de Planck, [m⁻¹]

Le temps de résidence [47] s'exprime comme suit :

$$\tau_f = \frac{\rho_f W^2 L_f f_s}{3\rho_j d_j^2 u_j} \quad (47)$$

Ces approches peuvent être associées aussi bien à la méthode de la source ponctuelle qu'à la méthode de la flamme solide.

Le lecteur pourra se reporter également au Tableau 2 page 27 pour obtenir un ordre de grandeur de la valeur de χ_{rad} en fonction du combustible.

4.3.1.3.2 TRANSMISSIVITE ATMOSPHERIQUE

Afin de tenir compte de l'atténuation atmosphérique du rayonnement dans le calcul du flux de chaleur lié au taux d'humidité de l'air ambiant, le facteur de transmissivité τ_a qui dépend de la distance entre l'enveloppe de la torche et la cible peut être estimé au moyen de diverses méthodes. Les méthodes les plus courantes sont décrites à la suite :

Loi empirique de Bagster [4]

La transmissivité est donnée par l'équation suivante :

$$\tau_a = 2.02(p_w R)^{-0.09} \quad (48)$$

Avec :

p_w = Pression partielle de vapeur d'eau dans l'air à une humidité relative donnée, [N/m²]

R = Distance entre le centre de la flamme et la cible, [m]

Cette équation est valable seulement dans la plage suivante $10^4 < p_w X < 10^5$ N/m.

Loi empirique de Wayne [50]

La transmissivité est donnée par l'équation suivante :

$$\begin{aligned} \tau_a = & 1.006 - 0.01171 \times \log X(H_2O) - 0.02368 \times (\log X(H_2O))^2 \\ & - 0.03188 \times \log X(CO_2) + 0.001164 \times (\log X(CO_2))^2 \end{aligned} \quad (49)$$

Le coefficient d'absorption de la vapeur d'eau est donné par :

$$X(H_2O) = \frac{2.165 \times P_w \times R}{T_\infty}$$

T_∞ = Température ambiante, [K]

Et celui du dioxyde de carbone est donnée par :

$$X(CO_2) = \frac{273 \times R}{T_\infty}$$

D'autres méthodes sont décrites dans l'omega 2 [5].

Ces approches peuvent être associées aussi bien à la méthode de la source ponctuelle qu'à la méthode de la flamme solide.

4.3.2 METHODE DE CALCUL DES EFFETS THERMIQUES CONVECTIFS

Lorsqu'un jet enflammé se rapproche d'un obstacle (par exemple une canalisation présente sur une installation pétrolière), ce dernier est susceptible d'être soumis au flux convectif de la flamme. Le flux convectif surfacique reçu par la cible par unité de surface s'exprime comme suit :

$$\dot{Q}_{conv} = h(T_f - T_s)S \quad (50)$$

Avec :

- \dot{Q}_{conv} = Puissance convective dégagée par la flamme, [W]
- h = Coefficient de convection, [W/m².K]
- T_f = Température de flamme, [K]
- T_s = Température de la surface de l'obstacle, [K]
- S = Surface impactée par la flamme, [m²]

Le coefficient de convection s'écrit de la manière suivante :

$$h = Nu \frac{\lambda_g}{D} \quad (51)$$

Avec :

- λ_g = Conductivité des gaz, [W/m/K]
- D = Grandeur caractéristique du jet, [m]

Le nombre de Nusselt Nu représente le ratio convection/conduction des gaz chauds et est directement conditionné par la forme de la cible impactée. Par exemple, pour une forme d'obstacle cylindrique telle qu'une canalisation [48] :

$$Nu = C Re^m Pr^{0.33} \quad (52)$$

Avec :

- C et m = Coefficients empiriques dépendant du nombre de Reynolds et de la forme de l'obstacle (canalisation, plaque ...), [-]
- Pr = Nombre de Prandtl, [-]
- Re = Nombre de Reynolds, [-]

Les valeurs des coefficients C et m sont issues de Holman [48]. Elles sont détaillées dans le Tableau 9.

Nombre de Reynolds	C	m
4000 – 40 000	0.193	0.618
40 000 – 400 000	0.0266	0.805

Tableau 9 : Valeur des coefficients C et m pour un obstacle cylindrique en fonction de la valeur du nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds, qui traduit le régime de turbulence, dépend de la vitesse de la flamme (avant impact avec l'obstacle). L'expression suivante traduit la décroissance hyperbolique de la vitesse du jet enflammé suivant son axe :

$$U_g = \frac{Au_j d_j}{x} \tag{53}$$

Avec :

- A = Coefficient empirique (≈5) [-]
- u_j = Vitesse du jet au point de fuite, [m/s]
- d_j = Diamètre du jet expansé en sortie de brèche, [m]
- x = Position axiale : distance sur l'axe du jet entre la brèche et la cible, [m]

4.4 MODELES INTEGRAUX

Les modèles intégraux, appelés également modèles phénoménologiques ou modèles 1D axiaux résolvent de manière globale les équations de la physique. Les équations de conservation de la masse (prenant en compte l'entraînement d'air), de la quantité de mouvement et de l'énergie sont résolues sur les différentes sections transversales de l'axe curviligne de la flamme. Les équations peuvent être fermées par un modèle de viscosité turbulente comme par exemple l'approche *k-ε* monodimensionnelle. Concernant le modèle de combustion, une réaction infiniment rapide est généralement considérée. La fraction de mélange, définie comme le ratio gaz brûlé/gaz frais en tout point de la flamme, permet d'évaluer la progression de la combustion. Un modèle de suie peut être implémenté afin de prendre en compte leur émissivité dans le calcul des flux thermiques radiatifs. Le schéma de principe des modèles intégraux est présenté sur la Figure 15.

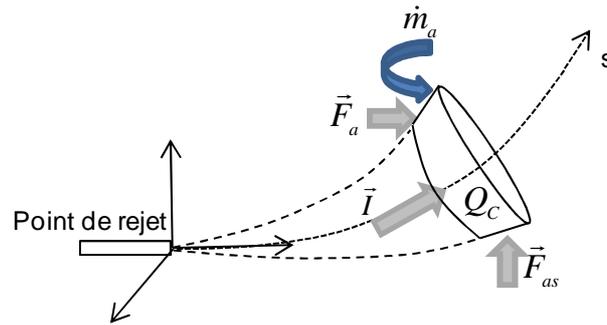


Figure 15 : Schéma de principe d'un modèle intégral

Les différents paramètres identifiés sur la Figure 15 sont détaillés à la suite.

- Q_c = Production de chaleur liée à la combustion
- \vec{I} = Quantité de mouvement
- \vec{F}_a = Forces liées au vent
- \vec{F}_{as} = Forces de flottabilité
- \dot{m}_a = Masse d'air entrainé par la flamme

Ces modèles permettent de prendre en compte de manière plus physique les effets des forces de flottabilité non négligeables sur les feux torche horizontaux ou inclinés, pour la modélisation de l'incurvation de la flamme [53]. Certains modèles s'appliquent pour tout type de rejet (gazeux ou diphasique).

Par ailleurs, il existe des modèles intégraux permettant de prendre en compte les effets du sol et plus particulièrement d'un cratère sur la géométrie d'un feu torche issu d'une rupture de canalisation enterrée. L'un des modèles de cratère utilisés est décrit par Cleaver et al. [49]. Il prend en compte l'angle du cratère formé par le jet et la différence de pression entre les deux contributions (amont et aval), entre autres.

A travers les équations simplifiées de la mécanique des fluides, les modèles intégraux permettent de prendre en compte les différents paramètres physiques qui régissent le comportement de la flamme.

4.5 MODELISATION 3D DES FEUX TORCHES

Les modèles tridimensionnels ou CFD (Computational Fluids Dynamics) permettent de décrire plus finement le comportement du jet enflammé à travers la résolution locale des équations complexes de la mécanique des fluides.

Les logiciels FLACS Fire [57], Kameleon FireEx [58] et Fluent sont des exemples de logiciels 3D qui permettent de modéliser la physique complexe des feux torche. Ces logiciels proposent, entre autres, le modèle k-epsilon pour la résolution de la turbulence, le modèle EDC (Eddy Dissipation Concept) pour la modélisation de la combustion et le modèle DTM (Discrete Transfer Model) pour la résolution du transfert thermique par rayonnement. Enfin, ces logiciels proposent également des modèles pour prendre en compte la formation des suies au cours du processus de combustion, ces suies ayant un impact non négligeable sur les transferts thermiques entre la flamme et son environnement.

4.5.1 POINTS FORTS DE LA MODELISATION 3D

En plus de posséder un champ d'application étendu, la modélisation 3D permet de prendre en compte la présence d'obstacles ou de reliefs susceptibles d'avoir une influence sur le comportement de la flamme.

4.5.2 LIMITES DE LA MODELISATION 3D

L'utilisation de la CFD peut toutefois s'avérer coûteuse en temps et en moyens matériel si bien que son usage ne s'applique par toujours au domaine des risques industriels et est souvent réservé à des études particulières. Par ailleurs, la prise en main de ce type d'outils nécessite du personnel spécialisé et des données complètes et précises sont nécessaires pour la modélisation de la flamme. En outre, la précision des calculs dépend de la méthode de résolution numérique, du type de maillage et de la manière de mise en œuvre des modèles physiques pour la caractérisation de la flamme.

La diversité des outils et des hypothèses à retenir ainsi que l'expertise nécessaire pour la mise en œuvre de ce type d'approche fait que son emploi en est limité réglementairement. Le lecteur pourra se reporter à la circulaire du 10 Mai 2010 [55] pour plus de détails au sujet de l'utilisation réglementaire de la CFD.

4.6 COMPARAISON DES RESULTATS

L'objet de ce paragraphe est, d'une part, d'appliquer les différents modèles décrits dans les paragraphes précédents afin de comparer les longueurs de flamme obtenues et, d'autre part, de comparer les deux modèles de flux incidents. Enfin, l'influence du vent sera testée avec le modèle de Shell.

4.6.1 LONGUEURS DE FLAMME ET FLUX REÇUS

Pour comparer les différents modèles, un scénario d'accident de rupture guillotine d'une canalisation de méthane de 20 cm de diamètre sous 26 bars de pression constante a été imaginé. Cette rupture de canalisation est à l'origine d'un feu torche qui est supposé se développer verticalement. Le gaz est considéré initialement à température ambiante c'est-à-dire à 15 °C et émerge au niveau du sol avec un débit constant de 132 kg/s dans une atmosphère initialement au repos (absence de vent).

Les paramètres caractérisant le jet à la source obtenus avec la méthode décrite dans le 4.1.1 sont présentés dans le Tableau 10.

Paramètres	Symbole	Valeur	Unité
Température à l'expansion	T_j	-45	°C
Vitesse à l'expansion	u_j	500 ⁽¹⁾	m/s
Diamètre effectif	D_s	0,53	m
Diamètre équivalent	d_j	0,61	m

Tableau 10 : Valeurs des paramètres à la source

(1) La vitesse du jet en sortie de zone d'expansion est limitée à 500 m/s

Le Tableau 11 compare les longueurs de flamme obtenues avec les différents modèles décrits dans le paragraphe 4.2. Les distances d'effets sont calculées avec le modèle de la source ponctuelle. L'action du vent sur la flamme n'est pas prise en compte. La fraction radiative est fixée à 0,15 et le facteur de transmissivité atmosphérique est égal à l'unité.

Modèle de calcul de la longueur de flamme	Longueur de flamme [m]	Distance d'effets en m au flux de :		
		8 kW/m ²	5 kW/m ²	3 kW/m ²
API RP 521	182	47	92	140
BRZUSTOWSKI	196	30	85	136
SHEFER	130	79	112	154
SHELL (Modèle de Chamberlain)	126	81	113	155

Tableau 11 : Comparaison des résultats obtenus avec le modèle de la source ponctuelle

Le modèle de Hawthorne décrit précédemment n'a pas été appliqué car il modélise uniquement la partie turbulente de la flamme.

Le Tableau 11 permet de constater que les modèles de Chamberlain et de Shefer sont en très bonne adéquation concernant la prédiction de la longueur de flamme et des distances d'effets.

