

RAPPORT D'ÉTUDE
N° DRA-17-164793-09921A

21/09/2017

**Formalisation du savoir et des outils dans le
domaine des risques majeurs**

Ω-5

**Le BLEVE, phénoménologie et modélisation des
effets**

Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs

Ω-5 Le BLEVE, phénoménologie et modélisation des effets

**Direction des Risques Accidentels
Verneuil-en-Halatte (60)**

Liste des personnes ayant participé à l'étude : Laure HEUDIER, Christophe PROUST

PREAMBULE

Les rapports Oméga sont la propriété de l'INERIS. Il n'est accordé aux utilisateurs qu'un droit d'utilisation n'impliquant aucun transfert de propriété.

Le rapport Oméga est établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur, ainsi que des pratiques et méthodologies développées par l'INERIS. Bien que l'INERIS s'efforce de fournir un contenu fiable, il ne garantit pas l'absence d'erreurs ou d'omissions dans ces documents.

Ce rapport est destiné à des utilisateurs disposant de compétences professionnelles spécifiques dans le domaine des risques accidentels. Les informations qu'il contient n'ont aucune valeur légale ou réglementaire. Ce sont des informations générales et ne peuvent, en aucun cas, répondre aux besoins spécifiques de chaque utilisateur. Ces derniers seront donc seuls responsables de l'utilisation et de l'interprétation qu'ils feront des rapports. De même, toute modification et tout transfert de ces documents se fera sous leur seule responsabilité.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra, en aucun cas, être engagée à ce titre. En toute hypothèse, la responsabilité de l'INERIS ne pourra être retenue que sur la base de la version française de ces rapports.

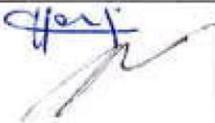
	Rédaction	Relecture	Vérifications		Approbation
NOM	L. HEUDIER C. PROUST	Franck PRATS	Emmanuel LEPRETTE	Frédéric MERLIER	Stéphane DUPLANTIER
Qualité	Ingénieur Unité EMEX Réfèrent Technique DRA-PHDS Direction des Risques Accidentels	Responsable du programme EAT-DRA-76 Direction des Risques Accidentels	Responsable de l'Unité EMEX Direction des Risques Accidentels	Délégué Appui à l'Administration Direction des Risques Accidentels	Responsable du Pôle PHDS Direction des Risques Accidentels
Visa					

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	5
1.1	Les référentiels OMEGA	5
1.2	Domaine d'application	5
1.3	Modifications apportées à la précédente version (2002)	6
1.4	Structure du présent document	6
2	RETOUR D'EXPÉRIENCE	7
2.1	Quelques exemples d'accidents significatifs	7
2.1.1	BLEVE de camions-citernes de GPL dans une entreprise de transport de matières dangereuses (Bassens, France, 03/04/2016)	7
2.1.2	BLEVE de camions-citernes de GPL dans une entreprise de transport de matières dangereuses (Port-La-nouvelle, France, 27/07/2010)	8
2.1.3	BLEVE de camions-citernes de GPL sur une zone industrielle (Dagneux, France, 07/05/2007)	9
2.1.4	BLEVE d'un camion citerne de GPL (Kamena Vourla, Grece, 30/04/1999)	10
2.1.5	Série de BLEVE sur une installation de stockage de GPL (San Juan Ixhuatepec, Mexico, Mexique, 19/11/1984)	11
2.1.6	BLEVE d'un camion de propylène au voisinage d'un camping (Los Alfaques, Espagne, 11/07/1978)	12
2.1.7	Bleve d'un wagon-citerne de GPL (Perpignan, France, 22/07/1970)	12
2.1.8	BLEVE dans une installation de stockage de GPL dans une raffinerie (Feyzin, France, 04/01/1966)	13
2.2	Synthèse	15
2.2.1	Événements initiateurs	15
2.2.2	Dynamique de développement des phénomènes	15
2.2.3	Effets constatés	20
2.2.3.1	Emission et propagation d'une onde de pression	20
2.2.3.2	Projection de fragments d'enveloppe	21
2.2.3.3	Effets thermiques	22
2.2.4	En conclusion de cet aperçu du retour d'expérience	23
3	PHÉNOMÉNOLOGIE	25
3.1	Définition du BLEVE	25
3.1.1	Evolution de la définition du BLEVE	25

3.1.2	Comment se produit la ruine « complète » du réservoir ?.....	25
3.1.2.1	Pressurisation excessive.....	26
3.1.2.2	Agression externe.....	26
3.1.2.2.1	Par un incendie	26
3.1.2.2.2	Choc mécanique.....	28
3.1.3	Que signifie « température est très supérieure à la température d'ébullition » ?.....	28
3.2	Production des effets.....	31
3.2.1	Emission d'une onde de pression	31
3.2.2	Emission d'une boule de feu.....	33
3.2.3	Fragments.....	35
3.2.3.1	Formation des fragments.....	35
3.2.3.2	Accélération et projection	36
4	PREDIRE LES EFFETS D'UN BLEVE.....	39
4.1	Prédiction des effets de pression	39
4.1.1	Méthode de Prugh	39
4.1.2	Méthode du CCPS / TNO	41
4.1.3	Méthode de Planas-Cuchi et al.....	42
4.1.4	Méthode de Shield.....	43
4.1.5	Comparaison	44
4.2	Prédiction des projections de fragments.....	45
4.2.1	Détermination de la vitesse initiale du fragment	45
4.2.1.1	Méthodes énergétiques.....	46
4.2.1.2	Méthodes impulsionnelles	46
4.2.2	Détermination de la distance de projection.....	47
4.2.3	Comparaison	50
4.3	Prédiction des effets thermiques	51
4.3.1	Caractéristiques de la boule de feu.....	51
4.3.2	Distances d'effets thermiques	54
4.3.3	Confrontation avec l'expérience.....	56
5	CONCLUSION.....	59
6	RÉFÉRENCES.....	61
7	LISTE DES ANNEXES	65

1 INTRODUCTION

1.1 LES RÉFÉRENTIELS OMEGA

Les référentiels OMEGA constituent un recueil global formalisant l'expertise de l'INERIS dans le domaine des risques accidentels. Ce recueil concerne les 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, ...).

Ces rapports ont vocation à présenter les connaissances considérées comme consolidées au moment de leur rédaction. Ces rapports sont mis à disposition des acteurs de la maîtrise des risques d'accidents majeurs qui en feront bon usage sous leur responsabilité. Certains de ces rapports sont traduits en anglais en vue d'en favoriser leur diffusion. Les concepts exposés dans ces rapports n'ont pas vocation à se substituer aux dispositions réglementaires.

1.2 DOMAINE D'APPLICATION

Le présent rapport **Ω-5** présente une synthèse de l'état des connaissances sur le risque de BLEVE pouvant survenir dans les capacités de stockage de gaz liquéfiés. Le BLEVE (acronyme de Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion), peut être défini en première approche comme une vaporisation violente à caractère explosif consécutive à la rupture d'un réservoir contenant un liquide à une température significativement supérieure à sa température normale d'ébullition à la pression atmosphérique.

Le BLEVE est associé avant tout à un changement d'état à caractère explosif, et non à une réaction de combustion comme c'est le cas des explosions de nuages de gaz. Ainsi, il n'est pas nécessaire que le produit concerné soit inflammable pour qu'un BLEVE soit possible.

Ce rapport a pour objectif de décrire les différents phénomènes qui se produisent lors d'un BLEVE, en vue de leur modélisation. L'état de l'art des modèles de prédiction des effets thermiques, des effets de pression et de projection de fragments est présenté. **En revanche, les effets liés au caractère éventuellement toxique des produits ne sont pas abordés.**

1.3 MODIFICATIONS APPORTÉES À LA PRÉCÉDENTE VERSION (2002)

Un premier rapport a été réalisé en 2002 (Leprette, 2002) avec les objectifs suivants :

- dégager, sur la base d'accidents passés et d'expériences, une typologie et une phénoménologie du BLEVE,
- présenter une synthèse critique de quelques modèles disponibles pour décrire les effets thermiques engendrés par un BLEVE.

La présente version reprend la plupart des informations présentées dans la version initiale (2002) et propose des réflexions supplémentaires sur la phénoménologie du BLEVE grâce notamment à des publications récentes et des connaissances issues de champs disciplinaires contigus (vaporisation brutale de liquides) qui permettent de mieux cerner la phénoménologie. En particulier, il n'apparaît plus nécessaire de distinguer le « BLEVE chaud » (température du produit supérieure à sa température limite de surchauffe) du « BLEVE froid » (température inférieure à sa température limite de surchauffe), étant donné que les effets produits peuvent être prédits par les mêmes méthodes.

Par ailleurs, la révision a également permis d'enrichir les aspects relatifs à la projection des fragments et la production d'ondes de pression dans la mesure où il ne se produit pas systématiquement une boule de feu lors d'un BLEVE tandis que ces autres effets, tout-à-fait significatifs, sont systématiques.

1.4 STRUCTURE DU PRÉSENT DOCUMENT

Le document présente successivement les éléments suivants :

- l'accidentologie (chapitre 2) ;
- la description de la phénoménologie (chapitre 3) ;
- la modélisation des conséquences du BLEVE (chapitre 4).

2 RETOUR D'EXPÉRIENCE

Les BLEVEs sont des accidents relativement fréquents dont le retour d'expérience peut servir comme base d'analyse des circonstances de l'occurrence des BLEVEs et de leurs conséquences maximales.

Ce chapitre présente quelques accidents ayant conduit à des BLEVEs, et contenant des informations exploitables sur l'événement initiateur, la cinétique du phénomène et les effets constatés. Les résultats de l'interrogation de la base de données ARIA¹ du BARPI² sont présentés dans l'annexe A.

Les effets d'un BLEVE sur l'environnement se manifestent généralement de trois manières :

- la propagation d'une onde de surpression,
- la projection de fragments à des distances parfois très importantes,
- et, dans le cas d'un BLEVE de liquide inflammable, la formation d'une boule de feu dont le rayonnement thermique peut devenir prépondérant en termes de conséquences.

Les accidents présentés ci-après concernent tous des BLEVEs de réservoirs contenant des gaz inflammables liquéfiés car, dans ce cas, les dégâts observés sont souvent très importants et l'accident comporte les trois effets possibles du BLEVE. Toutefois, le phénomène de BLEVE peut également se produire avec des produits non inflammables (cf. annexe A).

2.1 QUELQUES EXEMPLES D'ACCIDENTS SIGNIFICATIFS

2.1.1 BLEVE DE CAMIONS-CITERNES DE GPL DANS UNE ENTREPRISE DE TRANSPORT DE MATIÈRES DANGEREUSES (BASSENS, FRANCE, 03/04/2016)

Vers 6h30, un dimanche, **un feu est détecté** dans une entreprise de transport de matières dangereuses classée SEVESO seuil bas. Le départ de feu se situe au niveau d'un camion-citerne en stationnement. D'une capacité de 19 T, il contient 1,5 T de gaz de pétrole liquéfié (GPL). L'incendie se propage à plusieurs autres camions-citernes. Les pompiers, prévenus par des tiers, arrivent sur place à 7 h. L'exploitant déclenche son Plan d'Opération Interne. Les secours établissent un périmètre de sécurité. Ils arrosent le sinistre.

¹ Analyse, Recherche et Information sur les Accidents

² Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industrielles (bureau du ministère chargé de l'environnement)

À 7h15, la citerne de GPL explose (BLEVE). À 7h30, une seconde citerne, contenant 2,5t de GPL, explose (BLEVE), et est projetée à 150 m. Quatre pompiers, qui se trouvaient à 40 m, sont légèrement blessés par la déflagration. Deux autres citernes vides éclatent dans les instants qui suivent, dont une projetée à 50 m. Les secours se replient durant 20 minutes puis reprennent l'arrosage de l'épicentre du sinistre. Ils déploient 10 lances, dont 4 canons. Ils déclarent l'incendie maîtrisé à 8h20 puis éteint vers 10 h. Des opérations de dégazage, dépotage et inertage sont réalisées sur 4 citernes pleines, dont 3 sont fuyardes et une contient du propane. Les eaux d'extinction sont contenues dans la rétention du site.

La zone des explosions est dévastée. L'accident a engendré des **effets thermiques très intenses dans un diamètre de 40 m** (et jusqu'à 60 m), et mécaniques avec des **effets de pression jusqu'à 400 m** (et **projections de fragments jusqu'à 1,5 km**). Des **fragments de citernes**, dont certains pèsent **plusieurs tonnes**, sont projetés à **plusieurs centaines de mètres**.

2.1.2 BLEVE DE CAMIONS-CITERNES DE GPL DANS UNE ENTREPRISE DE TRANSPORT DE MATIÈRES DANGEREUSES (PORT-LA-NOUVELLE, FRANCE, 27/07/2010)

Un **feu se déclare vers 23h40** au niveau du pare-choc avant d'un camion-citerne de propane stationné près de l'atelier de réparation des véhicules d'une entreprise de transport de bouteilles de gaz et de négoce vrac d'hydrocarbures liquides et liquéfiés. Un rondier de la société de gardiennage de la zone industrielle alerte les secours. **Un BLEVE se produit à 0h17 sur le véhicule-citerne qui contient 4 t de propane (64 % de sa capacité).**

Aucun blessé grave n'est à déplorer mais 12 pompiers, victimes de l'effet de souffle, souffrant de céphalées et / ou de troubles auditifs sont recensés mais non-hospitalisés ; alertés par un sifflement au niveau du poids lourd, ils s'étaient mis à l'abri avant l'explosion. Les 90 pompiers et 36 véhicules mobilisés maîtrisent le sinistre à l'eau et à la mousse vers 2 h, à partir de 2 poteaux incendie. L'incendie est éteint à 4h30 ; quatre camions-citernes endommagés sont mis en sécurité dans la journée (vidange du GPL pour l'un, brûlage du gaz à la torche pour les 3 autres). Un chauffeur de l'entreprise légèrement blessé à la main par le bris du pare-brise du camion qu'il évacuait sera soigné sur place. L'intervention des secours s'achève à 22 h.

Sur le site, outre le camion à l'origine du sinistre qui a été détruit, **les effets du BLEVE** ont provoqué **l'incendie de l'atelier de réparation (détruit) et d'un atelier d'entretien** (gravement endommagé) tous les deux en bardages métalliques, ainsi que la **destruction de 2 camions-citernes d'hydrocarbures liquides et des cabines de 4 camions-citernes de gaz** (3 vides mais non-dégazés et un rempli à 80 %). **L'effet de surpression a endommagé le bâtiment administratif** (murs de moellons déplacés), provoqué des **bris de vitres sur des voitures** et sur 48 véhicules routiers, et **projeté, parfois à l'extérieur du site, des bardages de bâtiments. À l'extérieur du site**, selon un recensement de la mairie, 105 particuliers et une vingtaine de commerçants ont subi des **bris de vitres ou vitrines (jusqu'à 700 m)** ; l'effet de souffle a également endommagé des silos (zones de décharge d'explosion en galerie supérieure et évent centrale d'aspiration soufflés, une porte d'isolation entre étages de la tour bloquée) et des bardages de hangars. Le **fond du réservoir côté cabine et le trou d'homme** du camion qui a explosé, ont été **projetés à l'extérieur du site à respectivement 30 et 160 m** de l'emplacement du BLEVE. Deux explosions secondaires se sont aussi produites sur des bouteilles de gaz présentes dans l'atelier de réparation durant l'incendie. Quatre départs de feux de broussailles sont également signalés à l'extérieur de l'établissement. La préfecture publie un communiqué de presse. Des enquêtes judiciaire et administrative sont effectuées pour déterminer les causes et circonstances de l'accident.

2.1.3 BLEVE DE CAMIONS-CITERNES DE GPL SUR UNE ZONE INDUSTRIELLE (DAGNEUX, FRANCE, 07/05/2007)

Le 7 mai 2007 vers 20h30 (Leprette, 2005), **trois camions de GPL³ en feu** sont signalés sur la zone industrielle de Dagneux-Montluel (Ain). Malgré l'intervention rapide des secours, l'explosion des camions se produit, entraînant de très importants dégâts matériels dans un rayon de plusieurs centaines de mètres. Aucune victime n'est à déplorer hormis quelques blessés légers.

Les trois camions de propane étaient stationnés sur un site privé lors de l'explosion. Deux d'entre eux (camions de 20 m³ contenant respectivement 0 et 2 500 kg de propane) se sont fragmentés en multiples morceaux qui ont été projetés dans l'environnement (cf. ci-après). Le troisième (**15 m³, 500 kg de propane**) **s'est ouvert** et a été projeté à environ **60 m, sans se fragmenter**.

Les **deux camions de 20 m³** ont explosé simultanément environ **40 minutes** après le début de l'incendie, sans que l'on sache si l'éclatement du premier est à l'origine de l'éclatement du second. Ces explosions s'apparentent à des BLEVES et ont engendré les effets classiques associés à ce phénomène. Une boule de feu d'environ **80 m de diamètre** s'est formée et a duré **9 s**.

Aucun effet de rayonnement thermique n'a pu être identifié sur les structures. Mais il est visible sur la végétation (**herbe et arbustes roussis**) dans un rayon d'environ **80 m**. On suppose que cette distance doit être l'enveloppe du plus faible seuil d'effet sur l'homme (3 kW/m²). La quantité de liquide était vraisemblablement trop faible pour produire des effets de rayonnement à grande distance.

³ GPL : Gaz de Pétrole Liquéfié

Des effets de pression ont été observés ponctuellement **jusqu'à 400 m (bris de vitres)**, mais l'essentiel des effets est concentré dans un rayon de 200 m. L'analyse des dégâts par comparaison avec des tableaux de dégâts typiques permet de situer le seuil de **50 mbar entre 50 et 100 m**, et le seuil de **20 mbar entre 150 et 250 m**. Ce résultat est confirmé par les calculs de résistance des structures effectués sur quelques points (vitrages et bardages simple peau).

Des **fragments de réservoir très massifs** ont été retrouvés **jusqu'à 900 m**, mais **75%** des fragments ont été retrouvés dans un **rayon de 250 m**. La **direction privilégiée** de projection est **perpendiculaire à l'axe** des réservoirs et le nombre de fragments est très élevé (en moyenne 6 par réservoir), ce qui est très inhabituel par rapport au retour d'expérience disponible sur ce type de BLEVE. En revanche, les distances maximales de projection sont conformes au retour d'expérience, même si, d'un accident à l'autre, elles sont extrêmement variables.

Il est théoriquement possible, à partir de l'observation des lignes de déformation maximale, d'identifier les modes de rupture d'un réservoir et de localiser l'amorce probable de la rupture initiale. Il est vraisemblable que ce mode de rupture soit la cause de l'effet directionnel très prononcé observé à Dagneux. Cela suppose néanmoins d'être en mesure de reconstituer le réservoir à partir des fragments retrouvés. Cela n'a malheureusement pas été possible en raison du grand nombre de fragments, pas plus qu'il n'a été possible d'attribuer les fragments à l'une ou l'autre des deux citernes qui ont explosé, car les deux citernes étaient de conception identique et ne possédaient pas d'élément distinctif qui aurait pu faciliter l'identification des fragments.

Les distances réglementaires sont cohérentes avec les effets observés et les modélisations. On notera toutefois que des effets de pression ont été observés au-delà de la distance au seuil réglementaire de 20 mbar, ce qui confirme que cette valeur ne représente pas un seuil de début des bris de vitres, mais doit être considérée comme un seuil de bris de vitre significatifs (au moins 10% des vitres brisées). Des bris de vitres peuvent survenir dès 5 à 10 mbar⁴, en fonction des caractéristiques géométriques et mécaniques.

Enfin, il a été observé que les distances d'effets enveloppe du BLEVE pouvaient provenir de la projection de fragments. Ces fragments peuvent causer des dégâts très importants. Les fragments chauds et incandescents sont également vecteurs d'effets dominos. À Dagneux, les plus gros dégâts matériels ont été causés par des incendies propagés par la projection de fragments incandescents.

2.1.4 BLEVE D'UN CAMION CITERNE DE GPL (KAMENA VOURLA, GRECE, 30/04/1999)

A la veille des fêtes légales, il est habituel que la police grecque interdise la circulation des camions sur l'ensemble du réseau routier. La veille du 1^{er} mai, la police interpelle un camion-citerne contenant 18 tonnes de GPL à proximité de la ville de Kamena Vourla. Le chauffeur stationne son véhicule sur le côté de la chaussée. Peu de temps après, une camionnette vient heurter le camion à l'arrière et provoque **une fuite de GPL qui s'enflamme aussitôt**.

⁴ La distance à 10 mbar est égale à au moins 2 fois la distance à 20 mbar. De plus, à ces faibles niveaux de pression, des phénomènes extérieurs comme le vent ou la réflexion des ondes de pression sur les basses couches de l'atmosphère ne sont plus négligeables.

Trente minutes plus tard, alors qu'un véhicule des pompiers vient prendre position à 5 m de la citerne, un BLEVE se produit. Des témoins rapportent la formation d'une boule de feu d'environ **100 m de rayon et 150 m de hauteur**. De grosses gouttes de GPL liquide en feu pleuvent sur des distances de 300 à 400 m. Le camion-citerne et le camion de pompiers sont complètement désintégrés. De **gros fragments** sont retrouvés à des distances de **200 à 300 m** (le moteur du camion de pompier est retrouvé à 250 m). La **citerne de GPL** est projetée en un seul morceau dans un immeuble distant d'environ **500 m, démolit sa toiture** et atterrit 200 à 300 m plus loin, soit à une distance de **700 à 800 m** du lieu de l'explosion. L'accident fait quatre morts, dont une personne décapitée par un fragment à 400 m du lieu de l'explosion. Des personnes situées à **300 m** de l'accident sont **blessées par brûlures**. Des dégâts aux immeubles sont observés dans un rayon de 500 m.

2.1.5 SÉRIE DE BLEVE SUR UNE INSTALLATION DE STOCKAGE DE GPL (SAN JUAN IXHUATEPEC, MEXICO, MEXIQUE, 19/11/1984)

Le site de stockage était constitué de 4 sphères de GPL (mélange 80 % butane, 20 % propane) d'un volume unitaire de 1 600 m³, de deux sphères de 2400 m³ de volume unitaire et de 48 réservoirs cylindriques horizontaux de diverses capacités. Au moment de l'accident, approximativement 11 000 à 12 000 m³ de GPL étaient stockés sur le site.

Lors d'une phase de remplissage d'un réservoir, une canalisation de 8 pouces (200 mm de diamètre) sous 24 bars se rompt. Lorsque la hauteur du nuage atteint une hauteur visible d'environ deux mètres, il **s'enflamme, 5 à 10 minutes** après le début de la **fuite**, sur une torchère située à quelques 120 à 150 mètres du lieu du rejet. Le nuage inflammable ayant vraisemblablement pénétré dans des maisons, son inflammation entraîne leur destruction.

Quelques minutes après l'inflammation du nuage, deux des plus petites sphères subissent des BLEVEs, engendrant la formation d'une boule de feu (d'un **diamètre** évalué entre **350 ou 400 mètres**) ainsi que l'éjection d'un ou deux réservoirs cylindriques. Les effets thermiques et l'éjection de fragments entraînent d'autres BLEVE par effet domino.

En définitive, les quatre petites sphères ont été détruites. Les sphères plus grosses sont restées intactes, bien que leur supportage ait été brisé. Seulement 4 des 48 cylindres sont demeurés dans leur position initiale. Dans un rayon de 300 mètres, toutes les personnes ont été tuées ou blessées. Cet accident a causé au total le décès de plus de 500 personnes. Il y a eu environ 7 000 blessés, et 39 000 personnes évacuées. Les secours ont mobilisé de l'ordre de 4000 personnes. Des **fragments de sphères** ont été retrouvés à **plus de 600 mètres** et **12 parties de réservoirs cylindriques** horizontaux ont été projetées, par "**effet fusée**", à des distances pouvant atteindre **1 200 mètres**.

2.1.6 BLEVE D'UN CAMION DE PROPYLÈNE AU VOISINAGE D'UN CAMPING (Los ALFAQUES, ESPAGNE, 11/07/1978)

Un camion transportant 23,5 tonnes de propylène quitte la route et heurte le muret d'un camping comptant 700 à 800 estivants. La citerne est fissurée et **l'inflammation du rejet gazeux** qui se forme entraîne une augmentation de la pression interne et une détérioration des parois de la citerne. Consécutivement à une première explosion, un BLEVE se produit engendrant notamment une boule de feu. Cet accident a fait 216 morts et plus de 200 blessés dans un rayon de 125 m (Lees, 1996).

Il est à noter que le camion était rempli d'une quantité de propylène supérieure à la capacité autorisée (soit 23,5 tonnes contre 19,1 tonnes), et n'était pas muni d'une soupape.

2.1.7 BLEVE D'UN WAGON-CITERNE DE GPL (PERPIGNAN, FRANCE, 22/07/1970)

Une violente explosion et un incendie se produisent dans un établissement fabriquant du gaz manufacturé, comportant également des activités induites de stockage, distribution de produits du site et de GPL venant de l'extérieur. Au cours du dépotage d'un wagon-citerne de 45 t de propane, un flexible (diamètre 50 mm) se rompt au ras du manchon de raccord de la vanne du wagon et provoque une **fuite** estimée à 8 kg/s. Un brouillard (gaz + gouttelettes de gaz liquéfié) se forme. Le vent est léger (1 m/s) et la température de 25°C. 5 tonnes seulement de produit avaient déjà été transférées au moment de l'accident. Le nuage blanc et épais empêche l'opérateur et deux témoins à proximité d'intervenir. Le nuage **s'enflamme** au passage d'une locomotive, 4 min plus tard. Ses deux occupants, grièvement brûlés, décèderont de leurs brûlures. L'inflammation du nuage entraîne le démarrage de plusieurs foyers, répartis sur plusieurs dizaines de mètres sous le vent. La police évacue les habitants dans un rayon de 200 m environ, notamment un groupe scolaire et un hospice. L'incendie menace les deux cylindres (100 m³ chacun), les deux sphères (500 m³ chacune), les deux gazomètres (10 000 m³ et 4000 m³), un autre wagon de propane, les dépôts d'essence. La fuite alimente l'incendie qui enveloppe le wagon à l'origine de l'accident. Malgré les efforts des secours, **le wagon explose (BLEVE) 40 min** après la fuite. Les dégâts sont importants : bornes de dépotage détruites, gazomètres en feu, calorifuge des sphères en partie arraché. La police étend la zone évacuée à 450 m. Les équipes de secours en place sont déstabilisées (on compte 17 brûlés parmi les intervenants hospitalisés dans les 10 minutes) et ne reprennent leur lutte qu'une heure plus tard. Ils procèdent à l'éloignement d'une citerne d'essence et du 2^{ème} wagon, ainsi qu'à la fermeture des vannes, arrêtant ainsi l'alimentation de l'incendie. Les foyers sont éteints environ 4h30 après l'explosion. Le bilan s'établit à 2 morts et 49 blessés, 11 parmi le personnel, 18 parmi les pompiers dont 4 grièvement atteints, 23 parmi les passants et les riverains (brûlures, fractures, éclats de verre, amputation de phalanges. La distribution de gaz est interrompue pour 20 000 abonnés. Environ 1 100 déclarations de sinistres sont établies. Les dégâts importants se situent dans un rayon de 300 m autour du wagon, des endommagements moins sévères se situent dans un rayon de 500 m, et **quelques bris de vitres** sont observés **jusqu'à 1 000 m**.

2.1.8 BLEVE DANS UNE INSTALLATION DE STOCKAGE DE GPL DANS UNE RAFFINERIE (FEYZIN, FRANCE, 04/01/1966)

L'installation de stockage de GPL de cette raffinerie était constituée de quatre sphères de propane de 1200 m³, quatre sphères de butane de 2000 m³, ainsi que deux réservoirs cylindriques horizontaux contenant du propane pour l'un et du butane pour l'autre. Les réservoirs de G.P.L. étaient situés à une distance de 450 mètres de la raffinerie, et à environ 300 mètres des premières maisons du village de Feyzin (Figure 1).

Pour un prélèvement d'échantillons dans un des réservoirs, à **6h40**, un opérateur ouvre successivement deux vannes dans le bas d'un réservoir de stockage de propane. Cependant, il ne respecte pas l'ordre d'ouverture de ces vannes : il ouvre d'abord la vanne la plus éloignée du réservoir, puis tente de réguler le débit avec la vanne située en amont. Comme le débit n'est pas suffisant, probablement pour cause de gel, il ouvre plus largement la vanne. Le bouchon de glace qui s'était vraisemblablement formé lors de la première ouverture disparaît, et **du propane s'échappe en grande quantité**. Les trois opérateurs présents tentent, sans succès, de fermer la vanne amont. Ils n'essayent pas d'emblée de fermer la vanne la plus éloignée du réservoir, qui gèle en position ouverte. Démunis, les opérateurs s'enfuient et déclenchent l'alarme.

Un nuage de gaz d'environ 1 mètre de hauteur se forme au-dessus de l'autoroute voisine. Bien que la route ait été fermée au signal d'alerte, une voiture pénètre malgré tout dans le nuage de gaz et provoque l'**inflammation à 7h15**. Le conducteur, sorti de sa voiture, est mortellement brûlé, et le feu remonte jusqu'à la sphère d'où le propane s'échappe.

Une équipe de secours de près de 160 hommes tente alors d'éteindre l'incendie, et commence à refroidir par arrosage les réservoirs voisins. Le réservoir d'où s'échappe le propane **explose violemment (BLEVE) à 8h45, soit 90 minutes après l'inflammation**, et des fragments sont projetés. **La boule de feu culmine à 400 m de hauteur et atteint 250 m de diamètre.**

55 minutes plus tard, une seconde sphère explose (BLEVE), et provoque la rupture des canalisations d'une troisième sphère qui se vidange, entretenant ainsi l'incendie.

Trois sphères de butane s'ouvrent sans produire de BLEVE. Le village de Feyzin, à **400 mètres** de là est **touché par les ondes de surpression** successives. Au total 11 réservoirs sont détruits, des **missiles sont projetés jusqu'à 800 mètres**. L'accident a tué 18 personnes et blessé 84 autres, principalement lors du premier BLEVE.

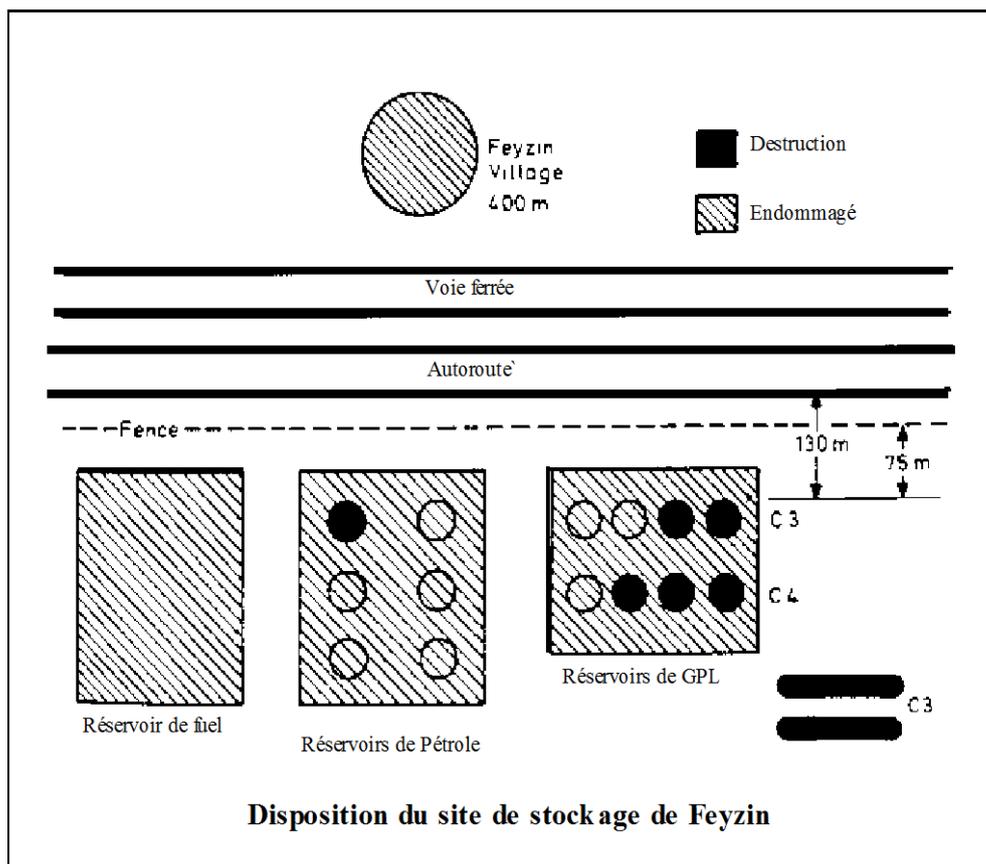


Figure 1 : Disposition du site de stockage de G.P.L. de FEYZIN

2.2 SYNTHÈSE

L'analyse de ces accidents (et de ceux de l'annexe A) permet de qualifier la nature de l'événement initiateur, la dynamique de développement du BLEVE et l'intensité de ses effets.

2.2.1 ÉVÉNEMENTS INITIATEURS

Si on s'en tient à l'accidentologie mentionnée en annexe, on observe que majoritairement l'événement initiateur est **l'incendie d'une fuite** (la moitié des événements initiateurs) qui se produit sur le réservoir (suite à une erreur de manipulation, à la rupture de flexible, à une brèche due à un choc) ou un **feu externe** (un quart des événements initiateurs).

Quelques BLEVEs de liquides non inflammables se sont également produits (azote liquide, dioxyde de carbone, oxygène liquide) qui mettent en lumière deux autres causes : la **pressurisation excessive** (sur-remplissage, surchauffe interne pour un dixième des événements initiateurs) et la **défaillance mécanique** du réservoir (conception, choc pour un dixième des événements initiateurs).

On note que ces observations sont assez comparables à celles présentées par Abbasi (Abbasi, 2007). Cet auteur rappelle cependant que cette analyse des causes immédiates ne vaut que pour le *premier* BLEVE qui se produit sur un site. Ceux qui se produisent après sont la conséquence directe du premier si bien qu'on peut dire **la très grande majorité des BLEVEs unitaires est le résultat d'un effet domino** dont l'événement initiateur est soit un BLEVE d'un autre réservoir, soit un incendie.

2.2.2 DYNAMIQUE DE DÉVELOPPEMENT DES PHÉNOMÈNES

Le tableau 1 ci-après montre que le délai qui s'écoule entre la manifestation de l'événement initiateur et le BLEVE varie généralement d'une dizaine de minutes à plus d'une heure environ (tableau 1). **Le BLEVE n'est donc pas toujours un phénomène à dynamique lente de développement.**

À Feyzin par exemple, le délai d'amorçage de la fuite est de 35 min et le BLEVE se produit **90 min** plus tard tandis qu'à Izmit, la fuite s'enflamme immédiatement et le BLEVE survient 3 min après.

Lorsqu'une analyse plus détaillée des rapports d'enquête est effectuée, il est constaté que le délai d'occurrence n'est pas toujours compté à partir du même événement initiateur (origine ou inflammation de la fuite par exemple). On constate également que le délai d'occurrence peut être considérablement réduit à partir du moment où l'enveloppe du réservoir a été endommagée ou mécaniquement affaiblie.

Cependant, dans l'hypothèse où l'événement initiateur est une fuite enflammée, il est probable que l'étendue de cet incendie, donc le débit de la fuite, joue un rôle. Il est vraisemblable également que la masse totale du réservoir (liquide + métal), c'est-à-dire sa capacité de transfert thermique, ait une incidence sur la rapidité d'échauffement. Cependant, l'accidentologie fournit peu d'informations sur ces points.

Date	Lieu	Installation	Volume (m ³)	Taux de remplissage (%)	Séquence accidentelle	Délai d'occurrence du BLEVE (min)	Endommagement mécanique identifié avant (oui/non)	Référence
03/04/2016	Bassens (France)	Camion	20	10-15	Départ de feu au niveau d'un camion citerne de GPL, BLEVE de la citerne 45min plus tard, BLEVE d'une deuxième citerne 15min plus tard, puis 2 autres citernes vides éclatent	45 min après le départ de feu	non	ARIA n°47856 Prod'homme, 2016
28/07/2010	Port-la-Nouvelle (France)	Camion	13,5	6	Départ de feu au niveau du pare-choc d'un camion citerne, BLEVE 37 min plus tard	37 min après le départ du feu	non	ARIA n°38714 Heudier, Richomme, 2012
10/05/2007	Dagneux (France)	Camion	20	25	Feu de cabine d'un camion citerne, BLEVE 40min plus tard, suivi de 2 ou 3 autres BLEVE de camion	40 min après le départ du feu	non	ARIA n°33085 Leprette, 2007
18/11/2003	La Roche Bernard - Nivillac (France)	Camion	20	14	Un semi-remorque frigorifique percute un camion de GPL, embrasement immédiat des 2 poids lourds, 20min après, fort sifflement et BLEVE de la citerne	20 min après la collision et le départ du feu	oui	ARIA n°25956 Conseil général des ponts et chaussées, 2005
05/07/2003	Ankara (Turquie)	Camion	25	50	Fuite suite à une rupture de flexible pendant un dépotage de GPL, inflammation, VCE	10 min après le début de l'accident	Peut-être (explosion)	ARIA n°24999
21/08/2002	Izmit (Turquie)	Camion	45	Qqe % (début de remplissage)	Fuite lors d'un remplissage de camion, explosion, suivie d'un BLEVE du camion qqes minutes plus tard	Qqes min après l'explosion	Peut-être (explosion)	ARIA n°22756 Lim, 2004
		Réservoir fixe	115 ou 180 ?	?		qqes min après le BLEVE du camion	Peut-être (explosion)	

Date	Lieu	Installation	Volume (m ³)	Taux de remplissage (%)	Séquence accidentelle	Délai d'occurrence du BLEVE (min)	Endommagement mécanique identifié avant (oui/non)	Référence
30/04/1999	Kamena Vourla (Grèce)	Camion			Une camionnette percute l'arrière d'un camion-citerne garé sur le bas-côté, fuite de GPL, qui s'enflamme aussitôt, BLEVE 30 min plus tard	30min après l'inflammation	Peut-être (collision)	ARIA n°15517
22/03/1999	Dortyol (Turquie)	Réservoir	115 ?	?	Rupture d'une vanne lors de l'épreuve d'un réservoir, qui percute une canalisation d'un réservoir voisin, fuite, inflammation, BLEVE 20 min plus tard	20 min après inflammation	Peut-être (impact de vanne)	ARIA n°15518
11/11/1998	Bucheon (Corée)	Camion	35	60	Fuite de butane lors du dépotage d'un camion, inflammation 4 min plus tard, BLEVE d'un camion de propane 15min après l'inflammation	15 min après l'inflammation	Non	Kyoshik Park, 2005
		Camion	35	25	BLEVE du camion de butane 2 min après le premier BLEVE	17 min après le départ	Non	
09/04/1998	Albert City (USA)	Réservoir	68	50	Rupture de canalisation, fuite, inflammation 5 min plus tard, BLEVE 25 min après l'inflammation	25 min après l'inflammation	Peut-être (rupture de cana par choc)	ARIA n°13051
27/06/1993	St Elisabeth de Warwick (Canada)	Reservoir	4	55	Incendie affectant une partie du réservoir, BLEVE 31 min après	31 min après le départ de feu	Non	Lim, 2004
17/08/1987	Cairns (Australie)	Wagon	40	40	Rupture d'un flexible pendant le dépotage d'un wagon, inflammation 2 min plus tard, BLEVE 10 min après l'inflammation	10 min après l'inflammation (VCE)	Peut-être (VCE ?)	Lim, 2004

Date	Lieu	Installation	Volume (m ³)	Taux de remplissage (%)	Séquence accidentelle	Délai d'occurrence du BLEVE (min)	Endommagement mécanique identifié avant (oui/non)	Référence
19/11/1984	St Juan Ixuatepec (Mexique)	Sphères	1600		Fuite lors du remplissage d'un réservoir de GPL, inflammation 5-10 min après la fuite, BLEVE de 2 sphères qqes min après l'inflammation, d'autres BLEVE suivent	qqes min après un VCE	Peut-être (VCE ?)	ARIA n°7128 (Pietersen, 1985)
18/12/1978	Nimègue (Pays-Bas)	Camion	Petit porteur	?	Fuite lors du déchargement d'un camion, inflammation immédiate, BLEVE 25 min après	25	Non	Lim,2004
30/05/1978	Texas City (USA)	Réservoir	800	100	Sur-remplissage d'une sphère d'isobutane, suivi d'une fissuration sur la ligne de soudure, inflammation de la fuite, BLEVE quasi-instantanée	Immédiatement après l'inflammation	Oui (fissuration sur la ligne de soudure)	ARIA n°7122
11/07/1978	Los Alfaques (Espagne)	Camion	23 tonnes (4 t au-dessus du max Propylène)	100	Collision du camion contre un mur, fuite, inflammation du nuage, retour de flamme vers la citerne, BLEVE quasi-instantané de la citerne.	Immédiatement après un VCE	Oui (collision contre un mur)	ARIA n°5003
22/07/1970	Perpignan	Wagon	110	36	Fuite de GPL lors du dépotage d'un wagon, inflammation du nuage 4min plus tard, wagon pris dans les flammes, BLEVE 40min après la fuite	40min après la fuite	Non	ARIA n°6805
04/07/1966	Feyzin (France)	Sphère	1200 1200	70 60	Fuite, inflammation après 35min, 1 ^{er} BLEVE 90 min après l'inflammation 2eme BLEVE : 55 min après le premier	90 min après l'inflammation	Non	ARIA n°1

Date	Lieu	Installation	Volume (m ³)	Taux de remplissage (%)	Séquence accidentelle	Délai d'occurrence du BLEVE (min)	Endommagement mécanique identifié avant (oui/non)	Référence
08/01/1957	Montréal (Canada)	Sphère	1900	20	BLEVE 30min après un sur-remplissage, BLEVE de 2 autres sphères 15 min plus tard	30	Non	ARIA n°6848
07/07/1951	Port Newark (USA)	Réservoirs	100	?	Rupture de canalisation, incendie, BLEVE du premier réservoir 15min après, BLEVE des 69 autres dans les 100min	Premier BLEVE 15 min après l'inflammation	Non	ARIA n°6756

Tableau 1 : Quelques données de retour d'expérience sur les séquences accidentelles et les délais d'occurrence du BLEVE de réservoirs de GPL

2.2.3 EFFETS CONSTATÉS

Un BLEVE se traduit systématiquement par la propagation d'une onde de choc et la projection de fragments d'enveloppe du réservoir dans l'environnement. Si le produit stocké est inflammable, une boule de feu peut se produire dont les effets thermiques peuvent être très significatifs.

2.2.3.1 EMISSION ET PROPAGATION D'UNE ONDE DE PRESSION

L'analyse des dégâts d'une explosion accidentelle s'effectue en rapprochant des niveaux de dégâts typiques à des niveaux de surpression obtenus sur la base d'essais militaires (donc explosifs). Éventuellement, des calculs de résistance des structures peuvent permettre d'affiner ces estimations, mais des données structurales précises doivent être disponibles ainsi qu'une bonne idée de la forme de l'onde pression. Souvent, ces informations ne sont pas accessibles.

Le retour d'expérience disponible sur les BLEVEs ne mentionne que rarement l'étendue des effets de pression, en particulier parce qu'ils sont souvent « masqués » par les effets thermiques, ou par d'autres explosions lorsqu'elles se produisent en chaîne.

On dispose cependant de quelques éléments :

- À propos de l'accident de San Juan Ixhuatepec (1984), Pietersen (Pietersen, 1984) mentionne que « la majeure partie des dégâts ont été causés par un intense rayonnement thermique de plusieurs heures⁵ » et que « les effets de surpression sont relativement faibles ». Il cite des destructions de vitres par effet de pression dans un rayon de 300 m.
- À propos de l'accident de Perpignan (1970), Bonnet (Bonnet, 2003) mentionne des distances d'effets de pression très élevées, jusqu'à 750 m pour le seuil de 30 mbar, alors que les effets thermiques semblent avoir été beaucoup plus limités.
- A Dagneux (2007), on a observé (Leprette, 2007) des effets de pression de l'ordre de 20 mbar jusqu'à 350 m.

Il est important de préciser que les recherches menées sur le BLEVE au cours des 20 dernières années, tant en Europe qu'en Amérique, ont essentiellement porté sur les effets thermiques du BLEVE de réservoirs de GPL (Leprette, 2005). Les effets de pression associés au BLEVE (comme les effets de projection) sont généralement un « sous-thème » des études expérimentales consacrées aux phénomènes thermiques, et n'ont pas été étudiés de manière systématique. Pourtant, compte tenu de ce que, majoritairement, le BLEVE d'un réservoir est induit par un autre BLEVE, immédiatement antérieur, on peut supposer que ces effets mécaniques, tout à fait significatifs, relativement mal connus, ont une importance déterminante.

⁵ Ce rayonnement très long s'explique par la succession de plusieurs explosions, BLEVE et incendies.

2.2.3.2 PROJECTION DE FRAGMENTS D'ENVELOPPE

Lors d'un BLEVE, le réservoir éclate et les fragments d'enveloppe sont projetés sous l'effet de la pression interne. Une synthèse du retour d'expérience sur ce sujet est présentée en annexe B. Elle fait apparaître quelques traits particuliers aux BLEVEs de réservoirs cylindriques :

- Le nombre de fragments est réduit, généralement 2 ou 3, plus rarement 4 ou 5, exceptionnellement plus ;
- Les fragments sont projetés préférentiellement dans l'axe du réservoir (Figure 2) ;

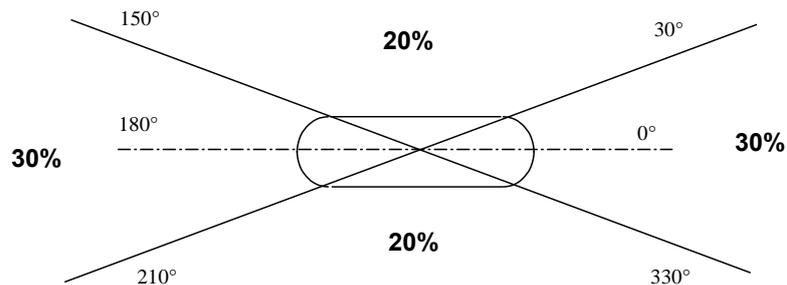


Figure 2 : Répartition des projections de fragment autour de l'axe du réservoir d'après (Holden, 1988)

- 70 à 80% des fragments sont projetés dans un rayon de 200 m autour du réservoir, mais des distances beaucoup plus élevées, de l'ordre de 1000 m, peuvent être atteintes. Cette situation extrême se produit pour des réservoirs de taille importante bien remplis de sorte que la vaporisation entretient l'accélération des fragments pendant le début de la phase ascendante de la trajectoire, un peu à la manière d'une fusée.

Cette analyse confirme que les distances d'effets les plus grandes peuvent être celles de la projection de fragments. Ces fragments peuvent induire des dégâts très importants même si la probabilité d'impact est plus faible (que pour les autres effets). Les fragments chauds sont également vecteurs d'effets dominos (incendies).

2.2.3.3 EFFETS THERMIQUES

Si le produit stocké est inflammable, la combustion des vapeurs et du liquide contenus survient très généralement au contact, par exemple, de l'incendie initiateur. On peut distinguer la combustion du mélange vapeurs-gouttelettes liquides formé par la vaporisation brutale qui produit une « boule de feu », intense mais de courte durée (quelques secondes), de l'incendie du liquide répandu sur le sol, qui prend plutôt la forme d'un « feu de flaque », moins intense mais plus durable.

Les BLEVEs au cours desquels le gaz liquéfié s'enflamme sont reconnus comme les plus meurtriers :

- On se souvient qu'à Los Alfaques (Espagne) en 1978, un camion-citerne accidenté contenant du propylène produit un BLEVE avec inflammation du nuage. Plus de 200 personnes sont mortes brûlées dans le camping adjacent.
- À San Juan Ixhuatepec (1984), 650 personnes sont mortes dans le voisinage immédiat du dépôt de GPL.

2.2.4 EN CONCLUSION DE CET APERÇU DU RETOUR D'EXPÉRIENCE

On peut retenir en substance que :

- Les événements initiateurs du premier BLEVE sont, par ordre de prééminence, un feu sur une fuite du réservoir concerné (50% des cas), un feu d'une autre origine (25%), une pressurisation excessive (10%) et enfin une défaillance mécanique (10%). Les BLEVEs des réservoirs adjacents résultent très généralement de ce premier BLEVE par effet domino ;
- En se basant sur le REX, la dynamique du BLEVE prend au moins une dizaine de minutes si on compte ce délai depuis l'apparition de l'événement initiateur (démarrage du feu par exemple) ;
- On note que les distances d'effet sont souvent déterminées par les effets thermiques de la boule de feu mais quelques accidents révèlent que les effets mécaniques peuvent être tout à fait conséquents (accident de Dagneux). Il est d'autant plus nécessaire de savoir en tenir compte que ces derniers sont largement impliqués dans les effets dominos évoqués ci-dessus.

Le tableau suivant rassemble, pour les principaux couples capacités/type de produit dangereux concernés par le présent document, les principales causes de rupture et les éventuels renvois à d'autres référentiels de l'INERIS, plus adaptés.

Type de capacité	Phénomène	Principales causes	Documents de référence INERIS
Capacité contenant un gaz liquéfié sous pression Capacité cryogénique contenant un gaz liquéfié sous pression	BLEVE (pour les gaz liquéfiés sous pression)	Incendie (principalement)	Présent document
	Fuite de liquide inflammable ⁶	Corrosion, impact d'un projectile, remplissage, ...	Référentiels : -Modélisation des feux industriels - Ω 2 -Terme source - Ω 19 -Dispersion atmosphérique, mécanismes et outils de calculs - Ω 12 - Ω UVCE

Tableau 2 : Principales capacités concernées par le présent document

⁶ Selon les conditions de stockage (température et/ou pression) et du produit stocké (tension de vapeur), une perte de confinement peut conduire à une fuite liquide, de gaz ou diphasique à même de conduire à la formation d'une flaque et/ou une dispersion de produit dans l'atmosphère.

3 PHENOMÉNOLOGIE

Dans les paragraphes suivants, on tente de décrire les mécanismes responsables du BLEVE et de ses effets.

3.1 DÉFINITION DU BLEVE

3.1.1 EVOLUTION DE LA DÉFINITION DU BLEVE

Reid (Reid, 1976, 1979, 1980), l'un des pionniers dans ce domaine, a fait l'hypothèse qu'un liquide, stocké sous pression à une température supérieure à son point d'ébullition, ne peut produire une « ébullition explosive » (littéralement un BLEVE) lorsqu'il est brutalement mis à la pression ambiante (sous l'effet de la rupture des parois du réservoir) que si sa température, au moment de la rupture est plus grande que la température limite de surchauffe⁷.

Cependant, l'expérience a montré que des BLEVEs peuvent avoir lieu lors de la dépressurisation rapide d'un réservoir contenant un liquide à une température bien inférieure à sa température limite de surchauffe à la pression atmosphérique (Birk, Ye et al., 1993 ; Lees, 1994).

Shield (Shield, 1995a) note une dérive de la définition du BLEVE : il est souvent considéré comme un phénomène de perte de confinement, consécutive à une exposition au flux thermique d'un incendie (feu de torche ou de flaque), d'un réservoir contenant un liquide inflammable initialement stocké à sa pression de vapeur saturante. Cette dernière définition est centrée sur une cause particulière de BLEVE (ignore les autres, notamment l'effet domino) et non sur le phénomène de vaporisation au cœur du processus. C'est pourquoi Shield et d'autres (Birk, Cunningham et al., 1994) ont proposé une définition plus large qui correspond également à la position de l'INERIS :

"Un BLEVE est causé par la ruine complète d'un réservoir pressurisé contenant un liquide dont la température est très supérieure à sa température d'ébullition à la pression atmosphérique".

Cette définition nécessite de préciser la manière dont se produit la ruine complète du réservoir, et ce qu'on entend par « température très supérieure à la température d'ébullition ».

3.1.2 COMMENT SE PRODUIT LA RUINE « COMPLÈTE » DU RÉSERVOIR ?

En dehors des situations où le réservoir aurait été mal conçu ou entretenu (ce qui a été le cas dans un nombre très limité de situations), l'éclatement résulte soit d'une pressurisation excessive soit d'un affaiblissement de l'enveloppe par une agression externe.

⁷ D'après le Center for Chemical for Process Safety (CCPS), la température limite de surchauffe d'un liquide (ou température de nucléation homogène) correspond à la limite de température, à une pression donnée, au-delà de laquelle se développent des bulles de vapeur dans tout le liquide, même en l'absence de sites de nucléation (CCPS, 1994).

3.1.2.1 PRESSURISATION EXCESSIVE

Une pressurisation excessive peut résulter d'un **sur-remplissage**. Pour un stockage à température ambiante, la température interne varie selon les conditions climatiques (typiquement entre -40°C et $+60^{\circ}\text{C}$). En raison de ces variations, la masse volumique de la phase liquide évolue : elle diminue lorsque la température augmente. Si le niveau initial de liquide est trop élevé (au-delà de 80 à 90% de fraction volumique pour un GPL), la dilatation thermique peut faire disparaître la phase gazeuse et la pression interne peut alors augmenter très rapidement en fonction de la température comme cela a été vérifié expérimentalement (Stawczyk, 2003). Il est possible de prédire ce phénomène (Seigneuret, 2009).

L'**introduction accidentelle d'un produit trop chaud** (« échauffement ») est parfois identifiée comme une cause de pressurisation excessive. C'est clairement une crainte pour les réservoirs cryogéniques, très bien isolés thermiquement : l'introduction d'un fluide trop chaud peut vaporiser une partie du liquide et augmenter brutalement la pression. On peut également prévoir l'effet par un calcul simple de thermodynamique.

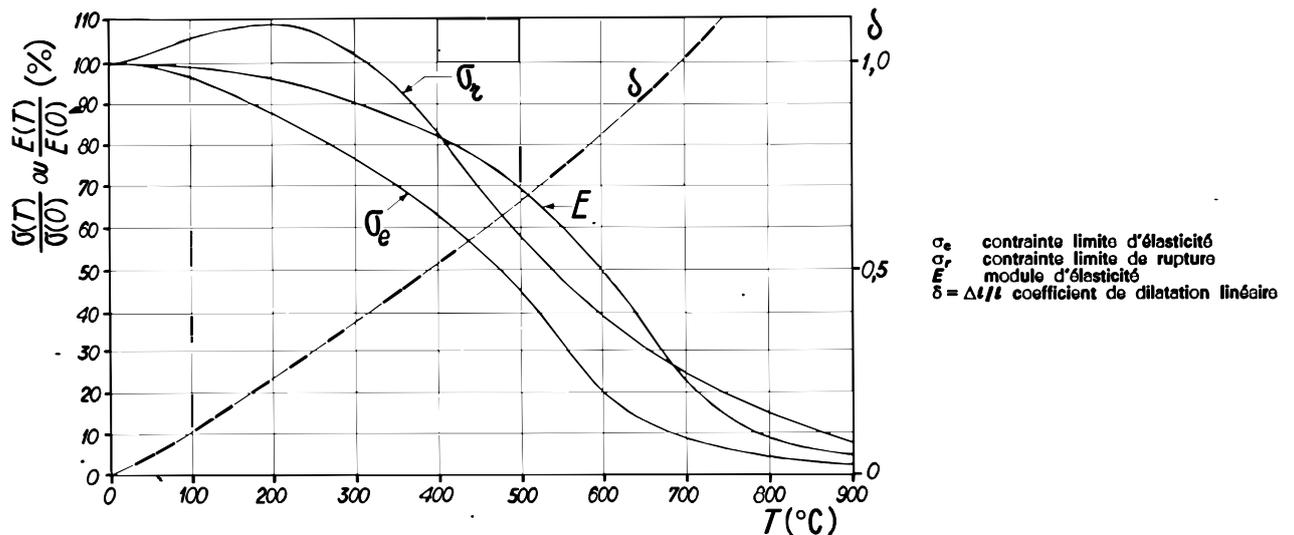
Abbasi cite également le cas d'un stockage d'oxygène liquide qui a été le siège d'un BLEVE suite à une réaction exothermique entre un alliage d'aluminium et l'oxygène.

3.1.2.2 AGRESSION EXTERNE

3.1.2.2.1 PAR UN INCENDIE

À proximité immédiate d'un incendie, la température d'un objet (réservoir) augmente sous l'effet du flux thermique reçu. La résistance ultime des aciers qui composent les réservoirs de stockage de gaz liquéfiés chute dramatiquement au-delà de 300°C (Figure 3) et est virtuellement nulle vers 700°C (Birk, 1995). Il propose implicitement de prendre cette dernière valeur comme critère de tenue au feu.

Il est sans doute possible d'affiner ce critère en remarquant qu'un réservoir d'acier est calculé pour éclater, en statique et à température ordinaire, à une pression interne égale au double de sa pression d'épreuve (Heudier, 2004). On rappelle que la pression de service est 30% plus basse que la pression d'épreuve. Mais lorsqu'un réservoir est exposé au flux thermique d'un incendie, sa pression interne augmente (vaporisation du liquide, dilatation des fluides contenus) alors que sa résistance mécanique diminue sous l'effet de l'augmentation de la température. On note que la résistance ultime de l'acier atteint 50% de sa valeur nominale vers 500°C ce qui signifie que la rupture se produira autour de cette valeur si on admet par ailleurs que la surpression interne aura augmenté pour atteindre la pression d'épreuve.



Les valeurs des caractéristiques en ordonnées sont données en pourcentage de la valeur correspondante à température ordinaire.

Figure 3 : Caractéristiques mécaniques de l'acier en fonction de la température, sur éprouvette de traction - courbes obtenues à partir d'essais de traction sur des éprouvettes (Fruitet, 1979)

Il convient de distinguer l'effet des feux enveloppants qui communiquent leur flux thermique par rayonnement uniquement et les feux torches impactants qui communiquent l'énergie thermique par convection et rayonnement (Birk, 1995). Le flux thermique type est de l'ordre de 100 kW/m² pour les premiers et de l'ordre de 250 kW/m² pour les seconds (valeurs confirmées par l'expérimentation). La partie du réservoir en contact avec la phase liquide se réchauffe plus doucement que celle en contact avec le gaz en raison notamment de la plus grande capacité thermique du liquide. Il existe des modèles pour estimer l'échauffement (Lautkaski, 2009 par exemple). Si on ignore l'effet du gaz liquéfié, on peut estimer une valeur par défaut du temps requis pour que la paroi du réservoir atteigne (localement) plus de 500°C :

$$\Phi_f = \rho_{acier} \cdot e \cdot C_{pacier}$$

Où Φ_f est le flux thermique reçu, e l'épaisseur de la paroi d'acier, ρ_{acier} et C_{pacier} sont respectivement la masse volumique et la chaleur spécifique de l'acier (7800 kg/m³ et 400 J/kgK). Pour des épaisseurs de l'ordre de 10 mm, on trouve une durée de l'ordre de quelques minutes ce qui est en bon accord avec les résultats d'expérience. La présence du liquide semble d'importance secondaire.

La rupture initiale se produit préférentiellement sur la partie du réservoir en contact avec le ciel gazeux. Birk (Birk et al., 2007) a observé que, selon la résistance du réservoir, la première fissure qui se produit peut soit se propager jusqu'à l'ouverture complète ou alors s'arrêter pour éventuellement reprendre sa propagation ultérieurement (BLEVE « en une étape » ou « en deux étapes »). L'interprétation qu'ils en donnent est la suivante : lorsque le réservoir est mécaniquement très affaibli (par un feu important par exemple), l'énergie du ciel gazeux peut suffire à propager la fissure, alors que lorsque le réservoir est plus résistant (plus solide par exemple), la fissure s'arrête pendant la décharge du gaz

et c'est l'énergie du liquide (coup de bélier, cf. ci-après) qui achève le processus de fissuration.

3.1.2.2.2 CHOC MÉCANIQUE

Le retour d'expérience indique qu'un choc mécanique sur le réservoir peut induire le BLEVE. À notre connaissance, il existe très peu d'information spécifique au BLEVE sur ce sujet.

On peut suspecter des mécanismes de rupture proches de ceux évoqués ci-dessus. Si la masse et la vitesse du projectile sont importants, une fissure de taille suffisante devrait pouvoir se former pour que la pression interne du gaz permette une propagation jusqu'à la ruine complète. Si la fissure n'est pas suffisamment étendue, le mécanisme de rupture « en deux temps » pourrait se produire.

À ce stade, on peut tout juste préciser qu'un projectile arrivant sur un réservoir d'acier à une vitesse de 10 m/s serait capable de pénétrer dans l'enveloppe (Nguyen, 2009).

3.1.3 QUE SIGNIFIE « TEMPÉRATURE EST TRÈS SUPÉRIEURE À LA TEMPÉRATURE D'ÉBULLITION » ?

Dans la vision « classique » du BLEVE, on a longtemps admis que le phénomène de vaporisation « brutale » était relié à la notion de « température limite de surchauffe ». En effet, lorsqu'on transfère, à pression donnée, de la chaleur à un liquide, celui-ci subit une augmentation de température, jusqu'à atteindre son point d'ébullition et à former des bulles de vapeur qui se développent sur les sites actifs que sont les impuretés et les interfaces avec les solides. Lorsqu'il n'y a pas suffisamment de sites de nucléation dans le liquide, le point d'ébullition peut être dépassé sans qu'il y ait ébullition. Dans ce cas, le liquide est dit surchauffé. Il existe cependant une limite de température, à une pression donnée, au-delà de laquelle se développent des bulles de vapeur dans tout le liquide, même en l'absence de sites de nucléation (C.C.P.S., 1994). Cette limite est la **limite de surchauffe d'un liquide**, appelée encore **température de nucléation homogène**.

Considérons, par exemple, un gaz liquéfié pur à l'équilibre thermodynamique dont l'état est présenté par le point A de la figure 4. Si on lui fournit de la chaleur, le point représentatif de son état se déplace sur la courbe de tension de vapeur saturante jusqu'à rejoindre le point B. Le gaz peut alors passer, par dépressurisation brutale, à l'état représenté par le point E en restant, au moins momentanément, surchauffé, à l'état liquide avant de se vaporiser plus ou moins rapidement. En revanche, du gaz dont l'état est représenté par le point C de la courbe de tension de vapeur, ne peut subir une dépressurisation brutale amenant la droite verticale représentative de cette transformation à couper la droite limite de surchauffe sans subir une vaporisation homogène et rapide, pouvant avoir un caractère explosif.

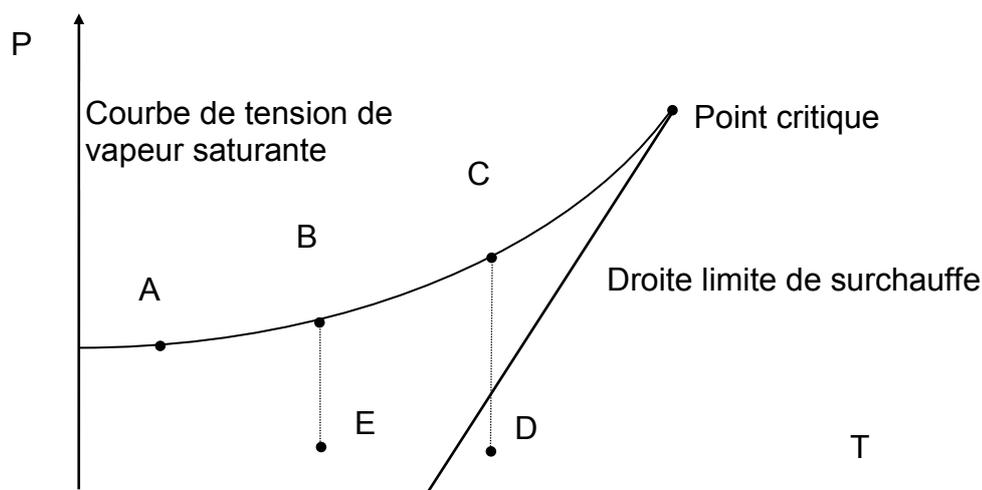


Figure 4 : Température limite de surchauffe en fonction de la pression

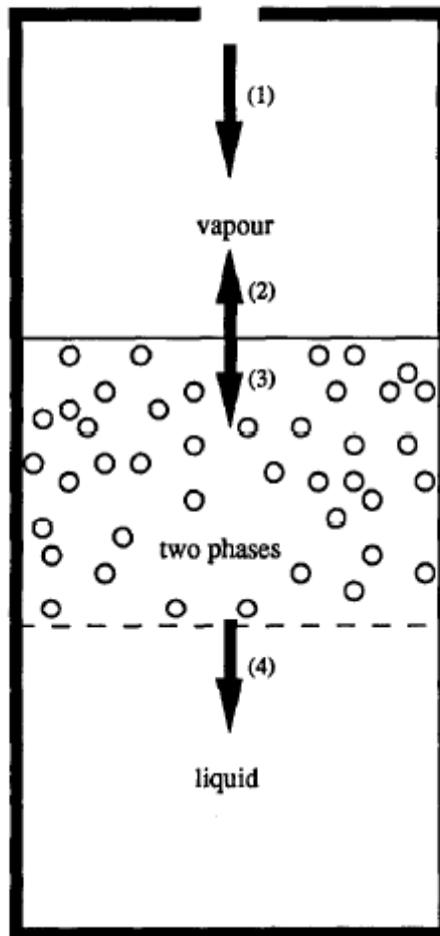
La théorie du BLEVE associée à cette définition, présentée par Reid (Reid, 1976, 1979, 1980) considère qu'un liquide, dont la température est supérieure à sa température limite de surchauffe et qui est dépressurisé à la pression atmosphérique, peut se vaporiser instantanément. Le volume massique de la vapeur étant de plusieurs centaines de fois supérieurs à celui du liquide, ce phénomène, assimilable à une explosion, est susceptible d'engendrer une onde de choc. Cette approche est celle reprise par la circulaire du 10 mai 2010⁸.

En réalité, l'expérience semble démontrer (Birk, 1995) que la grande majorité des BLEVEs se produisent alors que le liquide est loin de sa température limite de surchauffe. Il suffit pour cela que le liquide soit surchauffé. Ce point important relativise la distinction (Leprette, 2002) entre les BLEVEs « froids » (la température du liquide à la pression ambiante est au-dessous de la température limite de surchauffe) et les BLEVEs « chauds » (la température du liquide à la pression ambiante est au-dessus de la température limite de surchauffe). En revanche, les seconds donneraient lieu à des explosions nettement plus violentes que les premiers ce qui peut s'expliquer à la fois par des raisons énergétiques (l'énergie thermique « sensible » disponible dans la masse liquide pour vaporiser est plus grande pour les BLEVEs chauds) et cinétiques (la vitesse de production des sites de nucléation et la vitesse de croissance des bulles de vapeur augmentent avec le degré de surchauffe : Yu et al., 1996).

Yu et al proposent une description physique relativement complète, séduisante, du mécanisme de vaporisation et même de la rupture de l'enceinte dite « en deux étapes ». On suppose (« première étape ») qu'une brèche de taille limitée s'est formée dans le ciel gazeux du réservoir (figure 5). Une onde de dépressurisation se propage d'abord dans le gaz puis se transmet dans le liquide. Des bulles de vapeur se développent dans la fraction de liquide dépressurisée, augmentant ainsi

⁸ 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-----

très fortement le volume de cette zone, diminuant celui du ciel gazeux, si bien que la pression (du ciel gazeux) peut ré-augmenter. Ce phénomène, déjà postulé par Birk (Birk et Cunningham, 1994), pourrait être responsable de l'accroissement de la taille de la brèche. Remarquons cependant que cette augmentation de pression pourrait aussi s'accompagner d'une condensation au moins partielle de la vapeur, limitant ainsi l'amplitude de ce phénomène. En revanche, il apparaît que l'impact de l'interface liquide-vapeur sur la zone de la brèche peut se produire à une vitesse telle qu'un violent « coup de bélier » pourrait alors faire voler en éclat le réservoir (« seconde étape »).



Schematic diagram of BLEVE/BLCBE process as in a vessel: (1) propagation of the vapour depressurization wave caused by mass discharge through a crack; (2) propagation of the compressive wave caused by the rise in the interface (in the vapour region); (3) propagation of vapour depressurization wave caused by mass discharge through the crack and the compressive wave caused by rise of the two-phase interface; (4) propagation of interface between the two-phase and the liquid space.

Figure 5 : Description proposée par Yu et al. (Yu et al., 1996)

Cette description, physiquement très solide, permet d'expliquer certaines observations expérimentales (Birk et al., 2007) mais mériterait d'être davantage étayée (Abbasi et al., 2007) en raison des implications potentielles sur les techniques de lutte (faut-il ou non une soupape ? comment la dimensionner ?) mais aussi de la modélisation des effets. Au plan des effets thermiques du BLEVE par exemple, les conséquences les plus désastreuses ne dépendraient alors plus directement du degré de surchauffe du liquide ou du degré de remplissage initiaux du réservoir (l'absence de lien a été confirmée expérimentalement) mais surtout de l'état thermo-hydraulique du fluide juste avant la ruine totale du réservoir.

3.2 PRODUCTION DES EFFETS

3.2.1 EMISSION D'UNE ONDE DE PRESSION

Lors d'un BLEVE les effets de pression peuvent être la conséquence de trois phénomènes :

- la détente du ciel gazeux du réservoir,
- la vaporisation brutale du liquide,
- la combustion rapide dans la boule de feu (lorsque le produit est inflammable).

Les essais révèlent (Ludwig et Balke, 1999 ; Johnson et Pritchard, 1990) effectivement la présence de plusieurs pics successifs (figure 6). Certains (Johnson, Shield, 1993) attribuent les deux premiers pics, très rapprochés, à l'expansion du ciel gazeux et au flash du liquide et le dernier, souvent plus éloigné et d'impulsion nettement plus grande à la combustion. Birk (Birk, 1997, 2007) a critiqué ce point de vue en arguant de ce que le second pic est également présent lors d'éclatement de capacité sous pression de gaz uniquement. Cependant, lorsqu'on observe attentivement les signaux obtenus lors d'éclatement de capacités sous pression de gaz et lors d'un BLEVE (Esparza et Baker, 1977a, 1977b) on s'aperçoit que, dans la première situation, la « réplique » de l'onde initiale est d'amplitude nettement plus faible et qu'elle apparaît bien détachée. Dans le cas du BLEVE, la seconde onde peut être d'amplitude comparable ou plus grande que la première et peut apparaître plus tôt, éventuellement lors de la détente consécutive à la première onde.

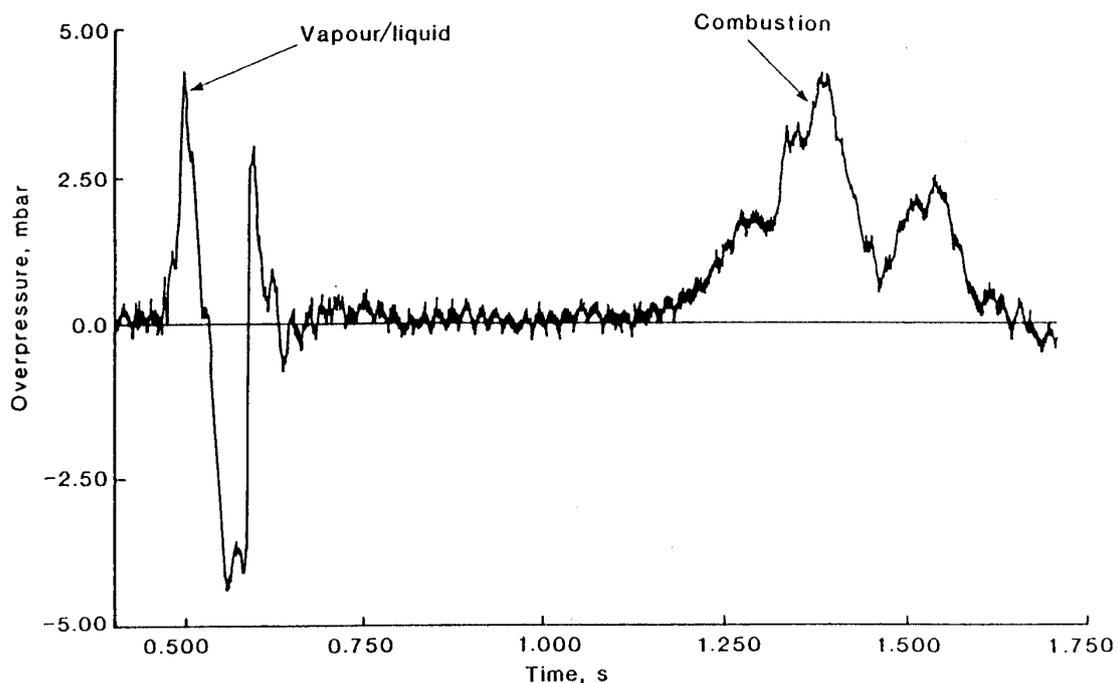


Figure 6 : Surpression en fonction du temps à 150 m du réservoir, lors du test n°5 des essais British Gas

Il est donc extrêmement probable que les deux types d'expansion de vapeur (détente du ciel gazeux et vaporisation) se manifestent quasi-simultanément. La tendance actuelle est de considérer qu'ils ne peuvent pas se cumuler et ne former qu'une seule onde d'amplitude plus importante au motif que la vaporisation est un phénomène plus lent que l'expansion du ciel gazeux. Ce point mériterait cependant d'être approfondi car :

- À grande distance les ondes successives peuvent se rattraper et se cumuler ;
- Si l'expansion du liquide sous l'effet de la vaporisation est très rapide (200 m/s), ce qui paraît possible selon notamment le mode de rupture de l'enceinte (modèle de Yu), alors la libération d'énergie apparaît instantanée à un observateur. Comme suggéré par Abbasi (Abbasi et al., 2007) et calculé par Van den Berg (Van den Berg et al., 2004), ce sont l'état thermohydraulique du fluide juste avant la ruine totale du réservoir et la vitesse d'éclatement du réservoir qui joueraient alors un rôle majeur.

Shield a fait remarquer que l'impulsion induite par la combustion pouvait être très grande et suspecte que les effets de pression induits par la boule de feu pourraient avoir des conséquences mécaniques significatives sur les structures. On peut remarquer à cet égard que l'énergie libérée par la combustion peut être beaucoup plus grande que celle induite par la vaporisation ou l'expansion du ciel gazeux (par exemple les énergies de vaporisation et de combustion sont dans un rapport 10). Donc même si la vitesse d'expansion de la boule de feu est sans doute nettement plus faible que celle de l'onde de détente du fluide, comme

l'énergie disponible est plus grande d'un ou deux ordres de grandeur, les effets de pression dans le champ proche sont plus modestes mais peuvent être plus importants à grande distance. A l'heure actuelle, ces aspects ne sont pas abordés dans la littérature. Compte tenu des niveaux d'énergie en jeu, il est certainement nécessaire de s'interroger sur ce point surtout si le BLEVE se produit en milieu confiné.

Pour l'heure la tendance actuelle est d'estimer le champ de pression induit par un BLEVE sur la base de l'énergie de pression contenue dans le ciel gazeux en y ajoutant éventuellement l'énergie du flash. L'effet de la « boule de feu » sur le champ de pression est ignoré.

3.2.2 EMISSION D'UNE BOULE DE FEU

Selon la violence du BLEVE, le liquide inflammable peut brûler sous la forme d'un feu de flaque, ou d'une boule de feu.

D'après le Yellow Book (TNO, 2005), une boule de feu est un feu suffisamment rapide pour que les gaz brûlés s'élèvent dans l'air sous la forme d'un nuage ou d'une boule. Shield, tout comme (Crawley, 1982) distingue trois étapes de développement d'une boule de feu :

- expansion de la boule de feu jusqu'à son diamètre maximal,
- combustion et ascension de la boule de feu,
- extinction de la boule de feu.

Concernant la physique interne de ces « boules de feu », on peut imaginer que la combustion se produit à la frontière entre le mélange gaz-gouttelettes combustibles et l'air externe et que l'entraînement de l'un dans l'autre dépend, significativement au moins, de la « turbulence » initiale impulsée par l'éclatement du réservoir. La vitesse de la flamme serait alors liée à cette « turbulence » c'est-à-dire in fine aux conditions d'éclatement. Or, pour des pressions d'éclatement égales ou supérieures à plusieurs fois la pression atmosphérique, la vitesse des ondes « mécaniques », responsable de la « turbulence » du nuage, est relativement constante (de l'ordre de la vitesse du son dans les fluides) et on peut penser que la vitesse de combustion dans la « boule de feu » puisse être assez constante d'un BLEVE à l'autre. En d'autres termes, la vitesse de la flamme serait peu dépendante de la taille du BLEVE. En revanche, le volume de la boule de feu serait lié à la quantité totale de combustible : on pourrait le rapprocher de la notion de « pouvoir fumigène » (volume des fumées dans le cas d'une combustion stœchiométrique) utilisée dans le calcul des machines thermiques. Ce paramètre est exprimé en Nm^3 de fumée par kg de combustible (par exemple $11 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ de GPL). Ainsi le volume maximal de la boule de feu serait proportionnel à la masse de combustible⁹ tandis que la durée de cette boule serait proportionnelle au rayon (car la vitesse de la flamme est supposée constante) c'est-à-dire à la racine cubique de la masse de combustible. Comme nous le constaterons ci-après cette

⁹ En théorie, le volume de la boule de feu serait alors égal à la Masse de combustible M multipliée par le pouvoir fumigène multiplié par le taux d'expansion des fumées sous l'effet de la chaleur (8 pour une combustion stœchiométrique de GPL dans l'air). En faisant l'hypothèse que cette boule est une sphère, son diamètre maximum serait alors approximativement $5,5.M^{1/3}$

analyse rapide est assez bien confortée par les corrélations proposées dans la littérature.

À propos de la phase ascensionnelle, il suffit sans doute de rappeler que les forces d'Archimède agissent sur les gaz de combustion chaud et peuvent être, à elles seules, responsables de ce phénomène. La vitesse ascensionnelle d'une bulle de gaz léger dans un gaz plus dense est proportionnelle à la racine carrée du diamètre de la bulle. Si on s'intéresse à l'altitude atteinte par la boule de feu à la fin de la durée de combustion, on montre assez facilement avec le raisonnement précédent que l'altitude maximale devrait varier comme le diamètre maximal de la boule de feu à la puissance 3/2.

Les effets thermiques radiatifs d'une boule de feu sur une population donnée dépendent de l'intensité du rayonnement ainsi que de la durée d'exposition. Lorsqu'une personne est exposée à une densité de flux thermique, les effets auxquels on s'intéresse habituellement sont définis comme étant l'apparition (à faible probabilité) de la létalité, des brûlures significatives, de la douleur... Ces effets sont directement fonction de la densité de flux thermique ϕ et du temps t pendant lequel le sujet est exposé à cette densité de flux thermique.

Dans le cadre de ce document, nous considérerons les seuils des effets thermiques sur l'homme retenus par la réglementation des installations classées¹⁰, rappelés dans le tableau suivant.

Définition du seuil	Charge thermique (en $(\text{kW/m}^2)^{4/3} \cdot \text{s}$)
Effets irréversibles	600
Premiers effets létaux	1000
Effets létaux significatifs	1800

Tableau 3 : Définition des seuils d'effets thermiques sur l'homme en termes de charges thermiques, retenus dans la réglementation des installations classées

10 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. Pour un phénomène de courte durée (typiquement inférieur à 2 minutes) tel que la boule de feu engendrée lors d'un BLEVE, les seuils des effets thermiques sur l'homme sont exprimés en charge thermique, et non en flux thermique.

3.2.3 FRAGMENTS

3.2.3.1 FORMATION DES FRAGMENTS

Les différentes techniques de dimensionnement des structures (ex : EUROCODES) permettent d'estimer la surpression de ruine d'une paroi lorsque la surpression est appliquée de manière lente, typiquement lorsque la vitesse de chargement est plus petite que 0,01 bar/s et lorsque la température du matériau est homogène. En régime de chargement dynamique, tant que la durée caractéristique du chargement reste comparable (ou plus grande) en ordre de grandeur à celle de la déformation de la structure considérée, on peut admettre que les fragments susceptibles d'être formés devraient avoir des dimensions identiques à celles des fragments formés lors de la rupture sous chargement statique. Dans la situation inverse, les régimes de vibration sont susceptibles de devenir plus complexes et la taille des fragments ne peut plus être prédite simplement (Proust, 2000).

La figure 7 illustre un exemple extrême de déformation d'un réservoir cylindrique contenant un gaz sous pression initiée par une fissure axiale. Il convient de souligner que chacune des géométries de cette figure pourrait être l'état final.

La fissure initiale se propage le long de l'axe vers chaque extrémité du réservoir où la fracture bifurque. Ensuite, des fissures circonférentielles se propagent dans des directions opposées autour de chacune des extrémités. La virole se déplie à mesure que la fissure progresse autour des extrémités et peut même se replier dans le sens contraire. Les fissures circonférentielles se propagent et se rencontrent éventuellement entraînant le détachement d'une ou deux extrémité(s) du réservoir.

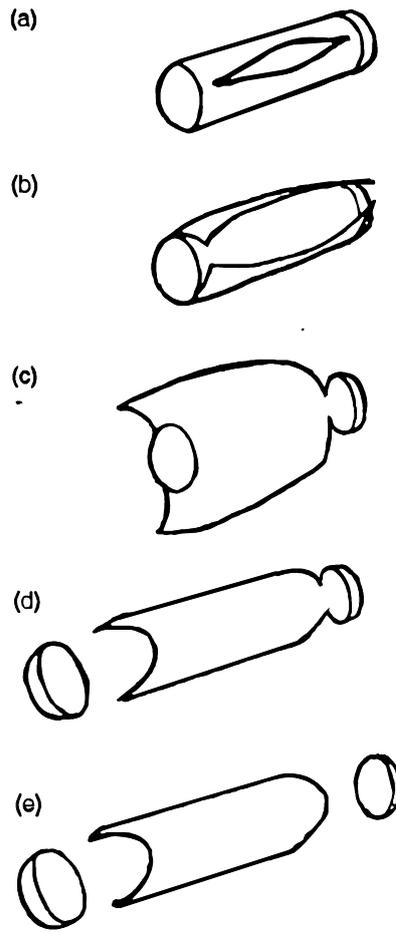


Figure 7 : Les déformations successives du réservoir (Baum, 2001)

Lorsque se superposent des gradients thermiques induits par un feu, la répartition des contraintes peut être hétérogène et il paraît plus difficile de prédire le nombre et la forme des fragments qui seront produits lors de l'éclatement. Le calcul en statique homogène ne peut fournir qu'un ordre de grandeur.

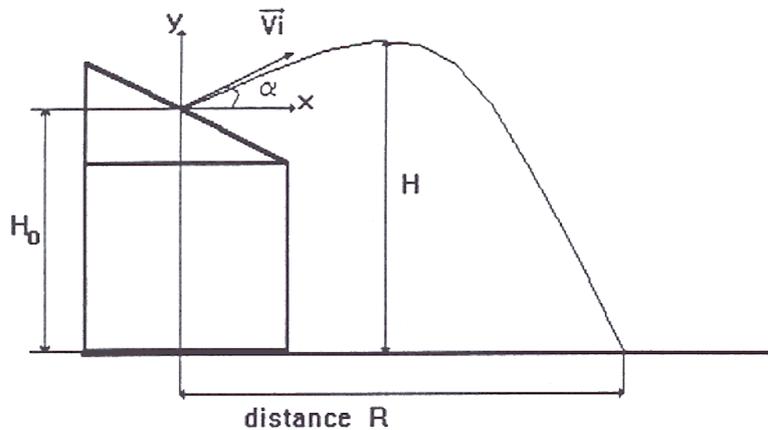
3.2.3.2 ACCÉLÉRATION ET PROJECTION

La vitesse et la distance d'un fragment d'enveloppe est principalement fonction de sa vitesse initiale, de sa masse, et de sa géométrie (Heudier, 2004).

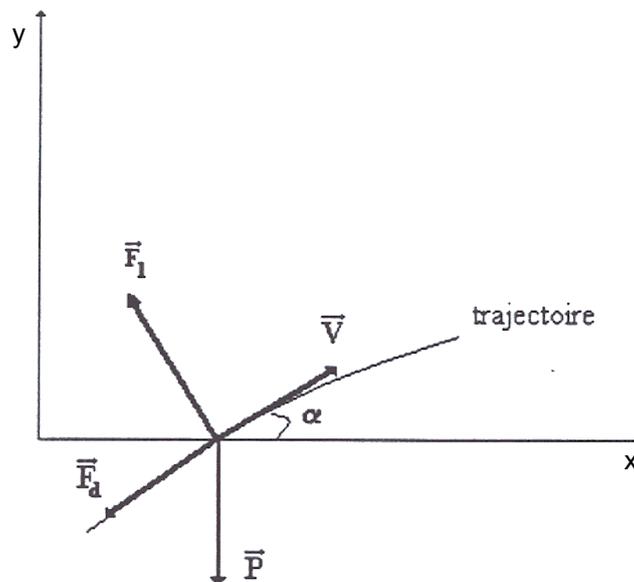
On peut montrer à partir des théories de la mécanique que la vitesse initiale du fragment dépend essentiellement de l'impulsion I ($I = \int \Delta p(t) dt$ où $\Delta p(t)$ est la surpression dans le réservoir) communiquée lors de la dépressurisation du réservoir après éclatement. $\Delta p(t)$ est une fonction décroissante si bien que l'impulsion est une grandeur finie. Plus elle est grande, plus la vitesse initiale est importante, toutes choses égales par ailleurs.

Après la phase de poussée, le fragment est soumis aux seules forces de traînée et de pesanteur, plus rarement à des effets de portance. En effet, la portance pourrait intervenir si les profils extrados (surface supérieure du fragment) et intrados (surface inférieure du fragment) étaient dissymétriques.

La trajectoire peut être déduite des équations de la balistique (figure 8), connaissant notamment l'angle α de projection, la hauteur de départ H_0 et la vitesse initiale V_i .



a) Trajectoire du fragment



b) Bilan des forces (\vec{F}_1 force de portance, \vec{F}_d force de traînée, \vec{P} force de pesanteur, \vec{V} vitesse du fragment)

Figure 8 : Trajectoire du fragment et bilan des forces extérieures exercées sur le fragment

Les fragments ne peuvent pas avoir une vitesse initiale plus grande que la vitesse matérielle du fluide qui les propulse. Ce dernier paramètre peut être extrait de la théorie des tubes à choc. Il correspond à la vitesse limite d'un fragment de masse nulle.

Baum (1999) a étudié la rupture circonférentielle d'un cylindre contenant un liquide surchauffé. Selon la position de la rupture circonférentielle, le fragment principal peut être constitué d'une des extrémités du réservoir seulement ou d'une extrémité et de la majeure partie de la virole. Dans ce cas, le projectile subit une accélération semblable à celle d'une fusée à mesure que le fluide est expulsé.

La dépressurisation soudaine induite par la rupture du réservoir initie la vaporisation du liquide. Les bulles de vapeur entraînent l'augmentation du volume du fluide. Ce processus de "flash" maintient la pression à l'intérieur du réservoir à une valeur proche de la pression de saturation du liquide.

Compte tenu de ce mécanisme de « production de gaz », l'expansion et l'expulsion du mélange vapeur-liquide sont plus longues et une plus grande impulsion est communiquée aux fragments par rapport à la situation où le réservoir contiendrait un gaz sous pression.