En revanche, les modèles de l'API RP 521 et de Brzustowski donnent une longueur de flamme nettement plus importante associée à des distances d'effets beaucoup plus faibles, notamment en champ proche. L'écart entre les distances d'effets obtenues avec les modèles de Chamberlain et de l'API RP 521 atteint 42% au flux de 8 kW/m², 18% au flux de 5 kW/m² et 10% au flux de 3 kW/m².

Ces écarts peuvent s'expliquer par le fait que le modèle de point source suppose que toute l'énergie est rayonnée à partir du centre de la flamme. Il en résulte que plus la longueur de flamme est élevée, plus les distances d'effets sont faibles (car le point source s'éloigne alors du sol), ce qui explique les distances d'effets plus faibles calculées avec les modèles de l'API RP 521 et de Brzustowski, notamment en champ proche. Ce test montre clairement qu'être conservatif sur la prédiction de la longueur de flamme a pour effet de sous-estimer les distances d'effets en champ proche avec le modèle du point source. Par conséquent ce modèle n'est pas adapté en champ proche.

4.6.2 COMPARAISON ENTRE LES MODELES DU POINT SOURCE ET DE LA FLAMME SOLIDE

La Figure 16 compare les deux modèles de détermination des effets thermiques en montrant l'évolution du flux reçu au niveau du sol en fonction de la distance pour l'exemple de feu torche choisi. Les caractéristiques géométriques de la flamme ont été calculées au moyen du modèle de Chamberlain, modèle implémenté dans le logiciel Phast [52].

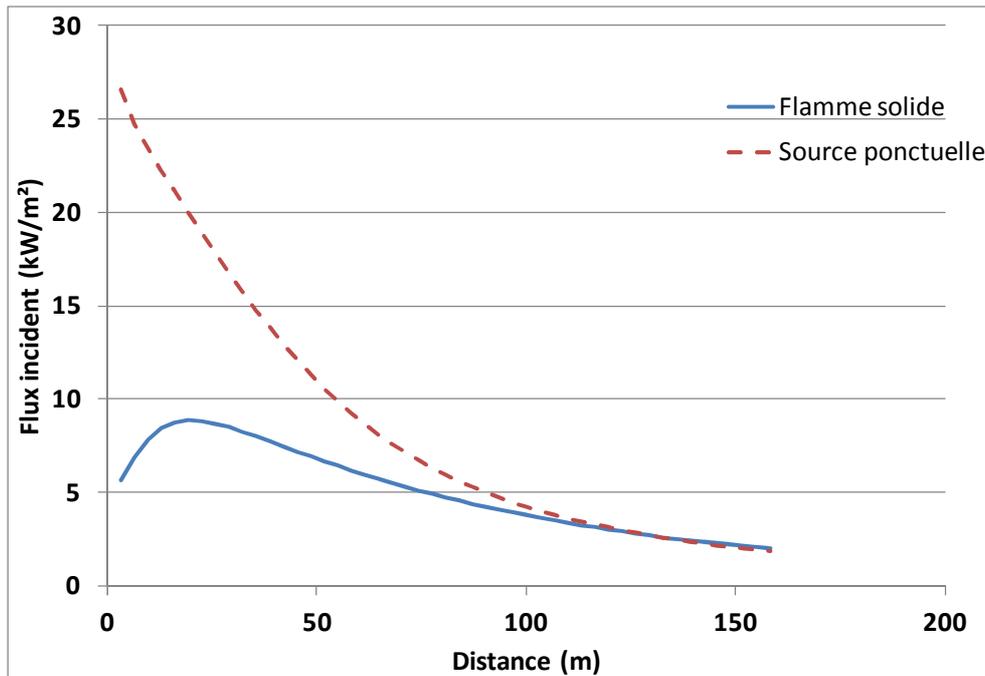


Figure 16 : Distances d'effets – Comparaison entre la méthode de la flamme solide et celle de la source ponctuelle

Le facteur de transmissivité atmosphérique est calculé au moyen de la loi empirique de Waynes [50] décrit dans le paragraphe 4.3.1.3.2.

Il apparaît qu'en champ proche, autrement dit pour des flux reçus élevés (à savoir supérieurs à 5 kW/m² dans l'exemple), la méthode du point source est conservative par rapport à la méthode de la flamme solide. En revanche, plus la cible s'éloigne de la flamme et plus ces deux méthodes ont tendance à donner des résultats équivalents. Le modèle de point source pourra être considéré comme valide à partir d'une distance à l'axe de la flamme égale à environ 3 fois son diamètre. Ainsi, en appliquant l'équation (23) permettant d'évaluer le diamètre de la flamme en fonction de sa longueur, $l_f = 0.26 \times 105 = 27,3$ m, la distance à partir de laquelle le modèle de point source pourra être considérée comme valide est d'environ 80 m.

4.6.3 INFLUENCE DU VENT

Le vent est une condition extérieure qui peut modifier de façon significative la configuration du feu torche. En gardant les mêmes hypothèses que précédemment et en appliquant deux conditions de vitesse de vent transversal de respectivement 1 et 10 m/s, de nouveaux calculs de feux torche ont été réalisés avec le modèle de Chamberlain, modèle implémenté dans le logiciel Phast [52]. Les résultats de ces calculs sont reportés dans le Tableau 12.

Vitesse de vent (m/s)	Longueur de flamme	Angle d'inclinaison de la flamme par rapport à la verticale	Distance d'effets thermiques à la SEL 5% (8 kW/m ²)	Distance d'effets thermiques à la SEL 1% (5 kW/m ²)	Distance d'effets thermiques à la SEI (3 kW/m ²)
1	105	2,5	120	77	36
10	63	24	148	117	94

Tableau 12 : Effets du vent sur la longueur de flamme et les distances d'effets

Le vent a pour effet de diminuer la longueur de flamme et d'incliner la flamme de 24° par rapport à la verticale. Les distances d'effet augmentent pour deux raisons :

- la flamme se rapproche des cibles,
- la surface de flamme diminue ce qui a pour conséquence d'augmenter son pouvoir émissif d'après l'équation (54).

$$SEP = \frac{\chi_{rad} \dot{Q}}{A_{env}} \tag{54}$$

A noter que dans le modèle de Cook, la vitesse du vent intervient également sur les dimensions des bases du tronc de cône représentant la flamme.

5. CONCLUSION

Dans l'environnement industriel, les feux torche peuvent se produire suite à des rejets accidentelles ou intentionnelles (torchères) de fluides inflammables. Les feux torche accidentels proviennent en général de fuites liées à la rupture partielle ou totale de canalisation, de raccord ou de vanne, ou à la suite d'une perforation de réservoir. Les accidents impliquant des feux torche peuvent être très dévastateurs pour les structures et pour les hommes comme l'a montré l'analyse des accidents passés.

Par ailleurs, par effet domino, ces feux torche peuvent occasionner de graves avaries sur le reste de l'installation et donc conduire à la propagation de l'incendie ou provoquer de nouveaux accidents tels que le phénomène de BLEVE de réservoirs.

L'objet de ce document est de présenter le phénomène physique de feu torche ainsi que différentes méthodes visant à les représenter et à en estimer les effets.

Les principales conclusions de cette étude sont les suivantes :

- La forme et les dimensions d'un feu torche varient en fonction des caractéristiques du rejet au point source telles que la nature du combustible, la forme et le diamètre de la fuite, la température, la pression et la vitesse de rejet ;
- Le vent est susceptible de modifier la configuration des feux torche : inclinaison de la flamme, réduction de la longueur de flamme, etc ;
- Différents modèles issus de la littérature permettent de caractériser les feux torche. Du plus simple comme le modèle API RP 521 qui donne un ordre de grandeur de la longueur de flamme à travers une loi empirique, aux plus complexes comme les modèles de Shell (Cook, Chamberlain, Johnson) ou les modèles intégraux. Les modèles de Shell tendent à définir les caractéristiques géométriques de la flamme ainsi que son décollement à travers des lois empiriques et physiques simples. Les modèles intégraux résolvent les équations de masse, de quantité de mouvement et d'énergie sur des sections de la flamme. Ces modèles prennent en compte l'effet du vent sur la flamme. Les différents modèles de feu torche abordés dans le présent document sont synthétisés dans le Tableau 13.

Modèle	Données d'entrée	Données de sortie	Modèle associé pour le calcul des effets thermiques	Point fort	Limite
API RP 521 [2]	\dot{Q}	L_f	Point source	Simple d'utilisation	Domaine d'utilisation restreint
Hawthorne [22]	TS*	L_f (partie turbulente)	Point source	Simple d'utilisation Prise en compte de la LIE	Partie turbulente de la flamme modélisée uniquement
Brzustowski [6]	TS	L_f	Point source	Simple d'utilisation	
Shefer	TS	L_f, χ_{rad}	Point source améliorée / Flamme solide		Valable uniquement pour le méthane et l'hydrogène
Brzustowski améliorée [8]	TS	L_f	Point source	Prise en compte des effets du vent	
Shell (modèles de Chamberlain [9], Cook [11] et Johnson [42])	Cf. ANNEXES 2 et 3	Géométrie simplifiée de la flamme (Longueur, largeur des bases, décollement) + caractéristiques thermiques de la flamme χ_{rad}, SEP	Flamme solide	Prise en compte des effets du vent Le modèle de Johnson : prend en compte les effets de flottabilité de la flamme	Calcul du facteur de vue complexe pour la flamme solide
Intégral	TS	Géométrie de la flamme et caractéristiques thermiques complètes	Calcul numérique associé	Prise en compte des conditions atmosphériques (vent, stabilité, température ...) Facilité de mise en œuvre	Equations de la mécanique des fluides simplifiées
3D (CFD)	TS	Géométrie de la flamme et caractéristiques thermiques complètes	Calcul numérique associé	Résolution des équations de la mécanique des fluides Prise en compte des conditions atmosphériques (vent, stabilité, température ...) Prise en compte des obstacles et de la topographie	Complexe à mettre en œuvre Pas mûr réglementairement Temps de calcul élevé

Tableau 13 : Synthèse sur les différents modèles de feu torche

*TS : Terme Source qui comprend les caractéristiques du jet en sortie de brèche ou de la zone d'expansion (vitesse, débit, température)

6. GLOSSAIRE – DEFINITIONS

6.1 GLOSSAIRE

API :	American Petroleum Institute
ARIA :	Analyse, Recherche et Information sur les Accidents
BARPI :	Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industrielles
BLEVE :	Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion
LIE :	Limite Inférieure d'Explosivité
LES :	Limite Supérieure d'Explosivité
GPL :	Gaz de Pétrole Liquéfié
MEDD :	Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable
TNO :	The Netherlands Organization of Applied Scientific Research
UFIP :	Union Française des Industries Pétrolières

6.2 DEFINITIONS PRINCIPALES

Le présent chapitre propose quelques définitions relatives aux mécanismes et aux conséquences d'un feu torche. Classées par ordre alphabétique, ces définitions, auxquelles le lecteur pourra se référer tout au long de la lecture du présent rapport, permettent d'appréhender les termes utilisés dans les chapitres précédents.

Les définitions suivies d'un astérisque sont extraites de la norme NF EN ISO 13943 intitulée « Sécurité au feu – Vocabulaire ».

Allumage spontané, auto-inflammation

Allumage résultant d'une élévation de température sans l'apport d'une source extérieure d'allumage.

BLEVE

Dans la littérature anglo-saxonne, ce terme signifie Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion. Ce phénomène est le résultat d'une fissure soudaine de réservoir stockant un liquide sous pression à une température bien au-dessus de son point d'ébullition à pression atmosphérique.

Brûler

Etre en état de combustion.

Chaleur de combustion

Energie thermique dégagée par la combustion d'une unité de masse d'une substance donnée. Elle est exprimée en joules par kilogrammes (J/kg)

Chaleur spécifique

La chaleur spécifique, ou bien chaleur massique d'échauffement, d'un corps correspond à la quantité de chaleur absorbée par 1 g de ce corps pour que sa température s'élève de 1°K. Cette grandeur s'exprime ainsi généralement en J/kg.K

Combustible

Susceptible de brûler. Objet pouvant brûler.

Combustion

Réaction exothermique d'une substance avec un comburant. La combustion émet généralement des effluents accompagnés de flammes et/ou d'incandescence.

Convection

La convection est le mode de transport de chaleur par le mouvement d'un fluide. Dans le cas des feux torche, deux modes de convection peuvent intervenir, la convection forcée due à l'écoulement pulsé du jet combustible et la convection naturelle induisant un mouvement de l'air autour de la flamme, dont l'écoulement est perturbé par la présence même du feu.

Effets dominos

Action d'un phénomène accidentel affectant une ou plusieurs installations d'un établissement qui pourrait déclencher un phénomène accidentel sur les établissements voisins conduisant à une aggravation générale des conséquences.

Emissivité

L'émissivité de la flamme est un nombre sans dimension entre 0 et 1 qui traduit l'aptitude de la flamme à se comporter comme un corps noir.

Facteur de vue / de forme

Le facteur de vue ou de forme traduit l'angle solide sous lequel la cible perçoit le rayonnement d'un émetteur.

Feu

Combustion auto entretenue qui a été délibérément organisée pour produire des effets utiles et dont l'extension dans le temps et l'espace est contrôlée. Lorsque cette extension ne peut être contrôlée, on parle alors d'incendie.

Flammes

Zone de combustion en phase gazeuse généralement avec émission de lumière.

Flammes de diffusion / flammes de pré-mélange

Des flammes de diffusion sont créées lorsque la combustion a lieu sans mélange préalable de l'air comburant et du combustible gazeux. Dans le cas contraire, on parle de flammes de pré-mélange.

Flux thermique radiatif

Quantité de chaleur transférée par rayonnement thermique, par unité de temps. Il s'exprime en kW.

Incendie

Combustion autoentretenu qui se développe sans contrôle dans le temps et dans l'espace.

Incandescence

Emission de lumière produite par un corps chauffé intensément.

Inflammable

Capable de brûler avec flamme, dans des conditions spécifiées.

Inflammation

Première apparition de flammes. Action de provoquer une combustion avec flammes.

Jet enflammé

Combustion d'un fluide émergeant avec une vitesse significative d'un orifice quelconque (injecteur, brèche...).

LII ou LIE

Limite Inférieure d'Inflammabilité (ou Limite Inférieure d'Explosivité) correspond à la concentration d'un fluide inflammable dans l'air au-dessous de laquelle le mélange fluide/air ne s'enflammera pas.

LSI ou LES

Limite Supérieure d'Inflammabilité (ou Limite Supérieure d'Explosivité) correspond à la concentration d'un fluide inflammable dans l'air au-dessus de laquelle le mélange fluide/air ne s'enflammera pas.

Modèle semi-empirique

Un modèle semi-empirique est un modèle mathématique qui est constitué de physique simple et de corrélations empiriques obtenues à partir d'expériences similaires (en terme de combustible, de conditions extérieures...) aux configurations réelles à modéliser.

Pouvoir émissif (surfactive) ou émittance

Flux thermique radiatif de la flamme par unité de surface. Il est exprimé en kilowatts par m² (kW/m²).

Rayonnement thermique

Transfert d'énergie par ondes électromagnétiques

Régime laminaire / turbulent

Régimes d'écoulement d'un fluide différenciés selon la vitesse de cet écoulement qui influe notamment sur le déplacement des couches de fluide entre elles. Dans un régime laminaire, à faible vitesse, les lignes de courant demeurent parallèles entre elles et les couches de fluide glissent les unes sur les autres sans se mélanger. A l'inverse, le régime turbulent est un régime désordonné, obtenu pour des valeurs du nombre de Reynolds⁵ supérieures à une valeur critique.

Suie

⁵ Nombre adimensionnel qui représente le rapport entre les forces d'inertie et de frottement dans un écoulement.

Particules produites et déposées au cours de la combustion ou après. La suie est constituée généralement de particules carbonées finement divisées, produites et déposées au cours de la combustion incomplète de matériaux organiques.

Rendement de combustion

Rapport entre la quantité d'énergie effectivement libérée par la combustion et l'énergie théorique disponible, correspondant à une combustion complète.

Température d'auto-inflammation ou d'allumage spontané

Température minimale à laquelle l'allumage est obtenu dans des conditions d'essai spécifiées, sans source d'allumage piloté.

Torchère

Haute tour métallique qui permet de brûler les gaz résiduels de procédés chimiques.

Vitesse massique de combustion

Masse du matériau brûlée perdue par unité de temps, dans des conditions spécifiées. Elle est exprimée en kilogrammes par seconde (kg/s).

7. NOMENCLATURE

A	=	Coefficient empirique qui intervient dans l'expression de la vitesse du jet enflammé suivant son axe (≈ 5) [-]
A_{env}	=	Surface de l'enveloppe de la flamme, [m ²]
a_p	=	Coefficient d'absorption moyen de Planck, [1/m]
C et m	=	Coefficients empiriques qui interviennent dans l'expression du nombre de Nusselt [-]
C_L	=	Concentration volumique du combustible à la LIE [-]
C_T	=	Concentration volumique de combustible dans l'air à la stœchiométrie, [-]
Cp_∞	=	Capacité calorifique de l'air ambiant, [J/kg/K]
D	=	Longueur caractéristique, [m]
d_j	=	Diamètre d'expansion, [m]
D_s	=	Diamètre effectif, [m]
Dist	=	Distance séparant l'axe de la flamme à la cible, m
Fr	=	Nombre de Froude, [-]
f_s	=	Fraction massique du combustible à la stœchiométrie, [-]
F_{view}	=	Facteur de vue, [-]
g	=	Accélération gravitationnelle [m/s ²]
h	=	Coefficient de convection, [W/m ² .K]
ΔH_c	=	Chaleur de combustion, [J/kg]
L^*	=	Longueur de flamme adimensionnée, [-]
L_T	=	Longueur de la partie turbulente de la flamme, [m]
M_a, M_f	=	Masse molaire de l'air ambiant et du combustible, [kg/mol]
M_j	=	Nombre de Mach à l'orifice, [-]
\dot{m}	=	Débit massique de combustible, [kg/s]
\dot{m}_a	=	Débit d'air entraîné par la flamme, [kg/s]
Nu	=	Nombre de Nusselt, [-]
P_{res}	=	Pression de stockage, [Pa]
P_∞	=	Pression atmosphérique, [Pa]
P_c	=	Pression statique, [Pa]

Pr	=	Nombre de Prandtl, [-]
ρ_w	=	Pression partielle de vapeur d'eau dans l'air à une humidité relative donnée, [N/m ²]
q_c	=	Flux reçu par la cible, [W/m ²]
\dot{Q}	=	Puissance thermique totale dégagée par la combustion, [W]
Q_r	=	Puissance rayonnée par la flamme, [W]
\dot{Q}_{conv}	=	Puissance convective dégagée par la flamme, [W]
R	=	Distance entre le centre de la flamme et la cible, [m]
R	=	Constante des gaz parfaits = 8.314 [J/mol K]
Re	=	Nombre de Reynolds [-]
Ri	=	Nombre de Richardson [-]
R_L	=	Longueur du tronc de cône, [m]
SEP	=	Pouvoir émissif de la flamme, [W/m ²]
S	=	Surface impactée par la flamme, [m ²]
T_{af}	=	Température adiabatique de flamme, [K]
T_f	=	Température de flamme, [K]
T_j	=	Température du gaz à l'expansion, [K]
T_s	=	Température de la surface de l'obstacle, [K]
T_{res}	=	Température de stockage, [K]
T_∞	=	Température ambiante, [K]
U_j	=	Vitesse du jet à l'orifice, [m/s]
U_w	=	Vitesse du vent, [m/s]
w_2	=	Diamètre de la base supérieure du tronc de cône, [m]
W_g	=	Masse molaire du gaz, [kg/mol]
x	=	Position axiale, [m]
Y_{fj}	=	Fraction massique du combustible dans le jet à l'orifice, [-]
α_T	=	Nombre de moles de réactifs sur le nombre de moles de produits de combustion à la stœchiométrie, [-]
λ_g	=	Conductivité des gaz, [W/m/K]
γ	=	Ratio des chaleurs spécifiques, [-]
ν	=	Viscosité cinématique du gaz à l'orifice, [m ² /s]

ρ_0	=	Masse volumique du combustible à l'orifice, [kg/m ³]
ρ_j	=	Masse volumique du gaz à l'expansion, [kg/m ³]
ρ_∞	=	Masse volumique de l'air ambiant, [kg/m ³]
τ_a	=	Transmissivité atmosphérique, [-]
τ_f	=	Temps de résidence de la flamme, [ms]
Ω	=	Angle entre la direction du vent et le vecteur normal perpendiculaire à la brèche dans le plan horizontal, [°]
θ_{jv}	=	Angle entre l'axe de la brèche et le plan horizontal dans la direction du vent, [°]
θ_j	=	Angle entre l'axe de la brèche et l'horizontal dans le plan vertical, [°]
σ	=	Constante de Stefan-Boltzmann [=5,67E-8 W.m ⁻² .K ⁻⁴]
χ_{rad}^S	=	Flux émis par la surface latérale de la flamme, [kW/m ²]
χ_{rad}^{END}	=	Flux émis par les deux bases de la flamme, [kW/m ²]
χ_{rad} , χ_{conv}	=	Fraction radiative et convective, [-]
$4 \pi R^2$	=	Angle solide de la sphère de rayon R centrée sur la source ponctuelle, [-]

8. BIBLIOGRAPHIE

- [1] R.BORGHI, M. DESTRIAU La combustion et les flames - Editions Technip - 1995
- [2] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE GUIDE FOR PRESSURE RELIEVING AN DEPRESSING SYSTEMS - API Recommended Practice, 1997
- [3] S. ATALLAH, J.N. SHAH LNG FIRE – A THERMAL RADIATION MODEL FOR LNG FIRES Topical report GRI-89/0176, GRI, 1990
- [4] D.G. BAGSTER, R.M. PITTBLADO, THERMAL HAZARDS IN THE PROCESS INDUSTRY Chemical Engineering Progress, pp. 69-75, 1989
- [5] E. BERNUCHON, C. JOLLY Ω -2 , FEUX DE NAPPE INERIS-DRA-2002-25427 - feu_nappe.doc, 2002
- [6] T.A. BRZUSTOWSKI PREDICTING RADIANT HEATING FROM FLARES, Esso Engineering Research and Development Report, EE 15ER.71, 1971
- [7] T.A. BRZUSTOWSKI, A NEW CRITERION FOR THE LENGTH OF A GASEOUS TURBULENT DIFFUSION FLAME Comb. Sci. And Tech., 6, pp. 313-319, 1973
- [8] T.A. BRZUSTOWSKI, S.R. GOLLAHALLI, H.F. SULLIVAN, THE TURBULENT HYDROGEN DIFFUSION FLAME IN A CROSS-WIND Comb. Sci. And Tech., 2, pp. 29-33, 1975
- [9] G.A. CHAMBERLAIN, DEVELOPMENTS IN DESIGN METHODS FOR PREDICTING THERMAL RADIATION FROM FLARES Chem. Eng. Res. Des., Vol. 65, pp. 299-309, 1987
- [10] D.M. COOK, M. FAIRWEATHER, J. HAMMONDS, D.J. HUGHES, SIZE AND RADIATIVE CHARACTERISTICS OF NATURAL GAS FLARES. PART II: EMPIRICAL MODEL Chem. Eng. Res. Des., Vol. 65, pp. 318-325, 1987
- [11] J. COOK, Z. BAHRAMI, R.J. WHITEHOUSE, A COMPREHENSIVE PROGRAM FOR CALCULATION OF FLAME RADIATION LEVELS Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 3, Issue 1, pp. 150-155, 1990
- [12] D.M. COOK, M. FAIRWEATHER, J. HAMMONDS, D.J. HUGHES, SIZE AND RADIATIVE CHARACTERISTICS OF NATURAL GAS FLARES. PART I: EMPIRICAL MODEL Chem. Eng. Res. Des., Vol. 65, pp. 310, 1987
- [13] Bennett, J. F., Cowley, L. T., Davenport, J. N. and Rowson, J. J., 1991, Large-scale natural gas and LPG jet fires final report to the CEC, CEC research programme: Major Technological Hazards, CEC contract EV4T.0016.UK, TNER.91.022 (Shell Research Ltd).
- [14] M.A. DELICHATSIOS, L. ORLOFF, EFFECTS OF TURBULENCE ON FLAME RADIATION FROM DIFFUSION FLAMES 22nd Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, pp. 1271-1279, 1988
- [15] G. DREUX, CONNAISSANCE DU BETON Union Technique Interfédérale du Bâtiment et des Travaux Publics, 1964
- [16] D. DRYSDALE, AN INTRODUCTION TO FIRE DYNAMICS University of Edinburgh, second edition, 1999