4 PREDIRE LES EFFETS D'UN BLEVE

4.1 PRÉDICTION DES EFFETS DE PRESSION

Abbasi (Abbasi, 2007) présente quelques méthodes de prédiction des effets de pression et retient celles qui additionnent les effets de la détente du ciel et de la vaporisation flash du liquide en argumentant qu'il est difficile d'estimer quelle étape contribue le plus à la production d'énergie de pression. Trois méthodes sont privilégiées qui requièrent d'abord une estimation d'énergie de pression puis l'emploi d'un abaque de décroissance des ondes, mais il en existe une quatrième sans abaque, plus originale (Shield, 1993) :

- Dans la méthode de Prugh (Prugh, 1991), appelée « méthode de l'équivalent TNT », l'énergie d'explosion est calculée en supposant que la vaporisation du liquide et l'expansion de la vapeur sont isentropiques (avec l'équation des gaz parfaits). Une charge équivalente de TNT est définie à partir de l'énergie d'explosion, et les courbes de décroissance de la surpression fournies dans (CCPS, 1994) pour un explosif condensé sont utilisées ;
- La méthode préconisée par le CCPS et le TNO est plus connue (CCPS, 1994 ; TNO, 2005). C'est la « méthode SVEE ». L'énergie d'explosion est supposée égale à la variation d'énergie interne du gaz en expansion (soit le ciel gazeux initial et la contribution de la vaporisation). L'expansion est supposée isentropique mais il n'y a pas d'hypothèse sur l'équation d'état ;
- Dans la méthode de Planas-Cuchi (Planas-Cuchi et al., 2004), l'énergie d'explosion est calculée en supposant que le travail d'expansion jusqu'à la pression ambiante est égal à la différence d'énergie interne due à l'expansion (le ciel gazeux initial et contribution de la vaporisation), supposée adiabatique et irréversible. Les graphes fournis dans (Van den Berg, Lannoy, 1993) sont utilisés.
- Shield (Shield, 1993) présente une méthode très originale et physiquement étayée. L'auteur calcule la vitesse d'expansion du nuage, en déduit une surpression locale puis la « propage » dans l'atmosphère au moyen d'une approximation acoustique (donc faible niveau de pression). Aucun abaque n'est requis.

4.1.1 MÉTHODE DE PRUGH

L'énergie d'explosion du BLEVE est calculée à partir de la différence d'énergie de pression de la vapeur ($\frac{\Delta P \cdot V_{\text{vapeur}}}{\gamma - 1}$) entre les conditions de rupture (P_{rupt} , la pression de rupture) et l'expansion (supposée isentropique, ie telle que $P \cdot V^\gamma = \text{cste}$) à la pression atmosphérique, le volume de vapeur au moment de la rupture tenant compte de la fraction du liquide vaporisée. La masse équivalente de TNT W_{TNT} (kg) correspondant à l'énergie d'explosion du BLEVE se calcule en divisant l'énergie d'explosion par l'énergie d'un kilogramme de TNT :

$$W_{TNT} = \frac{2,4 \cdot 10^{-7} \cdot P_{rupt} \cdot V_{vapeur}}{\gamma - 1} \cdot \left[1 - \left[\frac{P_{atm}}{P_{rupt}} \right]^{\gamma-1/\gamma} \right]$$

avec :

$$V_{vapeur} = V_{réservoir} + M_{liq} \cdot \left[\frac{x}{\rho_{vap,rupt}} - \frac{1}{\rho_{liq,rupt}} \right],$$

avec $\rho_{vap,rupt}$ et $\rho_{liq,rupt}$ les masses volumiques de la vapeur et du liquide au moment de la rupture, M_{liq} la masse de liquide contenue, γ le rapport des chaleurs spécifiques de la vapeur, P_{atm} la pression atmosphérique et $V_{réservoir}$ le volume interne du réservoir qui éclate). La fraction massique x de liquide qui se vaporise de manière isentropique s'écrit (empirique) :

$$x = 1 - \exp \left[-\Omega \cdot \frac{C_{pliq_eb}}{L_{vap_eb}} \cdot (T_c - T_{éb}) \right]$$

$$\Omega = 2,63 \cdot \left(1 - \left[\frac{T_c - T_1}{T_c - T_{éb}} \right]^{0,38} \right)$$

Où T_c est la température critique du fluide (T_1 température du fluide au moment de la rupture). Le paramètre permet de tenir compte du passage éventuel depuis l'état supercritique. C_{pliq_eb} et L_{vap_eb} sont respectivement les chaleurs spécifiques du liquide et la chaleur de vaporisation à $T_{éb}$, la température d'ébullition. Les différentes étapes de la méthode de Prugh pour prédire les effets de pression sont les suivantes :

- 1) détermination de la pression maximale à proximité de ce réservoir $P_{s,rupt}$, que l'on appelle pression de contact ou pression de choc, à partir de la pression dans le réservoir au moment où la rupture se produit P_{rupt} (solution approximative de la théorie) :

$$P_{rupt} = P_{s,rupt} \cdot [1 - \theta]^{-2\gamma/(\gamma-1)}$$

$$\text{avec } \theta = \frac{0,035 \cdot (\gamma - 1) \cdot (P_{s,rupt} - P_{atm}) \cdot 10^{-3}}{\sqrt{[1 + 0,058 \cdot P_{s,rupt} \cdot 10^{-3}] \cdot \frac{\gamma \cdot T}{M}}}$$

- 2) détermination d'une « distance virtuelle », à partir des courbes de (CCPS, 1994), de la surpression maximale $P_{s,rupt}$ et de la charge équivalente de TNT

W_{TNT} en utilisant la distance réduite : $z = \frac{r}{\sqrt[3]{W_{TNT}}}$. La « distance virtuelle » est

obtenue en enlevant la valeur du rayon du réservoir à la distance r déduite des courbes, pour laquelle la surpression maximale est atteinte.

- 3) Pour déterminer la surpression à une distance donnée du réservoir, on ajoute cette distance à la « distance virtuelle », puis on utilise cette valeur comme r pour calculer la distance réduite z , donnée d'entrée des courbes (CCPS,

1994). Ce point peut être critiqué car cette zone à une signification physique. C'est le « champ proche » dans lequel se forment les ondes de choc (Heudier, 2004). Mais le fait d'utiliser une courbe d'atténuation de pression de type « explosif » est a priori justifié si on admet la vaporisation et la détente des gaz plus rapide que le temps de propagation de l'onde dans l'environnement.

4.1.2 MÉTHODE DU CCPS / TNO

L'énergie d'explosion E_{ex} est calculée à partir de la variation d'énergie interne u des phases liquide et vapeur au cours de leur expansion à la pression atmosphérique (ie entre l'état initial 1, qui correspond au moment du BLEVE, et l'état final 2 à la pression atmosphérique P_{atm}), supposée isentropique :

$$E_{ex} = m_{liq,1} \cdot u_{liq,1} - m_{liq,2} \cdot u_{liq,2} + m_{gaz,1} \cdot u_{gaz,1} - m_{gaz,2} \cdot u_{gaz,2}, \text{ avec}$$

$$m_{liq,2} = (1 - X_{liq}) \cdot m_{liq,1} + (1 - X_{gaz}) \cdot m_{gaz,1}$$

$$m_{gaz,2} = X_{liq} \cdot m_{liq,1} + X_{gaz} \cdot m_{gaz,1}$$

$$X_{gaz} = \left(\frac{s_{gaz,1} - s_{liq,2}}{s_{gaz,2} - s_{liq,2}} \right) \text{ la fraction de vapeur qui se condense}$$

$$X_{liq} = \left(\frac{s_{liq,1} - s_{liq,2}}{s_{gaz,2} - s_{liq,2}} \right) \text{ la fraction de liquide qui se vaporise}$$

$$u_{liq,1} = h_{liq,1} - p_1 \cdot v_{liq,1}$$

$$u_{gaz,1} = h_{gaz,1} - p_1 \cdot v_{gaz,1}$$

$$u_{liq,2} = h_{liq,2} - p_{atm} \cdot v_{liq,2}$$

$$u_{gaz,2} = h_{gaz,2} - p_{atm} \cdot v_{gaz,2}$$

$$m_{liq,1} \cdot s_{liq,1} - m_{liq,2} \cdot s_{liq,2} + m_{gaz,1} \cdot s_{gaz,1} - m_{gaz,2} \cdot s_{gaz,2} = 0$$

Ou s est une entropie spécifique et m des masses (de liquide ou de gaz). L'emploi de cette méthode est assez complexe et requiert des diagrammes thermodynamiques. Le principal avantage est qu'il n'est pas fait d'hypothèses particulières quant aux équations d'état des fluides, ni d'approximations pour calculer le chemin thermodynamique de la transformation. Cependant, la transformation est supposée isentropique et être à tout instant à l'équilibre thermodynamique. Enfin, on admet implicitement que la variation d'énergie interne du fluide entre son état initial est intégralement transmise sous forme d'onde de choc.

TNO préconise enfin les diagrammes de Baker (Baker et al., 1983) établis pour les détonations d'explosifs afin d'estimer la décroissance de la surpression maximale en fonction de la distance.

4.1.3 MÉTHODE DE PLANAS-CUCHI ET AL.

Par rapport aux méthodes précédentes, ces auteurs considèrent que les hypothèses thermodynamiques de comportement de gaz parfait et d'expansion isentropique introduisent une surestimation importante des effets de pression (Planas-Cuchi et al., 2004). Les auteurs rappellent que l'énergie contenue dans l'onde de choc ne peut pas être plus grande que celle transmise par la variation d'énergie interne du fluide (comme TNO en somme) soit :

$$E_{ex} = -\Delta U$$

Avec

$$-\Delta U = -U_{final} + U_{initial} = -u_{gaz,2} \cdot m_{totale} \cdot x - (1-x) \cdot m_{totale} \cdot u_{liq,2} + U_{initial}$$

Où $U_{initial}$ est l'énergie interne du fluide au moment de la rupture, x la fraction massique de vapeur à l'état final, m_{totale} la masse totale de fluide, u_{gaz} et u_{liq} les énergies internes spécifiques respectives du gaz et du liquide composant de fluide au point d'ébullition (à P_{atm}).

Les auteurs admettent que la transformation est adiabatique et la pression de l'atmosphère au contact de l'interface air-fluide ne change pas et reste égale à P_{atm} ce qui permet d'exprimer le travail récupéré par le milieu extérieur (l'atmosphère), égal à E_{ex} :

$$E_{ex} = P_{atm} \cdot \Delta V$$

avec

$$P_{atm} \cdot \Delta V = P_{atm} \cdot [v_{gaz,2} \cdot m_{totale} \cdot x + (1-x) \cdot m_{totale} \cdot v_{liq,2} - V_{réservoir}]$$

Où v_{liq} et v_{gaz} sont les volumes spécifiques respectifs du gaz et du liquide composant de fluide au point d'ébullition. $V_{réservoir}$ est le volume interne du réservoir occupé par le fluide au moment de la rupture. En égalisant $P_{atm} \cdot \Delta V$ et $-\Delta U$, on trouve la fraction massique de vapeur à l'état final :

$$x = \frac{m_{totale} \cdot P_{atm} \cdot v_{liq,2} - V_{réservoir} \cdot P_{atm} + m_{totale} \cdot u_{liq,2} - U_{initial}}{m_{totale} \cdot [(u_{liq,2} - u_{gaz,2}) - (v_{gaz,2} - v_{liq,2}) \cdot P_{atm}]}$$

E_{ex} se déduit alors de l'une ou l'autre des formules de l'énergie. Puis, un abaque de décroissance de la pression en fonction de la distance utilisé pour les explosifs doit être employé en prenant comme masse équivalente de TNT (kg) :

$W_{TNT} = 2,14 \cdot 10^{-7} \cdot \beta \cdot E_{ex}$, où β représente la fraction de l'énergie d'explosion qui participe effectivement à la formation de l'onde de pression (1 au maximum si par exemple peu d'énergie est transmise aux fragments). Les auteurs montrent que les quantités d'énergie calculées sont plus faibles qu'avec la méthode TNO.

La méthode est relativement simple mais requiert quand même l'usage de diagrammes thermodynamiques. Aucune hypothèse particulière n'est faite sur les équations d'état des fluides. En revanche, la seconde expression de E_{ex} pose question : supposer que la pression du milieu extérieur reste identique à P_{atm} revient à faire l'hypothèse d'une transformation très lente ce qui n'est pas le cas et est contradictoire avec l'usage des abaques pour explosifs.

4.1.4 MÉTHODE DE SHIELD

Cette méthode est plus complexe à présenter que les autres car elle repose sur une description de l'expansion du nuage à chaque instant (et non simplement sur les états initiaux et finaux). Shield estime les niveaux de pressions induits par l'expansion du ciel gazeux d'une part et par la vaporisation du liquide d'autre part.

À propos de l'expansion du ciel gazeux (avant donc vaporisation du liquide), il fait l'hypothèse que l'onde de pression est une sinusoïde (une seule période) qui s'achève lorsque se termine l'expansion du gaz. Il montre que l'énergie mécanique contenue dans cette onde, prise à une distance r grande devant la taille du nuage final, peut s'écrire (sous l'hypothèse d'une onde acoustique, c'est-à-dire de faible amplitude) :

$$E_{\text{onde}} = \frac{\pi}{\rho_{\text{atm}} \cdot a_{\text{son_atm}}} \cdot \Delta P_g^2 \cdot r^2 \cdot t_p$$

(ΔP est l'amplitude de l'onde de pression à la distance r , ρ_{atm} et $a_{\text{son_atm}}$ sont respectivement la masse volumique et la vitesse du son dans l'atmosphère et t_p est le temps caractéristique d'expansion du nuage). Cette onde contient la part de « l'énergie de Brode » du ciel gazeux qui n'a pas été transmise aux fragments (soit 60% d'énergie résiduelle) :

$$E_{\text{Brode}} = 0,6 \cdot \frac{(P_{\text{rupt}} - P_{\text{atm}}) \cdot V_{\text{ciel}}}{\gamma_v - 1} = E_{\text{onde}}$$

(γ_v est le rapport des chaleurs spécifiques de la vapeur). Shield note que l'onde de pression est formée dès que le temps caractéristique d'expansion du nuage (t_p) est atteint. Cela suppose, sans que cela ne soit cependant tout à fait clair dans les écrits de Shield, qu'en deçà de la zone $r = a_{\text{son_atm}} \cdot t_p$, l'onde est en cours de formation. L'auteur semble identifier cet instant comme correspondant à l'amplitude maximale de la surpression.

On notera que l'usage de l'Énergie de Brode est particulièrement indiqué dans ce cas car la situation s'apparente à un éclatement de réservoir de gaz sous pression (Heudier, 2004) même si le rendement (60%) choisi peut faire débat. De même, la mise en équation de l'onde est intéressante même si le choix de l'hypothèse acoustique est critiquable. Enfin t_p est corrélé à la taille du nuage de vapeur après expansion R_f (supposé sphérique) de la manière suivante :

$$t_p = 2,65 \cdot \frac{R_f}{U_{\text{exp}}} \quad \text{avec} \quad R_f = \left[\frac{(1 - x_1) \cdot x \cdot m_{\text{totale}}}{\rho_{\text{gaz2}}} \right]^{1/3}$$

Où U_{exp} est la vitesse maximale d'expansion du nuage. L'auteur précise que U_{exp} est voisin de 225 m/s et est peu variable d'un BLEVE d'hydrocarbure à un autre. Mais il éprouve des difficultés à cerner les significations physiques de t_p et de U_{exp} . Il fait remarquer que U_{exp} devrait avoir un lien avec la vitesse du son dans le ciel gazeux sans qu'il ne puisse vraiment le confirmer et il a retenu une corrélation expérimentale pour accéder à ce paramètre. Pourtant, son approche pourrait être « poussée » pour introduire une vision plus complète de l'expansion qui intégrerait d'une part le fait que la présence de l'air externe a un effet sur l'expansion (c'est la problématique du « tube à choc » : Heudier, 2004) et d'autre part de l'effet retardant des gouttes de liquide fatalement entraînée lors de l'expansion brutale du ciel gazeux. Enfin, x_1 est la fraction de vapeur juste avant la rupture (ciel gazeux) et x la fraction de vapeur suite à une vaporisation isenthalpique jusqu'à la pression atmosphérique ($C_{spé,moy}$ et $L_{vap,moy}$ sont respectivement les chaleurs spécifiques du liquide et la chaleur de vaporisation moyennes) :

$$x = \frac{C_{spé,moy}}{L_{vap,moy}} \cdot (T_1 - T_{eb})$$

Shield propose également une formulation pour la contribution de la **vaporisation du liquide** faisant cependant remarquer que l'onde produite est distincte de la première. Il utilise la théorie des ondes de choc pour la calculer et, considérant qu'elle ne peut se former qu'après l'expansion du ciel gazeux dans la zone de détente, il propose de retrancher ΔP_{g_max} (qu'il considère comme l'amplitude max de l'onde de raréfaction formé dans la zone de détente) :

$$\Delta P_l = (0,23 \cdot \rho_{gaz} \cdot U_{exp}^2 - \Delta P_{g_max}) \cdot \frac{R_f}{r}$$

4.1.5 COMPARAISON

Une analyse plus précise de la confrontation de ces modèles avec les données d'essais ou du retour d'expérience est proposée en annexe. On retient dans ce paragraphe essentiellement les essais de Birk (Birk, 1997), relativement complets et bien documentés. On constate (figure 9) que les modèles proposés ne sont pas toujours conservatifs et présentent de gros écarts entre eux. Les modèles TNO/CCPS et de Planas semblent conservatifs mais on remarque néanmoins que les tendances de ces modèles et celles déduites des expériences ne sont pas superposables.

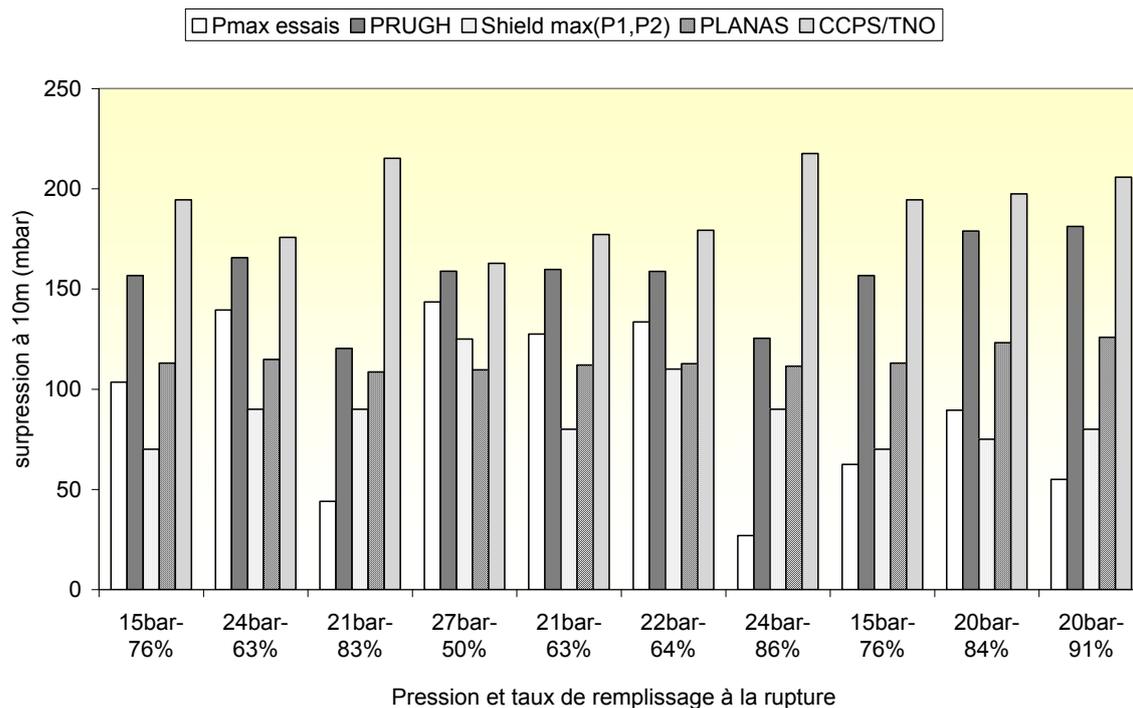


Figure 9 : Comparaison des modèles entre eux et par rapport à l'expérience

Pour cette raison, ces méthodes et leurs résultats doivent donc être interprétés avec précaution. Il est probable que cela provient d'une relative méconnaissance du mécanisme de vaporisation et d'expansion du nuage et sans doute également d'une certaine dispersion des résultats expérimentaux.

Dans ce contexte, l'INERIS met en œuvre les méthodes présentées dans le rapport Ω 15 relatif à la phénoménologie et modélisation des effets d'éclatements de capacités afin de déterminer les distances de sécurité en champs proche et lointain.

4.2 PRÉDICTION DES PROJECTIONS DE FRAGMENTS

La prédiction de la trajectoire d'un fragment est faite traditionnellement en deux temps. La vitesse initiale résultant de l'éclatement du réservoir et de l'expansion du nuage est tout d'abord déterminée. Dans cette étape, les forces autres que celles propulsant le fragment sont généralement ignorées (traînée, portance, pesanteur, ...). Puis la trajectoire est calculée en utilisant des équations de la balistique prenant éventuellement en compte les forces de traînée et de portance. Dans cette seconde étape, les forces de propulsion sont souvent ignorées.

4.2.1 DÉTERMINATION DE LA VITESSE INITIALE DU FRAGMENT

On distingue deux grandes catégories de méthodes :

- les méthodes énergétiques dans lesquelles on suppose que les fragments récupèrent une fraction forfaitaire de l'énergie du BLEVE (section 4.1) sous forme d'énergie cinétique. La vitesse s'en déduit directement connaissant la masse totale des fragments (habituellement l'enveloppe du réservoir),

- les méthodes impulsives dans lesquelles la vitesse initiale du fragment est déduite de l'impulsion de pression qu'il reçoit, estimée à partir de l'historique de la pression interne du réservoir.

4.2.1.1 MÉTHODES ÉNERGÉTIQUES

Ce sont des méthodes d'ingénieur assez typiques. TNO notamment l'a développée dans son « yellow book ». Mais Shield la reprend également. Dans le cas d'un BLEVE, TNO préconise de retenir que 4% de l'énergie totale du BLEVE pourra être communiquée aux fragments sous forme d'énergie cinétique.

On rappelle que le TNO considère que ce rendement peut être 60% au maximum dans le cas de l'éclatement d'un réservoir ne contenant que du gaz sous pression (Heudier, 2004). À cet égard, il est important de souligner (et de rappeler cf. Heudier, 2004) que ce rendement ne peut être constant. En réalité, la vitesse des projectiles est communiquée par la pression interne pendant la durée de la dépressurisation. La dépressurisation est assurée par une onde de détente (sonique) qui se propage des brèches vers le centre du volume. La vitesse des fragments est donc proportionnelle à l'impulsion de pression, paramètre qui ne dépend pas que de l'énergie.

Dans la dernière version du Yellow Book, TNO préconise une seconde estimation de la vitesse initiale de projection, V_{sup} , au moyen de la formule empirique de Moore :

$$V_{sup} = 1,092 \cdot \left(\frac{E_{ex} \cdot \eta}{M_v} \right)^{0,5} \quad \text{avec} \quad \eta = \frac{1}{1 + \frac{M + M_v}{2 \cdot M_v}}$$

Où η est un facteur de répartition de l'énergie cinétique entre les fragments qui constituent l'enveloppe de l'enceinte (de masse totale M_v) et le contenu de l'enceinte (de masse M). TNO préconise de retenir cette estimation lorsque celle obtenue avec le rendement forfaitaire est plus grande.

4.2.1.2 MÉTHODES IMPULSIONNELLES

Baum a étudié expérimentalement et théoriquement (Baum, 1998 et 1999) la vitesse de projection des fragments d'enveloppe de réservoirs cylindriques contenant un liquide en équilibre (ou non) avec le ciel gazeux. Il distingue la situation où un fond relativement plat est projeté tandis que le reste du confinement reste en place de celle de la projection de la virole munie d'une de ses extrémités (effet « fusée »). On signale que Baum a principalement réalisé des expériences à petite échelle (dizaines de mm) avec comme liquide de l'eau.

À propos de la projection d'un fond, Baum remarque que, dans ses conditions d'essais au moins, la vitesse maximale ne dépend pas du taux de remplissage. Cela démontre que la projection des fragments n'est pas une question d'énergie contenue dans le réservoir. Il interprète ce résultat en arguant de ce que le liquide surchauffé se comporte comme une source constante de pression tout ou long du processus de vaporisation initié par l'onde de détente qui remonte vers l'extrémité fermée du réservoir. Il propose d'établir une analogie avec la propulsion d'un

fragment soumis à un jet de gaz à pression/débit constant. Sur cette base, il développe une équation, calée ensuite sur l'expérience, pour la vitesse limite supérieure V_{sup} du fond du réservoir :

$$V_{sup} = \frac{1,25 \cdot F^{0,375}}{\left(\frac{P_{rupt}}{P_{atm}}\right)^{0,085}} \cdot a_{rupt},$$

avec a_{rupt} la vitesse du son dans la vapeur au moment de la rupture à la pression, P_{rupt} . P_{atm} est la pression atmosphérique, et F l'accélération initiale du fragment de rayon R_f et de masse M_f :

$$F = \frac{P_{rupt} \cdot \pi \cdot R_f^3}{M_f \cdot a_{rupt}^2}.$$

À propos de la projection du reste du réservoir (effet « fusée »), Baum développe une théorie dans laquelle il sépare nettement les contributions de la poussée du ciel gazeux de celle du liquide. Ce modèle possède sans doute une plus large part d'empirisme. Il propose :

$$V_{sup} = \left(0,55 + 1,05 \cdot \left(1 - \frac{k}{0,65}\right)\right) \cdot \sqrt{\frac{P_{rupt} \cdot \pi \cdot R^2 \cdot L}{\gamma \cdot M_f}} \quad \text{pour } k \leq 0,65$$

$$V_{sup} = 0,55 \cdot \sqrt{\frac{P_{rupt} \cdot \pi \cdot R^2 \cdot L}{\gamma \cdot M_f}} \quad \text{pour } k > 0,65$$

Où k est la fraction volumique de vapeur au moment de la rupture.

4.2.2 DÉTERMINATION DE LA DISTANCE DE PROJECTION

TNO et CCPS proposent d'utiliser la méthode de Baker (1983) qui tient compte de la résistance de l'air (« traînée »). La distance de projection résulte de simulations numériques des équations classiques de la balistique. Baker a représenté les résultats sur la figure 10 pour une altitude de départ nulle. Sur ce diagramme, l'évolution de la distance adimensionnelle \bar{R} est représentée en fonction de la vitesse adimensionnelle \bar{V}_i pour différents rapports portance sur traînée C_{LA}/C_{DA} .

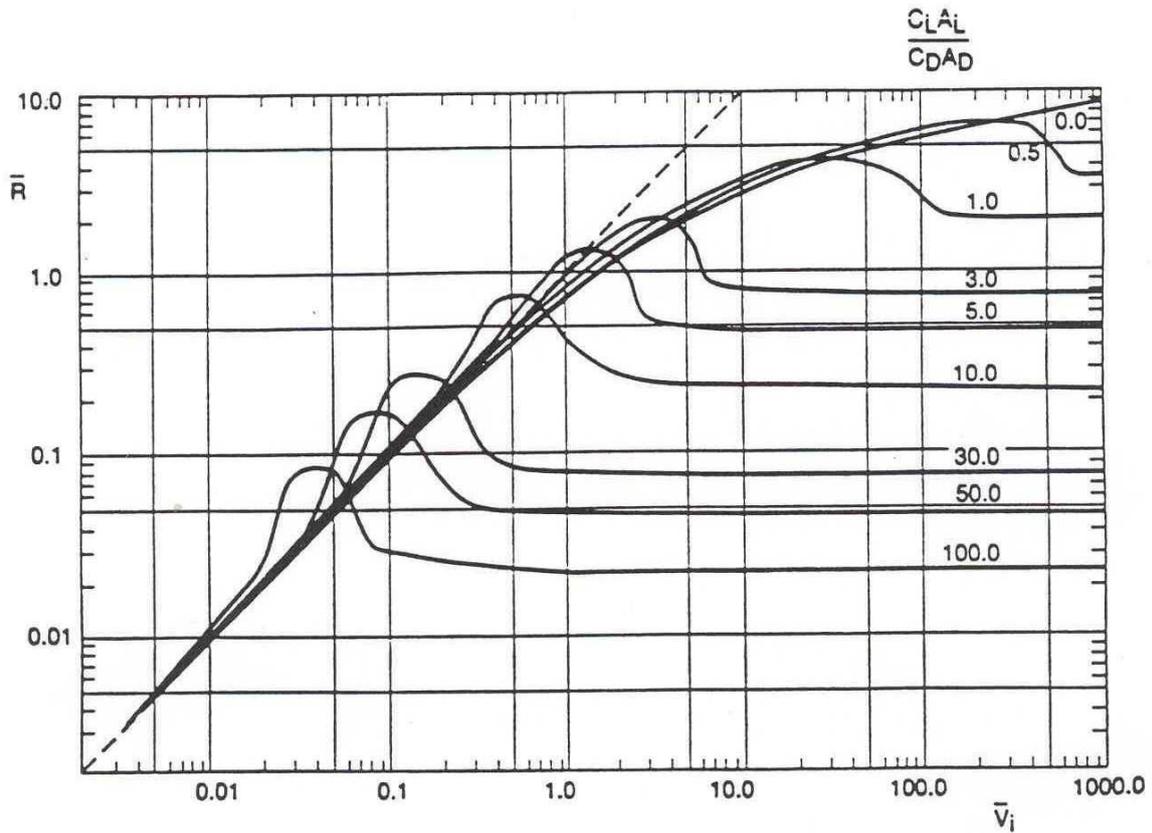


Figure 10 : Distance maximale R en fonction de la vitesse initiale et du rapport des coefficients de traînée et de portance du fragment (Baker, 1983)

$$\bar{R} = \frac{\rho_a C_D A_D R}{M_f}$$

$$\bar{V}_i = \frac{\rho_a C_D A_D v_i^2}{M_f g}$$

où :

- A_D est la surface du fragment dans le plan perpendiculaire à la trajectoire (m^2),
- A_L , la surface du fragment dans le plan parallèle à la trajectoire (m^2),
- C_D , le coefficient de traînée,
- C_L , le coefficient de portance,
- g , l'accélération de la pesanteur (m/s^2),
- M_f , la masse du fragment (kg),
- R , la distance entre le point d'éjection et le point de retombée au sol (m),
- ρ_a , la masse volumique de l'air ambiant (kg/m^3)

- v_i la vitesse initiale du fragment.

Le plus souvent la portance est nulle ($C_l=0$) mais pas la traînée. C_D dépend de la forme du fragment, de la rugosité de sa surface et de son orientation par rapport à la direction de l'écoulement (tableau 3).

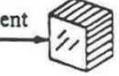
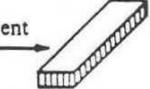
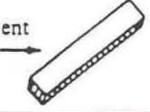
Forme	Schéma descriptif	C_D
Cylindre allongé (diamètre \ll longueur) perpendiculaire au sens de l'écoulement		1.20
Sphère		0.47
Cylindre dont l'une des extrémités est perpendiculaire à l'écoulement		0.82
Disque dont l'une des faces est perpendiculaire à l'écoulement		1.17
Cube dont l'une des faces est perpendiculaire à l'écoulement		1.05
Cube dont l'une des arêtes est perpendiculaire à l'écoulement		0.80
Parallélépipède allongé dont l'une des faces est perpendiculaire à l'écoulement		2.05
Parallélépipède allongé dont l'une des arêtes est perpendiculaire à l'écoulement		1.55
Plaque mince dont l'une des faces est perpendiculaire à l'écoulement		1.98

Tableau 3 : Coefficients de traînée pour différentes formes de projectiles

De façon simplifiée, on peut retenir que les coefficients de traînée des extrémités de réservoirs cylindriques sont compris entre 0,8 (pour un corps hémisphériques) et 1,1 (pour un disque plat) (Hauptmanns, 2001).

4.2.3 COMPARAISON

Il existe peu de données auxquelles confronter les modèles proposés. Il n'en existe guère que pour le modèle de Baum et, dans ce cas, l'approche paraît assez cohérente avec les valeurs expérimentales (figure 11). Il est donc difficile de statuer sur la valeur générale de son modèle, qui, quoique bien argumenté, recèle des zones d'ombres. On voit en revanche que la méthode forfaitaire est très imprécise, fortement en excès par rapport aux données d'essai disponibles.

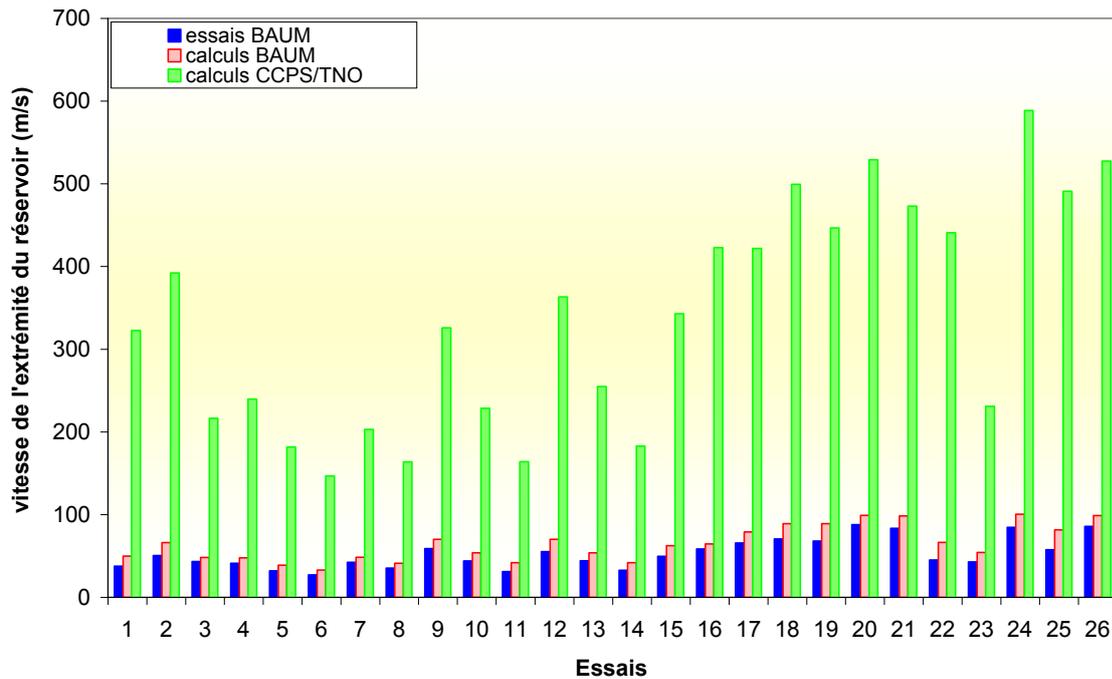


Figure 11 : Comparaison des modèles entre eux et par rapport à l'expérience

Cependant, on présente dans l'annexe D, des estimations de distances de projection sur la base du modèle CCPS/TNO et de la méthode de Baum associée aux graphes de Baker (Figure 10). Même si les données disponibles restent lacunaires, force est de constater que les prédictions de chacune de ces méthodes sont éloignées des observations. Les prédictions ne sont en particulier pas toujours conservatives.

Clairement, l'effet de projection des fragments lors d'un BLEVE paraît assez mal connu ce qui est peut-être une lacune significative si on se rappelle que les projectiles sont largement responsables des effets « domino » de BLEVEs en série.

4.3 PRÉDICTION DES EFFETS THERMIQUES

Dans le cas d'un BLEVE d'un combustible, les effets sur l'environnement induits par le rayonnement de la « boule de feu » peuvent être plus intenses que ceux produits par l'onde de pression et les projectiles.

Pour cette raison sans doute, une attention plus marquée a été portée à la modélisation de ce phénomène. Dans chaque théorie proposée, des équations sont proposées tout d'abord pour déterminer les caractéristiques de la boule de feu (diamètre maximal, durée de combustion et hauteur maximale du centre de la boule de feu) et pour estimer le flux thermique radiatif dans l'environnement.

Concernant la détermination des dimensions et de la durée de vie de la boule de feu, de nombreux auteurs ont proposé des formules empiriques basées sur le retour d'expérience.

4.3.1 CARACTÉRISTIQUES DE LA BOULE DE FEU

De nombreuses formulations empiriques ont été proposées (Abbasi, 2007) pour estimer le diamètre de la boule de feu et sa durée (tableau 4). Ces paramètres sont reliés à la masse de produit M (en kg) présente dans la boule de feu, supposée égale à la masse de produit présent dans le réservoir au moment de l'éclatement car on admet la portion de liquide qui ne « flashe » pas lors de l'éclatement est pulvérisée sous forme de gouttelettes qui participe également la combustion.

On constate que pour les GPL par exemple le diamètre de la boule de feu est proportionnel à $M^{1/3}$ et qu'en moyenne le coefficient de proportionnalité est de l'ordre de 5 en bon accord avec l'estimation de la section 3.2.2. En revanche les formulations divergent franchement pour ce qui concerne la durée de la boule de feu. Certaines, pour lesquelles la durée est proportionnelle à la racine cubique de la masse de combustible, corroborent plutôt bien les projections théoriques (paragraphe 3.2.2).

Référence	Produit	D_{max} (m)	T_b (s)
<i>Corrélations empiriques</i>			
Hardee et Lee	Propane	$5,55M^{0,333}$	-
Fay et Lewis	Propane	$6,28M^{0,333}$	$2,53M^{0,167}$
Hasegawa et Sato	Pentane	$5,28M^{0,277}$	$1,10M^{0,097}$
Hasegawa et Sato	n-Pentane	$5,25M^{0,314}$	$1,07M^{0,181}$
Williamson et Mann	-	$5,88M^{0,333}$	$1,09M^{0,167}$
Lihou et Maund	Butane	$5,72M^{0,333}$	$0,45M^{0,333}$
Lihou et Maund	Rocket fuel	$6,20M^{0,320}$	$0,49M^{0,320}$
Lihou et Maund	Propylène	$3,51M^{0,333}$	$0,32M^{0,333}$
Lihou et Maund	Méthane	$6,36M^{0,325}$	$2,57M^{0,167}$
Moorhouse et Pritchard	Liquide inflammable	$5,33M^{0,327}$	$1,09M^{0,327}$
Lihou et Maund	Propane	$3,46M^{0,333}$	$0,31M^{0,333}$
Duiser	Liquide inflammable	$5,45M^{1,30}$	$1,34M^{0,167}$
Marshall	Hydrocarbure	$5,50M^{0,333}$	$0,38M^{0,333}$
Gayle et Bransford, Bagster et Pitblado	Liquide inflammable	$6,14M^{0,325}$	$0,41M^{0,340}$
Pietersen, Prugh, TNO	Liquide inflammable	$6,48M^{0,325}$	$0,852M^{0,260}$
Roberts, CCPS	Liquide inflammable	$5,80M^{0,333}$	$0,45M^{0,333}(M < 30000)$ $2,60M^{0,167}(M \geq 30000)$
Martinsen et Marx	Liquide inflammable	$8,66M^{0,25}t^{0,333}$, $0 \leq t \leq t_b/3$	$0,9M^{0,25}$
<i>Modèles analytiques</i>			
Bader et al.	Propellant	$0,61 \cdot \left(\frac{3}{4\pi\rho}\right)^{1/3} \cdot W_b^{1/3}$	$0,572 \cdot W_b^{1/6}$
Hardee et Lee	GNL	$6,24M^{0,333}$	$1,11M^{0,167}$
Fay et Lewis	Liquide inflammable	$\frac{g\beta t^2 \cdot (\rho_a - \rho_p)}{7\rho_p}$	$t = \left(\frac{14\rho_p}{g\beta \cdot (\rho_a - \rho_p)}\right)^{0,5} \cdot \left(\frac{3V}{4\pi}\right)^{0,167}$

Tableau 4 : Corrélations empiriques et modèles analytiques (Abbasi, 2007) pour déterminer le diamètre maximal D_{max} et la durée t_b d'une boule de feu (M la masse de produit dans le boule de feu (kg), t le temps compté à partir du BLEVE (s), ρ la masse volumique de la boule de feu gazeuse (lb/ft³), W_b la masse de propellant (lb), g l'accélération de la pesanteur (m/s²), β le coefficient d'entraînement, ρ_a la masse volumique de l'air (kg/m³), ρ_p la masse volumique des produits de la combustion (kg/m³))

Il existe nettement moins de données (tableau 5) quant à l'altitude maximale atteinte par la boule de feu. Pourtant ce paramètre a une incidence assez significative sur les effets thermiques notamment à courte distance où se concentre la zone des effets domino. On constate que cette altitude est proportionnelle et du même ordre de grandeur que le diamètre maximal de la boule de feu ce qui n'est pas tout à fait conforme à notre analyse rapide (paragraphe 3.2.2).

Référence	H_{max} (m)
TNO	$6,48M^{0,325}$
CCPS	$4,35M^{0,333}$
Martinsen et Marx	$4,33M^{0,25}t^{0,333}$ pour $0 \leq t \leq t_b/3$

Tableau 5 : Corrélations empiriques pour déterminer la hauteur maximale du centre de la boule de feu (Abbasi, 2007)

Les méthodes proposées ci-dessus ne sont pas fondées sur des approches phénoménologiques et on leur préférera celles développées par TRC dont nous présentons ci-après la démarche (Shield, 1993, 1995a, 1995b).

Le TRC a développé une approche phénoménologique, notamment à partir des résultats expérimentaux de BRITISH GAS (Johnson et Pritchard, 1990). L'approche du TRC vise à prendre en considération l'évolution au cours du temps des caractéristiques de la boule de feu (diamètre, hauteur, émittance) alors que les autres modélisations (dont celles du CCPS et du TNO) ne considèrent qu'un état stationnaire forcément forfaitaire.

La modélisation de la boule de feu par l'approche du TRC prend en compte les trois principales étapes suivantes :

- a) La **phase d'inflammation** du nuage et de **développement de la boule de feu** jusqu'à son diamètre maximal, ou phase d'expansion. Dans cette phase, le rayon et l'émittance de la boule de feu sont supposés croître linéairement avec le temps jusqu'à leur valeur maximale.
- b) La **phase de combustion** de la boule de feu. La durée de vie de la boule de feu, de son inflammation au début de son extinction est considérée égale à la durée de combustion des gouttelettes formées lors de l'éjection du produit à l'atmosphère. En effet, les gouttelettes qui se sont enflammées dès le début du phénomène sont alors consommées. Au cours de cette phase, la température de la boule de feu est supposée décroître linéairement entre sa valeur maximale et sa valeur de début d'extinction.

La température de la boule de feu au début de son extinction est évaluée par application du principe de conservation de l'énergie en supposant la combustion complète des gouttelettes (s'il y a suffisamment d'air entraîné dans le nuage). La température finale est supposée ne pas pouvoir être inférieure à 0,88 fois la température maximale de la boule de feu (cette hypothèse provient de l'observation des résultats expérimentaux).

Durant cette phase, la vitesse d'ascension de la boule de feu est constante. L'absence d'accélération verticale ascendante notable s'explique dans la

mesure où la boule de feu entraîne de l'air et donc se refroidit alors qu'elle s'élève. En effet, dans le cas contraire, elle devrait accélérer fortement dans la direction verticale du fait d'une différence de température importante avec l'ambiante.

Par ailleurs la boule de feu est considérée conserver une taille constante lors de son ascension.

- c) **Phase d'extinction.** L'extinction de la boule de feu est supposée complète lorsque les dernières gouttes qui se sont enflammées, alors que la boule de feu était à sa température maximale (fin de la phase d'expansion), sont consommées. Lors de cette dernière phase, le diamètre de la boule de feu est supposé décroître linéairement avec le temps alors que l'émittance de la boule de feu est considérée, de manière prudente, constante. De même, lors de cette phase, la boule de feu ne s'élève plus.