- [17] W.F.J.M. ENGELHARD "YELLOW BOOK" ; METHODS FOR THE CALCULATION OF PHYSICAL EFFECTS Part 2 – Chapter 6 « Heat flux from fires » Committee for the Prevention of Disasters 14E, third edition 1997
- [18] FLUMROC Site internet <http://www.flumroc.ch>, 2002
- [19] GEIE Programme GASAFE ETUDE DE LA PROTECTION AU FEU PAR IGNIFUGATION DES RESERVOIRS CONTENANT DES GAZ COMBUSTIBLES LIQUEFIES, Rapport final d'essais, 1993
- [20] S.R. GOLLAHALLI, T.A. BRZUSTOWSKI, H.P. SULLIVAN, CHARACTERISTICS OF A TURBULENT PROPANE DIFFUSION FLAME IN A CROSS-WIND Transactions of CSME, 3, pp. 205-214, 1975
- [21] P. GONZALES, UNE PROBLEMATIQUE DU FEU, deuxième partie – L'approche déterministe Ecole Nationale Supérieure des Mines de Nancy, 1994
- [22] W.R. HAWTHORNE, D.S. WEDDELL, H.C. HOTTEL, MIXING AND COMBUSTION ON TURBULENT GAS JETS 3rd Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, pp. 266-288, 1949
- [23] H.C. HOTTEL, W.R. HAWTHORNE, DIFFUSION IN LAMINAR FLAME JETS 3rd Symposium on Combustion, Flame and Explosions, pp. 254-266, 1949
- [24] G.T. KALGHATKI, THE VISIBLE SHAPE AND SIZE OF A TURBULENT HYDROCARBON JET DIFFUSION FLAME IN A CROSS-WIND Comb. And Flame, 52, pp. 91-106, 1983
- [25] G.T. KALGHATKI, LIFT-OFF HEIGHTS AND VISIBLE LENGTHS OF VERTICAL TURBULENT JET DIFFUSION FLAMES IN STILL AIR Comb. Sci. And Tech., 41, pp. 17-29, 1984
- [26] A.M. KANURY, INTRODUCTION TO COMBUSTION PHENOMENA Gordon and Breach, London, 1975
- [27] B. LEWIS, G. VON ELBE, COMBUSTION, FLAMES AND EXPLOSIONS OF GASES 3rd Edition, Academic Press, Orlando, 1987
- [28] LOSS PREVENTION IN THE PROCESS INDUSTRIES F. P. LEES, Volume 2, Chapter 16 « flares » second edition, 1996
- [29] G.H. MARKSTEIN, RADIATIVE ENERGY TRANSFER FROM GASEOUS DIFFUSION FLAMES 15th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, pp. 1285-1294, 1975
- [30] G.H. MARKSTEIN, RADIATIVE ENERGY TRANSFER FROM TURBULENT DIFFUSION FLAMES Comb. And Flame, 27, pp. 51-63, 1976
- [31] B.P. MULLINS, S.S. PENNER, EXPLOSIONS, DETONATIONS, FLAMMABILITY AND IGNITION Pergamon Press, London, 1959
- [32] NF EN ISO 13943 Glossaire des termes relatifs au feu et de leurs définitions première édition, 1990
- [33] K.S. MUDAN, P.A. CROCE, SFPE, HANDBOOK OF FIRE PROTECTION ENGINEERING Chapter 3-11 « Fire hazard calculations for large open hydrocarbon fires », National Fire Protection Association, 2nd edition 1995

- [34] C.J.H. VAN DEN BOSCH, L. TWILT, "GREEN BOOK"; METHODS FOR THE DETERMINATION OF POSSIBLE DAMAGE Chapter 1 « Damage caused by heat radiation », Committee for the Prevention of Disasters 16E, 1989
- [35] M.G. ZABETAKIS, FLAMMABILITY CHARACTERISTICS OF COMBUSTIBLE GASES AND VAPOURS US Bureau of Mines, Bulletin 627, 1965
- [36] E.E. ZUKOSKI, CONVECTIVE FLOWS ASSOCIATED WITH ROOM FIRES Semi Annual Progress Report, National Science Foundation Grant n° GI 31892 X1, Institute Technology, Pasadena, 1975
- [37] E.E. ZUKOSKI, FLUID DYNAMIC ASPECTS OF ROOM FIRES Proceedings of the 1st International Symposium on Fire Safety Science, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, pp. 1-30, 1975
- [38] K.K KUO, Principles of combustion, 2nd edition, Wiley and sons, New-York, 2005
- [39] HOUF W., SCHEFER R., Predicting Radiative Heat Fluxes and Flammability Envelopes from Unintended Releases of Hydrogen, 16th Annual Hydrogen Conference and Hydrogen Expo USA. March 29 2005 – April 1, Washington, D.C.
- [40] SCHEFER R.W., HOUF W.G., BOURNE B., COLTON J., Spatial And Radiative Properties Of An Open-Flame Hydrogen Plume, International Journal Of Hydrogen Energy 31 (10): 1332-1340 AUG 2006.
- [41] SCHEFER, HOUF, WILLIAMS, BOURNE, COLTON, Characterisation of high-pressure, underexpanded hydrogen-jet flames, 31/10/2005.
- [42] A.D, JOHNSON, H.M. BRIGHTWELL, A.J.CARSLEY, A model for Predicting the Thermal Radiation Hazards from Large-Scale Horizontally Released Natural Gas Jet Fires. Institution of Chemical Engineers, 1994, Vol. 72, 157-166.
- [43] G, R, KENT, Practical design of flare stacks. Hydrocarbon Processing, 5, 1964
- [44] E. LEPRETTE Ω-5, Le BLEVE, Phénoménologie et modélisation des effets thermiques, Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs, Septembre 2002.
- [45] J.M. LACOME, Ω-19 Détermination des grandeurs caractéristiques du terme source nécessaires à l'utilisation d'un modèle de dispersion atmosphérique des rejets accidentels, Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs, Octobre 2010.
- [46] S. PATEJ, T. DURUSSEL, Experimental Analysis of Jet Fire Impingement on Industrial Pipe. Interflam 2007, 1389-1395
- [47] A.MOLINA, R.W , SCHEFER, W.G. HOUF, Radiative fraction and optical thickness in large-scale hydrogen-jet fires. Proceedings of the Combustion Institute. 2007, Vol.31, 2565-2572.
- [48] J.P. HOLMAN, Heat Transfer. S.I.: Mc Graw-Hill International Edition, 2002
- [49] R.P. CLEAVER, P.S. CUMBER, P. GENILLON, A Model to predict the characteristics of fires following the rupture of natural gas transmission pipelines, Institution of Chemical Engineers, Trans IChemE, Vol 79, Part B, January 2001

[50] F. D. WAYNE, An economical formula for calculating atmospheric infrared transmissivities, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Volume 4, Issue 2, January 1991, Pages 86-92

[51] Proceedings of Symposium on Process Industry Hazards: Accidental release, assessment, containment and control: a symposium organised by the Scottish ... Chemical Engineers symposium series ; no. 47

[52] DNV, JSFH (Jet Fire) Theory Document. 2005

[53] G. LEROY, S. DUPLANTIER, 1D Iterative Model for Predicting Thermal Radiation From Jet Fire, INERIS, Fire and Explosion Hazards, Leeds 2010.

[54] Rapport d'étude INERIS, La résistance des structures aux actions accidentelles, Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs (DRA 35), 2007

[55] Circulaire du 10/05/10 récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers, à l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source et aux plans de prévention des risques technologiques (PPRT) dans les installations classées en application de la loi du 30 juillet 2003, Chapitre 1.1.2 Fiche n°2 : la dispersion atmosphérique - points C.3. et D.4.

[56] Magnussen, B. F, The Eddy Dissipation Model Concept, a bridge between science and Technology, ECCOMAS Thematic Conference on Computational Combustion, Lisbon, June 21-24, 2005.

[57] PEDERSEN, N, Modeling of Jet and Pool Fires and Validation of the Fire Model in the CFD code FLACS, Department of Physics and Technology, University of Bergen, 2012.

[58] VEMBE et al, Kameleon Fireex, A Simulator for Gas Dispersion and Fires, International Gas Research Conference, 1991

9. LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation	Nb pages
ANNEXE 1	Liste d'accidents fournie par le BARPI concernant le phénomène de feu torche- Base de données ARIA	10
ANNEXE 2	Description des modèles de Chamberlain et de Cook (modèles de Shell)	7
ANNEXE 3	Description du modèle de Johnson (modèle de Shell)	3
ANNEXE 4	Calcul du facteur de forme	3

ANNEXE 1
LISTE D'ACCIDENTS
CONCERNANT LE PHENOMENE DE FEU TORCHE
BASE DE DONNEE ARIA (BARPI)

N° 1 - 04/01/1966 - FRANCE - 69 – FEYZIN

23.2Z - Raffinage de pétrole

La raffinerie mise en service en 1964 traite 1,7 Mt/an de pétrole. Sa zone de stockage de GPL comprend 12 850 m³ (capacité théorique 13 100 m³) d'hydrocarbures sous pression dans 10 sphères de propane ou de butane. Les sphères sont au plus proche à 22,50 m de l'autoroute A7. Un aide opérateur prélève un échantillon lors d'une purge sur une sphère de propane de 1 200 m³ remplie à 60 %. Après plusieurs incidents, une procédure opératoire stricte avait été établie pour purger les sphères (ouverture de la vanne supérieure, puis progressivement de la vanne inférieure sans jamais l'ouvrir à fond). A 6h40, l'aide opérateur manœuvres dans le mauvais ordre les vannes en série qui givent et se bloquent. Une fuite de propane génère un nuage inflammable qui dérive lentement jusqu'à l'autoroute. Des voitures le traversent sans conséquences. Mais à 7h15, une voiture arrêtée à 100 m du point de fuite sur le CD4 longeant l'autoroute allume le nuage ; son chauffeur grièvement brûlé décèdera ultérieurement. Un violent chalumeau apparaît sous la sphère 1 min plus tard. Les secours de la raffinerie, de Vienne et de Lyon arrivés entre 7 h et 8h30, essaient de refroidir les sphères voisines et d'éteindre la torchère géante qui prend une nouvelle ampleur après l'ouverture des soupapes de sécurité sur le haut de la sphère. Celle-ci explose brutalement vers 8h45 (1er BLEVE) en faisant 13 victimes. La boule de feu culmine à 400 m de hauteur et atteint 250 m de diamètre. Une sphère voisine de propane explose à son tour à 9h40 (2ème BLEVE) sans faire de victimes. Le bilan humain est lourd : 18 morts dont 11 sapeurs pompiers et 84 blessés sur 158 personnes présentes. D'importants dommages matériels sont observés : inflammation des réservoirs voisins et ouverture de plusieurs sphères de stockage, missiles dus aux BLEVES retrouvés à plus de 700 m dont l'un de 48 t à 325 m, immense cratère à la place des 2 sphères, 8 000 m³ (1 500 t) de produits pétroliers perdus. Le souffle de l'explosion est perçu jusqu'à Vienne (16 km au sud) et 1 475 habitations ont été atteintes. Des responsabilités pénales sont retenues envers l'aide opérateur et l'agent de sécurité pour méconnaissances des consignes. Le Directeur du site est également mis en cause. En matière civile, des dommages et intérêt sont retenus. Cette catastrophe entraîne de profondes réformes de la réglementation et de l'administration chargée du contrôle des installations classées.