Cette méthode, plus complexe, requiert une programmation qui reste assez facile à mettre en œuvre à partir des détails présentés par Shield (annexe). Cependant, il faut garder présent à l'esprit qu'un certain empirisme subsiste comme notamment l'approche de la turbulence jugée responsable de l'entraînement de l'air dans la boule de feu ainsi que le mode de combustion retenu. Des constantes empiriques ont ainsi été incluses par observation de l'expérience. Néanmoins, cette méthode, jugée la plus fiable, a fait l'objet d'un outil de simulation suite à la première version de ce rapport (Leprette, 2002).

4.3.2 DISTANCES D'EFFETS THERMIQUES

Les approches proposées par le C.C.P.S. et du T.N.O doivent être rappelées car elles servent souvent de base.

Dans le modèle du CCPS, les effets radiatifs de la boule de feu sont évalués à l'aide d'un modèle de flamme solide, où le flux rayonné à une certaine distance de la boule de feu est donné par la formule :

$$q = E \cdot F \cdot \tau$$

avec q le flux reçu par la cible (kW/m^2), E l'émissivité de la boule de feu (kW/m^2), F le facteur de forme et τ l'atténuation atmosphérique du rayonnement. L'atténuation atmosphérique, qui dépend notamment du taux d'humidité de l'air, est évaluée à l'aide d'une corrélation empirique (souvent pris égal à un). Le facteur de forme est calculé en supposant que la boule de feu ne s'élève pas du sol (la hauteur du centre de la boule de feu est égale à son rayon). Le pouvoir émissif de la boule de feu est une valeur constante de 350 kW/m^2 . Cette valeur est fondée sur le retour d'expérience et constitue une hypothèse forte, car en particulier la puissance rayonnée n'est pas constante dans le temps. On déduit facilement la charge thermique de q et T_b ($\Phi = q^{4/3} \cdot T_b$).

Le facteur de forme peut être estimé de la façon suivante (modèle de la source ponctuelle) au moins pas trop près de la boule de feu (plus de 2 fois le diamètre) :

$$F \approx \left(\frac{D_{\max}}{2 \cdot \sqrt{x^2 + H_{\max}^2}} \right)^2$$

TNO (2005), comme le CCPS, retient un modèle de flamme solide avec les hypothèses suivantes :

- la boule de feu s'élève de telle sorte que la hauteur de son centre est égale à deux fois le rayon,
- l'atténuation atmosphérique du rayonnement est évaluée par une corrélation empirique (différente de celle du CCPS),
- l'émissivité moyenne de la boule de feu est le résultat d'un calcul semi-empirique :

$$E = 0,00325 \cdot P_{rupt}^{0,32} \cdot \frac{M \cdot \Delta H_{comb}}{\pi \cdot D_{max}^2 \cdot T_b}$$

Où P_{rupt} est la pression de rupture en Pa et ΔH_{comb} la chaleur de combustion du produit.

Pour le calcul des distances d'effet, la méthode TRC fonctionne qualitativement de la même manière sauf qu'il est possible de tenir compte de la variation des caractéristiques de la boule de feu en fonction du temps. Elle a été utilisée lors de la préparation des textes repris dans la circulaire du 10 mai 2010. Les formules proposées (tableau 6) valent pour des hydrocarbures industriels (à l'exclusion de l'ammoniac, l'hydrogène et le GNL).

	Butane, butènes, butadiènes, chlorure de méthyle, chlorure d'éthyle, CVM	Propane, propylène
Distance d'effet relative au seuil de 1800 (kW/m ²) ^{4/3} .s	0.81*M ^{0.471}	1.28*M ^{0.448}
Distance d'effet relative au seuil de 1000 (kW/m ²) ^{4/3} .s	1.72*M ^{0.437}	1.92*M ^{0.442}
Distance d'effet relative au seuil de 600 (kW/m ²) ^{4/3} .s	2.44*M ^{0.427}	2.97*M ^{0.425}

Tableau 6 : Formules de calcul des distances d'effets thermiques sur l'homme fournies dans la circulaire du 10 mai 2010 (les distances sont exprimées en mètres, les masses en kilogrammes)

4.3.3 CONFRONTATION AVEC L'EXPÉRIENCE

On rappelle que la méthode TRC a été développée sur une base expérimentale notamment les essais de British Gas (Johnson et Pritchard, 1990). On ne sera pas surpris dès lors d'un accord raisonnable entre ceux-ci et celle-là. Il n'existe globalement que peu de données d'essai (description en annexe). Outre les essais de British Gas, on peut citer ceux du projet J.I.V.E. (Hazards consequences of Jet fire Interaction with **V**Essels containing pressurised liquids, Terry et Roberts, 1995), du NFPA (Mehlem et al., 1993), de Birk (Birk, Cunnigham et al, 1997) et du BAM (Ludwig et Balke, 1999 ; Ludwig et Heller, 1999). Il s'agit de BLEVEs de GPL de capacités de volumes compris entre 400 litres et 45 m³ avec des taux de remplissage variables.

Des comparaisons sont présentées dans les tableaux suivants.

	Essai n°4 BRITISH GAS	Modèle du C.C.P.S.	Modèle T.N.O.	Modèle T.R.C.
Diamètre maximal de la boule de feu (m)	74	79	82	83
Durée de vie de la boule de feu (s)	6,5	6,1	6,5	5,9
Emittance de la boule de feu (kW/m ²)	356	350	256	440 à 264
Hauteur par rapport au sol du centre de la boule de feu (m)	85	39	82	77
Distance* au seuil de 1000 (kW/m ²) ^{4/3} .s	-	98	56	60
Distance* au seuil de 600 (kW/m ²) ^{4/3} .s	-	120	87	78

Tableau 7 : Simulation du BLEVE de l'essai BRITISH GAS n°4 à l'aide de différents modèles

* il s'agit de la distance projetée sur le sol

	Essai B.A.M.	Modèle C.C.P.S	Modèle T.N.O	Modèle T.R.C.
Diamètre maximal de la boule de feu (m)	100	100	104	94
Durée de vie de la boule de feu (s)	7,2	7,8	7,9	7,4
Hauteur du centre de la boule de feu par rapport au sol (m)	100	50	104	98
Emittance moyenne de la boule de feu (kW/m ²)	-	350	325	199 à 332
Distance au seuil de 1000 (kW/m ²) ^{4/3} .s	-	136	98	60
Distance au seuil de 600 (kW/m ²) ^{4/3} .s	-	166	152	82

Tableau 8 : Simulation du BLEVE de l'essai B.A.M. à l'aide de différents modèles

Taux de remplissage du réservoir (%)	Masse libérée à la rupture (kg)	Durée de vie de la boule de feu (s)			
		Essais J.I.V.E.	Modèle C.C.P.S.	Modèle T.N.O.	Modèle T.R.C.
20	279	3	2,9	3,7	3,3
41	710	5	4	4,7	4,6
60	1272	6,5	4,9	5,5	5,7
85	1708	7	5,4	5,9	6

Tableau 9a : Durée de vie de la boule de feu calculée par les différents modèles pour les quatre essais du projet J.I.V.E.

Taux de remplissage du réservoir (%)	Masse libérée à la rupture (kg)	Diamètre de la boule de feu (m)			
		Essais J.I.V.E.	Modèle C.C.P.S.	Modèle T.N.O.	Modèle T.R.C.
20	279	40	38	40	31
41	710	54	52	55	51
60	1272	63	63	66	64
85	1708	77	70	73	75

Tableau 9b : Diamètre maximal de la boule de feu calculé par les différents modèles pour les quatre essais du projet J.I.V.E.

Taux de remplissage du réservoir (%)	Masse libérée à la rupture (kg)	Emission moyenne de la boule de feu (kW/m ²)			
		Essais J.I.V.E.	Modèle C.C.P.S.	Modèle T.N.O.	Modèle T.R.C.
20	279	415	350	223	262 - 157
41	710	>195	350	262	368 - 221
60	1272	320	350	265	390 - 234
85	1708	360	350	295	433 - 261

Tableau 9c : Emission de la boule de feu calculée par les différents modèles pour les quatre essais du projet J.I.V.E.

Quelques conclusions générales peuvent être tirées de ces simulations :

- Les diamètres et les durées de vie des boules de feu calculés respectivement par tous les modèles envisagés sont comparables en ordre de grandeur, et en bon accord avec les résultats d'essai. On a pu vérifier (annexe) que le modèle T.R.C. décrit également de manière satisfaisante la croissance et l'élévation de la boule de feu de l'essai du B.A.M.
- La hauteur du centre de la boule de feu est fixe pour les modèles du C.C.P.S. et du T.N.O. (le modèle T.R.C. décrit son évolution). L'hypothèse du C.C.P.S. qui consiste à considérer une boule de feu stationnaire au sol,

présente un caractère majorant pour l'évaluation des distances d'effets thermiques. A contrario, l'hypothèse d'une boule de feu stationnaire à une hauteur de deux fois le rayon (modèle T.N.O.) n'est pas toujours conservatrice (tableau 7 : la charge thermique tout près de la boule de feu est très faible).

- La modélisation du C.C.P.S. conduit à calculer les distances d'effets thermiques les plus importantes ce qui ne doit pas surprendre dans la mesure où, pour la modélisation du C.C.P.S., l'émittance de la boule de feu a été prise égale à 350 kW/m^2 pendant toute la durée de vie de la boule de feu. Or, si l'on observe effectivement des émittances de cet ordre et même supérieures lors des expérimentations, l'émittance de la boule de feu, après avoir atteint une valeur maximale, décroît au fur et à mesure que le produit est consommé.
- À propos de l'émittance de la boule de feu, la valeur constante et égale à 350 kW/m^2 du CCPS est une assez bonne estimation mais, prise constante pendant toute la durée du phénomène, conduit à de grandes distances d'effet. Le modèle T.R.C. prévoit une évolution au cours du temps comparable aux données expérimentales (notamment par la simulation de l'essai du B.A.M., qui montrent une décroissance du flux thermique rayonné en accord avec les données expérimentales). Cela conduit à des distances d'effet plus réduites.

L'application de ces modèles C.C.P.S., T.N.O. et T.R.C. à différents accidents passés (Mexico, Kamena Vourla, Los Alfaques) a été tentée (annexe), mais les données sont très parcellaires et imprécises. Les dimensions et la durée de vie de la boule de feu paraissent en bon accord avec les résultats des simulations par l'ensemble des modèles. La comparaison des charges thermiques est nettement plus délicate tant il est difficile de relier des dommages observés à des seuils d'exposition au flux thermique mais le modèle du C.C.P.S. semble souvent conduire à des charges thermiques surévaluées tandis que les modèles du T.N.O. et du T.R.C. semble donner des résultats plus proches de la réalité.

Dans ce contexte, l'INERIS met en œuvre la méthode TRC pour la détermination des effets thermiques car étant le plus proche de la phénoménologie d'un BLEVE.

5 CONCLUSION

Ce rapport est la seconde édition consacrée au BLEVE (acronyme de Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion).

On rappelle que le BLEVE est une vaporisation violente à caractère explosif consécutive à la rupture d'un réservoir contenant un liquide à une température significativement supérieure à sa température normale d'ébullition à la pression atmosphérique. Le processus de libération d'énergie, responsable de l'explosion, est un changement d'état à caractère explosif, et non une réaction de combustion comme c'est le cas des explosions de nuages de gaz. Ainsi, il n'est pas nécessaire que le produit concerné soit inflammable pour qu'un BLEVE soit possible.

Dans ce document sont décrits les phénomènes qui se produisent lors d'un BLEVE et un état de l'art des modèles de prédiction des effets thermiques, des effets de pression et de projection de fragments est présenté. En revanche, les effets liés au caractère éventuellement toxique des produits ne sont pas abordés.

Par rapport à la première édition (2002), les points suivants sont nouveaux :

- un point de vue légèrement différent sur la typologie des BLEVEs est présenté qui suggère notamment que la distinction entre les BLEVEs chauds et froids n'a pas réellement de substance.
- Une analyse un peu précise des causes est proposée. L'analyse des accidents passés révèle que la grande majorité des BLEVEs résultent...d'un BLEVE antérieur par effet domino induit en particulier par l'impact de fragments. Les causes du premier BLEVE sont pour l'essentiel des incendies (3/4), puis des pressurisations excessives (1/10) et enfin des défaillances mécaniques.
- Une analyse des modèles de prédiction des effets de pression et de projection de fragments :
 1. Pour la prédiction des effets de pression : aucun modèle n'est idéal car les tendances expérimentales semblent peu respectées. Cependant le modèle de Prugh, proche dans sa philosophie de la méthode de Brode pour les éclatements de capacités, semble fournir les meilleures estimations. Remarquons que les effets de la vaporisation du liquide et de la détente du ciel gazeux sont superposés. Ce positionnement est différent de celui parfois admis qui consiste à ne retenir que l'expansion du ciel gazeux dans la manifestation des effets de pression externes et cela sans justification physique solide ;
 2. Pour la prédiction des distances de projection des fragments de l'enveloppe : il n'existe que deux modèles explicitement adaptés au BLEVE mais aucun ne paraît particulièrement performant ;
 3. Pour la prédiction des caractéristiques et des effets de la « boule de feu » (si le fluide est combustible) : le modèle du TRC reste le plus complet et présente de bonnes performances mais le modèle du TNO est également intéressant et plus simple à utiliser. Il ne faut cependant pas ignorer la part d'empirisme de ces outils.

Les modèles employés par l'INERIS sont indiqués dans le présent rapport mais des efforts de recherche fondamentale devraient être consacrés aux phénomènes de vaporisation brutale en général et de BLEVE en particulier.

6 RÉFÉRENCES

Domaine réglementaire

Circulaire du 10 mai 2010 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 – Partie 1.1.4 *Fiche 4 : les phénomènes dangereux associés aux gaz inflammables liquéfiés dans les établissements de stockage hors raffineries et pétrochimie – le BLEVE*

Publications et rapports

Abbasi, 2007, *The boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE): Mechanism, consequence assessment, management*, Journal of Hazardous Materials 141, pp.489-519

Baker, Cox, Westine, Kulesz, Strehlow, 1983, *Explosion hazards and evaluation*, Elsevier scientific publishing company

Baum, 1998, *Rocket missiles generated by failure of a high pressure liquid storage vessel*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 11, pp.11-24

Baum, 1999, *Failure of a horizontal pressure vessel containing a high temperature liquid: the velocity of end-cap and rocket missiles*, Elsevier, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 12, pp.137-145

Birk, 1995, *Scale effects with fire exposure of pressure liquefied gas tanks*, J. Loss Prev. Process Ind. Vol 8, n°5, pp 275-290.

Birk, Ye, Maillette, Cunningham, 1993, *Hot and cold BLEVE: observation and discussion of two different kinds of BLEVE*, AIChE Symposium, Series Heat Transfer, Atlanta 1993

Birk, Cunningham, 1994, *The Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion*, J. Loss Prev. Process Ind., Volume7, Number 6, pp 474-480.

Birk, Cunningham, Kielec, Maillette, Miller, Ye, Ostic, 1997, *First Tests of Propane Tanks to study BLEVEs and other Thermal Ruptures: Detailed Analysis of Medium Scale Test Results*, Report for Transport Canada, Dpt of Mechanical Engineering, Queen's University, Kingston, Ontario

Birk, Davison, Cunningham, 2007, *Blast overpressures from medium scale BLEVE tests*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 20, pp.194-206

Bonnet, 2003, *BLEVE d'un wagon de GPL à Perpignan le 22 juillet 1970*, DRIRE Languedoc-Roussillon

C.C.P.S., Center of Chemical Process Safety, 1994, *Guidelines for evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVE*

Crawley, 1982, *The effect of ignition of a major fuel spillage*, The Assessment of Major Hazards, Institution of Chemical Engineers, Rugby

Hauptmanns, 2001, *a procedure for analyzing the flight of missiles from explosions of cylindrical vessels*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 14, pp.385-402

Heudier, 2004, *Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs – Les éclatements de réservoirs : Phénoménologie et modélisation des effets*, <http://primarisk.ineris.fr>

Heudier, Richomme, 2012, *Retour d'expérience sur l'explosion survenue le 28 juillet 2010 à Port-la-Nouvelle (Aude)*, DRA-12-116151-01480B, Rapport INERIS pour le Ministère

Johnson, Pritchard, 1990, *Large-scale experimental study of boiling liquid expanding vapor explosions (BLEVE)*, Commission of the European Communities Report EV4T.0014.UK (H)

Kyoshik Park, M. Sam Mannan, Young-Do Jo, Ji-Yoon Kim, Nir Keren, Yanjun Wang, 2005, *Incident analysis of Bucheon LPG filling station pool fire and BLEVE*, Journal of Hazardous Materials A317 (2006) 62-67

Lautkaski, 2009, *Evaluation of BELVE risks of tank wagons carrying flammable liquids*, J. Loss Prev. in the Process Industries, vol. 22, pp. 117-123

Lees, 1994, *A Model for Fatal Injury from Burns*, TranslChemE, Vol 72, Part B, pp127-134

Lees, 1996, *Loss Prevention in the Process Industries*, Butterworth-Heinemann, Oxford.

Leprette, 2002, *Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels : Le BLEVE – Phénoménologie et modélisation des effets thermiques*, <http://primarisk.ineris.fr>

Leprette, 2005, *Modélisation des effets de surpression du BLEVE*, Courrier du 28 juin 2005 pour le Ministère de l'Écologie et du Développement Durable – Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques – Service de l'Environnement Industriel

Leprette, Reimeringer, 2007, *Retour d'expérience sur les explosions survenues le 7 mai 2007 dans la zone industrielle de Dagneux (Ain)*, rapport INERIS DRA-2007-90293

Ludwig, Balke, 1999, *Untersuchung der Versagensgrenzen eines mit Flüssiggas gefüllten Eisenbahnkesselwagens bei Unterfeuerung*, Rapport B.A.M. 3215, Berlin, Septembre 1999

Ludwig, Heller, 1999, *Brandversuch mit einem Propankesselwagen*, Rapport d'essai B.A.M. III.2/9907, Berlin, Avril 1999

Melhem, Croce, Abraham, 1993, *Data summary of the National Fire Protection Association's BLEVE tests*, Process Safety Progress, vol. 12, n° 2, April 1993.

Nguyen, 2009, *Fiabilité des installations industrielles sous l'impact de fragments de structures - effet domino*, thèse de doctorat, université Paris-Est

Pietersen, 1984, *Analysis of the LPG disaster in Mexico City*, T.N.O. report

Planas-Cuchi, Salla, Casal, 2004, *Calculating overpressure from BLEVE explosions*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 17, pp.431-436

Prod'homme, 2016, *Retour d'expérience sur les explosions survenues le 3 avril 2016 dans la zone industrielle de Bassens (Gironde)*, DRA-16-156510-04973A, rapport INERIS pour le Ministère et la DREAL

Proust, 2000, *Prévoir les effets des explosions de poussières sur l'environnement, EFFEX, un outil de simulation*, <http://primarisk.ineris.fr>

Prugh (1991), Quantify BLEVE hazards, Chem. Eng. Prog., vol. 87, pp.66-72

Reid, 1976, *Superheated liquids*, Amer. Scientist, 64: 146-156

Reid, 1979, *Possible mechanism for pressurised gas-liquid tank explosion or BLEVE's*, Science 203(3)

Reid, 1980, *Some theories on boiling liquid expanding vapor explosions*, Fire, Mars 1980, pp. 525-526

Seigneuret (2009), "Etude thermodynamique du BLEVE", ENSGTI, Pau, micro thèse de 3^{ème} année.

Shield, 1993, *A model to Predict Radiant Heat and Blast Hazards from LPG BLEVE*, AIChE Symposium Series Heat Transfer, Atlanta 1993

Shield, 1995a *Fireball and explosion modelling, Safe handling of pressure liquefied gases*, Londres, Nov. 1995

Shield, 1995b, *The modeling of BLEVE fireball transients, Major Hazards onshore and offshore II*, IChemE symp. Series 139, 25/10/95

Stawczyk, 2003, *experimental evaluation og LPG tank explosion hazards*, Journal of Hazardous Material B96 pp.189-200

Terry, Roberts, 1995, *Fire protection of tanks, Safe handling of pressure liquefied gases*, Londres, nov 1995.

T.N.O., 2005, *Methods For The Calculation Of The Physical Effects Of The Escape Of Dangerous Material (Yellow Book)*, Report of the committee for the prevention of Disasters

Venart, Rutledge, Sumathipala, Sollows, 1993, *An Anatomy of a Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion*, Process Safety Progress, Volume 12, Number 2, April 1993, pp 67-71.

Van den Berg, Lannoy, 1993, *Methods for vapor cloud explosion blast modeling*, Journal of Hazardous Material, pp.151-171

Van den Berg, van er Voort, Weerheim, Versloot, *Expansion-controlled evaporation: a safe approach to BLEVE blast*, J. Loss Prev. Process Industries, Vol. 17, pp. 397-405

Yu, Venart, 1996, *The boiling liquid collapsed bubble explosion (BLCBE): A preliminary model*, Journal of Hazardous Materials, 46, p. 197-213.

7 LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation précise	Nb de pages
A	Résultats de recherche d'accidents sur www.aria.ecologie.gouv.fr	35
B	Synthèse relative à la projection des fragments lors d'un BLEVE	6
C	Présentation du modèle TRC	15
D	Confrontation des données d'essais et du retour d'expérience par rapport aux stratégies de modélisation	36

ANNEXE A :

Résultats de recherche d'accidents sur www.aria.ecologie.gouv.fr

H49.41 - Transports routiers de fret

Vers 6h30, un dimanche, un feu est détecté dans une entreprise de transport de matières dangereuses classée SEVESO seuil bas. Le départ de feu se situe au niveau d'un camion-citerne en stationnement. D'une capacité de 19t, il contient 1,5 t de gaz de pétrole liquéfié (GPL). L'incendie se propage à plusieurs autres camions-citernes. Les pompiers, prévenus par des tiers, arrivent sur place à 7 h. L'exploitant déclenche son Plan d'Opération Interne. Les secours établissent un périmètre de sécurité. Ils arrosent le sinistre.

A 7h15, la citerne de GPL explose en BLEVE. A 7h30, une seconde citerne, contenant 2,5t de GPL, explose en BLEVE également. 4 pompiers, qui se trouvaient à 40 m, sont légèrement blessés par la déflagration. 2 autres citernes vides éclatent dans les instants qui suivent. Les secours se replient durant 20 minutes puis reprennent l'arrosage de l'épicentre du sinistre. Ils déploient 10 lances, dont 4 canons. Ils déclarent l'incendie maîtrisé à 8h20 puis éteint vers 10 h. Des opérations de dégazage, dépotage et inertage sont réalisées sur 4 citernes pleines, dont 3 sont fuyardes et une contient du propane. Les eaux d'extinction sont contenues dans la rétention du site.

Conséquences matérielles lourdes :

La zone des explosions est dévastée. L'accident a engendré des effets thermiques très intenses dans un diamètre de 40 m (et jusqu'à 60 m), et mécaniques avec des effets de pression jusqu'à 400 m (et projections de fragments jusqu'à 1,5 km). La 2ème citerne ayant explosée en BLEVE a été projetée à 150 m. Une des 2 citernes vides ayant éclaté a été projetée à 50 m. Des fragments de citernes, dont certains pèsent plusieurs tonnes, sont projetés à plusieurs centaines de mètres. Les locaux administratifs de l'entreprise, situés à 200 m ont subi les effets de la surpression : bris de vitre et équipements tombés au sol. Une vingtaine de camions est détruite.

Les conséquences du sinistre ont dépassé les limites du site. Un bâtiment d'une société de travaux publics, distant de quelques dizaines de mètres du départ de feu, a été transpercé par des éléments métalliques. Le souffle des explosions l'a également est lourdement endommagé. Cette entreprise suspend son activité : 6 personnes sont au chômage technique. Au total, 5 sociétés voisines et 9 maisons individuelles sont sinistrées.

Suites de l'accident :

Le préfet prend un arrêté d'urgence afin d'encadrer la sécurisation du site. Il demande notamment une analyse des causes de l'accident. Selon les premiers éléments d'investigations de l'exploitant, plusieurs départs de feu auraient eu lieu, sans pouvoir pour le moment en expliquer l'origine. Les véhicules impliqués étaient à l'arrêt depuis plusieurs jours ce qui écarte l'hypothèse d'une surchauffe des parties roulantes.

A la suite du sinistre, l'exploitant prend les mesures suivantes :

- prévention et détection de l'intrusion : la hauteur de la protection du site sera portée à 2m20 et un système de détection d'intrusion lui sera associé. La vidéo-surveillance ainsi que l'éclairage sont renforcés ;
- détection incendie : la mise en place de dispositif de surveillance de prise de feu suite à échauffement des parties roulantes sera systématisée ;

- limitation de la propagation : l'exploitant modifie l'organisation de la zone de stationnement afin d'espacer les camions TMD les uns des autres ;
- réduction des potentiels de danger : interdiction de stationnement des citernes TMD pleines et limitation de la durée de stationnement des citernes TMD partiellement chargées.

N°46445 - 06/04/2015 - CHINE - 00 - ZHANGZHOU

C20.14 - Fabrication d'autres produits chimiques organiques de base

Un BLEVE d'un bac de pétrole brut se produit vers 19 h dans une usine de pétrochimie produisant du xylène (C₈H₁₀, inflammable et nocif). L'explosion est ressentie à 50 km, des vitres sont brisées à 1 km du site. Le feu qui s'ensuit se propage à 3 bacs de pétrole brut. La fumée est visible à 20 km. Plus de 800 pompiers et 170 engins interviennent et 30 000 riverains sont évacués. La production de plusieurs fermes piscicoles proches est détruite. Le feu reprend 48 h plus tard sur 2 réservoirs de pétrole. Un des bacs contenant 1 500 t d'hydrocarbure est à son tour victime d'un BLEVE. Selon les experts, la reprise de l'incendie est due à la perte d'efficacité de la mousse recouvrant les bacs accidentés sous l'effet de la chaleur et des rafales de vent qui la désagrègent. Le bilan est de 19 blessés. Au moment de l'accident, le site était en maintenance. L'enquête des autorités pointe le manque de sécurité sur le site et un encadrement insuffisant. Une fuite de pétrole s'étant enflammée dans une pomperie serait à l'origine du sinistre. L'usine avait démarré il y a 3 ans. L'explosion d'une tuyauterie d'hydrogène lors d'un test s'était produite quelques jours avant et avait endommagé plusieurs maisons riveraines.

N°39994 - 13/03/2011 - FRANCE - 51 - REIMS

Dans un quartier d'habitation, 2 personnes allument vers 16h15 un feu sur le toit d'un immeuble en construction pour effacer les traces d'un vol de cuivre. Les flammes se propagent à du matériel stocké pour des travaux d'étanchéité : rouleaux de bitumes, plaques de mousse de polyuréthane et 10 bouteilles de 26 kg de propane. Une épaisse fumée noire est émise. Cinq explosions (BLEVE) surviennent dont l'une à l'arrivée des secours, projetant des débris à plus de 150 m. Une passante et 3 pompiers légèrement blessés sont conduits à l'hôpital. Un périmètre de sécurité de 250 m est mis en place et les riverains sont confinés chez eux. L'incendie est éteint vers 18 h. Des experts effectuent un diagnostic des dommages éventuels à la structure en béton du bâtiment. Selon la presse, la police aurait arrêté 2 suspects qui auraient reconnu les faits.

N°40256 - 11/03/2011 - JAPON - 00 - CHIBA

C19.20 - Raffinage du pétrole

Un séisme majeur (Mw = 9) touche l'île de Honshu à 14h46. Une fuite sur une canalisation portuaire de GPL est détectée à 15h35 dans la raffinerie d'un grand complexe pétrochimique de la baie de Tokyo. La flaque de gaz se répand à 15h48 sur le parc adjacent de 17 sphères de butane / butylène et s'enflamme sur une source d'ignition inconnue. L'incendie se développe rapidement, entraînant la chute de la plupart des sphères dont les pieds se rompent et 5 BLEVE (boiling liquid expanding vapor explosion) en cascade avec une boule de feu de 600 m de diamètre pour le principal. Le sinistre étant incontrôlable en raison des flux thermiques

considérables, les pompiers de la raffinerie, aidés des secours publics arrivés à 16h04, protègent les installations proches : bacs, vapocraqueur.... Des petits départs de feu sur les vapocraqueurs de polyéthylène et polypropylène les plus proches sont maîtrisés dans la nuit, mais l'incendie perdurera 10 jours. Un blessé grave et 5 légers sont à déplorer parmi les employés. En raison des dommages provoqués les semaines suivantes sur les unités de raffinage par le séisme et ses nombreuses répliques, dont 63 de magnitude > 6, la raffinerie ne reprend ses activités hors stockage d'hydrocarbures que 9 mois plus tard. Le parc de sphères est reconstruit et mis en service 2 ans après. Les pertes d'exploitation s'élèvent ainsi à plusieurs dizaines de millions d'euros pour un coût total des sinistres évalué à 100 millions d'euros (2011). Une autre raffinerie est aussi endommagée au nord-est du Japon (ARIA 40258). La fuite initiale de GPL par écrasement d'une canalisation, résulte de l'effondrement d'une sphère en surplomb remplie d'eau pour une épreuve hydraulique après la 1ère réplique du séisme principal. La secousse principale (accélération de 0,1 m/s²) a fragilisé la structure porteuse en fissurant les croisillons, puis a conduit à la rupture des pieds de soutènement lors de la 1ère réplique de magnitude 7,2 (accélération de 0,99 m/s²) à 15h15. La conception adaptée de la structure au risque sismique pour une charge en gaz ne prenait pas en compte la surcharge due au remplissage en eau du réservoir. De surcroît, la mise en sécurité automatique du circuit de transport de gaz déclenchée par les sismomètres était inopérante sur cette partie du réseau, la vanne de coupure automatique étant shuntée en position ouverte à la suite de problèmes antérieurs de commande pneumatique. La procédure temporaire de fermeture manuelle de cette vanne dans l'attente de la réparation n'a pu être mise en oeuvre en raison d'une flaque importante de GPL. L'exploitant envisage plusieurs mesures : réduction de la durée de présence de l'eau dans les sphères en épreuves hydrauliques, celle-ci ayant été jugée anormalement longue lors de l'accident, surcharge en eau de la capacité prise en compte lors de la conception des structures des nouvelles sphères, isolement et vidange systématiques des réseaux de gaz proches des sphères en épreuve hydraulique, accentuation de la flexibilité des nouveaux réseaux de transport de gaz sur site pour amortir les déplacements multidirectionnels importants lors des séismes majeurs.

N°38714 - 27/07/2010 - FRANCE - 11 - PORT-LA-NOUVELLE

H49.41 - Transports routiers de fret

Un feu se déclare vers 23h40 au niveau du pare choc avant d'un camion-citerne de propane stationné près de l'atelier de réparation des véhicules d'une entreprise de transport de bouteilles de gaz et de négoce vrac d'hydrocarbures liquides et liquéfiés. L'établissement, qui emploie 200 salariés, est soumis à déclaration au titre de

la législation "installations classées" pour un stockage de bouteilles de GIL de moins de 50 t. Un rondier de la société de gardiennage de la zone industrielle alerte les secours. Un BLEVE se produit à 0h17 sur le véhicule-citerne qui contient 4 t de propane (64 % de sa capacité). Aucun blessé grave n'est à déplorer mais 12 pompiers, victimes de l'effet de souffle, souffrant de céphalées et / ou de troubles auditifs sont recensés mais non-hospitalisés ; alertés par un sifflement au niveau du poids lourd, ils s'étaient mis à l'abri avant l'explosion. Les 90 pompiers et 36 véhicules mobilisés maîtrisent le sinistre à l'eau et à la mousse vers 2 h, à partir de 2 poteaux incendie. L'incendie est éteint à 4h30 ; 4 camions-citernes endommagés sont mis en sécurité dans la journée (vidange du GPL pour l'un, brûlage du gaz à la

torche pour les 3 autres). Un chauffeur de l'entreprise légèrement blessé à la main par le bris du pare-brise du camion qu'il évacuait sera soigné sur place. L'intervention des secours s'achève à 22 h. Sur le site, outre le camion à l'origine du sinistre qui a été détruit, les effets du BLEVE ont provoqué l'incendie de l'atelier de réparation (détruit) et d'un atelier d'entretien (gravement endommagé) tous les deux en bardages métalliques, ainsi que la destruction de 2 camions-citernes d'hydrocarbures liquides et des cabines de 4 camions-citernes de gaz (3 vides mais non-dégazés et un rempli à 80 %). L'effet de surpression a endommagé le bâtiment administratif (murs de moellons déplacés), provoqué des bris de vitres sur des voitures et sur 48 véhicules routiers, et projeté, parfois à l'extérieur du site, des bardages de bâtiments. A l'extérieur du site, selon un recensement de la mairie, 105 particuliers et une vingtaine de commerçants ont subi des bris de vitres ou vitrines ; l'effet de souffle a également endommagé des silos (zones de décharge d'explosion en galerie supérieure et évent centrale d'aspiration soufflés, une porte d'isolation entre étages de la tour bloquée) et des bardages de hangars. Le fond du réservoir côté cabine et le trou d'homme du camion qui a explosé, ont été projetés à l'extérieur du site à respectivement 30 et 160 m de l'emplacement du BLEVE. Deux explosions secondaires se sont aussi produites sur des bouteilles de gaz présentes dans l'atelier de réparation durant l'incendie. Quatre départs de feux de broussailles sont également signalés à l'extérieur de l'établissement. La préfecture publie un communiqué de presse. Des enquêtes judiciaire et administrative sont effectuées pour déterminer les causes et circonstances de l'accident.

N°36503 - 15/07/2009 - FRANCE - 49 - VERRIERES-EN-ANJOU

E38.2 - Traitement et élimination des déchets

Un feu se déclare vers 2h30 sur un stockage de 1 000 m² sous auvent dans une usine de recyclage de déchets d'équipements électriques et électroniques (D3E). Le feu aurait pris au niveau d'un important stockage de sacs contenant de la poudre de polyuréthane provenant de la destruction des isolants dans des parois des réfrigérateurs et congélateurs (autocombustion de la poudre, favorisée par ses conditions de stockage et peut-être souillée par de l'huile ou de la graisse du process industriel). L'incendie se propage à une station de production d'azote, un stockage mobile d'une vingtaine de bouteilles de gaz, un stockage de composants en cuivre ainsi qu'à un stockage sur palettes de réfrigérateurs et congélateurs fonctionnant avec de l'ammoniac et préparés pour être expédiés vers d'autres sites de traitement. Des explosions surviennent (BLEVE des bouteilles de gaz). Une centaine de pompiers protège une cuve d'azote et maîtrise l'incendie vers 6h20 avec 8 lances à débit variable. Un élu et l'inspection des installations classées se rendent sur place. Les secours éteignent les foyers résiduels vers 12 h et établissent un périmètre de sécurité. Une partie de la chaîne de récupération de matériaux est endommagée à l'intérieur du bâtiment et 15 employés sur 120 sont en chômage technique.

N° 35664 - 03/12/2008 - FRANCE - 02 - LONGPONT

000.00 - Particuliers

Une explosion de propane suivie d'un incendie se produit vers 15 h dans la villa d'un particulier à la suite d'une fuite sur le réservoir de GPL de 3 m³ alimentant

l'habitation. La rupture de l'un des accessoires (soupape de sécurité) de la cuve, après la chute d'un arbre sur la capacité durant des travaux d'élagage dans le jardin de la villa, est à l'origine de la fuite de propane ; le GPL se serait ensuite écoulé dans le garage de la maison avant d'exploser. Le propriétaire gravement brûlé et son épouse asphyxiée par le gaz sont conduits à l'hôpital ainsi que les 3 intervenants (2 asphyxiés et un blessé à une jambe). Un périmètre de sécurité de 200 m est mis en place et les pompiers mettent en œuvre des lances à débit variable pour maîtriser l'incendie de la maison et refroidir la cuve de GPL sur laquelle subsiste une fuite enflammée. Redoutant un BLEVE du réservoir, les secours en accord avec un technicien du fournisseur de gaz augmentent le périmètre de sécurité à 400 m et évacuent 15 occupants de 10 habitations voisines dans une salle polyvalente de la commune. La fuite enflammée est maîtrisée vers 23 h et la cuve de propane est inertée à l'eau. L'intervention des secours s'achève vers minuit. Le maire de la commune prend un arrêté de péril pour l'habitation gravement endommagée et un balisage de sécurité est mis en place.

N° 35377 - 23/10/2008 - FRANCE - 76 - TANCARVILLE

H49.41 - Transports routiers de fret

Vers 16 h, le train arrière d'un camion-citerne transportant 19 t de propane liquéfié prend feu ; le conducteur se gare sur le pont de Tancarville. Les employés de la société exploitant le pont interviennent avec 2 extincteurs mais le feu est trop important. Les gendarmes interrompent la circulation dans les 2 sens et demandent la coupure du trafic fluvial et aérien. Les pompiers éteignent l'incendie en 15 min avec 2 lances et refroidissent la citerne ; le risque de BLEVE est écarté. Vers 19 h, les roues de l'essieu sont remplacées et un camion de dépannage remorque la citerne vers une société de transport où la citerne sera dépotée le lendemain. La circulation est rétablie vers 20h30. Une pièce d'amortisseur se serait cassée, provoquant un échauffement de l'essieu puis le départ de feu.

N° 35014 - 10/08/2008 - CANADA - 00 - TORONTO

G46.71 - Commerce de gros de combustibles et de produits annexes

Un incendie et des explosions, dont 1 BLEVE, se produisent durant la nuit dans un dépôt de propane constitué notamment de réservoirs de 4 000 gallons (environ 15 m³) ; 1 pompier victime d'une crise cardiaque et 1 employé décèdent, des riverains sont légèrement blessés. Un périmètre de sécurité de 1,6 km est mis en place et l'alimentation en gaz naturel et électricité du quartier est interrompue ; 12 000 personnes sont évacuées pendant une quinzaine d'heures, l'autoroute 401 (la plus fréquentée du pays) est fermée à la circulation et le survol du site est interdit. Les 200 pompiers mobilisés maîtrisent le sinistre dans la soirée ; dans la matinée 2 camions citernes étaient encore en feu faisant redouter de nouvelles explosions. Les dommages matériels sont importants, des édifices voisins ont notamment été endommagés (vitres, fenêtres...). Des résidants et commerçants intentent des actions en justice contre l'exploitant et les autorités locales. Une enquête est

diligentée pour déterminer l'origine du sinistre. Selon un organisme de contrôle canadien, il y aurait eu avant l'accident un transfert de propane entre 2 camions, pratique interdite au Canada.

N° 33086 - 10/06/2007 - FRANCE - 67 - BOERSCH

000.00 - Particuliers

La bouteille de 13 kg gaz d'un appareil de cuisson explose vers 20h37 lors d'une fête privée en plein air. Les débris projetés dans les airs retombent sur les invités. Une personne victime d'un arrêt cardiaque ne pourra pas être ranimée, une seconde est grièvement blessées (main arrachée) et 9 blessés légers sont également dénombrés. Les pompiers prennent en charge les 25 personnes présentes qui sont regroupées dans une salle des fêtes, certaines d'entre elles seront transportées à l'hôpital. L'origine et les circonstances de l'accident ne sont pas connues : fuite de gaz, inflammation, échauffement et BLEVE ou "explosion pneumatique" à la suite d'une défaillance de l'équipement sous-pression (ESP)... La gendarmerie effectue une enquête.

N° 33085 - 07/05/2007 - FRANCE - 01 - DAGNEUX

H49.41 - Transports routiers de fret

A 20h24, un passant observe un feu de cabine affectant l'un des trois camions citernes de transport de gaz de pétrole liquéfié (GPL) stationnés dans une entreprise d'entretien d'espaces verts. Le feu se développe rapidement et vers 21h15, une 1ère déflagration se produit suivie d'une ou plusieurs autres ; 2 des 3 citernes explosent (BLEVE) et la 3ème est projetée sur le toit d'une usine voisine. Les explosions et les incendies qui suivent provoquent d'importants dégâts matériels dans un rayon de 900 m (vitres brisées, toitures arrachées...) dont la destruction de 4 entrepôts de 1 000 m² chacun. Les gendarmes mettent en place un périmètre de sécurité au niveau de la zone industrielle, une autoroute et la ligne ferroviaire Lyon-Ambérieux sont fermées plusieurs heures. Un important nuage de fumée s'élève verticalement mais aucune évacuation de la population riveraine n'est requise. Cinq entreprises proches sont détruites ou fortement endommagées et au total une vingtaine d'établissements de la zone est atteinte à des degrés divers entraînant la mise en chômage technique de 35 personnes. La chute d'une pièce métallique de 100 kg défonce la toiture d'une maison d'habitation située à 700 m. Trois pompiers et deux gendarmes sont légèrement blessés. Une enquête judiciaire est effectuée pour déterminer l'origine du sinistre, la piste criminelle n'étant pas écartée. Des 3 citernes impliquées, l'une contenait 2,5 t de propane et une autre quelques centaines de kg. La dernière était vide mais non dégazée. Un tiers expert est mandaté pour recueillir des données techniques sur l'accident. Les premiers résultats font état de distances d'effets de 50 m par rayonnement thermique et jusqu'à 400 m (bris de vitres) par surpression. Des morceaux de citerne, projetés jusqu'à 900 m, ont détruit une entreprise située à 100 m des véhicules et incendié une haie à 250 m.

N° 32593 - 05/10/2006 - ETATS-UNIS - 00 - APEX

E38.22 - Traitement et élimination des déchets dangereux

Un incendie et plusieurs explosions se produisent dans une usine de traitement de déchets industriels spéciaux (DIS). Gênés par des odeurs, des riverains alertent les secours vers 21h30 évoquant une possible fuite de chlore. Ceux-ci dépêchés sur place pour localiser l'origine du nuage gazeux émis, déterminent que les rejets atmosphériques résultent d'un départ de feu dans l'usine de traitement de DIS. L'état d'urgence est déclaré, un important périmètre de sécurité est mis en place, plus de 300 pompiers sont mobilisés. Du fait de la dangerosité des produits stockés (peintures, solvants, pesticides, herbicides...) et du développement rapide du sinistre, la population sous le vent de l'usine est évacuée, soit 17 000 personnes sur une population totale de 32 000. Les écoles et entreprises implantées dans la zone d'intervention resteront fermées 24 h. Les personnes évacuées ne seront autorisées à regagner leur habitation qu'à partir de 8 h (soit près de 36 h après le début de la crise), le temps que des mesures de pollutions soient effectuées sur l'eau, l'air et les sols et que tout risque sanitaire ait été écarté. Face à l'inquiétude des riverains, de nouvelles mesures (toutes négatives) seront néanmoins réalisées dans les jours suivants, hors et dans des habitations. L'exploitant prendra en charge le coût de ces analyses (150 000 \$), ainsi que celui des secours (200 000 \$) et de l'évacuation. Plus d'une centaine de personnes seront hospitalisées (inférieur à 24 h) victimes de troubles respiratoires, dont 13 policiers intervenus en premier sur le site et 106 résidents d'une maison de retraite proche. Pour ne pas aggraver les conséquences environnementales de l'accident et ne pas se mettre inutilement en danger, les secours décident de ne pas attaquer directement le foyer et laissent brûler ; les flammes atteignent par endroits 45 m de haut, des explosions avec projections de boules de feu (BLEVE) sont observées. Une 1ère équipe d'intervention pénètre sur le site le lendemain en fin de matinée. Le bâtiment de stockage de structure métallique s'est effondré et 3 feux persistent sous les décombres. Leur extinction demandera plusieurs heures du fait des difficultés d'accessibilité aux foyers. Finalement, le sinistre est éteint peu après minuit. Une enquête est effectuée pour déterminer les causes de l'accident. L'une des hypothèses évoquées concerne le mélange de produits chimiques incompatibles ayant conduit à une réaction incontrôlée avec production de gaz inflammables, le feu s'étant déclaré dans la zone de stockage des produits oxydants. Au titre du retour d'expérience, les recommandations des autorités locales concernent la présence en continu de personnel sur le site, une meilleure connaissance de la nature des produits stockés et l'amélioration des plans de secours. Face à l'hostilité de la population, la reconstruction de l'usine est cependant incertaine.

N° 31730 - 01/04/2006 - FRANCE - 25 - AUDINCOURT

C29.32 - Fabrication d'autres équipements automobiles

A la suite d'un acte de malveillance, un feu se déclare vers 15 h dans un entrepôt de produits finis de 2 000 m² (pièces pour automobiles) d'une usine de fabrication

d'équipements automobiles. L'incendie émet d'épaisses fumées noires et se propage au bâtiment voisin, sans atteindre toutefois les liquides inflammables (solvants) stockés dans un local coupe-feu aménagé à l'intérieur de ce bâtiment en pierre. Le POI est déclenché. Le flux thermique provoque l'explosion (vraisemblablement Bleve) de 65 des 191 bouteilles de GPL (13 Kg de charge unitaire) stockées à l'air libre à quelques mètres de l'entrepôt et utilisées pour le fonctionnement des chariots-élévateurs du site. Des éclats de bouteilles sont projetés à l'extérieur de l'établissement et blessent légèrement un passant. Les 75 pompiers mobilisés maîtrisent le sinistre en 3 h avec 8 lances à débit variable ; les foyers résiduels sont éteints avec des lances à mousse. L'entrepôt de produits finis, à structure métallique et la toiture du bâtiment voisin sont détruits. Cet accident n'a pas de conséquence sur l'activité de l'usine, aucun atelier de production n'ayant été impliqué dans l'incendie. Les vannes empêchant l'écoulement des eaux d'extinction vers la rivière LE GLAND, inaccessibles au début de l'intervention des secours, ne seront fermées qu'une heure après le début de l'incendie ; ces eaux ont pu entraîner des résidus solides de combustion des plastiques. Les eaux d'extinction confinées sur le site sont évacuées par une entreprise spécialisée. L'Inspection des installations classées effectue une enquête et constate des non-conformités au regard des prescriptions de l'arrêté d'autorisation applicable à l'entrepôt : absence de détection incendie, de RIA et de détection automatique de fumées avec report d'alarme. Une enquête judiciaire est également diligentée à la suite d'une plainte contre X. Selon la presse écrite des jours suivants, un agent de sécurité du site, employé d'une entreprise sous-traitante de surveillance, aurait été mis en examen pour " dégradations volontaires par le feu de nature à créer un danger pour les personnes ".

N° 30004 - 09/06/2005 - FRANCE - 62 - SAINT-LAURENT-BLANGY

H49.41 - Transports routiers de fret

Un train express régional (TER) percute vers 17h30 un camion chargé de 863 bouteilles pleines de butane ou de propane (6-13-35 kg), entraînant une série d'explosions. La semi-remorque est en panne sur un passage à niveau en zone industrielle ; son conducteur utilise le téléphone relié à l'aiguillage d'Arras. Le conducteur du TER est à 200 m du passage à niveau, quand il aperçoit le camion, actionne le freinage d'urgence, puis va alerter les passagers. Le TER roule entre 30 et 50 km/h lors de la collision et transporte 150 à 200 personnes qui seront évacuées ; plusieurs souffrent de coupures ou de contusions, mais aucun blessé grave n'est à déplorer. Le 1er wagon est entièrement calciné et les explosions se prolongent bien après la collision. L'incendie qui se propage à un bâtiment proche et à plusieurs voitures, sera circonscrit à 18h30. La préfecture demande en fin d'après-midi aux habitants qui résident dans cette zone de rester chez eux et de fermer leurs fenêtres par précaution. Les liaisons ferroviaires sont perturbées. Le 1er BLEVE se serait produit 1 min après l'accident ; 500 bouteilles ont explosé ou ont été endommagées.

N° 29389 - 26/01/2005 - ITALIE - 00 - GÈNES (GENOVA)

G47.30 - Commerce de détail de carburants en magasin spécialisé

Un feu se déclare dans un dépôt de bouteilles de gaz (station-service ?) alors que des employés déchargent un camion de bouteilles de gaz. Les secours, appelés pour éteindre le sinistre, sont surpris par l'explosion (BLEVE?) qui tue le chef des pompiers et blesse une dizaine de personnes.

N° 25956 - 18/11/2003 - FRANCE - 56 - LA ROCHE-BERNARD

H49.3 - Autres transports terrestres de voyageurs

Une semi-remorque réfrigérée se met en travers dans une longue descente, traverse le terre-plein central après avoir écrasé les rails de sécurité et heurte un camion-citerne transportant du gaz butane et propane. Un conducteur de poids lourd roulant derrière le camion alimentaire se précipite avec un extincteur, constate que le feu embrase les cabines emprisonnant les deux chauffeurs morts et entend une vanne de la citerne de gaz fuir. Il court alors empêcher les automobilistes immobilisés derrière lui de s'approcher. Quelques minutes après, la citerne explose (BLEVE). Des témoins des villages voisins entendent une énorme déflagration suivie d'une boule de feu s'élevant dans le ciel. L'accident a occasionné le décès des deux conducteurs et treize blessés parmi les témoins (dont 2 gendarmes et 2 pompiers). Des débris du camion-citerne sont projetés à des dizaines de mètres. Les pare-brises des véhicules proches sont brisés. La RN 165 (2 X 2 voies) est coupée sur les 2 voies. 80 pompiers sont mobilisés et il faudra plus de 2 h aux gendarmes pour dégager la route nationale qui ne sera pas rouverte avant le lendemain à midi sur une seule voie. L'enquête technique permet d'attribuer la cause de l'accident à un épisode d'hypovigilance du conducteur de l'ensemble frigorifique. Aucune anomalie concernant l'application des réglementations relatives au transport de matières dangereuses n'a été constatée. Outre deux propositions en matière de code de la route, l'enquête technique recommande de rechercher des solutions d'amélioration de la tenue au feu des citernes de transport d'hydrocarbures en recourant à des dispositifs de protection externes adaptés (tôle de protection, isolant thermique, ...) et le réexamen de l'opportunité du recours à des soupapes de sécurité.

N° 25887 - 12/11/2003 - FRANCE - 37 - RAZINES

C28.14 - Fabrication d'autres articles de robinetterie

Une explosion suivie d'un feu se produit dans une société spécialisée dans la maintenance de citernes gaz et notamment les vidanges et dégazage sur retour de clientèle. L'entreprise testait un nouvel accessoire sur une citerne suspendue à un portique équipé de pesons. Le réservoir, muni à sa base d'une vanne, était également relié à une torchère, installée à 15 m pour simuler une utilisation du gaz par un particulier. En fin de remplissage, alors que le réservoir contenait 1,4 t de propane, l'ensemble portique/réservoir bascule puis chute. La vanne située sous le réservoir est sectionnée et le produit se répand sur le sol : un nuage se forme puis s'enflamme sur la torchère. La capacité testée, prise dans l'incendie, s'échauffe et Bleve. Une capacité voisine explose à son tour. Une quinzaine d'autres réservoirs ont également été pris dans l'incendie mais n'ont pas explosé, de même que la cuve

tampon, servant à recueillir les vidanges de citernes, et la citerne du camion. Le bilan fait état d'un employé gravement brûlé : il s'agit du chauffeur du camion intervenu pour déclencher le dispositif d'arrêt d'urgence du camion. Les secours établissent 5 lances queues de paon, 1 lance débit variable grande puissance et 1 petite lance pour assurer la protection et le refroidissement des citernes voisines. Le sous-préfet se rend sur place et un périmètre de sécurité de 900 m est mis en place. Quelques habitations sont évacuées et, pour d'autres, les habitants restent confinés. Les dégâts matériels correspondent à la détérioration des 2 citernes fixes, du camion-citerne, des réservoirs et de 2 voitures situées à proximité. Vingt habitations sont privées d'électricité à la suite de la détérioration d'une ligne de 15 000 volts. L'établissement, soumis à déclaration, était en situation irrégulière. La DRIRE constate les faits et propose au Préfet un arrêté de suspension. Une procédure judiciaire est ouverte.

N° 24999 - 05/07/2003 - TURQUIE - 00 - ANKARA

G47.30 - Commerce de détail de carburants en magasin spécialisé

Plusieurs explosions et un très violent incendie ravagent une station-service dans le centre de la ville : le bilan fait état de 3 morts, personnes décédées quelques jours plus tard de leurs blessures, et de 189 blessés dont 4 grièvement touchés. La station-service est située non loin d'une salle de mariage où se trouvaient alors 300 personnes dont certains ont pu évacuer les lieux dès la première explosion. Cependant, la plupart des blessés recensés font partie des invités du mariage. Le bâtiment sera détruit par la suite. 17 véhicules sont également détruits ainsi qu'un immeuble voisin. 100 habitations sont endommagées. Les pompiers maîtrisent l'incendie en 1 h. Selon les premiers éléments, la fuite initiale de GPL se serait produite à la suite de la rupture du flexible utilisé pour le transfert du gaz liquéfié de la citerne (capacité max : 20 à 25 m³, remplie environ à la moitié) vers un réservoir fixe, enterré et de capacité 10 m³ (?), de la station : il semble que les 2 raccords (vanne de vidange et flexible) n'étaient pas compatibles. Le nuage ainsi généré s'est enflammé (étincelle due à un frottement métallique, chute de l'embout du flexible ?) et a explosé (UVCE). Une autre explosion survient puis une 3ème : la plus importante correspond au BLEVE de la citerne du camion qui survient 10 min après le début de l'accident et provoque l'ouverture sur place de la citerne et un violent incendie qui s'étend aux bâtiments voisins. Dès le début, les pompiers interviennent avec des extincteurs à poudre, de l'eau et de la mousse mais leur action ne semble pas avoir été efficace. Les dégâts constatés sembleraient dus essentiellement aux effets thermiques de l'incendie, les effets des ondes de choc consécutives aux explosions restant circonscrits dans des zones proches (bris de vitres sur les bâtiments voisins). Selon les premiers éléments, il semble que le propriétaire (ou le gérant ?) n'était pas sensibilisé aux questions de sécurité : le personnel assurant les transferts n'était pas formé, la société à laquelle appartenait le camion ne faisait pas partie des fournisseurs contractuels, les équipements du camion n'étaient pas conformes, la station n'avait ni dispositifs de sécurité ni instructions.

N° 24261 - 14/03/2003 - ETATS-UNIS - 00 - NEWTON

G46.12 - Intermédiaires du commerce en combustibles, métaux, minéraux et produits chimiques

Vers 17 h, un camion du propane explose (BLEVE?) dans un dépôt de liquides et de gaz inflammables d'une société de distribution locale. Un très important incendie suit, le bâtiment utilisé par la société étant à structure de panneaux de bois. Il était occupé par 12 personnes, toutes ayant pu quitter rapidement les bureaux. D'autres réservoirs de propane étant stockés sur le site, les autorités décident l'évacuation d'une centaine de riverains dans un rayon de 800 m. Le sinistre se prolongera toute la nuit. Le bilan fait finalement état de 13 blessés légers, la plupart ayant été touchée par des éclats, de verre ou d'autres matériaux, générés par l'explosion : 10 personnes dont 3 pompiers sont hospitalisés une journée au moins. Aucun des blessés ne travaillait pour la société. Par ailleurs, des habitations sont endommagées.

N° 23454 - 29/10/2002 - ETATS-UNIS - 00 - BILLINGS

D35.22 - Distribution de combustibles gazeux par conduites

Dans une entreprise, un réservoir d'une capacité de 9 m³ placé sur semi-remorque s'enflamme. Le réservoir se situe à l'intérieur d'un bâtiment. L'accident est spectaculaire : les flammes sont visibles de loin et atteignent une trentaine de m de haut. Craignant un BLEVE ou au moins un impact sur les autres réservoirs présents dans l'enceinte, les secours font évacuer les entreprises voisines et les riverains situés dans un rayon de 500 m environ. Le trafic est interrompu dans un rayon de 800 m pendant une heure et une école dans cette zone est évacuée par précaution. Le réservoir contient un peu plus de 2 m³ de propane au moment de l'accident. Les pompiers choisissent de le refroidir et de laisser brûler le gaz qui s'échappe de manière à vider peu à peu la capacité et éviter l'explosion. Le sinistre est maîtrisé après 1h30 de lutte. Les secours se positionnent aussi loin que possible du réservoir et utilisent des lances sur pied : ils sont toutefois limités par les ressources en eau du site. Environ 110 m³ d'eau ont été utilisés pour maîtriser le sinistre. L'accident fait un blessé léger. Le bâtiment est fortement endommagé. Selon les premiers éléments, des employés remplaçaient une vanne quand ils ont détecté un nuage de gaz s'échappant du réservoir. La cause de l'ignition de gaz n'est pas connue, une enquête est effectuée pour la déterminer. Les dégâts matériels, en première évaluation, se montent à 225.000\$ selon l'exploitant.

N° 23082 - 19/08/2002 - ETATS-UNIS - 00 - SEVIERVILLE

C25.61 - Traitement et revêtement des métaux

Dans une usine spécialisée dans le travail du métal, une explosion détruit une partie des installations. Elle se produit tôt le matin, dans une unité dédiée au plaquage de métal. Le bilan fait état de 2 blessés, tous deux hospitalisés : l'un est dans un état critique, l'autre dans un état stable. Selon les premiers éléments, l'un des employés

manipulait un chariot élévateur et l'autre travaillait sur une rectifieuse lorsque l'explosion est survenue. Il semble que la bouteille de gaz de l'engin élévateur ait explosé (BLEVE?), elle aussi, propageant l'incendie en créant 2 foyers. La plus grande partie des dégâts sur le bâtiment a été occasionnée par le souffle de l'explosion, alors que les 2 foyers d'incendie, rapidement maîtrisés, n'ont eu que peu d'effets. Une enquête est engagée pour déterminer les causes précises de l'accident.

N° 22756 - 28/07/2002 - TURQUIE - 00 - IZMIT

D35.22 - Distribution de combustibles gazeux par conduites

Une explosion suivie d'un incendie se produit dans un centre emplisseur de gaz vers 8h un dimanche matin, lors du chargement d'une semi-remorque. Seuls le chauffeur et un garde sont présents sur le site. Le nuage résultant de la fuite aurait explosé suivie par un premier BLEVE quelques minutes plus tard (camion) puis 4 autres (capacité de 115 m³), par la suite. Un certain nombre de bouteilles, prises dans l'incendie ont également explosé et été projetées à l'extérieur du hangar. Le sinistre s'étend très rapidement à 7 maisons voisines. Les autorités demandent à 5000 riverains d'évacuer leur logement, par précaution. Les pompiers, aidés d'avions militaires et d'hélicoptères, luttent pendant 3 h avant de maîtriser le sinistre. Le bilan provisoire de 2 blessés (le gardien légèrement brûlé, le chauffeur du camion-citerne grièvement blessé) semblerait s'être alourdi dans les jours suivants (un mort). Le site est limitrophe de la plus grande raffinerie du pays, qui n'a pas été menacée. Selon l'exploitant, des vitres ont toutefois été brisées sur ce site. Plusieurs sites industriels proches ont été brièvement et légèrement touchés par les flammes, sans dommage important. Les images recueillies sur place mettent en évidence la présence de feux torches ainsi que d'importants panaches de fumée noire. Selon des témoins sur place, les effets se situeraient dans un périmètre de 100 m. Les causes de l'accident ne sont pas connues avec précision. Selon la presse, l'accident aurait occasionné des dommages d'un montant de 2,5 millions \$. La zone industrielle où sont implantées la raffinerie, l'entreprise gazière ainsi que d'autres usines, est très proche de quartiers habités avec une forte densité de population.

N° 21707 - 17/01/2002 - FRANCE - 59 - WERVICQ-SUD

C17.22 - Fabrication d'articles en papier à usage sanitaire ou domestique

Dans une usine de transformation de papier à usage sanitaire et domestique, lors du travail de l'équipe de nuit, un incendie se déclare dans un stockage de produits finis implanté dans une partie des 18 000 m² de bâtiments non recoupés, sans alarme incendie et sans exutoire de fumée. Les 26 employés sont évacués. Tardivement découvert et attisé par un vent violent, le sinistre se généralise avant l'arrivée des secours. Les services spécialisés coupent les alimentations en énergies du site. La police met en place un périmètre de sécurité et régule la circulation dans le quartier. Les pompiers mettent en place 11 grosses lances (dont 4 établies en protection des locaux administratifs et d'habitations), 2 lances canon (dont une protège 1 citerne de GPL) et 6 petites lances (dont 1 en protection de 2 transformateurs au PCB). L'impossibilité d'ouvrir les cannes d'aspiration équipant une réserve d'eau de 350 m³

impose l'utilisation de 1,5 km de tuyaux pour un pompage dans la LYS. De nombreuses bouteilles de gaz équipant des chariots de manutention explosent (BLEVE). Après 5 h, les secours circonscrivent le sinistre aux seuls entrepôts de matières premières et de produits finis dont 30 000 m² sont détruits (effondrement de toitures et de murs porteurs, affaissement de charpentes métalliques...). Les principales machines, le matériel informatique et les locaux administratifs sont toutefois épargnés. En l'absence de dispositif de confinement, les eaux d'extinction rejoignent le milieu naturel via le réseau d'égouts. Le rayonnement thermique a déformé les volets en PVC d'habitations situées à une vingtaine de mètres. Quarante personnes sont en chômage technique. Le redémarrage des activités sinistrées est soumis à une nouvelle autorisation préfectorale.

N° 21566 - 19/12/2001 - FRANCE - 71 - EPINAC

R93.21 - Activités des parcs d'attractions et parcs à thèmes

Un incendie se déclare dans un entrepôt à usage de stockage de matériels de forain. Deux BLEVE se produisent en raison de la présence de bouteille de gaz et 300 m² de toiture métallique s'effondre partiellement.

N° 20821 - 14/07/2001 - ETATS-UNIS - 00 - RIVERVIEW

C20.1 - Fabrication de produits chimiques de base, de produits azotés et d'engrais, de matières plastiques de base et de caoutchouc synthétique

Dans une usine chimique, 3 wagons vides en attente sur l'aire de déchargement de l'unité 46 sont remplacés par 3 wagons pleins : 1 de méthylmercaptan (MM) et 2 de chlore. A 3 h, les 2 wagons de chlore sont connectés. Un ouvrier raccorde le wagon de MM. A 3h45, 2 employés déchargent un wagon de MM, quand un tuyau de raccordement fixé sur une ligne de déchargement se désolidarise d'une vanne défectueuse : 67 à 74 t de MM gazeux, selon les sources, sont émises à l'atmosphère. Un opérateur déclenche l'alarme incendie, le chef de production alerte les employés et demande à ce que les pompiers soient appelés. A 3h47, les détecteurs de MM enregistrent une concentration élevée en gaz au 2ème étage du bâtiment 46. En quittant le bâtiment, une opératrice découvre le chef de production allongé sur le sol. Les employés d'autres ateliers s'équipent d'appareils respiratoires autonomes, se rendent sur les lieux et découvrent à leur tour les corps de l'un des 2 opérateurs et du chef de production. Ces derniers sont transportés à l'hôpital, où ils seront déclarés morts. Les pompiers de l'usine arrosent le wagon de MM duquel s'échappe de la fumée. A 3h52, les pompiers externes se dirigent vers l'usine et à 3h58, 2 unités et la police sont sur place. A 4h09, le gaz toxique s'enflamme, embrase le wagon, puis génère une boule de feu de 61 m de haut sur 15 m de large. Le wagon explose (BLEVE) libérant à l'atmosphère du MM et ses produits de décomposition. Le chef des secours requiert alors l'aide d'autres casernes.

Une brise du NO fait dériver le nuage toxique vers le SE en direction de Grosse Ile, île située au milieu de la rivière Détroit reliée par 2 ponts au continent. Vers 5 h,

l'ordre de se confiner est donné. Après une nouvelle évaluation de la situation, 2 000 personnes sont évacuées pendant 10 h, par mesures de sécurité, dans un périmètre englobant plusieurs communes. En raison des fumées émises, dès 6h30, les autorités américaines, puis celles canadiennes prennent la décision de fermer à la navigation une portion de la rivière Détroit jusqu'à 16h45. Le corps du 2ème opérateur est découvert sur la voie ferrée. Le flexible reliant le wagon de chlore à l'usine est détruit. Toutes les vannes du circuit chlore sont ouvertes lors de l'arrivée des équipes dans la zone de déchargement ; 12 t des 81 t de chlore contenues dans le wagon sont libérées. A 12h47, la fuite est stoppée. Les habitants peuvent regagner leur domicile dès 15 h. On dénombre : 3 morts, 1 blessé grave, 48 blessés légers (5 employés, 3 pompiers et 40 personnes du public). Une enquête du NTSB conclut : l'érosion/corrosion a provoqué la rupture de la tuyauterie, les procédures de l'exploitant sur le suivi, contrôle et maintenance des tuyauteries des postes de déchargement n'évoquent pas l'utilisation d'équipements individuels de protection qui aurait permis aux opérateurs de quitter la zone, l'asservissement des vannes de fermeture en cas de fuite n'était pas prévu...

N° 19613 - 25/12/2000 - ETATS-UNIS - 00 - DOUGLAS

YYY.YY - Activité indéterminée

Un réservoir de 2 m³ de propane explose dans une installation entreposant du gaz liquéfié. A priori, il s'agit d'un BLEVE qui n'a pas fait de blessé, la plupart du personnel étant en congé pour cause de fêtes de Noël. Les secours se tiennent à bonne distance afin de prévenir de nouvelles explosions. Ils sont cependant rappelés sur place à 3 reprises pour éteindre des nouveaux départs de feu.

N° 19010 - 24/10/2000 - FRANCE - 54 - NANCY

G47.3 - Commerce de détail de carburants en magasin spécialisé

Dans une station-service en bordure d'autoroute, un camping-car explose lors du remplissage de son réservoir de GPL : une fuite se produit entre le bouchon et le réservoir sur une durite, ce qui provoque un écoulement sur le sol. Les vapeurs de GPL ainsi formées s'enflamment et conduisent à l'explosion du réservoir (BLEVE). Une femme et un enfant, restés à l'intérieur du camping-car, sont légèrement brûlés au visage. Les dégâts matériels au niveau de la station-service sont limités.

N° 18967 - 20/10/2000 - ETATS-UNIS - 00 - DOWNEY

C11.07 - Industrie des eaux minérales et autres eaux embouteillées et des boissons rafraîchissantes

Une fuite intervient sur un réservoir de propane dans une usine d'embouteillage de boisson. Au contact d'une chaudière, l'ignition du nuage se produit et conduit à l'explosion de la capacité d'environ 4 m³ (BLEVE). 2 employés sont hospitalisés pour

des blessures mineures. Plusieurs autres personnes dans le public se rendent à l'hôpital pour des problèmes auditifs, des maux de tête ou des nausées. L'incendie consécutif à l'explosion se propage à des palettes et à des emballages plastiques mais est maîtrisé en 45 min. L'explosion par elle-même cause des dégâts sur le site même de l'usine, dans les usines voisines et chez des particuliers (vitres brisées jusqu'à environ 800 m).

N° 17543 - 05/04/2000 - NORVEGE - 00 - LILLESTROEM

H49.20 - Transports ferroviaires de fret

Une collision se produit entre 2 trains de marchandises au niveau d'une petite ville de Norvège. Les 2 trains étaient pourvus de dispositifs d'arrêt automatique qui auraient dû éviter l'accident mais qui apparemment n'ont pas fonctionné. Il n'y a pas eu de victime mais du fait de la présence de 2 wagons totalisant 90 t de propane, les autorités ont procédé à l'évacuation d'environ 2000 personnes sur une zone de 700 m de côté. Un incendie s'était aussitôt déclaré mais les wagons n'ont pas explosé. La stratégie utilisée par les pompiers était d'ailleurs de refroidir les wagons tout en laissant brûler le produit de manière à consumer les gaz explosibles émanant des capacités et éviter une explosion de masse (BLEVE).

N° 17560 - 22/03/2000 - MAROC - 00 - CASABLANCA

C20.41 - Fabrication de savons, détergents et produits d'entretien

Un camion-citerne (20 t) débute des opérations de ravitaillement en butane dans 2 réservoirs aériens horizontaux implantés sur le site d'une usine de détergents. Alors que le livreur est parti dans le bureau voisin, le chauffeur, resté dans la cabine du camion, constate l'ondulation du flexible. Environ 30 min après le début du dépotage, l'inflammation du nuage de gaz se produit au niveau du camion-citerne et 15 min plus tard, la citerne routière explose (BLEVE?) formant en particulier 3 gros fragments : le fond arrière projeté dans l'axe de la citerne à 100 m, la virole totalement déroulée à quelques dizaines de mètres et le fond avant projeté vers l'avant du camion à 40 m. Une canalisation liquide reliant les 2 réservoirs est arrachée et l'inflammation de la fuite qui suit occasionne un feu sous les réservoirs. Les soupapes s'ouvrent. Les pompiers arrosent les réservoirs. La fuite enflammée s'éteint par épuisement de produit environ 10 h après. Il n'y aurait que des blessés légers.

N° 15517 - 30/04/1999 - GRECE - 00 - KAMENA VOUVLA

H49.41 - Transports routiers de fret

A la veille de la fête publique du 1er Mai, la police arrête un camion-citerne de pétrole. Quelques minutes plus tard, un autre camion percute la citerne contenant 18 t de GPL qui s'enflamme. La police détourne le trafic et une zone de sécurité est

mise en place à 200 m. Les pompiers arrivent 30 min après l'accident et prennent position à 5 m de la citerne. A ce moment, la citerne explose (BLEVE). D'après des témoins, le BLEVE a généré une boule de feu de 100 m à 150 m de hauteur. Des gouttes de GPL pleuvent sur 300 à 400 m. La citerne et le camion des pompiers sont désintégrés et des fragments sont retrouvés jusqu'à 300 m pour les gros et 1 km (?) pour les petits. La citerne est retrouvée à 800 m et a défoncé la toiture d'un immeuble à 500 m. Trois pompiers, le conducteur et une autre personne sont tués, 13 autres personnes sont blessées.

N° 15518 - 22/03/1999 - TURQUIE - 00 - DORTYOL

G46.71 - Commerce de gros de combustibles et de produits annexes

A la suite d'une avarie sur une pompe hydraulique utilisée pour éprouver des réservoirs de 115 m³, un sous-traitant termine son opération en utilisant une bouteille d'oxygène comprimé. Une vanne cède sous un réservoir en cours d'épreuve et percute une canalisation raccordée à un réservoir voisin. Une fuite de gaz liquéfié s'enflamme et le réservoir explose (BLEVE) 20 min plus tard. Environ 1/3 du gaz est projeté contre le pied d'une sphère sur un terrain voisin, en bousculant les 3ème et 4ème réservoirs. Deux personnes sont tuées, 6 autres sont blessées. Les dommages matériels sont limités au site.

N° 12914 - 16/05/1998 - FRANCE - 35 - OSSE

000.00 - Particuliers

Un feu se déclare sur une voiture équipée d'un réservoir au GPL venant de percuter un panneau indicateur. Le conducteur d'un camion porte secours immédiatement à la victime. La voiture explose (BLEVE) quelques mn plus tard.

N° 13051 - 08/04/1998 - ETATS-UNIS - 00 - ALBERT CITY

A01.47 - Élevage de volailles

Une canalisation de propane est endommagée à la suite d'un accident de véhicule, à proximité d'un poulailler industriel. Un réservoir de 68 m³ de propane prend feu puis explose (BLEVE) lorsque les pompiers interviennent. Deux pompiers sont tués, 6 autres et un policier sont brûlés. Une enquête est en cours.

N° 14851 - 10/10/1997 - FRANCE - 94 - IVRY-SUR-SEINE

000.00 - Particuliers

Un incendie survient sur un camping-car stationné sur une aire en plein air. Une dizaine de minutes après l'arrivée des pompiers, le véhicule alimenté au GPL explose. Le réservoir de carburant a vraisemblablement subi un BLEVE. Un véhicule

situé à proximité et un box de garage voisin sont endommagés. Un pompier et 3 autres personnes sont blessés. De nombreuses fenêtres d'appartements des immeubles voisins sont brisées.

N° 11147 - 29/04/1997 - TURQUIE - 00 - KURTKOY

G46.18 - Intermédiaires spécialisés dans le commerce d'autres produits spécifiques

Dans une usine de conditionnement de récipients aérosols, une panne d'électricité survient. Au retour de l'énergie, une étincelle se produit et les lots de récipients aérosols explosent successivement. L'encadrement ordonne l'évacuation ; les ouvriers paniquent et personne ne tente d'éteindre le feu. Les pompiers sont alertés. Le feu s'étend à la zone de stockage. Les stocks très importants donnent des flammes s'élevant à 5 m au-dessus du bâtiment. Un réservoir cylindrique de 10 t de butane dépourvu de système de refroidissement explose (BLEVE) 35 mn plus tard, projetant la virole et les fonds à 20, 40 et 80 m. Les vitres sont brisées dans un rayon de 500 m et le flux thermique est ressenti à 250 m. L'incendie détruit deux usines voisines.

N° 11014 - 24/04/1997 - FRANCE - 42 - FIRMINY

000.00 - Particuliers

Le réservoir de GPL d'un véhicule volé en feu explose (BLEVE) alors que 2 pompiers sont en train de terminer l'extinction à l'arrière. Pris dans une boule de feu d'une quinzaine de mètres de diamètre, ils sont gravement brûlés au visage. Le réservoir de 80 L (plein au 3/4 ?) est resté en place. L'explosion a projeté le toit du véhicule à 80 m.

N° 12703 - 23/07/1996 - FRANCE - 45 - LOURY

000.00 - Particuliers

Une voiture alimentée au GPL explose à la sortie d'un village. Les gendarmes ayant observé un début de feu sous le véhicule, l'avaient intercepté et avaient demandé au conducteur de s'éloigner puis avaient arrêté toute circulation. Des fragments sont projetés jusqu'à 300 m et 4 hectares de chaume de blé sont incendiés. L'expertise du réservoir ne révèle aucune anomalie. Le réservoir a probablement subi un BLEVE.

N° 2307 - 24/09/1990 - THAILANDE - 00 - BANGKOK

H49.41 - Transports routiers de fret

En voulant éviter un taxi, un camion-citerne transportant du GPL se renverse de nuit dans le centre de BANGKOK. La citerne est fissurée. Le nuage de gaz s'enflamme

(allumage sur un lampadaire ?) et une violente explosion se produit (BLEVE ?). A la suite de ce sinistre, 85 personnes sont tuées et 112 autres sont plus ou moins gravement blessées (34 personnes resteront hospitalisées plus d'un mois). Les dommages matériels sont également importants : 47 voitures détruites, ainsi que 48 habitations, etc.

N° 1836 - 01/04/1990 - AUSTRALIE - 00 - SYDNEY

D35.22 - Distribution de combustibles gazeux par conduites

Un incendie se déclare dans un dépôt de gaz associé à un centre emplisseur de GPL comprenant notamment les stockages suivants : 5 réservoirs aériens (cigares de capacités 3x220 m³, 1x220 m³, 1x55 m³) contenant respectivement 160 m³, 148 m³, 148 m³, 88 m³, 31 m³ de gaz ; des réservoirs aériens de petites capacités (cigares), des camions citernes déjà chargés. Le site est entouré d'entrepôts et de bâtiments. Quelques habitations sont présentes dans un rayon de 500 m, ainsi qu'une route. Le jour de l'accident, un incendie se déclare vers 21 h sur le site mais il n'est pas combattu immédiatement. Du fait du week-end, il n'y avait pas de personnel dans l'installation. Le trafic de l'aéroport de Sydney, situé à 2 à 3 km, est aussitôt interrompu. A 22h05, le réservoir contenant 160 m³ de gaz bleve et se trouve projeté à 300 m dans la rivière voisine, détruisant au passage un bâtiment industriel non occupé à ce moment. L'explosion provoque le déplacement du réservoir voisin de 50 cm sur son socle sans le renverser. L'ensemble du site est en feu. A 22h33, un camion-citerne de 40 t bleve à son tour. A 23h00, les autorités décident d'évacuer les riverains dans un rayon de 2km en les prévenant par diffusion de messages vocaux. Des incompréhensions (langue du message non parlée par toute la population locale) créent une situation de panique. Environ 10 000 personnes auraient été évacuées. 300 sauveteurs sont mobilisés. L'incendie perdure jusqu'à 5 h du matin, moment où le gaz finit de brûler. Plusieurs vannes étaient restées ouvertes, l'incendie s'est donc propagé par les tuyauteries à l'ensemble des réservoirs connectés. Les pompes alimentant le réseau incendie étaient en panne. De nombreux bleve de petites bouteilles (une centaine) surviennent mais les autres gros réservoirs ne subiront pas de bleve. Le coût des dommages est évalué entre 20 et 25 MF (soit 3,5 M.euro). Le sinistre a causé d'importants dégâts par onde de choc et effets thermiques dans un rayon de 200 m. L'onde de choc est ressentie à 3 km. Des analyses effectuées sur le socle en béton du réservoir qui a blevé montrent que le réservoir a subi une élévation de température équivalente à celle d'une exposition à 900 °C pendant 2 h. La formation d'un nuage explosible à partir d'une fuite sur une tuyauterie serait à l'origine de l'incendie. La source d'ignition pourrait être due au passage d'une voiture ou à une étincelle d'origine électrique. L'exploitant évoque un acte de malveillance.

N° 1281 - 20/05/1989 - KAZAKHSTAN - 00 - ALMA ATA

H49.20 - Transports ferroviaires de fret

Un wagon-citerne explose (BLEVE ?) à la suite d'une collision avec une locomotive ; 5 personnes décèdent (dont 3 pompiers) et une centaine d'autres est blessée dont 40 grièvement.

N° 135 - 21/03/1988 - ROYAUME-UNI - 00 - KINGS RIPTON / CAMBRIDGE

000.00 - Particuliers

Lors du remplissage de l'un des 4 réservoirs domestiques de GPL d'un particulier, une fuite se produit et s'enflamme violemment. Un BLEVE se produit sur le réservoir, avec projection d'un fragment à 25 m transperçant le réservoir d'une maison voisine. Les 3 autres réservoirs sont évacués de leur contenu par la soupape, sans dommage. Une maison est détruite ainsi que 2 garages et les vitres de 3 maisons voisines.

N° 7269 - 19/05/1985 - ITALIE - 00 - PRIOLO GARGALLO

C19.20 - Raffinage du pétrole

La soupape d'admission des 2 bouilleurs d'un dééthaniseur se désolidarise de son support à la suite de la rupture de plusieurs tiges filetées de sa bride d'admission. Les surpressions répétées subies par la soupape seraient à l'origine de l'accident. Une fuite se produit et s'enflamme. Les stockages journaliers, pris dans l'incendie, sont détruits par BLEVE. Trois personnes sont blessées, une partie du fractionnement froid ainsi que les stockages de produits sont détruits. Le montant des dommages s'élève à 66,95 M\$.

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

D35.22 - Distribution de combustibles gazeux par conduites

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 à 5h30. 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° 7127 - 23/07/1984 - ETATS-UNIS - 00 - ROMEOVILLE AND LEMONT

C19.20 - Raffinage du pétrole

Dans une raffinerie, une tour de lavage de GPL à la MEA (Méthyl-Ethyl-Amine) explose pendant des travaux de soudure. La tête de colonne est propulsée à 1 km. Sur place, un incendie se déclare. En tout, 16 personnes sont tuées et 22 sont blessées. Un phénomène de corrosion sous tension est à l'origine de l'explosion - de type BLEVE -. Les dégâts sont très importants et de ce fait, les montants des dommages s'élèvent à 132,8 M\$.

N° 5412 - 27/07/1983 - ROYAUME-UNI - 00 - NC

C29.32 - Fabrication d'autres équipements automobiles

Un réservoir d'ammoniac (NH₃) pris dans un incendie explose (BLEVE ?) dans une usine de moteur diesel ; 5 personnes sont blessées ou intoxiquées.

N° 7953 - 21/06/1982 - PAYS-BAS - 00 - GROOTBROEK

YYY.YY - Activité indéterminée

Un cigare explose (BLEVE) et un fragment projeté tue un cycliste.

N° 7126 - 01/01/1982 - EGYPTE - 00 - SUEZ

H49.50 - Transports par conduites

Un gazoduc s'enflamme et explose (BLEVE). Dix-neuf personnes sont blessées.

N° 5403 - 10/09/1981 - ETATS-UNIS - 00 - SUD HUTCHINSON

H49.20 - Transports ferroviaires de fret

Des wagons d'ammoniac pris dans un incendie (palettes en bois ?) explosent (BLEVE ?). Des vitres sont brisées à 400 m et 5 000 personnes sont évacuées.

N° 7950 - 16/08/1981 - PAYS-BAS - 00 - OLDEHOLTPADE

H49.39 - Autres transports terrestres de voyageurs n.c.a.

A la suite d'une collision, un réservoir de gaz explose dans une voiture (BLEVE). Une personne est blessée.

N° 7943 - 13/07/1981 - PAYS-BAS - 00 - BEUNINGEN

000.00 - Particuliers

Dans une maison, une bouteille de gaz explose (BLEVE). Une personne est blessée.

N° 7125 - 01/01/1981 - ETATS-UNIS - 00 - NC

H49.31 - Transports urbains et suburbains de voyageurs

Dans un bus fonctionnant au GPL, le réservoir cylindrique BLEVE. Treize personnes sont tuées et 17 sont blessées.

N° 7954 - 26/11/1980 - PAYS-BAS - 00 - OOSTERWOLDE

C29.10 - Construction de véhicules automobiles

Un réservoir explose dans une voiture durant son montage (BLEVE). Une personne est blessée.

N° 10041 - 04/08/1980 - PAYS-BAS - 00 - RAALTE

000.00 - Particuliers

Le réservoir d'une voiture dont le moteur est en feu explose (BLEVE).

N° 5390 - 05/06/1980 - MALAISIE - 00 - PORT KELANG

YYY.YY - Activité indéterminée

Un réservoir d'ammoniac pris dans un incendie explose (BLEVE ?). L'onde de choc se propage sur 8 km, 3 personnes sont tuées et 200 sont plus ou moins intoxiquées. Plus de 3 000 personnes seront évacuées. Les dommages matériels sont évalués à 12 M de \$.

N° 7121 - 08/01/1980 - PAYS-BAS - 00 - ERLECOM

H50.20 - Transports maritimes et côtiers de fret

Une collision se produit entre deux navires dont un pétrolier. L'accident provoque un incendie et une explosion (BLEVE). Deux personnes sont blessées.

N° 5636 - 10/11/1979 - CANADA - 00 - MISSISSAUGA

H49.20 - Transports ferroviaires de fret

Un train transportant du chlore et du propane déraile. Trois wagons citernes de propane sont détruits par BLEVE dans un délai de 1h30. Des morceaux de réservoir sont projetés à 700 m de l'accident. La totalité de la ville, soit 220 000 personnes, est évacuée, et 14 personnes sont blessées. Le coût des dégâts s'élève à 10 millions de dollars.

N° 7119 - 08/09/1979 - ETATS-UNIS - 00 - PAXTON

H49.20 - Transports ferroviaires de fret

Un convoi ferroviaire composé de 33 wagons de produits chimiques déraile. Un wagon-citerne transportant de l'acétaldéhyde s'éventre. Le nuage de gaz s'enflamme spontanément. Des wagons-citernes contenant du tétrahydrofurane et de l'oxyde d'éthylène sont pris dans l'incendie et explosent (BLEVE(s)). Les pompiers ne parviennent à maîtriser le sinistre que 2,5 jours plus tard. Huit personnes sont brûlées ou intoxiquées. Entre 300 et 1 000 riverains sont évacués de la zone.

N° 10033 - 04/07/1979 - PAYS-BAS - 00 - OOSTFLAKKEE

YYY.YY - Activité indéterminée

Un réservoir d'hydrocarbure liquide et 2 cigares explosent (BLEVE ?).

N° 10032 - 01/06/1979 - PAYS-BAS - 00 - S-GRAVENZANDE

A01.50 - Culture et élevage associés

Une bouteille de gaz explose (BLEVE) dans une grange en feu.

N° 7949 - 16/05/1979 - PAYS-BAS - 00 - VLAARDINGEN

H49.39 - Autres transports terrestres de voyageurs n.c.a.

Une bouteille de gaz explose (BLEVE) dans une camionnette en feu. Deux personnes sont blessées.

N° 5382 - 08/04/1979 - ETATS-UNIS - 00 - CRESTVIEW

H49.20 - Transports ferroviaires de fret

A la suite d'un déraillement, un incendie et des explosions (BLEVE) se produisent sur des wagons transportant des produits inflammables. Un wagon d'ammoniac pris dans l'incendie de wagons d'acétone de méthane et de chlore, explose 20 minutes après le début de l'incendie. Quatorze personnes sont blessées ou intoxiquées et 4 500 autres sont évacuées dans un rayon de 2 500 m. Des fragments d'enveloppe sont projetés à 200 m du point de l'accident. L'enquête conclut à un attentat.

N° 5629 - 15/07/1978 - MEXIQUE - 00 - XILATOPEC

H49.41 - Transports routiers de fret

Un camion-citerne de GPL (butane) circulant sur une autoroute se renverse et fuit. Un autocar enflamme le nuage de gaz formé (UVCE) ; 100 personnes sont tuées et 200 autres sont blessées. Cet accident est également répertorié dans les BLEVE historiques selon certaines sources.

N° 5003 - 11/07/1978 - ESPAGNE - 00 - LOS ALFAQUES

H49.41 - Transports routiers de fret

Un camion-citerne transportant 23 t de propylène liquéfié sous pression explose. Le véhicule, après s'être couché dans un fossé, heurte le mur d'un camping où séjournait 700 à 800 estivants. La fissuration de la citerne et l'inflammation du rejet gazeux entraîne une augmentation de pression et une détérioration des parois de la citerne. Une première explosion entraîne une brèche et une brutale chute de pression. La citerne est alors entourée de flammes et il se produit un BLEVE. Les conséquences humaines sont très importantes : 216 morts et plus de 200 blessés sont à déplorer

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

C19.20 - Raffinage du 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° 7118 - 22/02/1978 - ETATS-UNIS - 00 - WAVERLY

H49.20 - Transports ferroviaires de fret

La rupture d'un essieu provoque le déraillement d'un convoi ferroviaire. Plusieurs wagons-citernes explosent (BLEVE). Le bilan fait état de 16 morts et de 43 blessés.

N° 7117 - 19/05/1977 - ETATS-UNIS - 00 - POCONO MOUNTAINS

F42.11 - Construction de routes et autoroutes

Une citerne de propane (utilisée pour des travaux routiers) explose (BLEVE). Une personne est blessée. Une fuite de canalisation d'alimentation de la cuve est à l'origine de l'accident.

N° 7115 - 20/02/1977 - ETATS-UNIS - 00 - DALLAS

H49.20 - Transports ferroviaires de fret

Des wagons-citernes contenant du butane explosent (BLEVE) à la suite du déraillement d'un convoi ferroviaire. Une personne est blessée.

N° 6934 - 06/02/1977 - ETATS-UNIS - 00 - BOYNTON BEACH

H49.20 - Transports ferroviaires de fret

A la suite du déraillement d'un train de marchandise, un wagon de propane enfonce le muret de rétention d'un stockage de 4 réservoirs de GPL. La citerne explose, se brise et la plus grosse partie est catapultée à 130 m. Un incendie se déclare, s'étend à l'ensemble du convoi ainsi qu'à des habitations et des commerces dans lesquels deux personnes sont brûlées vives. Les pompiers devant le manque d'informations concernant les produits transportés redoutent de nouvelles explosions. 1,5 h plus tard, un BLEVE détruit une citerne d'isobutane. Il se forme une boule de feu de 100 m de diamètre visible à plus de 40 km. L'incendie est finalement maîtrisé 2 jours plus tard.

N° 7113 - 26/11/1976 - ETATS-UNIS - 00 - BELT

H49.20 - Transports ferroviaires de fret

Un convoi de wagons-citernes de propane déraile. Une série d'explosions et de BLEVE, dont le dernier se produit 1 h 30 après le déraillement, détruit la totalité des citernes. Le bilan fait état de 2 morts et de 22 blessés.