N° 88 - 22/03/1989 - ITALIE - 00 - SANNAZARO DE BURGUNDI / PAVIA

23.2Z - Raffinage de pétrole

De l'hydrogène est lâché (cause non précisée) dans une unité de désulfuration de gazole, produisant après allumage une flamme chalumeau horizontale de 50 m de long. L'unité était en phase de fonctionnement normal. Les pompiers de la raffinerie interviennent rapidement et réussissent à stopper l'approvisionnement de la flamme en hydrogène avant le développement d'un accident plus grave. Les dégâts matériels sont peu importants en regard du risque encouru.

N° 3325 - 30/05/1991 - FRANCE - 13 - BERRE-L'ETANG

24.1G - Fabrication d'autres produits chimiques organiques de base

Une fuite se produit sur une conduite d'éthylène de 10 pouces sous 45 b à la suite d'une corrosion électrochimique entre une portion aérienne en tranchée et une portion enterrée protégée par fourreau. La fermeture des vannes d'isolement (2 km) prend 20 min. Malgré le périmètre de protection mis en place, un véhicule d'une entreprise extérieure circulant à proximité cale, enflamme le nuage en redémarrant et allume une torche de 15 m orientée vers un rack de 6 m de haut supportant 10 conduites. Une seconde canalisation d'éthylène de 6 pouces se rompt et s'enflamme. Un tronçon de cette dernière retombe près de la première conduite qui explose. Le feu se communique à un entrepôt abritant 22 m³ de solvants en fûts et 1 000 t de caoutchouc synthétique à 20 m. La quantité d'éthylène impliquée dans l'accident est évaluée à 32 t. On déplore 4 blessés dont un brûlé grave. Les pertes de production sont évaluées à 220 MF. En janvier 2004 et pour défaut d'entretien de la canalisation accidentée, l'ancien directeur du site est condamné à 10 mois de prison avec sursis et 8 000 Euros d'amende, un agent de maîtrise salarié de la société exploitant la conduite d'éthylène à 6 mois avec sursis et 1 000 Euros d'amende, un ingénieur de cette même société à 8 mois avec sursis et 3 000 Euros d'amende ; 5 autres personnes également poursuivies sont relaxées.

N° 4049 - 23/01/1992 - FRANCE - 54 – VARANGEVILLE

24.1A - Fabrication de gaz industriels

Lors du chargement d'un fût de carbure de calcium, une explosion sourde et un départ de feu se produisent dans un générateurs d'une usine de production d'acétylène. Une flamme chalumeau sort du générateur lors de l'enlèvement du fût et noircit le mur du local. Le générateur et les autres installations sont immédiatement mises en sécurité : arrêt alimentation en carbure, compresseurs... Les employés maîtrisent le début d'incendie en 5 mn avec des extincteurs avant l'arrivée des pompiers. Il n'y a pas de victime et les dommages matériels sont limités. Une expertise conclut à une inflammation de l'acétylène, évènement qualifié de rare qui est étudié pour définir les aménagements à effectuer afin d'éviter qu'il ne se reproduise. Lors du chargement d'un fût, l'atmosphère fût-sas est balayée à l'azote, puis un obturateur à joint gonflable ferme le sas. Tout en ne gênant pas la rotation de l'obturateur, des morceaux de carbure accrochés au sas ont empêché le joint de remplir complètement sa fonction. L'acétylène humide passant sur le carbure présent dans la vis et la trémie a provoqué une surchauffe locale. Cette dernière a conduit un début de polymérisation d'acétylène (explosion sourde) d'où une forte dilatation des gaz, une surpression dans le fût évacuée par le trou de purge (souffle anormalement fort) et l'inflammation du mélange acétylène / azote chaud au contact de l'air extérieur. Des procédures de contrôle et de vérification sont modifiées.

N° 4914 - 20/07/1977 - ETATS-UNIS - 00 - RUFF CREEK

60.3Z - Transports par conduites

Un pipeline qui transporte du propane sous une pression de 31 bars se rompt à la suite de phénomène de corrosion ainsi que des contraintes physiques auxquelles il est soumis. Le liquide vaporisé forme un nuage s'étirant sur près d'un kilomètre le long de la vallée. 1h 30 après le début de la fuite, le démarrage d'un camion entraîne une inflammation du nuage. Les 2 passagers du camion sont tués, la fuite de propane s'enflamme en formant une torchère. Une ligne électrique est coupée et 57 bêtes à bétail périssent carbonisées.

N°5243 – 05/10/1985 France – 93 – TREMBLAY-EN-France

H49.50 – Transport par conduites

Le gazoduc reliant FEROLLES à VILLIERS-le-BEL se déchire au passage d'un bulldozer. La conduite (diamètre 500 mm, 60 bars, épaisseur 7,9 mm, profondeur locale 1,10 m) éclate sur 8 m de longueur. Des morceaux de tôle de 110 kg sont projetés jusqu'à 100 m. L'engin est propulsé à plusieurs mètres de hauteur et se retourne en retombant, tandis qu'un cratère oblong de 12 m de long se forme. Une flamme de 60 m de hauteur s'allume 10 s après la rupture. Les 3 ouvriers présents périssent carbonisés à 38, 43 et 110 m de la torche. Les terrains sont calcinés à des distances considérables : 1400°C atteints à 60 m, 1100 °C à 76 m, 600 °C à 97 m, 450°C à 125 m. Les extrémités du tronçon (35 et 9 km) sont isolées après 20 et 40 mm. La réparation débute après 5 heures.

N°5678 – 28/07/1994 France – 76 – CIDEVILLE

H49.50 – Transport par conduites

Un gazoduc (De= 457,2mm ; PMS=67,7 bars ; acier X60; ép.=5,2mm) enterré à 1,20 m et revêtu de polyéthylène est perforé par la foudre et s'enflamme en plein champ, à 200 m d'habitations. Des flammes de 10 m de hauteur sont observées, le maïs est brûlé sur 30 m de rayon. L'impact se situe à l'aplomb d'un piquet en bois de 1,50m planté dans le sol (0,5m) et servant à repérer l'ouvrage; il présente 2 cratères distants de 110mm. Sur l'un, le revêtement a disparu et la paroi est percée, sur l'autre, le revêtement est localement absent et on observe 2 percements. Le sinistre est détecté par un conducteur de train qui donne l'alerte (feu de broussailles). Après 1h10, la fuite de gaz est détectée, l'exploitant alerté. Il a procédé à la décompression du tronçon et au torchage de gaz, après modification du schéma d'alimentation de la zone. Le feu est éteint 7h après la détection du sinistre. La zone endommagée est remplacée (pose de manchette). Le réseau est rétabli 7h plus tard.

N° 6919 - 21/06/1970 - ETATS-UNIS - 00 - CRESCENT CITY

60.1Z - Transports ferroviaires

Dans un convoi ferroviaire, une trémie de sable déraille et entraîne dans sa suite 9 wagons de propane. Perforé, un wagon s'enflamme spontanément. La chaleur déclenche la soupape de sécurité d'un second wagon et crée une flamme chalumeau qui en fait exploser un troisième (BLEVE). Un fragment est propulsé à 180 m et un autre morceau percute le toit d'une station service qui s'effondre. Le second wagon explose 2 heures plus tard. Un de ses fragments est projeté à 500 m. Un quatrième wagon explose et détruit 3 bâtiments situés sur sa trajectoire. 35 minutes plus tard un autre réservoir se rompt, il est bientôt suivi par deux nouveaux wagons. Les fragments de l'un d'entre eux provoquent l'explosion des 2 dernières citernes. 66 personnes sont blessées.

N° 7122 - 30/05/1978 - ETATS-UNIS - 00 - TEXAS CITY

23.2Z - Raffinage de pétrole

Vers 2h du matin, dans une zone de stockage de GCL de l'unité d'alkylation d'une raffinerie (3 sphères, 4 cylindres verticaux et 5 cylindres horizontaux), une sphère de 800 m³ d'isobutane est sur-remplie (de même qu'un des cylindres verticaux) à partir d'un pipeline et se fissure le long d'une ligne de soudure. Très rapidement la fuite s'enflamme et un feu chalumeau est allumé à la source. Moins d'une seconde après, la sphère BLEVE et une énorme (mais dimension non connue) boule de feu se forme : la sphère se rompt en 3 morceaux principaux projetés dans 3 directions (distance max : 80m). La soupape est projetée à 120 m dans une unité gaz, où elle endommage un échangeur à tubes, provoquant un incendie généralisé de l'unité. Des cigares verticaux et horizontaux BLEVENT tour à tour ; 20' après la première, une seconde sphère de 800 m³ d'un mélange butane-butylène (butène) BLEVE et génère une boule de feu d'environ 335 x 200 m. Des fragments sont projetés à 190 m et une soupape à 500m. Les explosions se poursuivent jusqu'à 6h. De nombreux autres effets missiles sont constatés : certains provoquent de gros dégâts voire des effets dominos dans les autres unités ou les matériels de protection (destruction d'une réserve d'eau et d'une pompe incendie par un fragment de la 2ème sphère). Des effets thermiques importants sont rapportés (selon un témoin, effet moins intense pour la 2ème sphère que pour la 1ère).

Des vitres situées face au sinistre sont brisées jusqu'à 3,5 km. L'incendie généralisé nécessite plus de 12 h d'intervention. Au final, seul 1 réservoir vertical cylindrique n'a pas explosé ; il sera retrouvé renversé à quelques mètres. 7 employés sont tués et 10 autres blessés. Le coût global est estimé à 100 M\$ (1986). Le sur-remplissage de la 1ère sphère serait dû à la défaillance d'un détecteur de niveau : une indication en salle de commande est relevée bloquée à 76 % alors qu'un accroissement subi de la pression de 16,5 à 23,5 bar a été détecté à la station de pompage du pipe.

L'estimation de la pression dans la sphère pleine serait de près de 21 bar. Le mauvais fonctionnement d'une soupape serait également en cause. L'administration relève à l'époque 27 'violations' de la réglementation.

N° 7128 - 19/11/1984 - MEXIQUE - 00 - SAN JUAN IXHUATEPEC

40.2C - Distribution de combustibles gazeux

Durant la phase de remplissage d'une zone de stockage de GPL (mélange 80 % butane - 20 % propane) composée de 2 sphères de 2 400 m³, 4 de 1600 m³ et 48 cylindres horizontaux (5 000 m³), une canalisation 8 à 24 bar se rompt. Un nuage de 150 X 200 X 2 m se forme et s'allume 5 à 10 min après sur une torchère à 120 - 150 m de la fuite. Le VCE engendre 5 min après le BLEVE de 2 petites sphères. Une boule de feu au niveau du sol (diamètre = 600 m) se forme. Dans un rayon de 300 m la zone est détruite et la population est décimée. Par effet domino, des explosions se succèdent jusqu'à 11 h. Des fragments de sphères sont projetés à 600 m et 12 cigares-rockets (20 t) sont lancés (1 à 1 200 m). Au total plus de 500 morts, 7 000 blessés, 39 000 évacués et 4 000 sauveteurs sont dénombrés.

N° 8726 - 16/02/1982 - FRANCE - 71 – BLANZY

40.1E - Distribution et commerce d'électricité

Dans une centrale thermique de 250 MW, 13 000 l d'huile de lubrification s'enflamment au contact d'une canalisation de vapeur surchauffée. Les fumées envahissent la salle de contrôle. Un flash se produit avec les vapeurs d'huile accumulées sous la toiture occasionnant d'importants dommages. L'huile haute pression a engendré des vibrations lors du pompage des soupapes d'admission de la turbo pompe alimentaire (TPA) qui se sont transmises à des tuyauteries basse pression en cuivre (diam. 22 mm) d'huile de graissage. La rupture d'une brasure constitue la cause principale de l'accident. Le jet d'huile a projeté des gouttelettes qui se sont enflammées sur les différents points chauds locaux en donnant naissance à un chalumeau à flamme verticale orientée vers le haut et alimenté à un débit de 250 à 300 l/min durant 45 min, temps de fonctionnement de la pompe. Les réparations durent plus d'un mois. Les dommages sont évalués à 10 MF. Des mesures correctives sont apportées lors des travaux pour éviter un autre incident.