N° 7436 - 02/09/1976 - ALLEMAGNE - 00 - HALTERN AM SEE

H49.20 - Transports ferroviaires de fret

Roulant à environ 16 km/h dans une gare de triage, un wagon-citerne (plein à 90 %) transportant 231 t de CO₂ liquide (-15 °C / 7 bars) explose alors que sa soupape de sécurité est ouverte. Selon différents témoignages, le BLEVE a lieu soit peu avant, soit juste après être entré en contact avec un autre groupe de wagons. Une personne est tuée. Le châssis de la citerne de transport est plié en V ; 22 fragments soit environ 80 % de la cuve sont projetés selon des angles de 5-20° et 65-95° par rapport à la direction du wagon. Certains projectiles seront retrouvés à plus de 360 m ; 3 wagons vides situés sur 3 voies ferrées plus loin sont renversés. L'analyse des fragments démontre qu'une rupture fragile est à l'origine de la ruine du réservoir.

N° 7112 - 31/08/1976 - ETATS-UNIS - 00 - GADSEN

YYY.YY - Activité indéterminée

Des explosions (BLEVE) se produisent lors d'un transvasement entre une citerne de transport et des citernes de stockage ; 3 morts et 28 blessés sont à déplorer.

N° 7111 - 01/09/1975 - ETATS-UNIS - 00 - DES MOINES

H49.20 - Transports ferroviaires de fret

Un convoi ferroviaire composé de 13 wagons dont 11 wagons-citernes de GPL (10 de propane et 1 de butane) déraille. Neuf minutes après l'accident, un premier wagon-citerne explose (BLEVE). D'autres BLEVE(s) se produisent ensuite. Un seul wagon reste intact. Des fragments de réservoirs sont projetés jusqu'à 300 m. 3 personnes sont blessées.

N° 7776 - 22/06/1975 - ETATS-UNIS - 00 - ANGLETON

YYY.YY - Activité indéterminée

Un réservoir de 80 m³ de gaz explose (BLEVE).

N° 5616 - 29/04/1975 - ETATS-UNIS - 00 - EAGLE PASS

H49.41 - Transports routiers de fret

Un camion-citerne transportant un mélange de propane et de butane fait une embardée en voulant éviter un véhicule. Il se renverse et le tracteur se sépare de la citerne qui s'éventre. Les témoins ressentent un souffle suivi d'une explosion. Un incendie se déclare et une seconde explosion (BLEVE) se produit. Un fragment correspondant au 3/4 de la citerne est propulsé à 500 m de son point de départ. Il détruit et embrase 3 mobil-homes qui se trouvaient sur sa trajectoire. La seconde partie de la citerne se scinde en trois fragments qui sont propulsés à 260, 240 et 110 mètres. Le bilan de cet accident fait état de 16 morts et de 35 blessés.

N° 7110 - 02/12/1974 - PAYS-BAS - 00 - HAARLEMMERMEER

G45.20 - Entretien et réparation de véhicules automobiles

Un incendie se déclare dans un garage de réparation automobile et provoque un BLEVE. Une personne est blessée.

N° 7109 - 17/04/1974 - ALLEMAGNE - 00 - BIELEFELD

H49.20 - Transports ferroviaires de fret

Un convoi composé de 36 wagons citerne déraille. Un incendie se déclare et provoque la destruction par BLEVE de plusieurs d'entre eux.

N° 7108 - 12/02/1974 - ETATS-UNIS - 00 - ONEONTA

H49.20 - Transports ferroviaires de fret

Un convoi de wagons citerne de GPL déraile dans une courbe. Un incendie se déclare. 40 minutes plus tard une citerne est détruite par un BLEVE. Elle est bientôt suivie de 3 autres citernes qui explosent à 10 minutes d'intervalle. De nombreux fragments de citernes sont catapultés lors des explosions successives. Certains atteignent une distance de 400 m. 25 personnes sont blessées.

N° 6982 - 11/01/1974 - ETATS-UNIS - 00 - WEST SAINT PAUL

YYY.YY - Activité indéterminée

Un BLEVE détruit un réservoir de stockage. 4 personnes sont tuées et 6 autres sont blessées.

N° 14313 - 04/01/1974 - ETATS-UNIS - 00 - HOLLY HILL

H49.20 - Transports ferroviaires de fret

La rupture d'une ligne de fond d'un wagon de propane provoque un BLEVE.

N° 14312 - 06/11/1973 - ETATS-UNIS - 00 - VENTURA

H49.20 - Transports ferroviaires de fret

A la suite du déraillement d'un train, des wagons-citernes de butane explosent et génèrent des BLEVE. Trois personnes sont mortes. Le desserrage de freins par des enfants sur la voie en pente de l'embranchement est à l'origine de cet accident.

N° 6938 - 05/07/1973 - ETATS-UNIS - 00 - KINGMAN

H52.21 - Services auxiliaires des transports terrestres

Une légère fuite est repérée lors du dépotage d'un wagon contenant 75 m³ de GPL. L'un des deux opérateurs tente de resserrer les vannes en utilisant un outil en aluminium qui pourrait être la cause de l'inflammation du gaz. Il meurt brûlé vif ; l'autre gravement brûlé, donne l'alerte. Les pompiers n'arrivent qu'après 25 min. De grandes flammes s'échappent du wagon. Les pompiers tentent de le refroidir mais ce n'est pas suffisant et un BLEVE se produit. La moitié du wagon est projetée à 365 m. Une boule de feu de 45 à 60 m de diamètre est observée. 5 bâtiments sont en feu. 12 pompiers meurent brûlés. 95 personnes sont blessées. Des débris mettent le feu à une usine, à un restaurant et à un magasin. Les incendies sont maîtrisés au bout de 8h.

N° 4953 - 01/01/1973 - ETATS-UNIS - 00 - NEW YORK

YYY.YY - Activité indéterminée

Un réservoir BLEVE. Une rupture de canalisation est à l'origine de l'accident.

N° 6939 - 30/03/1972 - BRESIL - 00 - DUQUE DE CAXIAS

YYY.YY - Activité indéterminée

Vingt minutes après avoir été purgée, une sphère de GPL explose en générant un BLEVE. Un fragment de 50 t est projeté à 950 m. 37 personnes sont tuées et 53 sont blessées. Le montant des dommages s'élève à 12,3 M\$.

N° 6937 - 09/02/1972 - ETATS-UNIS - 00 - TEWKSBURRY

YYY.YY - Activité indéterminée

Un réservoir de stockage explose en provoquant un BLEVE. L'origine de l'accident est une collision d'un camion-citerne avec une canalisation du réservoir de stockage. Deux personnes sont tuées et 21 sont blessées.

N° 14307 - 01/01/1972 - MEXIQUE - 00 - MEXICO

H49.20 - Transports ferroviaires de fret

Des wagons-citernes contenant du butane BLEVE suite au déraillement du train. (La date et le mois de l'accident sont inconnus).

N° 6935 - 19/10/1971 - ETATS-UNIS - 00 - HOUSTON

H49.20 - Transports ferroviaires de fret

Un convoi ferroviaire composé de 18 wagons déraille. Une fuite de monochlorure de vinyle se produit et s'enflamme instantanément ; 45 min plus tard, l'un des wagons explose (BLEVE). Des fragments importants du réservoir sont projetés dans un rayon de 100 m, une personne est tuée et 50 autres sont blessées.

N° 14301 - 23/10/1970 - ROYAUME-UNI - 00 - HULL

H49.41 - Transports routiers de fret

A la suite du renversement d'un camion-citerne contenant de propane, un BLEVE se produit. Deux personnes sont mortes.

N° 6805 - 22/07/1970 - FRANCE - 66 - PERPIGNAN

D35.21 - Production de combustibles gazeux

Une violente explosion et un incendie se produisent dans une usine à gaz, i.e. un établissement fabriquant du gaz manufacturé comportant aussi des activités induites de stockage, distribution de produits du site et de GPL venant de l'extérieur. Lors du dépotage d'un wagon-citerne de 45 t de propane, un flexible (diam. 50 mm) se rompt au ras du manchon de raccord de la vanne du wagon et provoque une fuite estimée à 8kg/s. Un brouillard (gaz + gouttelettes de gaz liquéfié) se forme. Le vent est léger (1 m/s) et la température de 25 °C ; 5 t seulement de produit avaient déjà été transférées au moment de l'accident. Le nuage blanc et épais empêche l'opérateur et 2 témoins proches d'intervenir. Le nuage s'enflamme au passage d'une locomotive, 4 min plus tard. Ses 2 occupants, grièvement atteints, décéderont de leurs brûlures. L'inflammation du nuage entraîne l'allumage de plusieurs foyers, répartis sur plusieurs dizaines de m sous le vent. La police évacue les habitants dans un rayon de 200 m, notamment un groupe scolaire et un hospice. L'incendie menace les 2 cylindres (100 m³ chacun), les 2 sphères (500 m³ chacune), les 2 gazomètres (10 000 et 4 000 m³), un autre wagon de propane, les dépôts d'essence. La fuite alimente l'incendie qui enveloppe le wagon à l'origine du sinistre. Malgré les efforts des secours, le wagon explose (BLEVE) 40' après la fuite. Les dommages sont importants : bornes de dépotage détruites, gazomètres en feu, calorifuge des sphères en partie arraché. La police étend la zone évacuée à 450 m. Les équipes de secours en place sont déstabilisées (--supérieur à 17 brûlés parmi les intervenants hospitalisés dans les 10 min) et ne reprennent leur lutte que 1 h plus tard. Ils éloignent une citerne d'essence et le 2ème wagon, puis ferment des vannes, arrêtant ainsi l'alimentation de l'incendie. Les foyers sont éteints 4h30 après l'explosion. Le bilan s'établit à 2 morts et 49 blessés, 11 parmi le personnel, 18 parmi les pompiers, dont 4 grièvement atteints et 23 parmi les passants et les riverains (brûlures, fractures, éclats de verre, amputation de phalanges). La distribution de gaz est interrompue pour 20 000 abonnés. Environ 1100 déclarations de sinistres seront établies. Les dommages importants se situent dans un rayon de 300 m autour du wagon, des dommages moins sévères dans un rayon de 500 m et des bris de vitres sont observés jusqu'à 1000m.

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

H49.20 - Transports ferroviaires de fret

Dans un convoi ferroviaire, une trémie de sable déraile 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° 7757 - 30/05/1970 - ETATS-UNIS - 00 - BROOKLYN

Q86.10 - Activités hospitalières

Un camion-citerne (plein depuis la veille) contenant 14 t d'oxygène liquide livre près de 2 t à un hôpital. Après déconnexion des canalisations de liaison et durant la manœuvre de départ, la citerne du camion explose (BLEVE). Un incendie s'en suit. Le chauffeur et un badaud sont tués. 30 personnes dont 4 pompiers et 2 policiers sont légèrement blessés. Le camion-citerne et les constructions environnantes subissent d'importants dommages. Des vitres sont brisées jusqu'à 180 m. D'après les investigations postérieures, l'accident serait dû à une série de réactions, finalisée par une oxydation de l'aluminium du réservoir par l'O₂.

N° 14299 - 25/01/1970 - ETATS-UNIS - 00 - LAUREL

H49.20 - Transports ferroviaires de fret

A la suite du déraillement d'un train contenant 63 tonnes de GPL, un BLEVE se produit et fait deux morts.

N° 14298 - 06/01/1970 - ETATS-UNIS - 00 - BILLINGS

YYY.YY - Activité indéterminée

La surchauffe de cylindres d'ammoniac entraîne l'explosion d'une bouteille de 70 kg (BLEVE). Des fragments du réservoir sont projetés à 150 m, des canalisations et des conteneurs sont détruits.

N° 14302 - 01/01/1970 - ETATS-UNIS - 00 - HOPKINTON

H49.41 - Transports routiers de fret

Sur une autoroute, un camion-citerne contenant du GPL se renverse. Un BLEVE se produit 15 minutes après. (La date et le mois sont inconnus).

N° 14294 - 11/07/1969 - ETATS-UNIS - 00 - BLACK BAYOU

H49.20 - Transports ferroviaires de fret

A la suite du déraillement d'un train contenant des wagons-citernes de chlorure de vinyle, un BLEVE se produit 6 heures après.

N° 5214 - 18/02/1969 - ETATS-UNIS - 00 - CRETE

H49.20 - Transports ferroviaires de fret

Une fuite de 64 t (ou 90 t) d'ammoniac se produit sur un wagon (BLEVE ?) ; 6 (ou 9) personnes sont tuées, 20 (ou 53) autres sont blessées et 400 sont évacuées.

N° 6892 - 25/01/1969 - ETATS-UNIS - 00 - LAUREL

H49.20 - Transports ferroviaires de fret

Un train composé de 15 citernes déraille. Un incendie suit et 12 réservoirs explosent (BLEVE) entre 10 et 60 minutes après l'accident. Des morceaux volumineux de réservoirs sont projetés dans un rayon de 300 mètres. Les vitres des habitations sont brisées dans un rayon de 5 km. 2 personnes sont tuées et 976 autres sont blessées.

N° 7645 - 02/01/1969 - HONGRIE - 00 - REPCELAK

C20.11 - Fabrication de gaz industriels

Dans une usine de production de CO₂ liquide (CO₂ naturel purifié et stocké à -30 °C / 15 bar), l'un des 4 cigares verticaux de stockage en remplissage explose par BLEVE. Par effets domino, un 2ème cigare explose (BLEVE) et un 3ème est propulsé dans le laboratoire situé à 30 m, tuant 5 personnes. Les projections liées aux 2 BLEVE tuent 4 personnes. D'autres sont blessées jusqu'à 150 m, dont 15 sérieusement (traumatismes et gelures). Des fragments de grandes tailles sont projetés jusqu'à 400 m ; 2 de 2,8 t et 1 t seront retrouvés à 150 et 250 m. L'origine probable de l'explosion est un sur remplissage dû au gel du détecteur de niveau (gel d'eau non extraite totalement du CO₂). De plus, le matériau des 2 cuves qui ont explosé, n'était pas adapté aux faibles températures.

N° 7507 - 01/01/1968 - ETATS-UNIS - 00 - DUNREITH

H49.20 - Transports ferroviaires de fret

Un wagon-citerne BLEVE suite à son déraillement provoqué par la rupture d'un rail.

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

C19.20 - Raffinage du 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 givrent 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-pompier 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° 14264 - 27/05/1962 - ETATS-UNIS - 00 - BERLIN

H49.41 - Transports routiers de fret

A la suite du renversement d'un camion contenant 12,5 tonnes de GPL, un nuage (Diamètre : 183 m et hauteur : 24 m) explose (BLEVE). Dix personnes sont tuées.

N° 14262 - 28/06/1959 - ETATS-UNIS - 00 - MELDRIN

H49.20 - Transports ferroviaires de fret

Des wagons-citernes contenant du GPL explosent (BLEVE) à la suite du déraillement d'un train. Vingt-trois personnes sont tuées.

N° 6889 - 02/06/1959 - ETATS-UNIS - 00 - DEER LAKE

H49.41 - Transports routiers de fret

Un camion percute par l'arrière une citerne routière de GPL qui le précède. La fuite provoquée par la collision s'enflamme immédiatement. La citerne prise dans l'incendie explose (BLEVE) 45 minutes après l'accident. Des projectiles sont répandus dans un rayon de 300 m autour de la citerne. 11 personnes sont tuées, il s'agit en majorité de spectateurs qui se trouvaient à 250 m de l'accident et qui ont été frappés par les projections.

N° 6870 - 28/05/1959 - ETATS-UNIS - 00 - MC KITTRICT

YYY.YY - Activité indéterminée

Un BLEVE détruit un réservoir de stockage de GPL alors que l'on vient, 10 minutes plus tôt, de procéder à sa purge d'eau. Un fragment de 4 t est projeté à plus de 700 m ; 35 min plus tard, 6 réservoirs principaux sont à leur tour détruits par des BLEVE. 2 personnes sont blessées.

N° 6879 - 12/03/1959 - ETATS-UNIS - 00 - BRINKLEY

YYY.YY - Activité indéterminée

Le chauffeur d'un camion-citerne de GPL déplace son véhicule en oubliant de déconnecter le tuyau de transfert. Le gaz s'enflamme et provoque la destruction par BLEVE de 3 réservoirs de propane de moins de 60 m³. Une personne est tuée et les dommages matériels sont considérables.

N° 14260 - 15/04/1958 - ETATS-UNIS - 00 - ARDMORE

H49.41 - Transports routiers de fret

A la suite de la rupture d'accouplement au chargement d'un camion-citerne de propane, un BLEVE se produit. Deux personnes sont blessées.

N° 14258 - 24/10/1957 - ETATS-UNIS - 00 - SACRAMENTO

H49.41 - Transports routiers de fret

A la suite d'avaries lors du raccordement d'un camion de GPL en charge, un BLEVE se produit. Une personne est tuée.

N° 6848 - 08/01/1957 - CANADA - 00 - MONTREAL

YYY.YY - Activité indéterminée

Une sphère de GPL (Butane) dont les capteurs de niveau étaient défectueux est sur-remplie à la suite d'une succession d'erreurs concernant l'estimation de la quantité de produit à introduire. Dans un délai de 30 minutes, la sphère se rompt (BLEVE). 15 minutes plus tard, 2 autres BLEVE détruisent les 2 sphères voisines. Les fragments de réservoirs sont projetés dans un rayon de 300 m. Une personne est tuée au cours de l'accident.

N° 6835 - 22/10/1956 - ETATS-UNIS - 00 - COTTAGE GROVE

C19.20 - Raffinage du pétrole

Dans une raffinerie, à la suite de la rupture d'un niveau à glace, un BLEVE détruit un réservoir de stockage de GPL dans une unité de F.C.C (craquage catalytique) ; 12 personnes sont tuées et 40 blessées. L'installation est détruite.

N° 6825 - 29/07/1956 - ETATS-UNIS - 00 - AMARILLO

YYY.YY - Activité indéterminée

Un triple BLEVE détruit 3 réservoirs de pétrole. 20 personnes sont tuées et plus de 32 autres blessées.

N° 6758 - 19/07/1955 - ALLEMAGNE - 00 - LUDWIGSHAFEN

H49.41 - Transports routiers de fret

Une citerne routière explose (BLEVE) et s'enflamme. 2 personnes sont blessées.

N° 14246 - 24/06/1952 - ETATS-UNIS - 00 - KANSANS CITY

H49.41 - Transports routiers de fret

Une fuite de gaz combustible liquéfié se produit sur la soupape d'un camion et provoque un BLEVE qui s'étend à 3,2 km. Deux personnes sont tuées.

N° 14245 - 16/08/1951 - ETATS-UNIS - 00 - BATON ROUGE

H49.20 - Transports ferroviaires de fret

Un wagon-citerne contenant du propane, déchiré sur 600 mm, BLEVE à la suite du déraillement du convoi.

N° 6756 - 07/07/1951 - ETATS-UNIS - 00 - PORT NEWARK

YYY.YY - Activité indéterminée

Dans une aire de stockage de propane, la rupture d'une tuyauterie provoque un incendie. Un défaut de fonctionnement de la vanne d'isolement interne du réservoir reliée à la canalisation du réservoir provoque son explosion 15 minutes plus tard. Les 69 autres cuves présentes sur le site explosent (BLEVE) dans les 100 minutes suivantes. L'intervention des pompiers est rendue délicate, le système de fourniture d'eau ayant été mis hors service par un projectile. 11 personnes sont blessées.

N°14242 - 23/08/1950 - ETATS-UNIS - 00 – WRAY.

H49.41 - Transports routiers de fret

Un BLEVE se produit à la suite du renversement d'un camion contenant du propane et entraînant un arrachement de lignes. Deux personnes sont tuées.

N° 14237 - 10/08/1943 - ETATS-UNIS - 00 - PALMER

YYY.YY - Activité indéterminée

Un BLEVE détruit un conteneur de 4,3 t de propane à la suite de la rupture d'une ligne de 2", une minute et demie après l'allumage.

ANNEXE B
Synthèse relative à la projection des fragments lors d'un BLEVE

1. RETOUR D'EXPÉRIENCE

Holden (Holden, 1988) a réalisé une synthèse très complète du retour d'expérience disponible sur la projection de fragments lors d'éclatements de réservoirs, et en particulier de BLEVE. Le mode de rupture du réservoir a une importance primordiale dans l'émission de fragments. Il explique en partie le nombre de fragments produits et leur trajectoire.

1.1 NOMBRE ET TYPOLOGIE DES FRAGMENTS

L'étude des accidents passés, de même que les résultats d'essais, montrent que le BLEVE d'un réservoir cylindrique produit un nombre limité de fragments massifs : le plus souvent deux ou trois, rarement plus de quatre ou cinq.

Holden cite, pour 31 BLEVE ayant produit 76 fragments, une moyenne de 2,45 fragments par BLEVE, avec la répartition de l'histogramme suivant (Figure 4) :

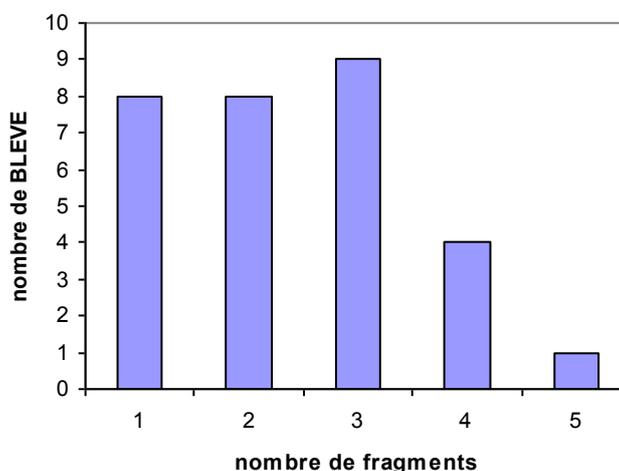


Figure 4 : Nombre de fragments produits par BLEVE, d'après (Holden, 1988)

A ces fragments massifs provenant de l'enveloppe du réservoir, s'ajoutent souvent des débris plus petits dus à la projection des équipements internes et externes du réservoir. Lors d'un BLEVE de wagon, la destruction du wagon peut également entraîner des projections de pièces mécaniques.

Un essai de BLEVE d'un wagon de 45 m³ contenant 5 tonnes de propane, effectué par le B.A.M. en 1998 (Ludwig et Balke, 1999 ; Ludwig et Heller, 1999), a produit 4 fragments d'enveloppe de réservoir (Tableau 4). Une pièce interne au réservoir a également été retrouvée.

Fragment	Masse(kg)	Distance de projection (m)	Hauteur maximale atteinte (m)
Calotte hémisphérique	1400	130	inconnue
Calotte hémisphérique	1200	155	inconnue
Morceau d'enveloppe	6710	150	inconnue
Morceau d'enveloppe	350	200	inconnue
Pièce en tôle ondulée renforcée	210	145	200

Tableau 4 : Projections de fragments – essai du B.A.M., 1998

Le nombre et la forme des fragments dépendent en grande partie du mode de rupture et de propagation des fissures dans le réservoir. Plusieurs profils de rupture typique peuvent être mis en évidence, en fonction de la localisation de la fissure initiale, de sa direction et de sa vitesse de propagation (Holden, 1988). En général, la fissure se propage d'abord de manière circonférentielle, en découpant l'un des fonds du réservoir, puis axialement, ce qui a pour effet de déplier la virole, puis à nouveau radialement en désolidarisant l'autre fond. Mais, parfois, la propagation axiale n'est pas complète, et l'un des fonds reste solidaire de la virole. Dans de nombreuses situations la virole est complètement dépliée au sol et n'est pas projetée. Dans d'autres cas, elle reste solidaire d'une des calottes et est projetée avec elle. Parfois, la virole engendre un ou deux fragments de tôle aplatie qui peuvent être également projetés (par exemple lors de l'essai du B.A.M., Tableau 3). La taille du réservoir ne semble pas avoir d'influence sur le nombre et des fragments. Plus le réservoir est volumineux, plus les fragments sont grands et massifs, mais pas plus nombreux.

Les essais de BLEVE réalisés par Birk (Birk, 1997), sur des réservoirs de propane de 400 litres ont présenté des modes de rupture conformes à cette analyse. Les BLEVE ont produit de 1 à 3 fragments, le mode de fragmentation le plus fréquent étant un aplatissement de la virole au sol et la projection d'un ou deux fonds de réservoirs. Toutefois, des morceaux de virole ont également été projetés lors de certains essais.

Le nombre, la taille et la forme des fragments est donc assez variable et imprévisible. Holden (Holden, 1988) donne une classification simple des types de fragments formés en fonction du nombre de calottes désolidarisées et du nombre de fissures circonférentielles (Figure 5). Cette classification est issue d'une étude américaine plus ancienne (AAR, 1972).

Nombres de calottes désolidarisées

		0	1	2
Nombre de fissures circonférentielles	2	A-1 	B-1 	C-1
		B-2 	C-2 	
	1	D-1 	E-1 	F-1
		D-2 	E-2 	F-2
		D-3 	E-3 	F-2
	0	G-1 	NOT APPLICABLE	
G-2 		NOT APPLICABLE		
G-3 		NOT APPLICABLE		

Figure 5 : Classification des modes de rupture, d'après (Holden, 1988)

D'une manière générale, on peut retenir qu'un BLEVE de réservoir cylindrique engendre de un à quatre fragments principaux : des fonds de réservoir, éventuellement solidaires de tout ou partie de la virole, et des morceaux de virole aplatie. Tous les fragments ne sont pas nécessairement projetés dans l'environnement.

1.2 ANGLE D'ÉMISSION

L'angle d'émission des fragments par rapport à l'axe du réservoir est assez peu prédictible. Une analyse statistique sur 18 BLEVE accidentels ayant produit 55 fragments (Holden, 1988) montre qu'environ 60% des fragments sont projetés dans un secteur angulaire de 60° autour de l'axe du réservoir, et que le restant est projeté plutôt de manière perpendiculaire (Figure 6). Birk (Birk, 1997) note également qu'environ deux tiers des fragments sont projetés dans l'axe du réservoir, et un tiers perpendiculairement.

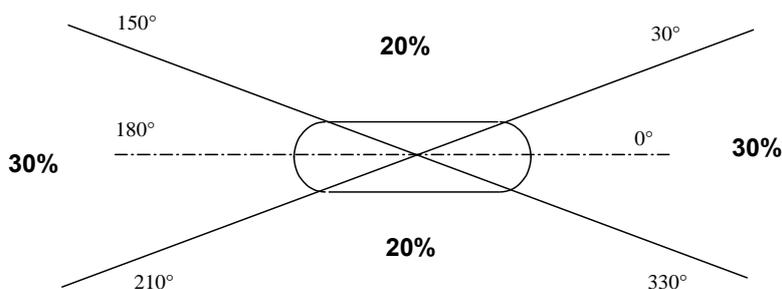


Figure 6 : Répartition des projections de fragment autour de l'axe du réservoir d'après Holden, 1988

Une analyse plus poussée montre que la direction de projection des fragments dépend aussi de leur nature. Les fonds de réservoirs sont projetés préférentiellement selon l'axe du réservoir, tandis que perpendiculairement on retrouve surtout des morceaux de virole (Holden, 1988).

Cependant, il ne s'agit que d'une répartition statistique. Le retour d'expérience sur les accidents comme sur les essais suggère que des fragments de grande taille peuvent être projetés dans toutes les directions.

1.3 TRAJECTOIRE ET DISTANCE DE PROJECTION

Une analyse statistique montre qu'en moyenne, 70 à 80% des fragments sont projetés dans un rayon de 200 m (Figure 7).

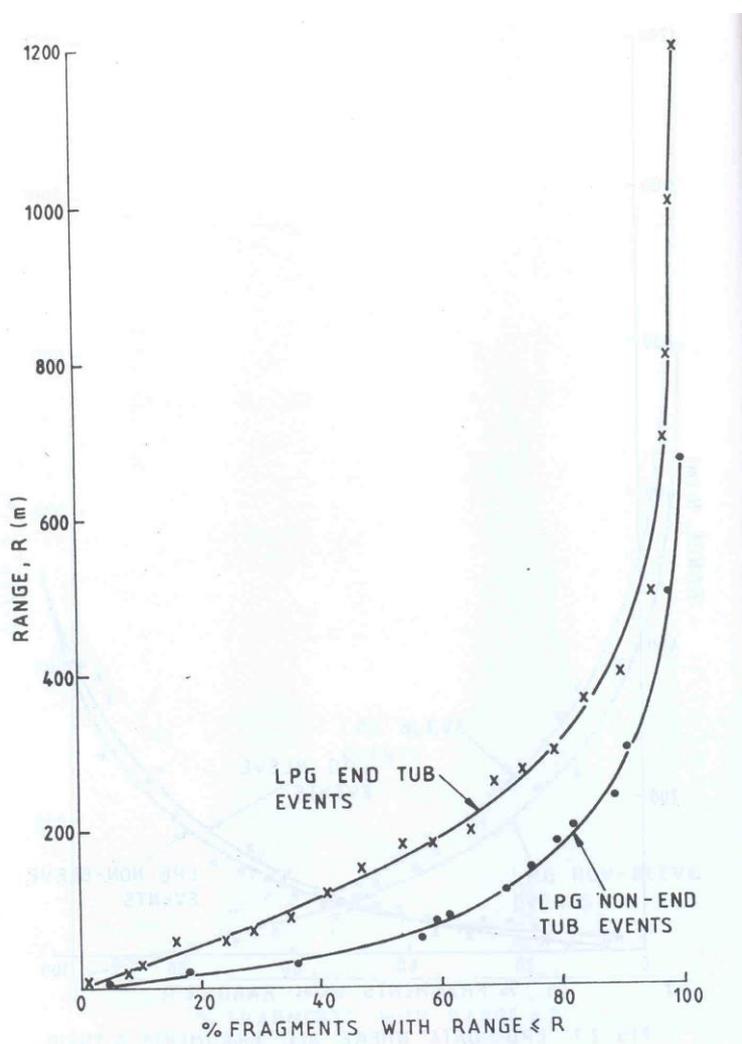


Figure 7 : Répartition des fragments en fonction de leur distance de projection
Analyse statistique de 18 BLEVE ayant produit 55 fragments,
d'après (Holden, 1988)

Cependant, lors de certains accidents, des fragments massifs ont été projetés à des distances considérables, de l'ordre du kilomètre. C'est le cas, par exemple, de l'accident de Belleville (Canada, février 2003), au cours duquel, suite au déraillement d'un train (BST, 2004), deux citernes ont été projetées à environ 500 et 1000 m (Figure 8). Ces fragments sont généralement des demi-réservoirs ou des réservoirs presque entiers, expulsés avec un volume de liquide important dont la vaporisation entretient la propagation pendant le début de la phase ascendante de la trajectoire, à la manière d'une fusée.



Figure 8 : Vue aérienne de deux citernes ferroviaires projetées par un BLEVE Belleville, Canada, février 2003

Les fragments suivent généralement une trajectoire basse, et peuvent quelquefois rebondir à l'impact sur le sol (Holden, 1988). Cependant, des morceaux de virole ou des pièces plus petites peuvent être projetés à grande hauteur, comme lors de l'essai du B.A.M. (un fragment de 210 kg a atteint une hauteur de 200 m).

3. RÉFÉRENCES

A.A.R., 1972, *Summary of ruptures tank cars involved in past accidents, Railroad Tank Car Safety Research and Test Project*, Report n°RA-01-2-7, Association of American Railroads Report n° AAR R-130, 1972

Birk A.M., 1997, *First Tests of Propane Tanks to study BLEVEs and other Thermal Ruptures: Detailed Analysis of Medium Scale Test Results*, Report for Transport Canada, Dpt of Mechanical Engineering, Queen's University, Kingston, Ontario

BST, 2004, *Déraillement et collision du train n°410-16 du Chemin de Fer Canadien Pacifique au point milliaire 80,5, subdivision Belleville à Melrose, Ontario, le 21 février 200*, Rapport d'enquête ferroviaire R03T0080, Bureau de la Sécurité des Transports du Canada

Heudier L. 2004, *Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs, Les éclatements de réservoirs : Phénoménologie et modélisation des effets*, rapport INERIS-DRA-2004-46055

Holden P.L., 1988, *Assessment of missile hazards: review of incident experience relevant to major hazard plant*, SRD report R477, United Kingdom Atomic Energy Authority, novembre 1988

Ludwig & Balke, 1999, *Untersuchung der Versagensgrenzen eines mit Flüssiggas gefüllten Eisenbahnkesselwagens bei Unterfeuerung*, Rapport B.A.M. 3215, Berlin, Septembre 1999

Ludwig & Heller, 1999, *Brandversuch mit einem Propankesselwagen*, Rapport d'essai B.A.M. III.2/9907, Berlin, Avril 1999

Proust Ch., 2000, *Prévoir les effets des explosions de poussières sur l'environnement : EFFEX, un outil de simulation*, Rapport INERIS-DRA-CPr/CPr-00-22751, téléchargeable sur www.ineris.fr.

ANNEXE C :
Présentation du modèle T.R.C.

Il s'agit de discuter les principales hypothèses de la modélisation du phénomène de BLEVE proposée par le TRC, en faisant ressortir ses limites.

On rappelle en premier lieu que le modèle TRC est basé sur les résultats d'essais conduits par British Gas et qu'il n'est applicable qu'à des réservoirs de butane, propane et propylène.

L'observation de ces essais a permis de distinguer cinq phases lors du développement d'un BLEVE. Bien évidemment il s'agit d'une simplification, ces phases étant susceptibles de se recouper.

Phase 1 : Le réservoir se rompt en éjectant des fragments tandis que le ciel gazeux du réservoir se détend à la pression atmosphérique.

Phase 2 : Une fraction du liquide se vaporise quasi-instantanément du fait de la dépressurisation, tandis que l'autre partie du liquide est éjectée sous la forme de gouttelettes. Durant cette phase il n'y a pas encore de mélange du produit avec l'air ambiant mais la turbulence au sein du nuage est importante.

Phase 3 : Durant cette phase, le nuage continue de s'agrandir en entraînant de l'air par transport turbulent.

Phase 4 : Le nuage s'enflamme en formant une boule de feu par combustion de la fraction de produit qui s'est vaporisée.

Phase 5 : La boule de feu est alimentée par la combustion des gouttelettes tandis que la boule de feu s'élève avant de s'éteindre.

Description de l'évolution du nuage de vapeur (phases 1 et 2)

Cette partie de la modélisation a pour objet de caractériser le développement du nuage de vapeur et notamment d'évaluer sa taille en fonction des conditions initiales de stockage du produit.

Hypothèse 1 : Pendant la phase de vaporisation du liquide, avant que le nuage n'entraîne trop d'air, d'après l'observation des résultats expérimentaux, l'évolution du rayon du nuage est décrite par une équation de la forme :

$$R = U_0 \cdot t_p \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{t_p}\right) \right)$$

Dans cette expression :

- **R est la dimension principale du nuage (m),**
- **U₀ est une vitesse initiale caractéristique d'expansion du nuage (m/s),**

- t_p est un temps caractéristique de la durée d'expansion du nuage (s),
- t est le temps (s)

L'Hypothèse 1 est issue, d'après SHIELD, de l'observation des résultats expérimentaux.

On remarquera cependant que

$\frac{dR}{dt} = +U_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{t_p}\right) \rightarrow U_0$ quand $t \rightarrow 0$, c'est à dire que U_0 est bien une vitesse initiale caractéristique d'expansion du nuage de vapeur.

Au fur et à mesure que le temps s'écoule, au cours de la phase 3 d'entraînement d'air, SHIELD observe que la vitesse d'expansion radiale du nuage décroît rapidement.

Le rayon du nuage n'est plus alors décrit par une loi en exponentielle mais serait proportionnel à $t^{1/2}$ (voir figure 3 de l'article de SHIELD).

D'après SHIELD, l'observation des résultats expérimentaux montre qu'il existe un rayon caractéristique des tourbillons dans le nuage.

A partir du moment où l'expansion du nuage décroît brutalement, SHIELD remarque ce qui constitue l'hypothèse suivante :

Hypothèse 2: La dimension caractéristique des tourbillons dans le nuage vers la fin de sa phase d'expansion et d'entraînement d'air est de l'ordre de grandeur du rayon du nuage immédiatement après la phase de vaporisation quasi-instantanée du liquide (ou "flash adiabatique").

Cette seconde hypothèse est également issue de l'observation des résultats expérimentaux (voir figure 3 de son article).

C'est une hypothèse dont la validité peut ne pas s'étendre à des phénomènes de BLEVE à plus grande échelle mais qui est, sauf à réaliser des essais à grande échelle, non vérifiable directement, hormis, et en partie seulement, par des tests de cohérence physique de la modélisation globale du phénomène.

Pour évaluer cette dimension caractéristique, SHIELD propose l'expression :

$$L^3 = \alpha\beta M / \rho_{vo}$$

- où
- M est la masse initiale de produit dans le réservoir (kg),
 - α est la fraction initiale de liquide dans le réservoir à la rupture,
 - β est la fraction de liquide qui se vaporise instantanément lors de sa détente à la pression atmosphérique (calcul isenthalpique, voir ci-après),
 - ρ_{vo} est la densité de vapeur saturante du produit à la pression atmosphérique (kg/m^3).

On note que cette équation revient à considérer que la fraction de liquide vaporisé quasi-instantanément lors de sa dépressurisation, dont le volume massique à la pression atmosphérique et aux conditions de saturation est $\frac{1}{\rho_{vo}}$, occupe grossièrement un volume égal à celui d'un cube de côté L.

On rappelle que β est la fraction de liquide qui se vaporise instantanément lors de sa détente à la pression atmosphérique : la détente subie par le produit entraîne sa vaporisation instantanée partielle (phénomène de "flash adiabatique"). Lors de cette phase, l'apport de chaleur par le milieu extérieur est négligeable, la vaporisation se produit au détriment de l'enthalpie disponible dans la phase liquide. La température du système tend vers la température d'ébullition du liquide à la pression atmosphérique. Pour des GPL, cette température est très inférieure à la température ambiante couramment considérée. Il convient encore de préciser que cette vaporisation contribue largement au fractionnement du liquide rejeté et à la formation d'aérosols (dont une dimension caractéristique sera évaluée plus loin). Le liquide rejeté se fractionne également par des effets mécaniques. En première approximation, pour estimer β , on peut faire un bilan enthalpique global sur le système : le liquide, initialement à la température T_0 , se vaporise partiellement et donne un mélange de titre massique en vapeur x et de température T .

En négligeant la variation de pression, on peut écrire :

$$h_L(T_0) = x \cdot h_V(T) + (1 - x) \cdot h_L(T) = -x \cdot \Delta H_{vap} + h_L(T)$$

où :

- h_V est l'enthalpie massique de la vapeur,
- h_L est l'enthalpie massique du liquide, donnée par $h_L = \int_{T_0}^T C_{pL} \cdot dT + h_L(T_0)$
- avec C_{pL} , chaleur spécifique du liquide,
- ΔH_{vap} est l'enthalpie de vaporisation,
- T_0 est la température de service.

d'où, pour une fraction x inférieure ou égale à 1 : $x = \frac{C_{p1} \cdot (T_{éb} - T_0)}{\Delta H_{vap}}$

où C_{p1} est la chaleur spécifique moyenne du liquide entre $T_{éb}$ et T_0 .

En d'autres termes, on considère que la chaleur sensible contenue initialement dans le liquide est la seule source de chaleur disponible pour la vaporisation. Ainsi, plus le liquide arrivant à l'orifice est surchauffé (c'est-à-dire plus la température de service est supérieure à la température d'ébullition du liquide à la pression atmosphérique) plus la quantité qui se vaporise instantanément est importante.

Hypothèse 3 : Les tourbillons formés dans le nuage grossissent au fur et à mesure de l'expansion du nuage, leur nombre restant constant (voir figure 3 de l'article de SHIELD).

Cette hypothèse est aussi basée sur l'observation des résultats expérimentaux. Elle appelle donc les mêmes remarques que celles associées à l'Hypothèse 2 ci-avant.

L'Hypothèse 3 implique que s'il existe N tourbillons de dimension caractéristique L dans le nuage à la fin de sa phase d'expansion, on aura, compte tenu de l'Hypothèse 2 précédente (selon laquelle la dimension caractéristique des tourbillons dans le nuage vers la fin de sa phase d'expansion et d'entraînement d'air est de l'ordre de grandeur du rayon du nuage immédiatement après la phase de vaporisation quasi-instantanée du liquide, N tourbillons de dimension caractéristique $\frac{L}{N}$ immédiatement après la phase de vaporisation instantanée du nuage.

On remarque qu'en considérant une longueur L caractéristique fixée, il y a lieu d'escompter de calculer une valeur de N non entière. On conçoit en effet que dans la réalité on n'aura pas un nombre non entier de tourbillons d'une taille fixée, mais plutôt un nombre de tourbillons fixé qui n'auront toutefois pas tous la même taille. Cette hypothèse et les développements suivants constituent des hypothèses fortes, c'est-à-dire, « dimensionnantes » pour la robustesse du modèle.

SHIELD rapporte la loi proposée par TENNEKES et LUMLEY selon laquelle pour un jet turbulent, la viscosité apparente des tourbillons ν_T est proportionnelle à l'écart type des fluctuations de vitesse d'un tourbillon (u'_ξ) et de sa dimension caractéristique ξ , soit :

$$\nu_T \propto u'_\xi \cdot \xi$$

Hypothèse 4 : La loi selon laquelle, pour un jet turbulent, la viscosité apparente des tourbillons est proportionnelle à l'écart type des fluctuations de vitesse d'un tourbillon et de sa dimension caractéristique est supposée valable dans la phase d'expansion consécutive à un BLEVE.

Aux tourbillons de longueur caractéristique L est associée une densité d'énergie cinétique k_L . A cette densité d'énergie cinétique, SHIELD fait correspondre une vitesse turbulente u_L , telle que, par définition $u_L^2 = k_L$.

SHIELD introduit alors l'hypothèse suivante :

Hypothèse 5 : La turbulence du nuage est isotrope.

Soit u , v et w les vitesses instantanées d'un tourbillon dans trois directions orthogonales, il est d'usage en mécanique de la turbulence d'exprimer la vitesse instantanée dans ces directions comme étant la somme de la valeur moyenne et d'une composante fluctuante :

$$\begin{aligned} u &= \bar{u} + u' \\ v &= \bar{v} + v' \\ w &= \bar{w} + w' \end{aligned}$$

On a donc, pour une turbulence isotrope ($u'=v'=w'$) :

$$k_L = \left(\frac{u'^2}{2} \right) + \left(\frac{v'^2}{2} \right) + \left(\frac{w'^2}{2} \right) = \frac{3u'^2}{2}$$

Or $k_L = u_L^2$ d'où $u' = \sqrt{\frac{2}{3}} u_L$: u' est proportionnel à u_L .

Compte tenu des hypothèses précédentes :

$$u_L \cdot L = u_{L/N} \cdot \frac{L}{N}$$

D'où

$$u_{L/N} = N \cdot u_L$$

Au début de la phase de vaporisation du liquide la vitesse radiale d'expansion du nuage est égale à U_0 .

A la fin de cette même phase de vaporisation du liquide, on aura N tourbillons de longueur caractéristique $\frac{L}{N}$ auxquels sera associée une densité d'énergie cinétique $(u_{L/N})^2$

SHIELD émet les deux hypothèses suivantes :

Hypothèse 6 : La densité d'énergie cinétique acquise par les tourbillons au cours de la phase de vaporisation est produite au détriment de l'expansion radiale du nuage.

Hypothèse 7 : Une particule fluide appartenant à un tourbillon a une vitesse voisine de la vitesse d'expansion du nuage : les fluctuations locales de vitesses sont négligeables devant la vitesse d'expansion du nuage.

D'après les deux hypothèses précédentes, à la fin de la phase d'expansion du nuage, lorsque ce dernier aura atteint la dimension caractéristique L , les tourbillons auront acquis une vitesse de l'ordre de $u_{L/N}$ au détriment de la vitesse radiale d'expansion :

$$U(L) = U_0 - N \cdot u_L$$

Les équations (10), (11) et (12) de l'article de SHIELD méritent quant à elles l'explication détaillée ci-dessous :

Par définition, on a

$$U(L) = \left. \frac{dR}{dt} \right|_L = \left. \frac{d}{dt} \left(U_0 \cdot t_p \left(1 - e^{-t/t_p} \right) \right) \right|_L, \text{ soit encore}$$

$$U(L) = U_0 \cdot e^{-t/t_p}$$

Or, en $R=L$, on peut écrire :

$$L = U_0 \cdot t_p \cdot \left(1 - e^{-t/t_p} \right)$$

$$L = U_0 \cdot t_p - U_0 \cdot t_p \cdot e^{-t/t_p}$$

$$L = U_0 \cdot t_p - U_0 \cdot t_p \cdot \frac{U(L)}{U_0}$$

$$L = U_0 \cdot t_p - t_p \cdot (U_0 - N \cdot u_L)$$

d'où, en vertu des Hypothèse 6 et Hypothèse 7, l'équation suivante :

$$t_p = \frac{L}{N \cdot u_L}$$

Par la suite, on applique la même démarche en $R=N \cdot L$ en utilisant l'hypothèse qu'en $R=N \cdot L$, U est très inférieur à U_0 .

Dès lors, **mathématiquement**, on peut écrire, en employant l'équation (1) de l'article de SHIELD :

$$U = \frac{dR}{dt} = U_0 \cdot e^{-t/t_p}$$

$$R = N \cdot L = U_0 \cdot t_p - U_0 \cdot t_p \cdot e^{-t/t_p} = t_p \cdot (U_0 - U) \approx t_p \cdot U_0 \text{ puisque } U \ll U_0$$

avec l'équation (10), on a donc $N \cdot L = \frac{L}{N \cdot u_L} \cdot U_0$

d'où $U_0 = N^2 \cdot u_L$

Des équations (11) et (12) on tire alors aisément l'équation (11) : $U_0 \cdot t_p = N \cdot L$

L'hypothèse $U(R=NL) \ll U_0$ n'appelle pas de commentaire particulier dans la mesure où, d'après les observations des essais -et cela se conçoit effectivement- la vitesse d'expansion du nuage décroît très rapidement lorsque le nuage a entraîné suffisamment d'air.

Il n'en va pas de même en ce qui concerne l'application de l'équation (1) qui décrit l'évolution du rayon du nuage en fonction du temps $R = U_0 \cdot t_p \left(1 - e^{-t/t_p} \right)$, puisque,

en toute rigueur, cette équation n'est valable que tant que R reste inférieur ou de l'ordre de L.

Néanmoins, dans la mesure où la vitesse d'expansion du nuage décroît très rapidement au cours de la phase 3 de la vitesse d'expansion du nuage, les rayons calculés par les équations (1) et (2) restent, en toute logique, d'un même ordre de grandeur.

Cette dernière remarque est d'autant plus relative que lors des essais de BLEVE de réservoirs cylindres de GPL conduit par British Gas, le nuage n'était pas parfaitement hémisphérique et que l'on est donc bien conduit à raisonner en ordre de grandeur.

C'est ainsi que l'emploi de l'équation (2) en $R = N \cdot L$ peut à priori être envisagé en vue d'estimer un temps caractéristique d'expansion du nuage.

Le TRC a communiqué à l'INERIS une comparaison entre le temps caractéristique de développement du nuage dans les directions verticale et horizontale, par rapport à la valeur calculée par emploi du modèle.

Essais	Valeurs expérimentales de tp (s)		Valeurs calculées de tp (s)
	Direction verticale	Direction horizontale	
1	0,22	0,07	0,1
2	0,22	Observation impossible	0,07
3	0,14	Développement de la boule de feu à la fin de l'expansion du nuage	0,08
4	0,22	0,07	0,09
5	0,13	0,07	0,09

Les résultats présentés dans ce tableau montrent que les ordres de grandeurs des valeurs de temps calculées correspondent bien aux valeurs de temps observées.

La remarque affichée pour l'essai n°2, selon laquelle le développement de la boule de feu a débuté avant la fin de la phase d'expansion du nuage, rappelle qu'il s'agit effectivement d'un modèle permettant une représentation simplifiée de la réalité et qu'il convient bien, faute de mieux, de raisonner en ordre de grandeur.

Description de la phase d'entraînement de l'air (phase 3)

Le travail de détente E_w de la fraction de liquide qui se vaporise quasi-instantanément à l'atmosphère est approximée par :

$$E_w = \alpha \cdot \beta \cdot \frac{M \cdot P_0}{\rho_{v0}}$$

P_0 est la pression atmosphérique, et ρ_{v0} est la masse volumique de la phase vapeur aux conditions de saturation à P_0 .

Il faut préciser ici que cette égalité n'est qu'une approximation valable pour des produits pour lesquels la masse volumique de la vapeur saturée dépend relativement peu de la pression, donc, d'après le TRC, les GPL. Cette expression mérite ainsi une explication puisqu'elle ne fait pas apparaître explicitement la pression du stockage à la rupture. Elle est obtenue en écrivant que l'énergie libérée par la détente à la pression atmosphérique est, par définition :

$$u_f - u_i = h_f - h_i - \int_i^f d(Pv)$$

où les indices i et f se réfèrent aux états initiaux et finaux, définis respectivement pour le liquide stocké à la pression P et à l'état dans lequel une partie du liquide est vaporisé et détendu à la pression atmosphérique P_0 .

u est énergie interne par unité de masse et v est le volume massique.

Si l'on calcule l'intégrale sur un chemin de vaporisation à pression constante puis la détente isentropique de la phase vapeur assimilée à un gaz parfait (pour lequel $P \cdot V^\gamma = \text{constante}$), de P à P_0 , on peut écrire :

$$\int_i^f d(Pv) = \int_{\text{liquide} \rightarrow \text{gaz}} P d(Pv) + \int_{\text{gaz}}^{P_0} d(Pv)$$

or $\int_{\text{liquide} \rightarrow \text{gaz}} P d(Pv) \approx P \cdot (v_{\text{vapeur}} - v_{\text{liquide}}) \approx P \cdot v_{\text{vapeur}}$

et $-\int_{\text{gaz}}^{P_0} d(Pv) \approx P_0 \cdot v_0 - P \cdot v$ avec $P_0 \cdot v_0^\gamma = P \cdot v^\gamma$

d'où $u_f - u_i = h_f - h_i + P_0 \cdot v_0$

Dès lors il est possible d'étendre le raisonnement précédent à l'ensemble du liquide contenu dans le réservoir, pour autant que l'on puisse négliger la variation du volume massique avec la pression, ce qui est le cas des GPL :

Hypothèse 8 : Il est possible de négliger la variation du volume massique des GPL considérés avec la pression.

Alors, si l'on considère l'hypothèse suivante :

Hypothèse 9 : La vaporisation du liquide est isenthalpique

Alors $H_f = H_i$ (où H est l'enthalpie totale du système), on est bien conduit à l'équation (13).

Il ne faut pas déduire de cette équation que l'énergie libérée lors de la vaporisation quasi instantanée du liquide, de la pression à la rupture à la pression atmosphérique P_0 , ne dépend pas de la pression de rupture. On rappelle en effet le taux de flash β sera d'autant plus important que la pression la rupture sera élevée.

Il s'agit ensuite d'évaluer la quantité d'air entraînée dans la détente. Pour cela SHIELD fait l'hypothèse suivante :

Hypothèse 10 : L'énergie emportée par l'ordre de souffle due à la vaporisation quasi instantanée de la phase liquide est très inférieure à celle emmagasinée dans le nuage turbulent.

Cette hypothèse est posée par SHIELD d'après l'observation des résultats expérimentaux par exploitation des signaux de surpression enregistrés. Ce peut-être un cas assez particulier mais cette hypothèse permet de maximiser la boule de feu.

L'énergie cinétique turbulente d'un nuage composé d'une masse M de produit et M_a d'air entraîné formant des tourbillons de dimension caractéristique L, est $(M+M_a) \cdot u_L^2$.

D'après l'hypothèse précédente, on a :

$$\alpha \cdot \beta \cdot \frac{M \cdot P_0}{\rho_{v0}} = (M + M_a) / u_L^2$$

D'où, en utilisant l'équation de définition de la dimension caractéristique L :

$$M_a = L^3 \cdot \left[\left(\frac{P_0}{u_L^2} \right) - \left(\frac{\rho_{v0}}{\alpha \beta} \right) \right]$$

Dans le membre de droite de cette dernière équation toutes les grandeurs sont connues à l'exclusion de u_L .

En outre, cette expression montre que, dans certains cas, la quantité d'air entraînée peut être insuffisante pour une combustion complète du produit rejeté. Il conviendra donc de le vérifier dans chaque cas.

Il est clair qu'il n'est pas possible de fermer les équations de la turbulence de manière théorique, et SHIELD fait l'hypothèse empirique (« forte » également) suivante :

Hypothèse 11 : La vitesse turbulente u_L peut être exprimée par une corrélation expérimentale en fonction du nombre adimensionnel $\frac{\rho_a^2}{\rho_{vT} \cdot \rho_{v0}}$, du taux de remplissage α et de la fraction vaporisée instantanément β :

$$u_L = 39,85 \cdot \left(\frac{\rho_a^2}{\rho_{vT} \cdot \rho_{v0}} \right)^{1/9} \cdot (\alpha \cdot \beta)^{1/9}$$

où ρ_{vT} est la densité de vapeur à pression et température ambiante (kg/m^3) et ρ_a est la densité de l'air aux conditions ambiante (kg/m^3).

La température T du mélange formé par le produit relâché et l'air entraîné est donnée par :

$$M_a \cdot C_{pa} \cdot (T_a - T) = \alpha \cdot \beta \cdot M \cdot C_{pv} \cdot (T - T_o)$$

où C_{pa} est la capacité calorifique à pression constante de l'air (J/kg.K),
 T_a est la température de l'air (K),
 C_{pv} est la capacité calorifique à pression constante de la vapeur (J/kg.K),
 T_o est la température de saturation de la vapeur à P_o (K).

Le volume total du nuage, V_c , est alors de l'ordre de :

$$V_c = V_a + L^3 + \alpha \cdot (1 - \beta) \cdot M / \rho_{10}$$

où ρ_{10} est la densité du liquide à la pression ambiante (kg/m³).

Si l'on assimile le nuage à une sphère de rayon N.L (voir Hypothèse 3), alors on peut écrire :

$$\frac{4 \cdot \pi}{3} \cdot N^3 \cdot L^3 = V_a + L^3 + \frac{\alpha \cdot (1 - \beta) \cdot M}{\rho_{10}}$$

D'où :

$$N = \left[\frac{P_0}{\frac{4 \cdot \pi}{3} \cdot \rho_a \cdot u_L^2} - \frac{\rho_{v0}}{\frac{4 \cdot \pi}{3} \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \rho_a} + \frac{1}{\frac{4 \cdot \pi}{3}} + \frac{(1 - \beta) \cdot \rho_{v0}}{\frac{4 \cdot \pi}{3} \cdot \beta \cdot \rho_{10}} \right]^{1/3}$$

Cette dernière équation relie N à u_L, ce qui permet notamment de calculer la masse d'air entraînée et le volume du nuage formé.

Description de la boule de feu (phases 4 et 5)

Hypothèse 12 : Alors que la boule de feu se développe (phase 4), seule la fraction de liquide vaporisée lors de sa détente à la pression atmosphérique s'enflamme.

On a alors, en négligeant le rayonnement thermique de la boule lors de son expansion :

$$\alpha \cdot \beta \cdot M \cdot h_c = (\alpha \cdot \beta \cdot M \cdot c_{pv} + M_a \cdot C_{pa}) \cdot (T_c - T)$$

où h_c est le pouvoir calorifique supérieur du produit (J/kg),

T_c est la température moyenne de la boule de feu à sa taille maximale (K).

On précise que l'hypothèse qui consiste à négliger le rayonnement de la boule de feu est vérifiée a posteriori : l'énergie dégagée par la combustion de la phase gazeuse sert principalement à échauffer les gouttelettes et l'air entraîné.

Hypothèse 13 : La boule de feu formée est assimilée à un corps noir.

L'INERIS souligne que cette hypothèse a un caractère majorant dans la mesure où la boule de feu comportera des zones plus sombres dues notamment à la présence de suies.

L'émissivité SEP peut alors être évaluée par :

$$SEP = \sigma \cdot T_c^4 \quad (\text{kW/m}^2) \quad (26)$$

où σ est la constante de Boltzmann.

On en déduit la température T_c de la boule de feu :

$$T_c = \frac{hc}{C_{pv} + C_{pa} \cdot \left(\frac{P_0}{\rho_{v0} \cdot u_L^2 - \frac{1}{\alpha \cdot \beta}} \right)} + T$$

Hypothèse 14 : Les gaz composants la boule de feu se comportent comme des gaz parfaits.

Cette hypothèse, classiquement effectuée faute de mieux, n'appelle pas de commentaire particulier.

Le volume de la boule de feu peut être exprimé par :

$$V_f = V_c \cdot f_1 \cdot (T_c/T_0)$$

où f_1 est un coefficient présentant le rapport de volumes des produits de combustion au produit consommés, à température constante.

On notera, que si l'on assimile la boule de feu à une sphère de diamètre D_f , D_f est proportionnel à $(\alpha\beta)^{5/27} M^{1/3}$ et **ne dépend donc pas de u_L** .

SHIELD a développé son modèle en vue de tenir compte de l'évolution, au cours du temps, de l'émissivité de la boule de feu formée.

SHIELD note ainsi que la durée de vie de la boule de feu est fixée par la durée de combustion des gouttelettes.

En l'absence de données éprouvées, SHIELD suggère ainsi d'évaluer une taille de gouttes représentative des gouttes les plus grosses susceptibles d'être formées. Ce sont en effet les gouttes de diamètres les plus importants qui brûlent le plus longtemps.

En définitive, pour les produits qu'il considère, SHIELD retient l'hypothèse semi-empirique suivante :

Hypothèse 15 : Le diamètre des gouttes formées D est proportionnel à :

$$\left(\frac{\sigma}{\rho}\right)^{0,6} \cdot \varepsilon^{0,4}$$

où ε est le taux de dissipation d'énergie cinétique par unité de masse,

$$\text{avec } \varepsilon = \frac{u_L^3}{L} \quad (\text{m}^2/\text{s}^3)$$

Cette hypothèse est retenue d'après des considérations qualitatives sur le nombre de WEBER critique (conformément à LEFEVRE), employées relativement classiquement pour des calculs de formation d'aérosols en dispersion atmosphérique. C'est un a priori, difficile à prouver.

En définitive, d'après les résultats expérimentaux obtenus, SHIELD retient l'expression suivante :

Hypothèse 16 : Un diamètre caractéristique des gouttelettes peut être évalué par

$$D = 2,8 \cdot \alpha^{2/15} \cdot \beta^{1/6} \cdot \left(\frac{\sigma}{\rho_{VO}}\right)^{0,6} \cdot (\beta \cdot N^3 \cdot \varepsilon)^{-0,4} \quad (\text{m})$$

L'INERIS souligne qu'en réalité il existe une distribution de taille des gouttes formée. L'hypothèse précédente n'est donc à considérer que faute de mieux.

Pour la durée t_{comb} de combustion d'une gouttelette de diamètre D, SHIELD retient la corrélation proposée par LEFEVRE.

En pratique, la variation de température, au cours du temps, de la boule de feu, n'est pas calculable. SHIELD retient donc en définitive une approche semi-empirique comportant les étapes suivantes :

- La phase d'inflammation du nuage et de développement de la boule de feu jusqu'à son diamètre maximal, ou phase d'expansion.
- La phase de combustion de la boule de feu.
- La phase d'extinction.

Pour caractériser chacune de ces phases, SHIELD table sur les hypothèses semi-empiriques suivantes :

Phase d'expansion :

Hypothèse 17 : De l'inflammation à la création d'une boule de feu à son diamètre maximal, son rayon et son émissivité sont supposés croître linéairement avec le temps jusqu'à leur valeur maximale.

Phase de combustion :

Hypothèse 18 : La durée de vie de la boule de feu, de son inflammation au début de son extinction est égale à la durée de vie des gouttelettes.

Hypothèse 19 : Durant cette phase, la vitesse d'ascension de la boule de feu est constante, de l'ordre de $u'/2$.

Cette hypothèse est tirée des résultats expérimentaux et n'appelle, à ce titre, pas d'autres commentaires que ceux associées à l'Hypothèse 2.

L'absence d'accélération verticale ascendante notable s'explique dans la mesure où la boule de feu n'a pas le temps d'accélérer au cours de la durée de vie - relativement brève- du phénomène.

Hypothèse 20 : La boule de feu conserve une taille constante lors de son ascension.

Hypothèse 21 : La température de la boule de feu est supposée décroître linéairement entre sa valeur maximale et sa valeur en début d'extinction.

Hypothèse 22 : La température finale est supposée ne pas pouvoir être inférieure à 0,88 fois la température maximale.

Phase d'extinction :

Hypothèse 23 : L'extinction de la boule de feu est supposée complète lorsque les dernières gouttes qui se sont enflammées, alors que la boule de feu était à sa température maximale (fin de la phase d'expansion), sont consumées.

Hypothèse 24 : Lors de la phase d'extinction, le diamètre de la boule de feu est supposé décroître linéairement avec le temps.

Cette dernière hypothèse revient à considérer qu'au début de la phase d'extinction les gouttelettes qui se sont enflammées dès le début du phénomène sont alors consumées.

Hypothèse 25 : L'émission de la boule de feu est considérée, de manière prudente, constante.

Par comparaison avec les résultats expérimentaux de British Gas, cette hypothèse est majorante.

Hypothèse 26 : La boule de feu ne s'élève plus.

ANNEXE D

Confrontation des données d'essais et du retour d'expérience par rapport aux stratégies de modélisation

LES CONDITIONS D'APPARITION DES BLEVES

Les expériences de Birk (Birk, Cunnigham et al, 1991) avaient notamment pour but de clarifier les conditions d'apparition des BLEVES permettant de la sorte de faire évoluer l'image qu'on se fait de la phénoménologie.

Des réservoirs cylindriques horizontaux de propane de 300 et 375 litres de capacités, de pression de conception de 17 ou 21,5 bar et de 5 ou 6 mm d'épaisseur ont été soumis à des flux thermiques issus de combinaisons de feux de torches et de flaques.

Les résultats des 11 tests effectués sont reportés dans le tableau 4 ci-dessous :

Numéro des tests	Descriptions	Observations
2	<ul style="list-style-type: none"> réservoir de 300 l rempli à 80 % pression de tarage de la soupape et de conception du réservoir : 21,5 bar réservoir soumis à un feu de flaque 	<ul style="list-style-type: none"> le réservoir ne s'est pas rompu il s'est vidé rapidement via la soupape au cours de l'essai, une balle de fusil tirée sur le réservoir a pénétré les parois sans autre effet que la création d'une fuite supplémentaire
3	<ul style="list-style-type: none"> réservoir de 375 l rempli à 80 % pression de tarage de la soupape et de conception du réservoir : 17 bar réservoir soumis à un feu de torche feu de torche à la soupape dirigé vers le réservoir 	<ul style="list-style-type: none"> le réservoir ne s'est pas rompu il s'est vidé rapidement via la soupape le réservoir s'est bombé à une de ses extrémités
4	<ul style="list-style-type: none"> réservoir de 300 l rempli à 80 % pression de tarage de la soupape et de conception du réservoir : 21,5 bar réservoir soumis à un feu de torche feu de torche à la soupape dirigé vers le réservoir 	<ul style="list-style-type: none"> le réservoir ne s'est pas rompu il s'est vidé rapidement via la soupape
5	<ul style="list-style-type: none"> réservoir de 375 l rempli à 80 % pression de tarage de la soupape de conception du réservoir : 17 bar feu de torche dirigé vers la partie du réservoir en contact avec son ciel gazeux 	<ul style="list-style-type: none"> le réservoir s'est rompu sans BLEVE le réservoir gèle au-dessus du niveau de liquide
6	<ul style="list-style-type: none"> réservoir de 375 l rempli à 80 % pression de conception du réservoir : 17 bar pression de tarage de la soupape : 21,5 bar feu de torche et de flaque à une extrémité rainure de 2,5 mm de profondeur le long du haut du réservoir 	<ul style="list-style-type: none"> la soupape ne s'est pas ouverte BLEVE soudain du réservoir réservoir aplati au sol extrémité du réservoir projeté à 15 m
7	<ul style="list-style-type: none"> réservoir de 375 l rempli à 80 % pression de tarage de la soupape et de conception du réservoir : 21,5 bar exposition à un feu de torche 	<ul style="list-style-type: none"> le réservoir s'est rompu sans BLEVE le réservoir gèle au-dessus du niveau de liquide
8	<ul style="list-style-type: none"> réservoir de 375 l rempli à 80 % pression de tarage de la soupape et de conception du réservoir : 21,5 bar réservoir soumis à des feux de torche et de flaque 	<ul style="list-style-type: none"> fonctionnement cyclique de la soupape avant son blocage en position ouverte le réservoir est rompu alors qu'il ne contenait presque plus de liquide détente explosive du gaz large ouverture du réservoir
9	<ul style="list-style-type: none"> réservoir de 375 l rempli à 80 % pression de tarage de la soupape : 21,5 bar réservoir soumis à des feux de torche uniquement 	<ul style="list-style-type: none"> le réservoir s'est rompu sans BLEVE le réservoir gèle au-dessus du niveau de liquide
10	<ul style="list-style-type: none"> réservoir de 375 l rempli à 80 % 	<ul style="list-style-type: none"> rupture du réservoir sans BLEVE

	<ul style="list-style-type: none"> pression de conception du réservoir : 21,5 bar réservoir soumis à un feu de torche et un ½ feu de flaque (idem test 6 avec un réservoir plus résistant) 	<ul style="list-style-type: none"> large rejet produisant une boule de feu apparence du rejet suggérant une repressurisation du réservoir après la rupture
11	<ul style="list-style-type: none"> réservoir de 375 l rempli à 80 % pression de conception du réservoir : 21,5 bar feu de torche et ½ feu de flaque 	<ul style="list-style-type: none"> fonctionnement cyclique de la soupape BLEVE violent explosion, création d'une onde de choc « visible »
12	<ul style="list-style-type: none"> réservoir de 375 l rempli à 80 % pression de tarage de conception du réservoir : 21,5 bar feu de torche et ½ feu de flaque 	<ul style="list-style-type: none"> cycles de fonctionnement de la soupape BLEVE violent explosion, création d'une onde de choc soupape projetée à 225 m

Tableau D.1 : Synthèse des essais de BIRK

Il convient de noter d'emblée que les auteurs, dont le tableau D.1 synthétise les résultats, ont retenu le terme de BLEVE lorsque le phénomène était suffisamment violent pour aplatiser une partie non négligeable du réservoir au sol.

Le test n° 6, mettant en œuvre un réservoir volontairement fragilisé, se serait ainsi produit alors que la température du liquide était estimée, par référence à un autre test, à 37°C, soit à une température inférieure à la température limite de surchauffe du propane à la pression atmosphérique. Dans ce cas, la boule de feu observée était composée de deux parties, l'une s'élevant à partir du réservoir, l'autre restant au niveau du sol et étant probablement constituée, d'après les auteurs, de gouttelettes de propane. Tout le propane fut consommé en moins de quatre secondes, sans apparition de feu de flaque au sol.

Les auteurs remarquent qu'au cours de ce BLEVE, le réservoir s'est rompu en un seul temps. La température moyenne de la phase liquide étant inférieure à la température limite de surchauffe du propane à la pression atmosphérique (c'est à dire inférieure à la température pour laquelle, à la pression atmosphérique, le liquide ne peut pas rester en état de surchauffe), ils ont ainsi proposé d'appeler ce phénomène BLEVE « froid ». Ce type de BLEVE serait caractérisé par une rupture catastrophique du réservoir du fait d'une faiblesse mécanique.

Au cours des tests n° 11 et n° 12 les auteurs ont observé une succession différente des événements : au cours de ces tests la soupape fonctionna plusieurs fois (lors de la rupture, les réservoirs contenaient environ 75 % de liquide). Des enregistrements vidéo ont montré que la rupture se produisait en deux étapes.

Une brèche d'une vingtaine de centimètres de longueur s'est formée sur le dessus du réservoir, produisant un rejet diphasique. La chute de pression dans le réservoir a entraîné l'ébullition violente, puis, par voie de conséquence, une repressurisation du réservoir entraînant sa ruine totale (la pression interne a été enregistrée comme passant de 21 bar à la rupture initiale à 170 bar, mais les auteurs ne sont pas certains de la fiabilité des mesures). Les auteurs ont dénommé ce phénomène « BLEVE chaud » dans la mesure où la température interne à la rupture était supérieure à la température limite de surchauffe du propane à la pression atmosphérique.

Aucune mesure de surpression dans le voisinage du réservoir n'a pu être effectuée.

La boule de feu formée s'est élevée bien plus haut que celle apparue lors du test n° 6.

Voici les conclusions de Birk et de son équipe :

- Les BLEVEs seraient causés par des ruptures totales de réservoir. Une rupture totale peut se produire de trois manières : fissure spontanée due à une fragilisation du réservoir, vaporisation explosive déclenchée par la chute de pression d'un liquide à une température proche ou supérieure à sa température limite de surchauffe, montée du réservoir en pression et maintien de cette dernière à des valeurs significativement supérieures à la pression d'apparition de la fissure initiale.
- Les BLEVEs les plus violents sont observés lorsqu'un réservoir très résistant subit une rupture locale qui déclenche une vaporisation explosive. Cela suggère que la température limite de surchauffe soit approchée ou dépassée. Cette température limite de surchauffe est celle pour laquelle, à la pression atmosphérique, le liquide ne peut pas rester en état de surchauffe. BIRK a qualifié de "chaud" ce type de BLEVE et, par opposition, a nommé "BLEVE froids" les BLEVEs mettant en jeu un produit dont la température moyenne est inférieure à la température limite de surchauffe du produit à la pression atmosphérique.
- Les résultats des expérimentations suggèrent qu'à produit donné, des réservoirs munis de soupapes tarées à des pressions élevées, présentent un risque plus important d'engendrer des BLEVE « chauds ». Il serait ainsi possible d'éviter ce type de BLEVE en réduisant la pression d'ouverture des soupapes. Cette dernière mesure ne permettrait pas toutefois d'éliminer l'occurrence de BLEVE « froids », qui pourraient par contre être prévenus en s'assurant que des réservoirs trop peu résistants ne sont pas utilisés.
- Les caractéristiques des boules de feu dépendent beaucoup des conditions de rupture. Pour les BLEVE « froids », la boule de feu reste au niveau du sol alors qu'elle s'élève dans le cas de BLEVE « chauds ».
- Les résultats suggèrent que les effets d'un BLEVE sont d'autant plus réduits que le taux de remplissage du réservoir est faible, ce qui s'expliquerait par des raisons énergétiques.
- Les effets de pression et de projection de fragments diffèrent significativement entre les deux types de BLEVE « chauds » et « froids », notamment du fait de la différence de pression à laquelle le réservoir se rompt. Lors des tests effectués, la pression d'éclatement du réservoir peut ainsi avoir été plus de huit fois plus importante que la pression à laquelle la rupture initiale a eu lieu.

On rappelle, qu'en pratique la distinction entre ces deux types de BLEVEs est bien moins nette.

LES EFFETS THERMIQUES

Les essais J.I.V.E.

Dans le cadre du projet communautaire J.I.V.E (Hazards consequences of Jet fire Interaction with Vessels containing pressurised liquids, 1994/1995), le HSL (Health and Safety Laboratory) a exposé des réservoirs cylindriques horizontaux de

propane (volume de 4,546 m³ et pression de conception de 18,7 bar relatif) à des jets enflammés de propane d'un débit massique de l'ordre de 1,5 kg/s. Tous les réservoirs étaient équipés d'une soupape isolée thermiquement pendant les essais et tarée à 17,2 bar relatif.

Dans trois des quatre essais (tableau D.2), la soupape s'est ouverte jusqu'à la ruine du réservoir. Pour le réservoir rempli à 85 %, la soupape s'est ouverte et refermée deux fois avant de s'ouvrir de nouveau avant la ruine du réservoir. Dans tous les cas, le rejet de propane à la soupape s'est enflammé, formant un dard enflammé de 7 à 15 m de hauteur.

Taux de remplissage du réservoir (%)	Masse de propane (kg)	Temps d'ouverture de la soupape après le commencement du test (s)	Pression d'ouverture de la soupape (bar relatif)	Fonctionnement cyclique de la soupape
20	455	112	18,6	non
41	929	130	18,8	non
60	1 364	109	18,1	non
85	1 932	68	18,3	oui

Tableau D.2 : Conditions des tests et modes de fonctionnement des soupapes.

Tous les réservoirs se sont rompus dans les cinq minutes suivant l'exposition au feu de jet, pour des pressions de rupture variant de 16,5 à 24,4 bar relatif (Tableau D.3).

Taux de remplissage (%)	Temps à l'instant de la rupture (s)	Pression à la rupture (bar relatif)
20	250	16,5
41	286	21,3
60	17	18,6
85	254	24,4

Tableau D.3 : Temps de rupture et pression à la rupture en fonction du taux de remplissage du réservoir

A la rupture, les températures de paroi étaient comprises entre 704 et 870°C. Dans tous les cas, c'est sur la paroi en contact avec la phase gazeuse que la température la plus élevée a été enregistrée.

Les auteurs ont mesuré (tableau D.4) la masse de propane présente au moment de la rupture, la durée de vie de la boule de feu, sa hauteur maximale, sa profondeur -peut être à entendre au sens de son rayon-, son émittance moyenne, ainsi que sa surface. La signification des caractéristiques géométriques de la boule de feu (hauteur, profondeur et surface) n'est pas définie avec précision dans la référence analysée. De même les auteurs restent prudents en ce qui concerne les valeurs des émittances.

Taux de remplissage (%)	Masse de propane à la rupture (kg)	Durée de vie (s)	Hauteur (m)	Profondeur (m)	Emittance moyenne (kW/m ²)	Surface (m ²)
20	279	3	43	45	415	1 300
41	710	5	70	45	> 195	2 300
60	1 272	6,5	85	75	320	3 150
85	1 708	7	105	85	360	4 600

Tableau D.4 : Caractéristiques de la boule de feu en fonction du taux de remplissage du réservoir

Les auteurs notent que trois des quatre réservoirs se sont rompus sur leur longueur, au voisinage de leur sommet, puis de manière circulaire autour de leurs extrémités. Les réservoirs se sont ouverts en s'écrasant au sol et en éjectant leur contenu très rapidement. Sur le réservoir rempli à 60 %, une fissure d'environ un mètre de longueur s'est formée, puis le réservoir s'est ouvert circulairement au voisinage de son extrémité la plus proche. Les deux tiers de ce réservoir ont été projetés par effet fusée à 450 mètres tandis que l'autre morceau a été envoyé à environ 310 mètres dans la direction opposée. Il convient encore de préciser que lors de l'essai avec un taux de remplissage de 85 %, le réservoir fut arrimé à un bloc de béton de deux tonnes pour prévenir la projection de fragments importants. Ce dernier essai entraîna le bris de deux vitres situées à 1 km du réservoir.

Enfin, deux essais ont été réalisés, suivant des modalités semblables, sur des réservoirs remplis à 20 %, mais cette fois recouverts d'une couche d'isolant solide. Deux revêtements ont été étudiés : un revêtement de 40 mm d'épaisseur nominale à base de ciment et renforcé par un maillage métallique, un revêtement époxy de 13 mm d'épaisseur nominale renforcé par un maillage en fibre de verre.

Dans le test mettant en œuvre un réservoir muni d'un revêtement à base de ciment, la pression est restée stationnaire pendant 5 minutes puis s'est élevée à raison de 0,2 bar/minute jusqu'à l'ouverture de la soupape à 16 bar, environ 48 min après le commencement du test. La soupape s'est ouverte et refermée trois fois avant de rester légèrement ouverte. Lors de l'essai mettant en œuvre le revêtement époxy, la pression de vapeur a augmenté jusqu'à ce que la soupape s'ouvre, à 17,5 bar, 53 minutes après le début de l'exposition du réservoir au feu de jet. La pression a chuté alors jusqu'à 15,5 bar relatif.

La température de paroi du réservoir revêtu d'un revêtement à base de ciment atteignit 100°C après 16 minutes et est restée à cette température pendant 24 minutes, alors que l'eau que ce matériau contenait se vaporisait. La température de paroi a augmenté ensuite jusqu'à la valeur maximale de 233°C au moment où l'exposition au feu de jet a été arrêtée. La température a augmenté alors encore de 20°C. Pour le réservoir recouvert d'époxy, la température a atteint 251°C et s'est abaissée dès que le feu de jet s'est arrêté. Mis à part de fines fissures, le revêtement à base de ciment était intact. Le revêtement époxy, quant à lui, était pratiquement complètement carbonisé et comportait d'importantes fissures.

Les principales caractéristiques des boules de feu extraites de ces essais sont confrontées aux modèles sur les figures D.1, D.2 et D.3. Sauf peut-être à faible taux de remplissage ces modèles se comportent plutôt bien.

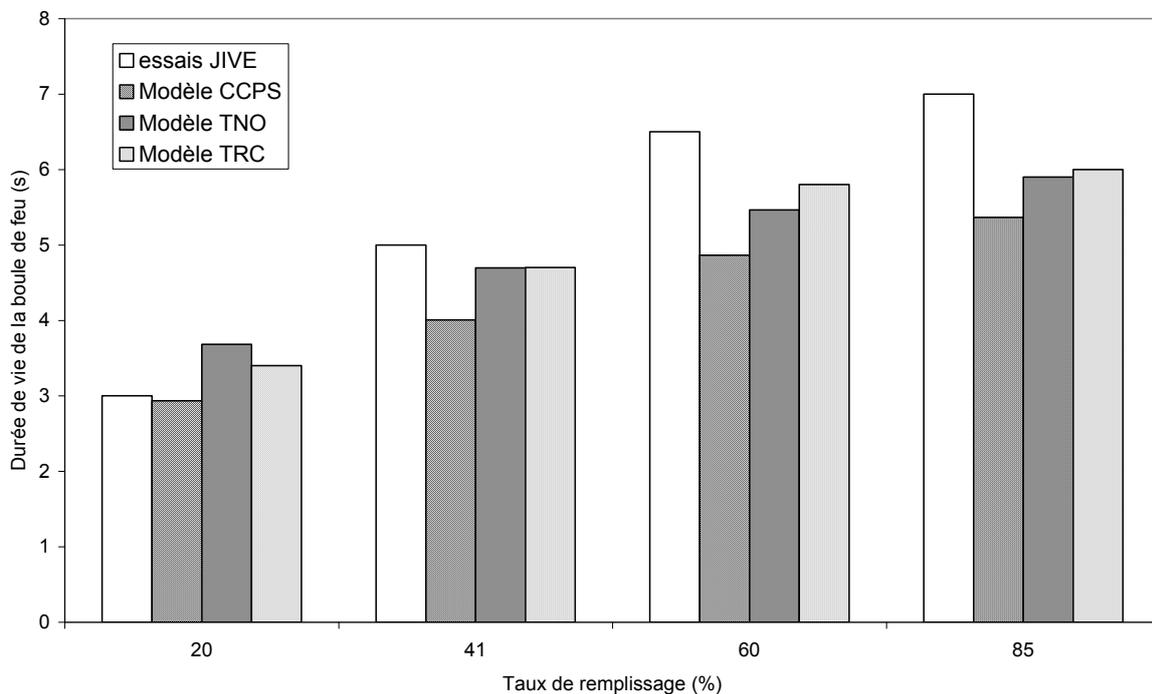


Figure D.1 : Durée de vie de la boule de feu en fonction du taux de remplissage (essais JIVE et prédictions à l'aide des différents modèles)

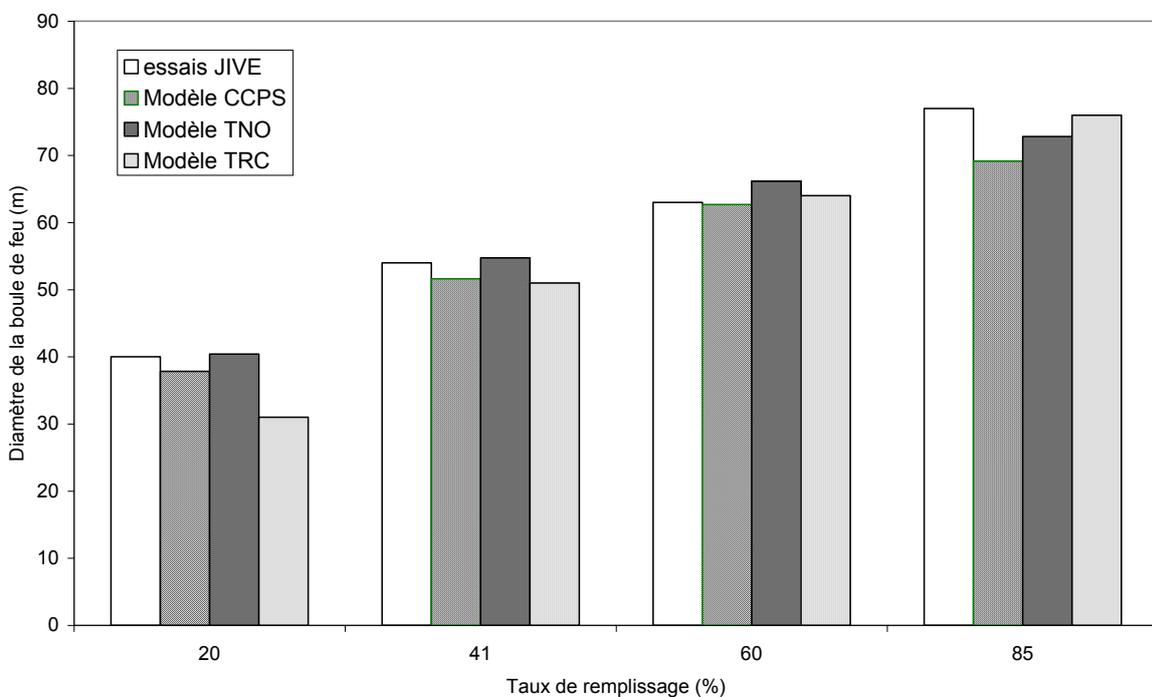


Figure D.2 : Diamètre de la boule de feu en fonction du taux de remplissage (essais JIVE et prédictions à l'aide des différents modèles)

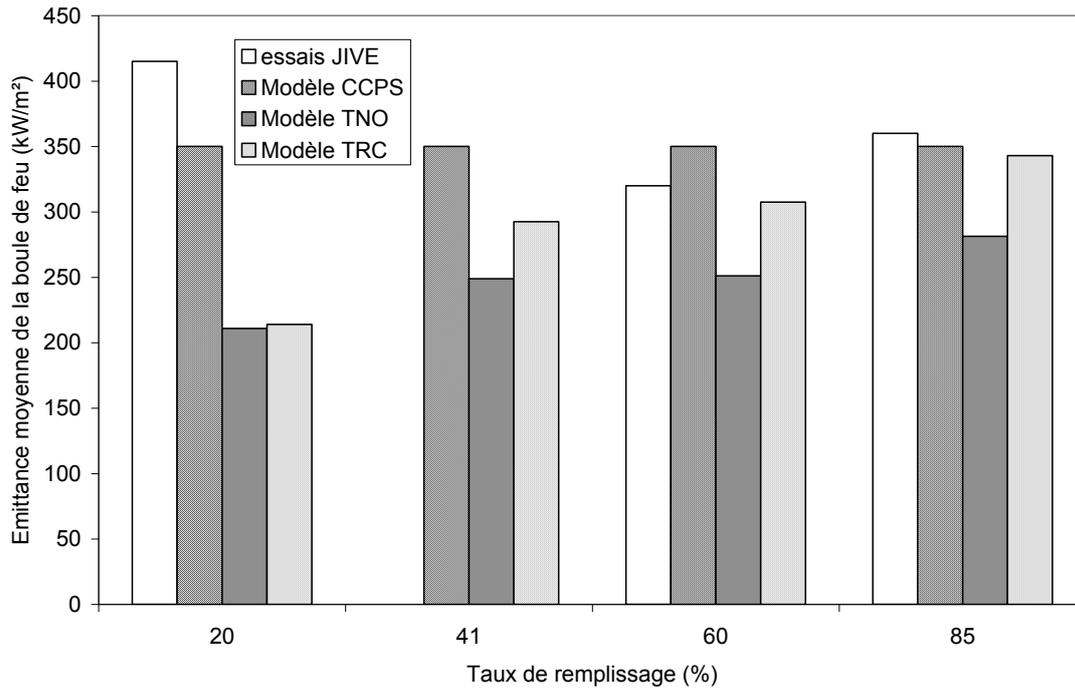


Figure D.3 : Emission moyenne de la boule de feu en fonction du taux de remplissage (essais JIVE et prédictions à l'aide des différents modèles)

Les essais British Gas

En 1990, Johnson et Pritchard (Johnson et Pritchard, 1995), ont réalisé une série de 5 tests de BLEVE de réservoirs cylindriques horizontaux de 5,659 m³ et 10,796 m³ de capacité remplis entre 40 et 80% par du propane ou du butane de qualité commerciale (tableau D.5). Pour ces essais, les réservoirs étaient isolés thermiquement et leur contenu était chauffé par des résistances électriques internes. La rupture était déclenchée par la détonation d'une charge explosive placée au sommet et au milieu du réservoir, et l'inflammation du produit rejeté était assurée par trois lances au propane. Ces essais ont servi à la mise au point du modèle TRC.

N° du test	Produit	Masse rejetée (tonnes)	Pression à la rupture (bar)	Volume du réservoir (m ³)	Taux de remplissage (%)	Objectif du test
1	Butane	2	15	5,659	77	Test de base pour un réservoir de G.P.L. et une pression de tarage typique
2	Butane	1	15	5,659	39	Etude de l'influence de la quantité rejetée
3	Butane	2	7,5	5,659	68	Etude de l'influence de la pression à la rupture
4	Butane	2	15	10,796	40	Etude de l'influence du rapport liquide/vapeur
5	Propane	2	15	5,659	80	Etude de l'influence du produit

Tableau D.5 : Conditions des tests conduits par BRITISH GAS

Lors des essais, les auteurs ont observé que la quasi-totalité du produit rejeté était consommée dans la boule de feu, seule une faible proportion de produit brûlant au sol. Les temps correspondant aux différentes phases de développement de la boule de feu sont présentés dans le tableau D.6 (la durée de vie totale de la boule de feu apparaît comme la différence entre le temps d'extinction et le temps d'inflammation) et les caractéristiques de la combustion dans le tableau D.7.

Test	Temps d'inflammation (s)	Temps de développement au diamètre max. (s)	Temps de début d'ascension (s)	Temps d'extinction (s)
1	0,5	2,0	3,2	6,3
2	0,2	1,2	2,7	4,5
3	0,5	2,2	3,9	8,4
4	0,4	1,5	3,6	6,5
5	0,6	1,9	4,0	9,2

Tableau D.6 : Phases de développement des boules de feu au cours du temps lors des essais de BRITISH GAS

N° du test	Aire visible de la boule de feu (m ²)		Diamètre maximum équivalent (m)	Hauteur maximale de la boule de feu (m)	Durée de vie (s)	Emission moyenne* (kW/m ²)
	Direction perpendiculaire à l'axe du réservoir	Direction parallèle à l'axe du réservoir				
1	3 650	5 550	76	90	5,8	368
2	2 450	3 200	60	45	4,3	347
3	3 200	4 300	69	70	7,9	306
4	2 850	6 100	74	85	6,1	356
5	3 200	3 400	65	90	8,6	344

Tableau D.7: Caractéristiques des boules de feu (*valeurs moyennes dans le temps et sur l'étendue de la boule de feu. Des valeurs locales atteignant 500 kW/m² ont été mesurées au sommet de la boule de feu)

La hauteur de la boule de feu est définie comme étant la distance du sol au centre de la boule de feu. Dans la majorité des cas la hauteur croît avec le temps jusqu'à ce que la boule de feu commence à s'éteindre. Dans un premier temps, on observe une augmentation rapide de l'émittance de la boule de feu, puis elle décroît tel que présenté sur la figure D.4 suivante. Le test effectué avec une pression de rupture de 7,5 bar (test n°3) met en lumière l'influence des conditions du rejet sur la durée de vie de la boule de feu. La comparaison des tests 1 et 2 montre que la durée de vie de la boule de feu croît avec la masse rejetée. Enfin, le rapprochement des tests 1 et 4 indiquerait que le taux de remplissage a peu d'influence sur la durée de vie, pour autant que les masses mises en jeu soient les mêmes. On présente figure D.5, un exemple de variation de la densité de flux thermique reçu à diverses distances du réservoir avec le temps.