N° 9516 - 15/04/1996 - CANADA - 00 – WINNIPEG

60.3Z - Transports par conduites

Un pipeline de gaz se rompt sous une rivière. Un nuage gazeux se forme et se déplace, en remontant la rivière. Il s'enflamme en détruisant une maison vide et en incendiant plusieurs arbres. La remontée de la flamme jusqu'à la fuite crée une torche de 45 m de haut. L'arrivée de gaz est coupée, ce qui permet de maîtriser le sinistre.

N° 10167 - 05/10/1979 - ITALIE - 00 – PRIOLO

YY.0Z - Activité indéterminée

Un feu se déclare au niveau d'une vanne de purge restée ouverte sur un circuit de recyclage de propylène. Le feu chalumeau provoque l'explosion des canalisations voisines. Une personne est tuée.

N° 17776 - 02/05/2000 - FRANCE - 13 - LA CIOTAT

28.7C - Fabrication d'emballages métalliques légers

Sur le parc de stationnement poids-lourds d'une usine fabriquant des emballages métalliques, un chariot élévateur de 12 t équipé au GPL-C explose à la suite d'un incendie. Le chauffeur d'un camion stationnant depuis 3 j sur le parking de l'usine, constate que sa batterie est épuisée et fait appel au conducteur d'un chariot élévateur. Il maintient le chariot en accélération pendant 3 min après avoir relié les 2 groupes de batteries. Lors de la tentative de démarrage du camion, une flamme bleue de type chalumeau sort du chariot au niveau des fourches transpalettes. Le chauffeur, qui ne parvient pas à éteindre l'incendie à l'aide d'un extincteur, décide avec le personnel d'attendre les pompiers et de reculer à 150 m. Le chariot explose 8 à 10 min après le départ de feu, provoquant une boule de feu type champignon et de gros dégâts au camion et au chariot. Il n'y a pas de blessé. La bouteille GPL de 13 kg qui est retrouvée à 40 m, n'était apparemment pas munie d'équipement de sécurité.

N° 18653 - 12/09/2000 - 38 - BOURGOIN-JALLIEU

40.2 - Production et distribution de combustibles gazeux

A la suite d'une fuite de gaz sur le réseau moyenne pression (inf. à 4 bars) , un incendie se déclare dans une rue en centre ville. Un tracto-pelle insuffisamment stabilisé est à l'origine de l'accident. Il bascule dans une tranchée et, dans sa chute, sectionne le réseau électrique et arrache une conduite de gaz qui s'enflamme aussitôt. Les 3 ouvriers présents dans la tranchée de même que le chauffeur peuvent s'échapper. Chauffés par l'incendie, les réservoirs de l'engin explosent. Des flammes de plusieurs mètres de haut s'élèvent de la tranchée, la canalisation en polyéthylène fond sous l'action du feu. Les services de secours et les services techniques du gaz interviennent rapidement. Les vannes sont fermées et un périmètre de sécurité mis en place. Les 80 enfants d'une école maternelle toute proche sont évacués, de même que les 52 pensionnaires d'une maison de retraite. En milieu d'après-midi, la situation redevient normale (soit quelques heures après l'incendie).

N° 19531 - 19/09/2000 - 76 - PETIT-COURONNE

23.2 - Raffinage de pétrole

L'unité CLAUS d'une raffinerie se déclenche et entraîne un dégagement à la torche. Aucun effet ne sera constaté sur l'environnement et le quota en SO₂ de l'arrêté est respecté.

N° 19541 - 07/12/2000 - 76 - GONFREVILLE-L'ORCHER

23.2 - Raffinage de pétrole

A la suite du dérèglement de courte durée d'une unité de distillation et de séparation des gaz, les rejets s'effectuent à la torche.

N° 19917 - 09/01/200 - CANADA - ALBERTA

60.3 - Transports par conduites

Une fuite sur un pipeline de sulfure d'hydrogène se produit lors de travaux de maintenance. Un employé injecte des inhibiteurs de corrosion dans la canalisation lorsqu'un raccord fileté cède et génère la fuite. La société indique qu'elle a perdu 9 000 m³ de gaz lors de l'accident en 11 h, temps nécessaire aux ouvriers pour réparer la canalisation. Une grande partie du gaz a cependant pu être brûlée à l'aide d'une torche, seuls 800 m³ se seraient répandus dans l'air ambiant. Pendant l'intervention des secours, l'accès à la zone a été limité et les riverains proches du lieu de l'accident ont été évacués.

N° 21130 - 06/10/2000 - Belgique - ANTWERP

23.2Z - Raffinage de pétrole

A 00h27, un employé essaie de remplacer un manomètre situé sur un piquage à l'aval hydraulique d'une pompe qui achemine du propylène depuis une capacité vers le dépropaniseur (tour assurant la séparation du propane du reste des produits) du craqueur de l'unité éthylène d'une raffinerie. La pompe se trouve en limite de l'unité, en bordure d'une zone dégagée. Sa pression de refoulement est de 20 bars. L'employé tente de dévisser le manomètre sur le piquage à l'aide d'une clé. Pendant cette manœuvre, le piquage se casse au droit du raccordement sur la tuyauterie de refoulement de la pompe.

Un jet de propylène atteint l'employé puis se dirige vers une zone dégagée. Un nuage de gaz se forme à proximité de l'unité de production puis s'enflamme très rapidement et s'accompagne d'une explosion et d'une boule de feu d'environ 20 m de diamètre. Le feu se limite ensuite à un « chalumeau » qui perdure pendant quelques minutes avant que la fuite de propylène ne soit stoppée. Les calculs font état d'un débit estimé à 16 t/h. La quantité rejetée est d'environ 1 t. Les vêtements de l'employé s'enflamment et est brûlé au 3ème degré, en particulier au visage, aux bras et aux jambes malgré le port de vêtements conformes aux règles de sécurité. Les dégâts matériels sont limités. L'enquête diligentée a montré que la victime avait suivi une procédure correcte pour le remplacement du manomètre, mais que l'épaisseur du tube utilisé n'était pas conforme à la spécification d'origine (2,6 mm mesuré pour une spécification de 3,7 mm). La construction d'un raccordement non conforme est la cause directe de l'accident, sans que l'enquête n'ait pu établir dans quelles circonstances la non conformité était apparue. Un vaste programme de contrôle et de réparation a été mis en oeuvre sur les piquages couramment utilisés et à risque, les autres piquages étant inclus dans un plan de contrôles périodiques. La mise en place d'un système d'assurance qualité

concernant les travaux de construction de même que pour toute réparation et modification est par ailleurs décidée.

N° 21196 - 08/10/2001 - FRANCE - 62 – HARNES

24.1G - Fabrication d'autres produits chimiques organiques de base

Un feu se déclare sur le réacteur d'hydrogénation primaire d'une usine chimique synthétisant alcools et acides par réactions d'oxonisation entre oléfines et mélanges gazeux H₂ / CO. Les alcools sont ainsi synthétisés en 3 étapes : oxonisation HP (280 b) / BP (inférieur à 3 b), hydrogénation primaire (63 b), distillation sous vide et hydrogénation finale (63 b). A 2h35, une chute de pression est notée sur l'unité d'hydrogénation ; une tuyauterie tracée et calorifugée (DN 50, ép. 3,6 mm,) connexe à un séparateur et contenant de l'H₂ à 40 bar fuit. L'unité est dépressurisée à 2h40, mais 15 mn plus tard l'H₂ s'enflamme par autoéchauffement générant un feu de chalumeau dirigé vers l'intérieur de l'unité.

Le POI est déclenché, 4 lances refroidissent l'unité et le feu est maîtrisé à l'aide d'extincteurs à 3h15. Sur les lieux avec d'importants moyens à 3h10, les pompiers n'interviennent pas et le POI est levé à 3h30. Les dommages matériels et l'impact sur l'environnement (fumée) sont limités. Une expertise de la tuyauterie révèle une fissure (30 mm) perpendiculaire à l'axe de la canalisation dans l'extrados d'un coude, une corrosion vers la portée de joint de la bride d'assemblage avec le condenseur et une corrosion interne du coude. La canalisation a subi une corrosion / érosion et les contraintes dues à un supportage insuffisant qui ont fragilisé le coude. Des contrôles d'épaisseurs sont effectués, la canalisation est remplacée (ép. 5,6 mm) et un supportage adapté est mis en place.

N°23524

17/11/2002

77 – GRANDPUITS-BAILLY-CARROIS

23.2Z – Raffinage de pétrole

Dans une raffinerie, en début de soirée (20h22), une fuite enflammée se produit sur une colonne de strippage de l'unité d'hydrotraitement des essences. Cette opération a pour but d'éliminer certaines impuretés (composés soufrés, azotés, oxygénés, métaux) avant passage dans l'unité de réformage. Un mélange d'essences, de gaz de pétroles (fuel-gas, butane, propane) et d'hydrogène circule dans l'échangeur du rebouilleur. Sa température est de 440°C pour une pression de 25 bars. La fuite est survenue au droit du plan de joint de cet échangeur, du côté du fluide chaud et s'est immédiatement auto-enflammée en provoquant un dard d'une dizaine de mètres de long. L'alerte est déclenchée ainsi que le POI et l'unité passe en arrêt dans les 5 min, suivant la séquence d'arrêt d'urgence. Puis, elle est décomprimée vers l'unité de fuel-gas et la torche. Afin de protéger les unités situées à proximité et d'éviter toute propagation du feu, des rideaux d'eau sont mis en oeuvre par l'intermédiaire de 9 canons à eau, jusqu'à l'extinction du feu. Par ailleurs, les pompiers externes mettent en place un tapis de mousse à titre préventif. Après 1h, l'intensité du feu baisse fortement et le sinistre est maîtrisé à 23h30. Les différentes unités sont mises en sécurité par inertage à l'azote et à la vapeur d'eau. Un employé est légèrement blessé lors des manoeuvres d'isolement de l'échangeur. Les dégâts matériels se montent à 4,3 M euros. De plus, l'unité d'hydrotraitement et le réformeur sont arrêtés durant plusieurs semaines : les pertes d'exploitation se montent à 1,7 M euros. Leur redémarrage sera soumis à un protocole normalisé. Après les constats initiaux, une première hypothèse est émise sous réserve des investigations ultérieures. La fuite pourrait résulter d'un défaut d'origine de l'échangeur : un problème de circularité au niveau de la gorge du logement de joint aurait pu rendre le positionnement de ce dernier délicat. Ainsi, lors du dernier remplacement de joint, un mauvais accostage aurait pu provoquer une mauvaise étanchéité sur une partie de la circonférence. L'exploitant contrôle les échangeurs de même type afin de vérifier les assemblages. Une expertise judiciaire est effectuée.

N°25494

12/08/2003

38 – SALAISE-SUR-SANNE

24.1A – Fabrication de gaz industriels

Dans une usine de production de gaz industriels, une fuite sur un cadre de 28 bouteilles d'hydrogène (H₂) s'enflamme, sans provoquer de dégâts importants. Un opérateur déplace le cadre en cours de remplissage sur le poste extérieur annexe, le poste principal étant à l'arrêt pour cause de travaux à proximité. Ce déplacement, alors que le flexible était toujours connecté au cadre, provoque la rupture de la lyre et une fuite d'H₂ dirigée contre le fût des bouteilles.

Immédiatement, les capteurs de gaz de l'atelier de conditionnement détectent l'anomalie et provoquent l'arrêt d'urgence de l'atelier : la vanne d'alimentation en H₂ est automatiquement fermée. L'opérateur dévisse le flexible pour éloigner le cadre de l'atelier et l'amener vers un point d'eau, en contournant le bâtiment. Sur le trajet, la fuite d'H₂, s'enflamme ; l'opérateur immobilise le cadre sur le sol et donne l'alerte. L'équipe de sécurité débute l'arrosage du cadre au moyen de la lance incendie, alerte les secours externes et déclenche manuellement l'arrêt d'urgence : la production d'H₂ est interrompue et l'inertage à l'azote des parties sensibles de l'installation est engagé. Lorsque les pompiers arrivent, 15 min plus tard, le cadre s'étant vidé, le feu s'éteint. L'arrosage est néanmoins maintenu du fait de la température très élevée des bouteilles dont le fût est incandescent, et ce, jusqu'à ce qu'un pyromètre à infrarouge soit disponible sur site pour évaluer la température des parois des bouteilles. Le site de l'usine est évacué. Une heure plus tard, la température du cadre chutant à 25 °C, l'alerte est levée. L'analyse formelle de l'accident en a révélé les causes : la configuration du poste de remplissage annexe ne permet pas la visualisation claire de la connexion du flexible de remplissage ; lorsque l'opérateur a déplacé le cadre pour le ranger, le câble anti-fouet du flexible étant accroché à la lyre, le déplacement a provoqué la rupture de celle-ci. Les actions correctives prises sont les suivantes : suppression du poste de remplissage annexe ; modification du poste de remplissage principal de façon à rendre visible le raccordement cadre/flexible ; ajout sur les cadres d'un anneau d'accrochage pour le câble anti-fouet ; achat d'un pyromètre infrarouge ; aménagement d'une zone permettant l'isolement d'emballages défectueux, loin des zones de production et de stockage.

N°27681

30/07/2004

Belgique - GHISLENGHIEN

60.3Z - Transports par conduites

Une violente explosion se produit sur un gazoduc reliant Zeebrugge à la frontière franco-belge, dans une zone industrielle. Vers 8h30, une fuite est décelée par le sifflement émis par le gaz non "odorisé" à ce stade. Les secours se rendent pour les premières interventions sur zone : elle se situe à proximité d'une usine de fabrication d'outils abrasifs en construction où travaille une trentaine de personnes. Le gazoduc est enterré à 1,10 m de profondeur (diam : 1 m ; P= 80 bar). A 9h, une violente explosion, ressentie à plusieurs km, se produit, accompagnée d'une boule de feu. Le feu s'étend à 2 entreprises voisines qui sont détruites : une station-service et le site en construction. Le gazoduc est isolé. Au 08.09, le bilan est très lourd : 24 personnes décédées (5 pompiers, 1 policier, des employés d'entreprises voisines), 50 blessés graves, brûlés pour la plupart, répartis dans les hôpitaux du pays et du nord de la France, et 79 blessés plus légers. Le plan d'urgence le plus élevé est déclenché, un centre de crise fédéral est mis en place. Les populations sont invitées à se confiner, les autoroutes E429 et A8 coupées jusqu'en fin d'après-midi ainsi que la nationale 7.

Le pays met en œuvre de gros moyens en hommes et matériels (5 hélicoptères, armée), renforcés par ceux envoyés par la France (65 secouristes, 13 ambulances, des hélicoptères, un poste médical avancé), l'Allemagne, le Luxembourg, les Pays-Bas. Les dégâts sont très importants et étendus: selon les témoins, un cratère d'une dizaine de m de diamètre et d'une profondeur de 5 m, zone brûlée sur plusieurs centaines de m, voitures calcinées jusqu'à 500 m, débris éparpillés jusqu'à 6 km. Un tronçon de la canalisation de 6 t (?) est retrouvé à 150 m. Selon la presse, des traces suspectes (prof. : 10 mm) auraient été constatées sur le tronçon récupéré favorisant la thèse défendue par l'exploitant du gazoduc d'un dégât déjà causé par un engin. Selon ce dernier, une modification du mode d'exploitation du pipeline cumulée à cette dégradation a pu conduire à la fuite. L'exploitation du pipeline reprend le 10.09.04. Celle du pipeline voisin, légèrement endommagé lors de l'accident, avait repris le 09.08.04. Le bilan final est de 24 morts et 132 blessés. Le procès, visant à déterminer les responsabilités dans la catastrophe, s'est déroulé du 15 juin 2009 au 22 février 2010, au tribunal correctionnel de Tournai. 11 des 14 prévenus sont acquittés, dont la mairie d'Ath, l'exploitant du gazoduc, et le commanditaire des travaux. 3 personnes sont condamnées, pour «homicide involontaire par défaut de prévoyance ou de précaution», dont l'architecte responsable des travaux, la société réalisant les travaux, et le conducteur des travaux.

N°30156

07/03/2005

67 – REICHSTETT

40.2C – Distribution de combustible gazeux

Dans un centre emplisseur de GPL, une fuite enflammée de propane se produit sur une chaîne de remplissage de bouteille de 35 kg lorsque l'opérateur veut contrôler la présence du limiteur de débit sur la bouteille. Le jet de gaz s'est enflammé au contact de la protection en plexiglas du poste de travail, par effet électrostatique (la plaque de plexiglas étaient isolée électriquement). La fuite est stoppée par fermeture du robinet de la bouteille et l'atelier est mis en sécurité. Les dommages sont minimes. L'analyse de l'accident conduit à modifier la protection du poste de travail et la procédure de contrôle de la présence du limiteur de débit.

N°37747

18/12/2009

54 – BLENOD-LES-PONTS-A-MOUSSON

D35-11 – Production d'électricité

Dans l'enceinte d'une centrale électrique thermique, une fuite de gaz enflammée se produit vers 11 h sur un gazoduc (pression de 60 bar, DN 300). L'ouvrage venait d'être inauguré 4 jours avant l'accident pour alimenter une nouvelle unité à Cycle Combiné de Gaz (CCG) sur le site. Le bulldozer, utilisé pour la manutention de tas de charbon, a été mis en œuvre pour aplanir les bosses et combler les trous d'un chemin de terre ; alors que l'engin circule au dessus de la canalisation, une fuite se produit et s'enflamme très rapidement. Le conducteur de l'engin, pris dans les flammes, décède et le bulldozer est détruit. Une personne choquée est évacuée vers un centre hospitalier. L'exploitant de la canalisation ferme les vannes d'alimentation vers 12h15 pour laisser la flamme s'éteindre d'elle même ; 2 h sont nécessaires pour purger la conduite. Les opérations de secours ont nécessité l'évacuation de 150 personnes. Un retard dans la mise en service de la centrale à CCG est envisagé. L'étude de sécurité de la canalisation identifie explicitement le passage d'engins de travaux publics. La conception ou les modalités de pose de la canalisation ainsi que les circonstances dans lesquelles le bulldozer a été amené à circuler dans la zone de l'accident font l'objet d'un examen attentif dans le cadre des diverses enquêtes en cours. Une enquête judiciaire est effectuée pour "homicide involontaire".

ANNEXE 2
DESCRIPTION DES MODELES DE CHAMBERLAIN ET DE COOK
(MODELES DE SHELL)

1 – Géométrie de la flamme

Détermination de la longueur de flamme L_{b0} dans l'air sans vent :

Tout d'abord, pour obtenir la longueur de flamme L_{b0} , il faut préalablement résoudre itérativement l'équation suivante:

$$C_a Y^{5/3} + C_b Y^{2/3} - C_c = 0 \quad (55)$$

Cette équation inclut les coefficients suivants :

$$C_a = 0,024 \left(\frac{g D_s}{u_j^2} \right)^{1/3} \quad (56)$$

$$C_b = 0,2 \quad (57)$$

$$C_c = \left(\frac{2,85}{W} \right)^{2/3} \quad (58)$$

⇒ la constante 2.85 est seulement valable pour les pétroles.

La longueur de la flamme dans l'air au repos s'écrit comme une fonction de la variable adimensionnelle Y et du diamètre effectif D_s telle que :

$$L_{b0} = Y D_s \quad (59)$$

Détermination de la longueur du jet enflammé mesurée entre la brèche et le centre de la base W_2 :

$$L_b = L_{b0} (0,51 e^{-0,4U_w} + 0,49) (1 - 0,00607(\theta_{jv} - 90)) \quad (60)$$

où :

θ_{jv} = Angle entre l'axe de la brèche et le plan horizontal dans la direction du vent (°)

U_w = Vitesse du vent (m/s)

Détermination de l'angle α entre l'axe de la brèche et celui du jet enflammé :

Le nombre de Richardson qui correspond à l'inverse de la racine cubique du nombre de Froude et qui permet d'estimer l'importance de la convection naturelle par rapport à la convection forcée est obtenu de la façon suivante :

$$Ri(L_{B0}) = \left(\frac{g}{D_s^2 u_j^2} \right)^{1/3} L_{B0} \quad (61)$$

L'angle α dépend de la valeur de $R = u_w/u_j$, rapport entre la vitesse du vent et la vitesse du jet en sortie de zone d'expansion :

$$\alpha = (\theta_{jv} - 90^\circ) \left(1 - e^{-25,6 R_w} \right) + \frac{8000 R}{Ri(L_{B0})} \quad \text{Si } \alpha \leq 0,05 \quad (62)$$

$$\alpha = (\theta_{jv} - 90^\circ) \left(1 - e^{-25,6 R_w} \right) + \frac{(134 + 1726(R - 0,026)^{1/2})}{Ri(L_{B0})} \quad \text{Si } \alpha > 0,05 \quad (63)$$

$$\cos \theta_{jv} = \cos \Omega \cos \theta_j \quad \theta_j \leq \theta_{jv} \leq 90^\circ \quad (64)$$

Avec :

Ω = Angle entre la direction du vent et le vecteur normal perpendiculaire à la brèche dans le plan horizontal

θ_j = Angle entre l'axe de la brèche et l'horizontal dans le plan vertical

Détermination du décollement de la flamme

Le décollement de la flamme b se définit comme la distance le long de l'axe de la brèche entre la brèche et le point P. Cette distance augmente avec la vitesse du jet jusqu'à ce que la flamme se retrouve « soufflée ».

$$b = L_B \frac{\sin \left\{ (0,185 e^{-20R} + 0,015) \alpha \right\}}{\sin \alpha} \quad (65)$$

Dans l'air sans vent ($\alpha = 0^\circ$), $b = 0,2 L_B$. Pour des flammes prises dans de forts vents ($\alpha = 180^\circ$), alors $b = 0,015 L_B$.

Détermination de la longueur du tronc de cône R_L :

$$R_L = \left(L_B^2 - b^2 \sin^2 \alpha \right)^{1/2} - b \cos \alpha \tag{66}$$

Détermination des bases du tronc de cône W_1 et W_2 :

Au préalable, les deux valeurs suivantes doivent être calculées :

$$Ri(D_s) = \left(\frac{g}{D_s^2 u_j^2} \right)^{1/3} D_s \tag{67}$$

$$C = 1000 e^{-100 R} + 0,8 \tag{68}$$

Les diamètres des bases W_1 et W_2 s'écrivent alors :

$$W_1 = D_s \left(13,5 e^{-6 R} + 1,5 \right) \times \left(1 - 1 \left(\frac{1}{15} - \left(\frac{\rho_{air}}{\rho_j} \right)^{1/2} \right) e^{(-70 Ri(D_s) C)} \right) \tag{69}$$

$$W_2 = L_B \left(0,18 e^{-1,5 R} + 0,31 \right) \left(1 - 0,47 e^{-25 R} \right) \tag{70}$$

Cook & al. (1987) ont apporté des modifications à cette corrélation en modifiant le dernier terme de la base W_1 .

$$W_1 = D_s \left(13,5 e^{-6 R} + 1,5 \right) \times \left(1 - 1 \left(\frac{1}{15} - \left(\frac{\rho_{air}}{\rho_j} \right)^{1/2} \right) e^{(-7,5 R)} \right) \tag{71}$$

Détermination de l'enveloppe de la flamme A :

Cette enveloppe comprend la surface latérale du cône tronqué ainsi que les disques des deux extrémités de la flamme telle que :

$$A = \frac{\pi}{4} (W_1^2 + W_2^2) + \frac{\pi}{2} (W_1 + W_2) \left(R_l^2 + \left(\frac{W_2 - W_1}{2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (72)$$

ANNEXE 3

DESCRIPTION DU MODELE DE JOHNSON (MODELE DE SHELL)

1 – Géométrie de la flamme

Détermination de la longueur du jet enflammé L_{b0} dans l'air sans vent :

Elle est identique à celle du modèle de Shell (Cf. Annexe 2)

Détermination de la longueur du jet enflammé mesurée entre la brèche et le centre de la base W_2 :

$$L_B = \sqrt{X^2 + Z^2} \quad (73)$$

Avec :

$$\frac{X}{L_{b0}} = f(\xi)(1 + r(\xi)\Omega_X) \quad (74)$$

$$\frac{Z}{L_{b0}} = h(\xi)(1 - c(\xi)\Omega_X) \quad (75)$$

Par ailleurs,

$$\Omega_X = \left[\frac{\rho_{amb}}{\rho_j} \right]^{\frac{1}{2}} \left[\frac{L_{b0} U_w \cos \phi}{2r_j v_j} \right] \quad (76)$$

Les variables $f(\xi)$, $r(\xi)$, $h(\xi)$, $c(\xi)$ sont corrélées à partir des essais expérimentaux de la façon suivante :

$$f(\xi) = \begin{cases} 0.55 + (1 - 0.55)e^{-0.168\xi(L_{B0})} & \left\{ \begin{array}{l} \xi(L_{B0}) \leq 5.11 \\ \xi(L_{B0}) > 5.11 \end{array} \right. \dots \dots \dots \end{cases} \quad (77)$$

$$r(\xi) = \begin{cases} 0.0 & \left\{ \begin{array}{l} \xi(L_{B0}) \leq 3.3 \\ \xi(L_{B0}) > 3.3 \end{array} \right. \dots \dots \dots \end{cases} \quad (78)$$

$$h(\xi) = \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{\xi(L_{B0})}\right)^{8.78}} \quad (79)$$

$$c(\xi) = 0.02\xi(L_{B0}) \quad (80)$$

Détermination de l'angle α entre l'axe de la brèche et celui du jet enflammé :

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{X - B}{R_L}\right) \quad (81)$$

Avec

$$R_L = \sqrt{(X - B)^2 + Z^2} \quad (82)$$

Ces deux termes s'obtiennent géométriquement.

Détermination du décollement de la flamme:

$$B = 0.141(G_j \rho_{amb})^{0.5} \quad (83)$$

Avec

$$G_j = \pi \rho_j (r_j u_j)^2 \quad (84)$$

Détermination des deux bases W_1 et W_2 :

$$W_1 / B = -0.18 + 0.081\xi(L_{B0}) \quad (85)$$

$$W_2 / Lb_{xy} = -0.004 + 0.0396\xi(L_{B0}) - \Omega_x (0.0094 + 9.5 \times 10^{-7} (\xi(L_{B0}))^5) \quad (86)$$

Avec

$$Lb_{xy} = (X^2 + Z^2)^{\frac{1}{2}} \quad (87)$$

Détermination de l'enveloppe de la flamme A :

Elle est identique à celle explicité dans l'ANNEXE 2.

ANNEXE 4

CALCUL DU FACTEUR DE FORME

Le facteur de vue se définit comme la fraction de l'énergie totale émise par la flamme qui est reçue par une cible donnée. La valeur de ce facteur dépend de la distance entre la flamme et la cible, de la forme géométrique de la flamme et de l'orientation de la flamme et de la cible. Il existe plusieurs méthodes pour calculer le facteur de vue. Deux méthodes sont présentées ci-dessous :

- La méthode analytique (Utilisé dans les cas particuliers où la flamme est assimilée à un cylindre)
- La méthode numérique (Utilisée dans la majorité des cas)

1- La méthode analytique

Afin de déterminer le facteur de vue, la flamme sera approximée à un cylindre inclinée comme le montre la Figure 1 (Atallah, 1990).

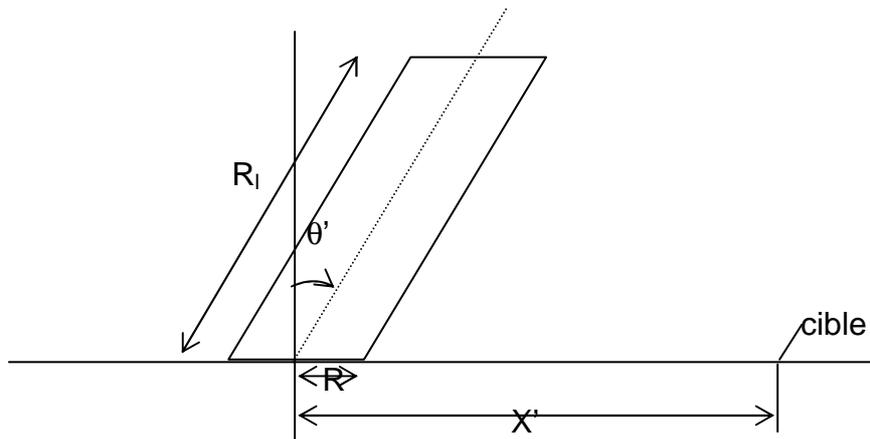


Figure 17 : Géométrie de la flamme pour une flamme cylindrique inclinée.

Pour calculer le facteur de vue maximal F_{view} , il faut exprimer le facteur de vue pour une cible verticale F_v et celui pour une cible horizontale F_h tels que :

$$\begin{aligned} \pi F_v = & -E \tan^{-1} D + E \left(\frac{a^2 + (b+1)^2 - 2b(1+a \sin \theta')}{AB} \right) \tan^{-1} \left(\frac{AD}{B} \right) \\ & + \frac{\cos \theta'}{C} \left[\tan^{-1} \left(\frac{ab - F^2 \sin \theta'}{FC} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{F \sin \theta'}{C} \right) \right] \end{aligned} \quad (88)$$

$$\begin{aligned} \pi F_h = & \tan^{-1} \left(\frac{1}{D} \right) - \left(\frac{a^2 + (b+1)^2 - 2(b+1+ab \sin \theta')}{AB} \right) \tan^{-1} \left(\frac{AD}{B} \right) \\ & + \frac{\sin \theta'}{C} \left[\tan^{-1} \left(\frac{ab - F^2 \sin \theta'}{FC} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{F \sin \theta'}{C} \right) \right] \end{aligned} \quad (89)$$

où :

$$\begin{aligned} a = \frac{R_l}{R} \\ b = \frac{X'}{R} \end{aligned} \left. \vphantom{\begin{aligned} a = \frac{R_l}{R} \\ b = \frac{X'}{R} \end{aligned}} \right\} \text{ où } R = \frac{W_1 + W_2}{4}$$

$$A = \sqrt{a^2 + (b+1)^2 - 2a(b+1) \sin \theta'}$$

$$B = \sqrt{a^2 + (b-1)^2 - 2a(b-1) \sin \theta'}$$

$$C = \sqrt{(1+(b^2-1) \cos^2 \theta')}$$

$$D = \sqrt{\frac{b-1}{b+1}}$$

$$E = \frac{a \cos \theta'}{b - a \sin \theta'} \quad F = \sqrt{b^2 - 1}$$

Le facteur de vue quadratique F_{view} s'écrit alors:

$$F_{\text{view}} = \sqrt{F_v^2 + F_h^2} \quad (90)$$

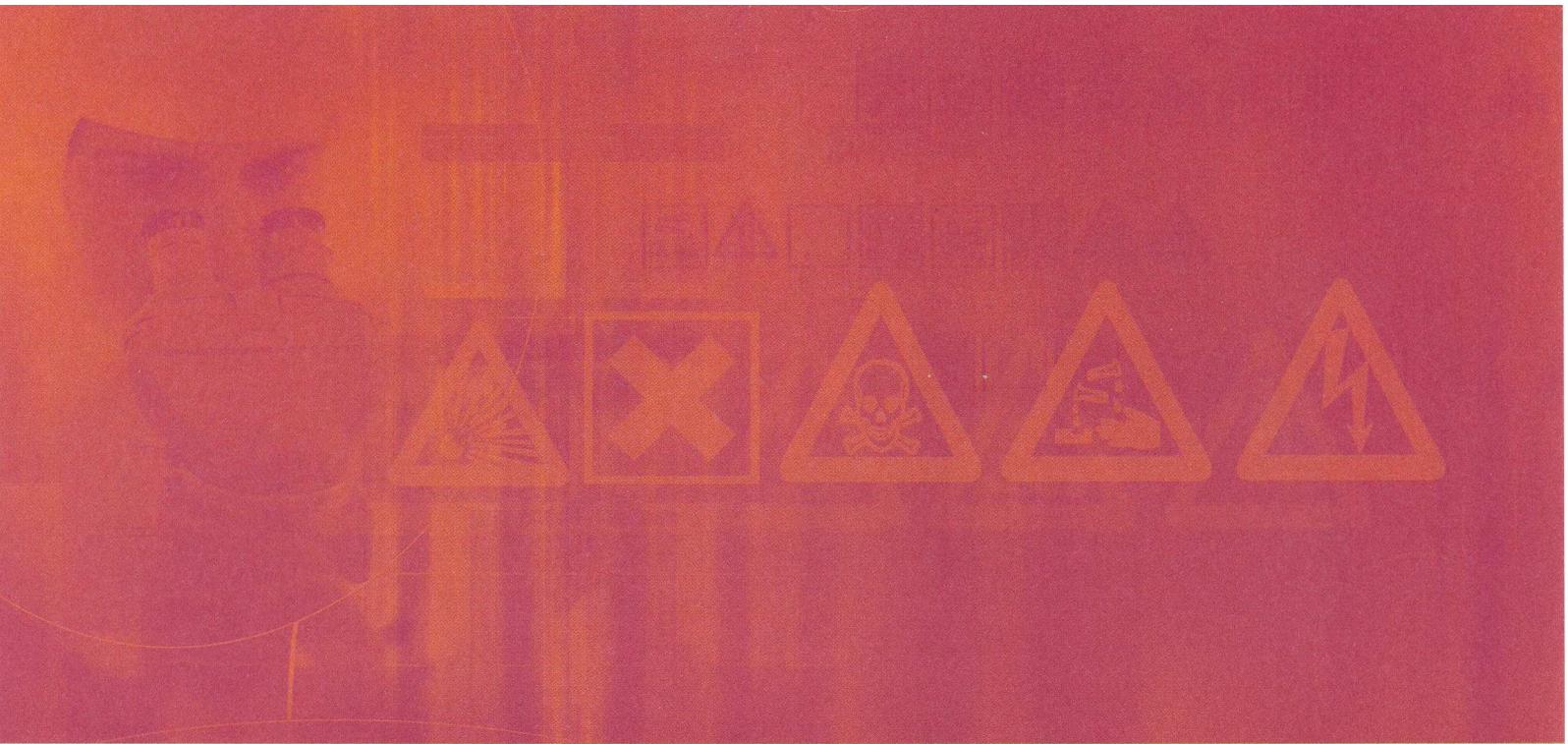
Cette méthode ne s'applique que dans les cas où le diamètre de la base de la flamme est similaire à celui du sommet, c'est-à-dire lorsque la flamme peut s'assimiler à un cylindre. Par ailleurs, la cible étant parallèle à la flamme, le facteur de vue reçu par cette dernière n'est pas totalement caractéristique d'un facteur de vue réel, particulièrement lorsque la flamme est fortement penchée.

2- La méthode numérique

C'est la méthode la plus précise mais la plus difficile à mettre en place. La surface source est discrétisée en $n \times n$ surfaces élémentaires, puis le Facteur de Vue est calculé sur chacune de ces surfaces élémentaires en fonction de la position de la cible.

Le Facteur de vue final recherché appliqué à la cible située à la distance k correspond à la somme des facteurs de vue de chaque surface élémentaire, pondéré par la surface, c'est-à-dire :

$$F_{VC \rightarrow C} = \sum F_{S_{ik} \rightarrow C} = \sum_{ik} \frac{\cos \varphi_{S_{ik}} \cos \varphi_{C_{ik}}}{\pi r_{ik}^2} dS_{ik} \quad (91)$$



*maîtriser le risque
pour un développement durable*

Institut national de l'environnement industriel et des risques

Parc Technologique Alata
BP 2 - 60550 Verneuil-en-Halatte

Tél. : +33 (0)3 44 55 66 77 - Fax : +33 (0)3 44 55 66 99

E-mail : ineris@ineris.fr - **Internet** : <http://www.ineris.fr>