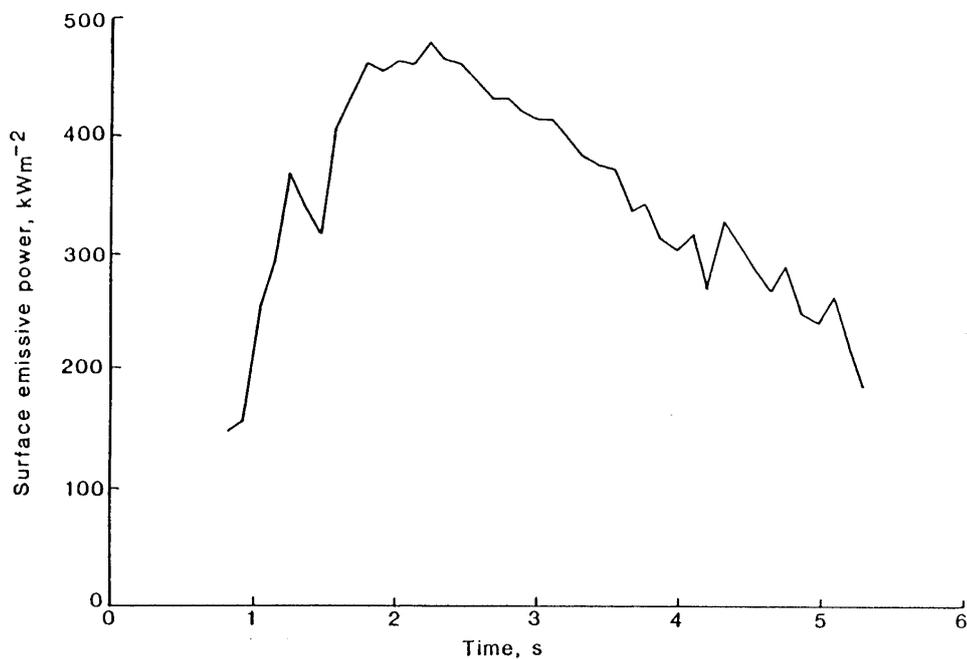


Figure D.4 : Exemple de variation de l'émittance au cours du temps (n° de test non précisé mais probablement n°2)

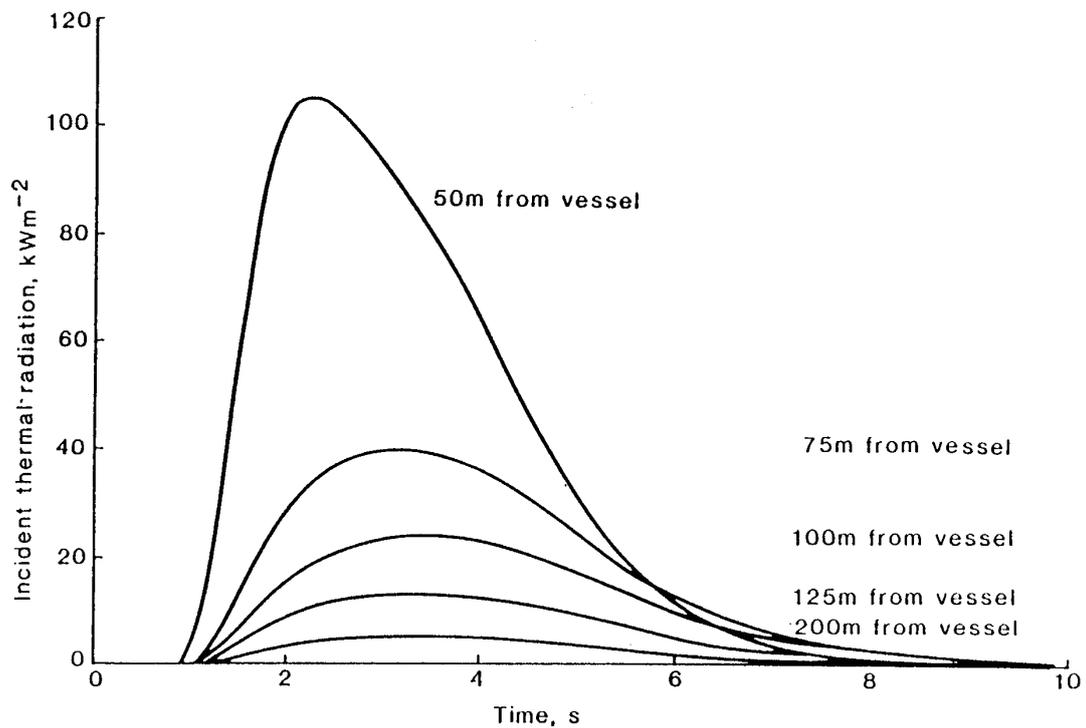


Figure D.5 : Densité de flux thermique reçu à 50, 75, 100, 125 et 200 m du réservoir en fonction du temps lors de l'essai 4

Les principales caractéristiques des boules de feu extraites de ces essais sont confrontées aux modèles sur les figures D.6, D.7, D.8 et D.9. Les modèles se comportent plutôt bien sauf pour les hauteurs choisies forfaitaires pour les modèles du CCPS et de TNO.

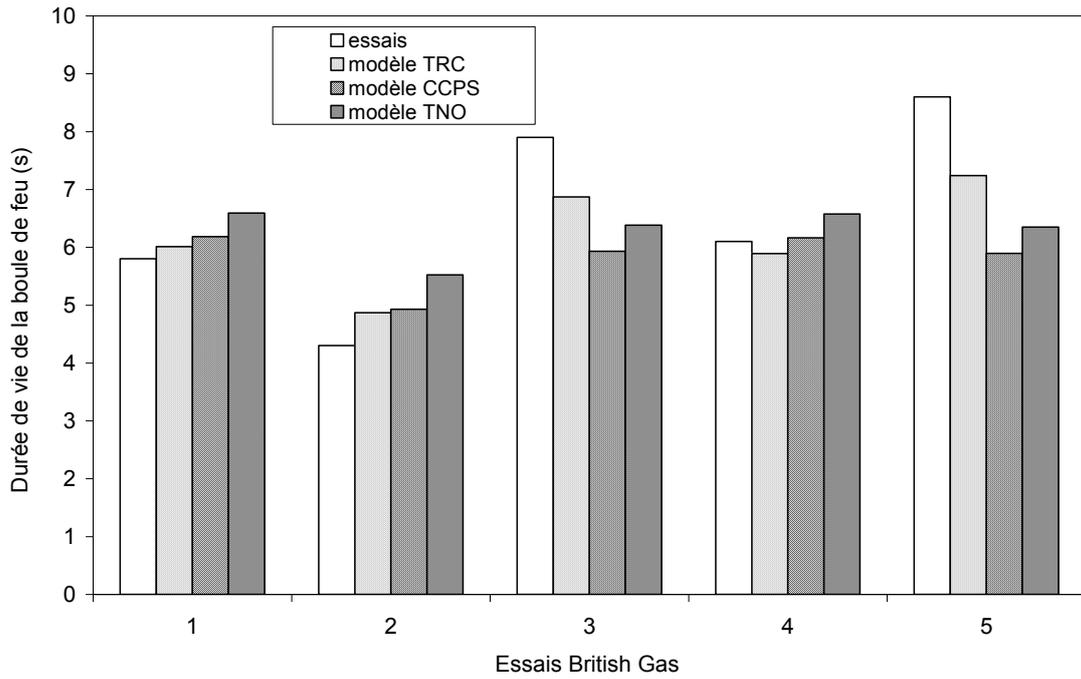


Figure D.6 : Durées de vie de la boule de feu observées et prédites pour 5 essais British Gas

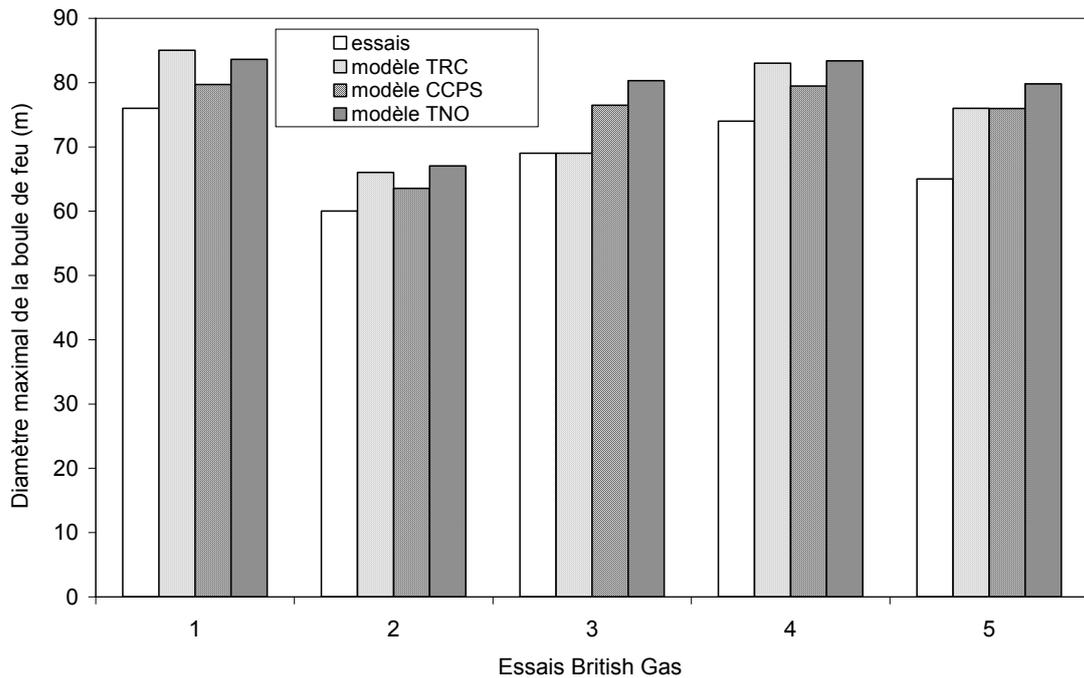


Figure D.7 : Diamètres de la boule de feu observés et prédits pour 5 essais British Gas

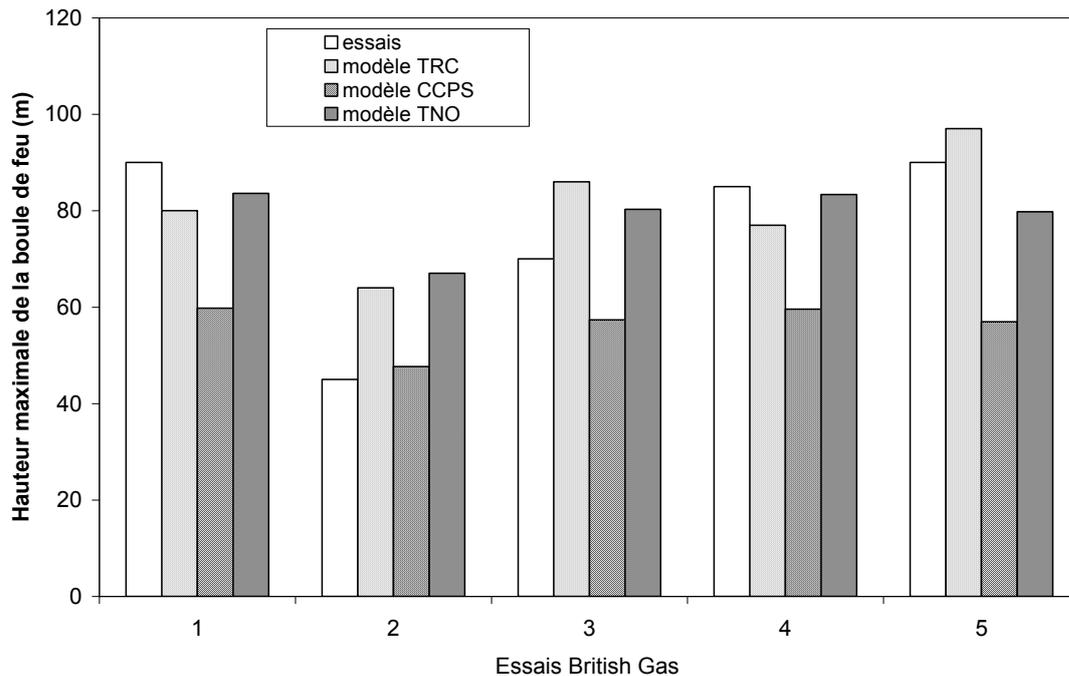


Figure D.8 : Hauteurs maximales de la boule de feu observées et prédites pour 5 essais British Gas

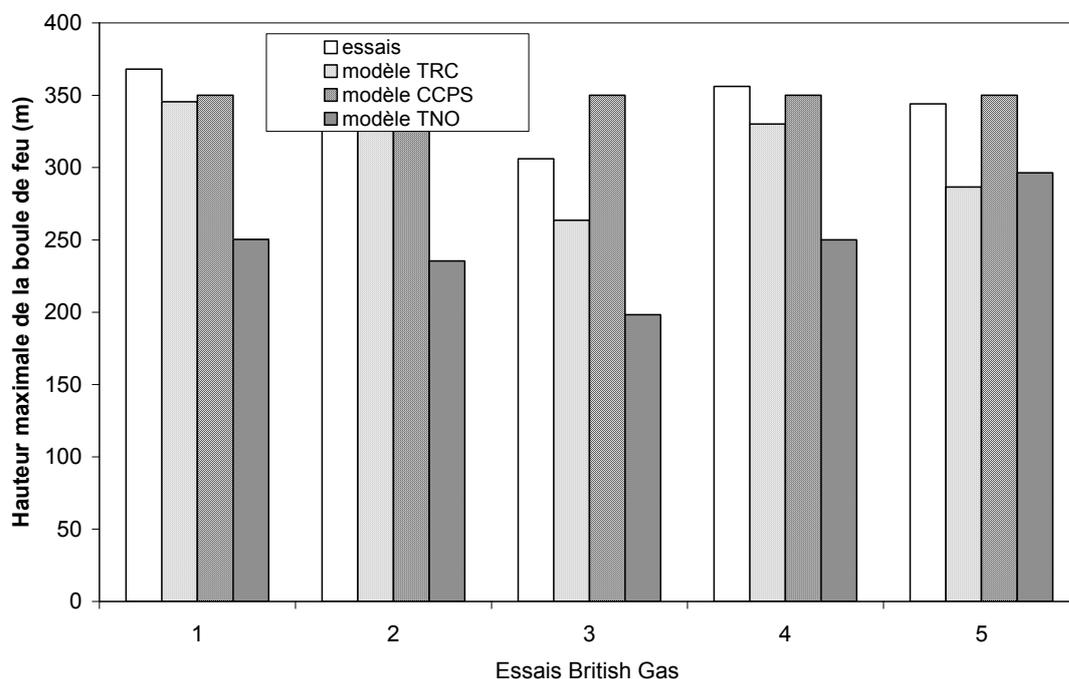


Figure D.9 : Émittance moyenne de la boule de feu observée et prédite pour 5 essais British Gas

On rappelle que le modèle TRC permet de connaître l'histoire complète du BLEVE. On fournit sur les figures D.11, D.12, D.13 et D.14, des résultats de simulations obtenues à propos de l'évolution de l'émittance, du rayon de la hauteur de la boule de feu puis du flux thermique reçu à 50 m. Les allures générales des figures D.11 et D.14 peuvent être rapprochée de celles des figures

D.4 et D.5. L'accord est convenable mais il convient cependant de rappeler ici que ces essais ont servi de base pour l'élaboration du modèle).

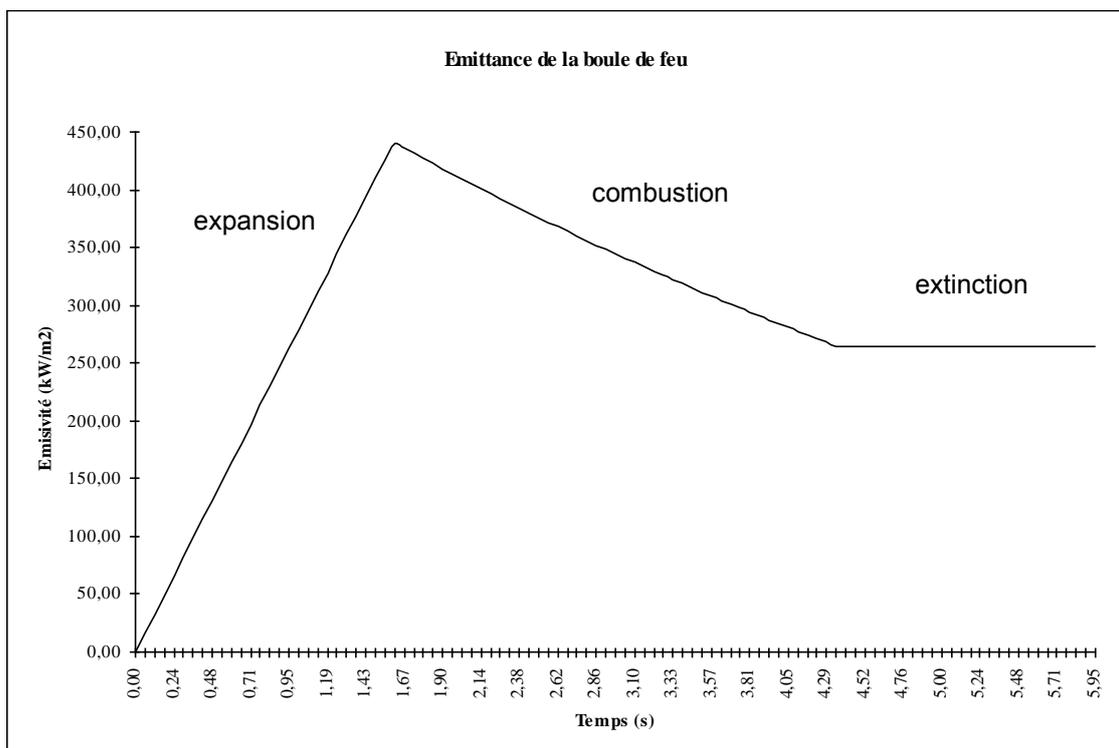


Figure D.11 : Evolution de l'émission de la boule de feu au cours du temps calculée par le modèle T.R.C. pour le test n°4 des essais BRITISH GAS.

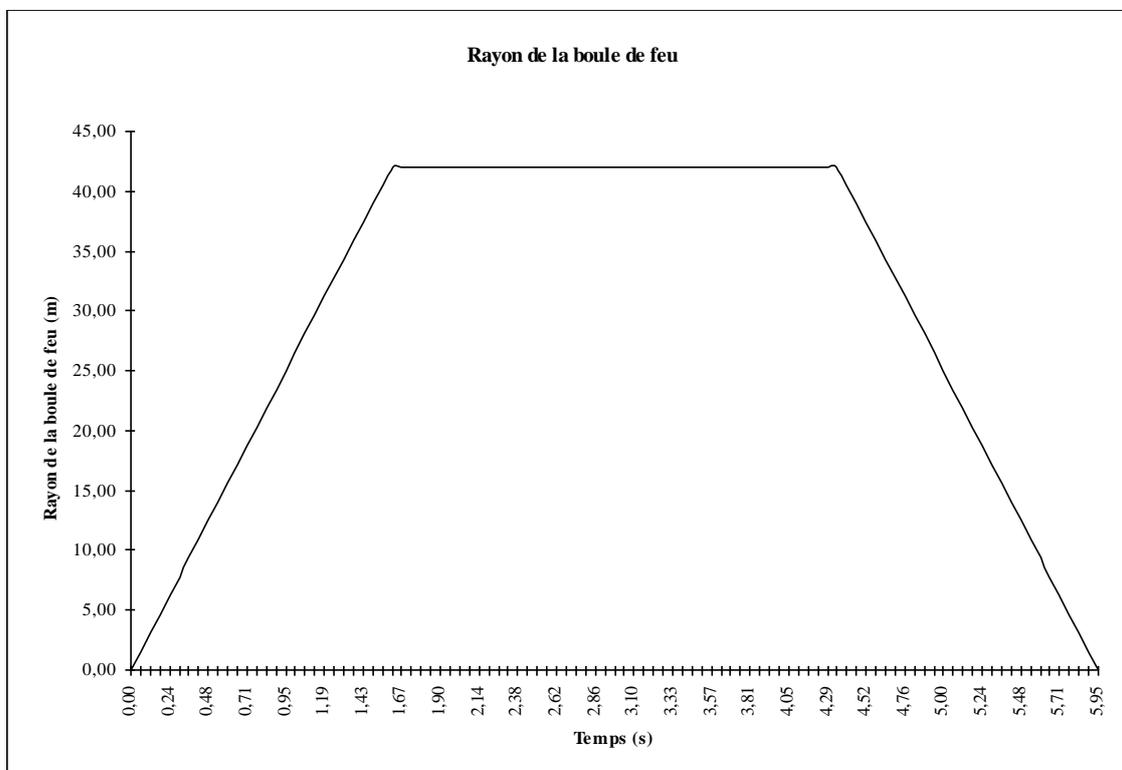


Figure D.12 : Evolution du diamètre de la boule de feu au cours du temps calculée par le modèle T.R.C. pour le test n°4 des essais BRITISH GAS.

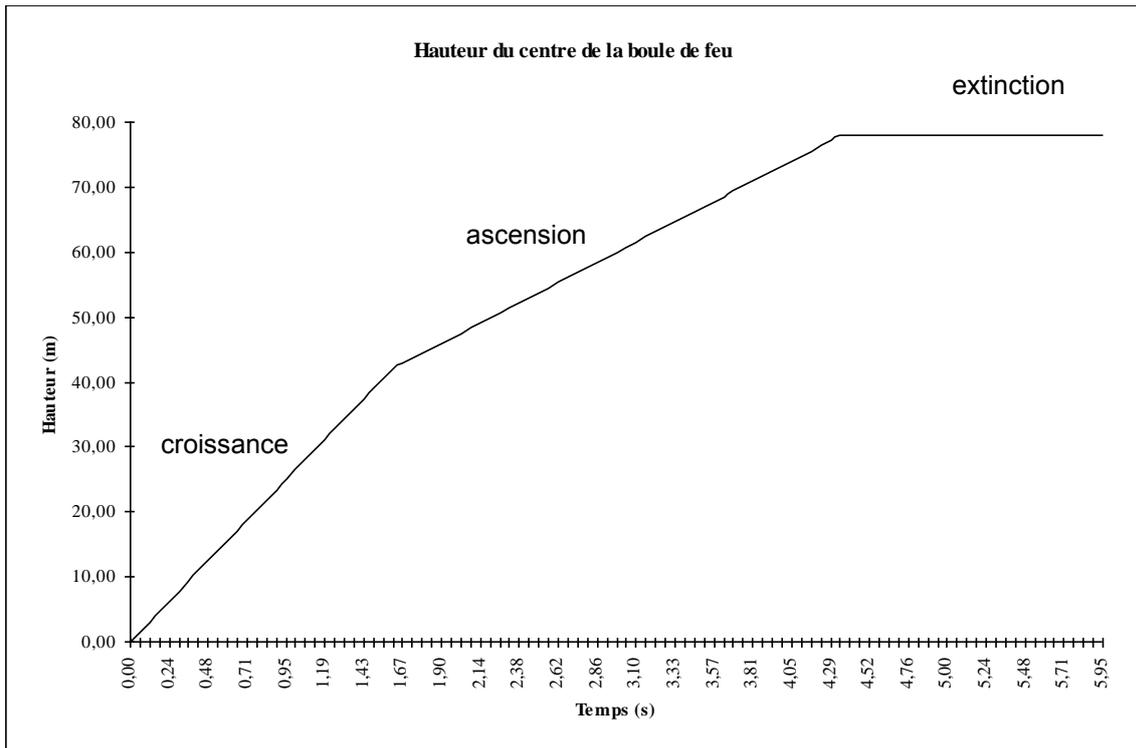


Figure D.13 : Evolution de la hauteur du centre de la boule de feu au cours du temps calculée par le modèle T.R.C. pour le test n°4 des essais BRITISH GAS.

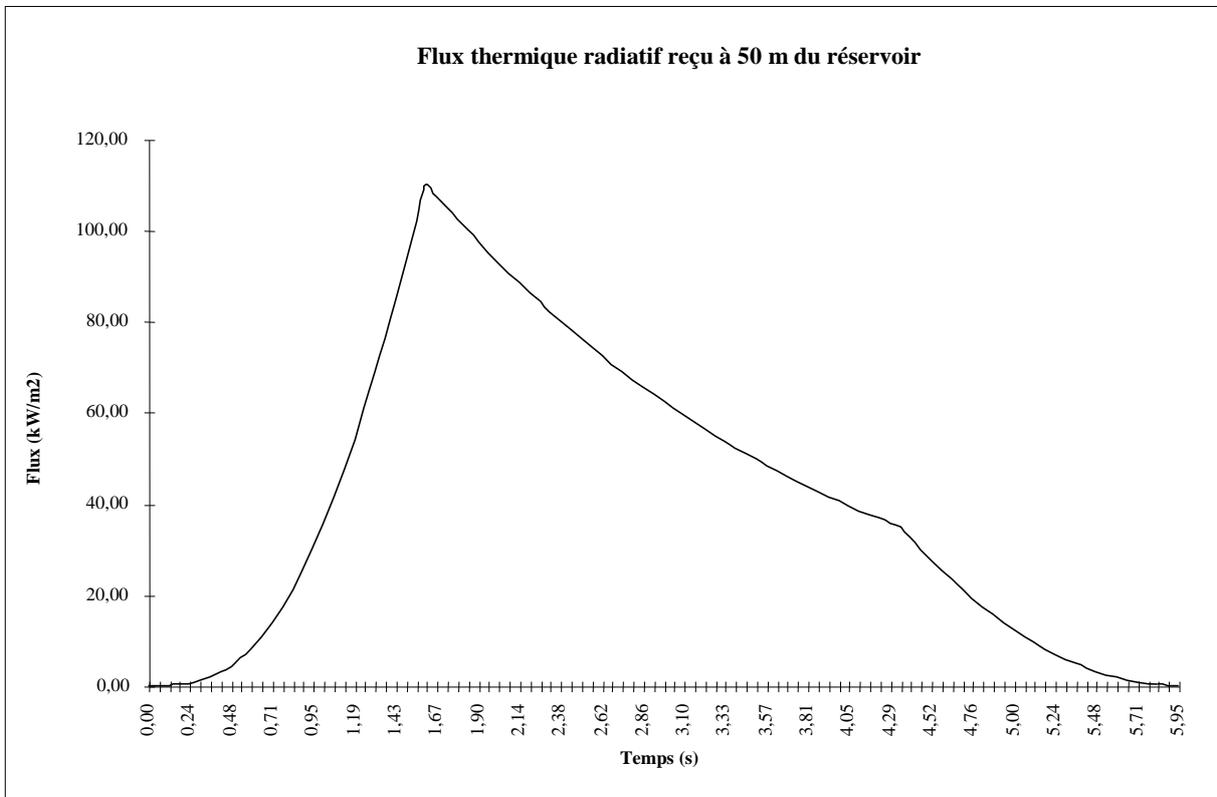


Figure D.14 : Flux thermique radiatif en fonction du temps à 50 m du réservoir

L'essai du BAM

Le B.A.M. (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Allemagne) a réalisé en 1998 un essai de BLEVE d'une citerne ferroviaire de 45 m³ rempli à 22 % de propane de qualité commerciale (Ludwig et Balke, 1999 ; Ludwig et Heller, 1999). Le wagon était placé au-dessus d'une cuvette de 50 m² contenant 7500 litres de fioul lourd (figures D.15 et D.16).

Pour protéger l'environnement des effets de surpression et de projection de fragment, un merlon de 6 m de haut a été élevé sur trois côtés autour de la citerne. En outre, sur le côté ouvert, un petit réservoir vide était placé perpendiculairement à la citerne. Ce réservoir à double coque, destiné au transport de matières radioactives, était placé à cet endroit dans le but d'éprouver sa résistance aux effets d'un BLEVE.

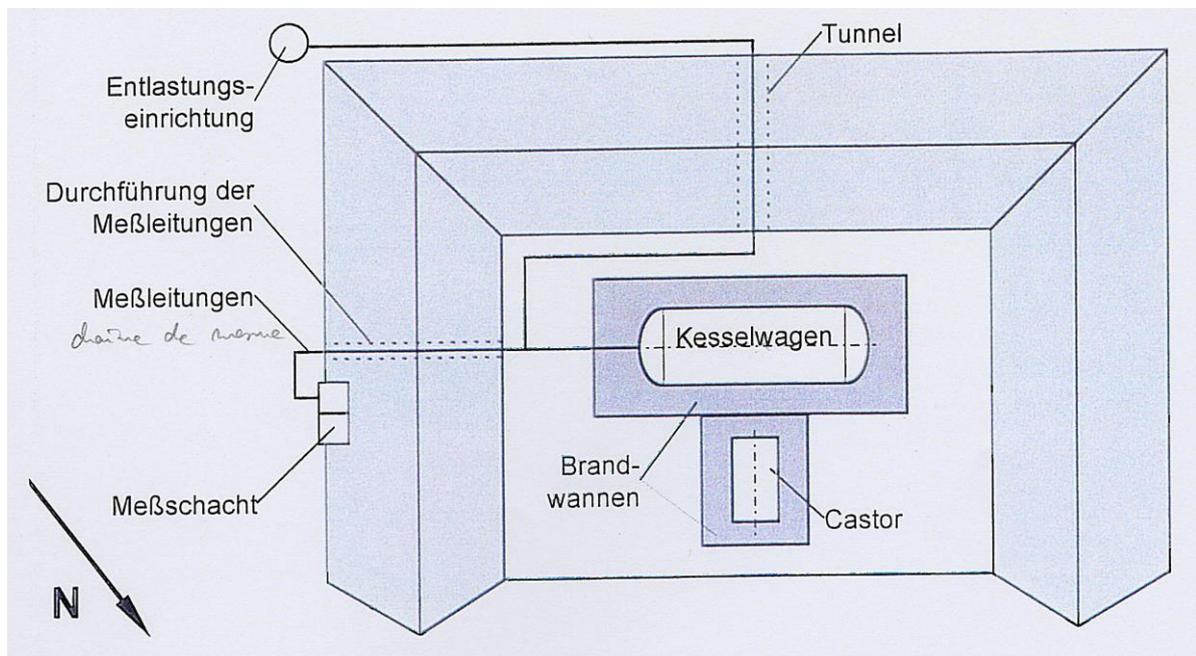


Figure D.15: Plan schématique de l'installation d'essai (vue de dessus)



Figure D.16 : Vue de l'installation d'essai : le wagon de propane est à gauche ; à droite, un petit réservoir de transport de matières radioactives est placé perpendiculairement au wagon.

Après inflammation de la cuvette de fioul, un feu de nappe s'est développé autour du wagon. Toutefois, les flammes ne l'enveloppaient pas complètement en raison d'un léger vent. L'éclatement de la citerne s'est produit 15 minutes après inflammation de la cuvette de fioul, à la pression de 25 bar et la température interne de 69°C en phase liquide. La température en paroi était alors très variable, comprise entre 100°C, sur la partie non exposée directement aux flammes, et 600°C sur la partie opposée. La rupture s'est produite au point le plus chaud, légèrement au-dessus du plan équatorial de la citerne. En ce point, la résistance mécanique de l'acier était de $1,5 \cdot 10^8$ Pa à la température considérée (600°C), alors qu'elle est de $4,2 \cdot 10^8$ Pa à 20°C. La fissure s'est ensuite propagée horizontalement, avant de se diviser et de se propager selon un diamètre, comme l'a montré l'analyse des fragments. L'expansion de la phase vapeur a été suivie de la vaporisation quasi-instantanée de la phase liquide et de la formation d'une boule de feu de 100 m de diamètre et 150 m de hauteur (figure D.17). La citerne s'est rompue en quatre morceaux principaux qui ont été projetés à des distances de 100 à 200 m, tandis que les essieux du wagon ont été écrasés au sol.

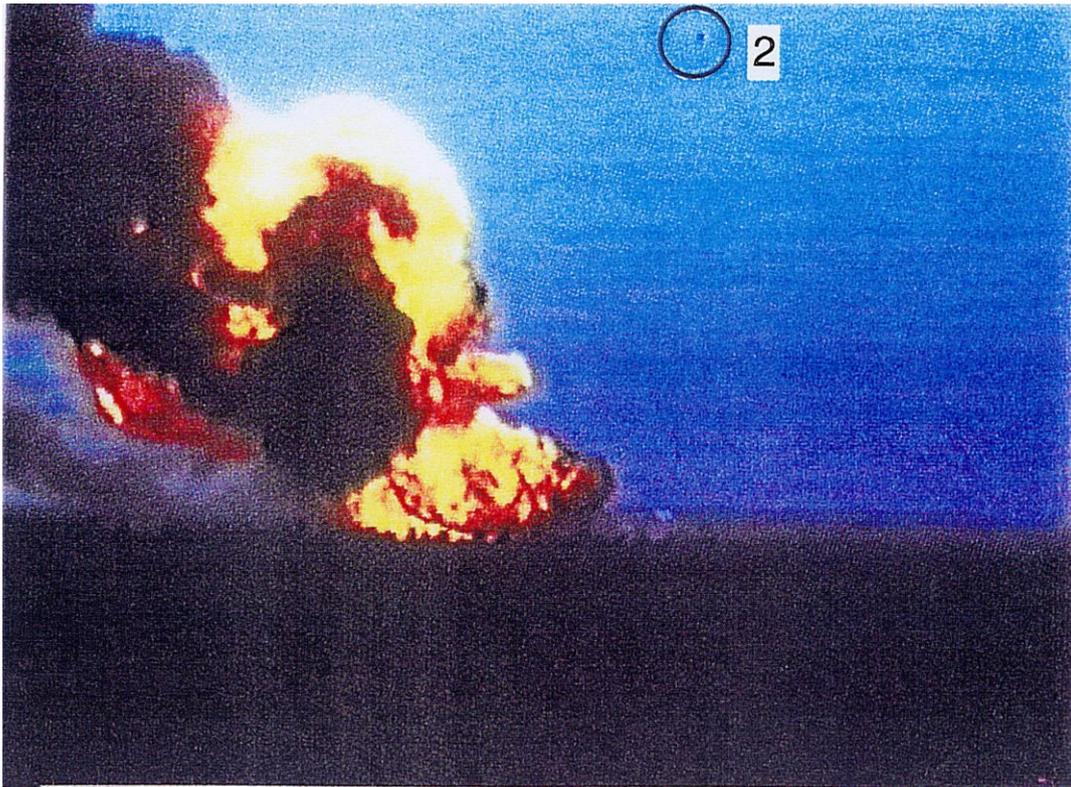


Figure D.17 : Vue de la boule de feu (4,6 s après l'éclatement) ; le point 2 est un fragment du réservoir à une altitude de 200 m.

Dans les tableaux D.8 et D.9 sont présentées les caractéristiques de la boule de feu.

Volume du réservoir	Masse de propane	Pression à la rupture	Dimensions de la boule de feu	Durée de vie de la boule de feu
45 m ³	5141 kg	25 bar	Diamètre 100 m Hauteur du centre : 100 m	7,2 s

Tableau D.8 : Principales caractéristiques de l'essai du B.A.M.

Temps d'inflammation (s)	Temps de développement au diamètre maximal (s)	Temps de début d'ascension (s)	Temps d'extinction (s)
0,4	3,2	4	7,6

Tableau D.9 : Caractéristiques de la boule de feu

Il n'a pas malheureusement pas été possible de mesurer précisément les flux thermiques (défaillance acquisition). Uniquement quelques points sont disponibles.

Les données disponibles sur cet essai sont comparées aux principaux modèles dans le tableau D.10 montrant un accord assez raisonnable sauf pour la hauteur s'agissant du modèle CCPS.

	Essai B.A.M.	Modèle C.C.P.S	Modèle T.N.O	Modèle T.R.C.
Diamètre maximal de la boule de feu (m)	100	100	104	94
Durée de vie de la boule de feu (s)	7,2	7,6	7,8	7,4
Hauteur du centre de la boule de feu par rapport au sol (m)	100	50	104	98

Tableau D.10 : Simulation du BLEVE de l'essai B.A.M. à l'aide de différents modèles

Le modèle T.R.C. a été employé plus largement afin de comparer l'histoire simulée de la boule de feu avec l'expérience. Notons que cette expérience du BAM est postérieure à l'établissement du modèle. Les résultats, convaincants pour ce modèle, sont présentés sur les figures D.18, D.19 et D.20.

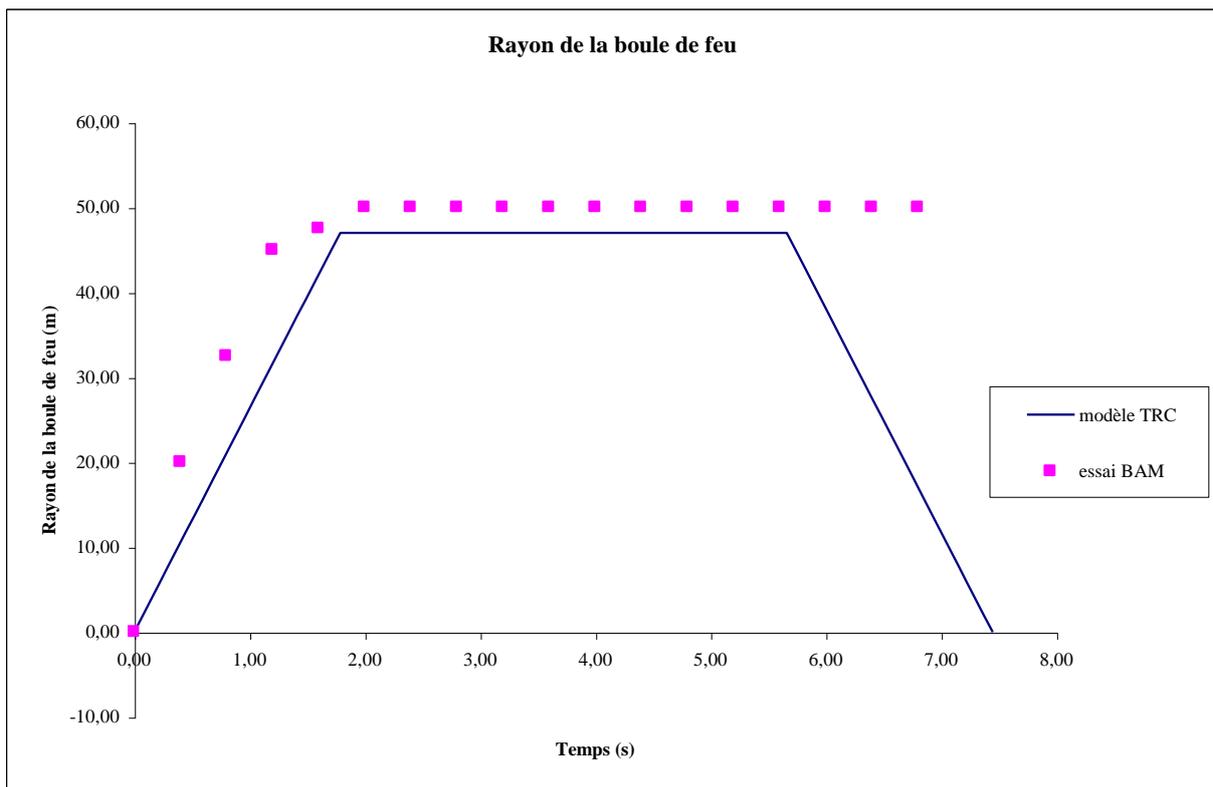


Figure D.18 : Evolution du rayon de la boule de feu au cours de l'essai du B.A.M.

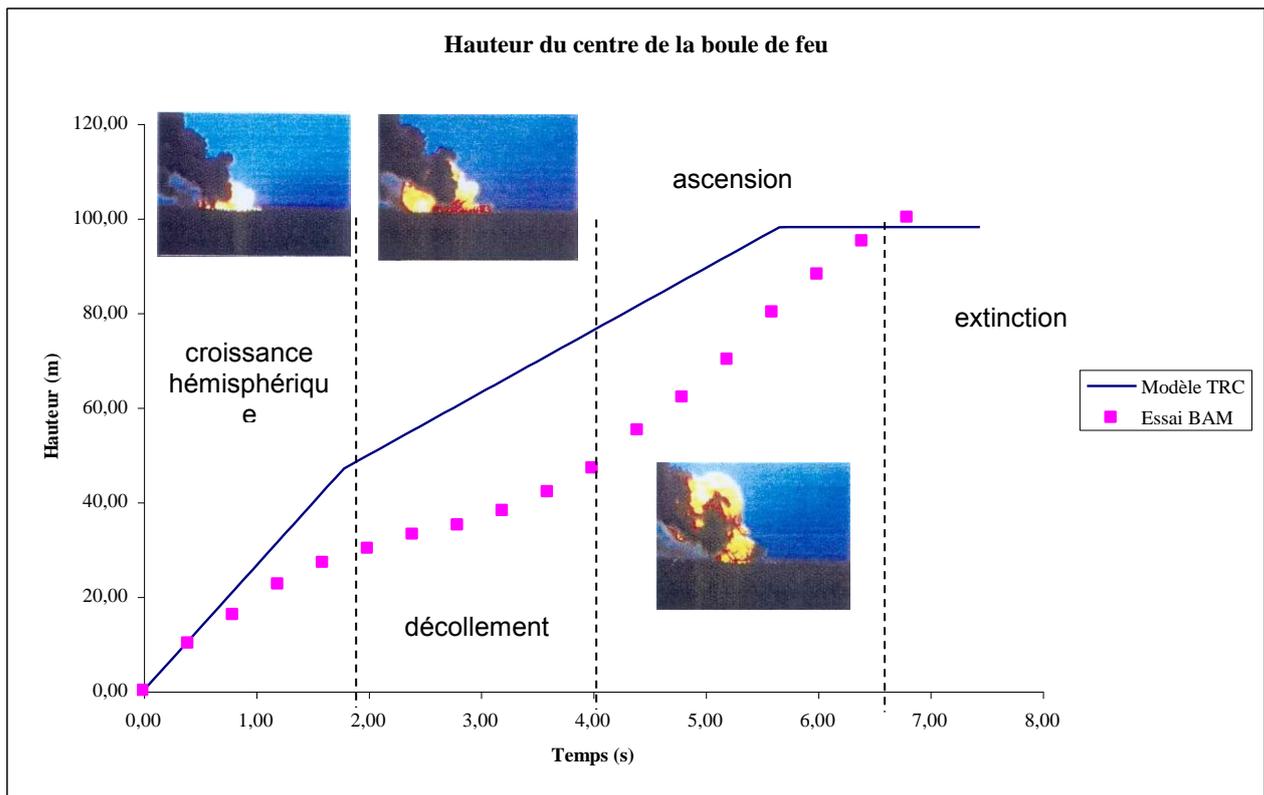


Figure D.19 : Evolution de la hauteur du centre de la boule de feu au cours de l'essai du B.A.M.

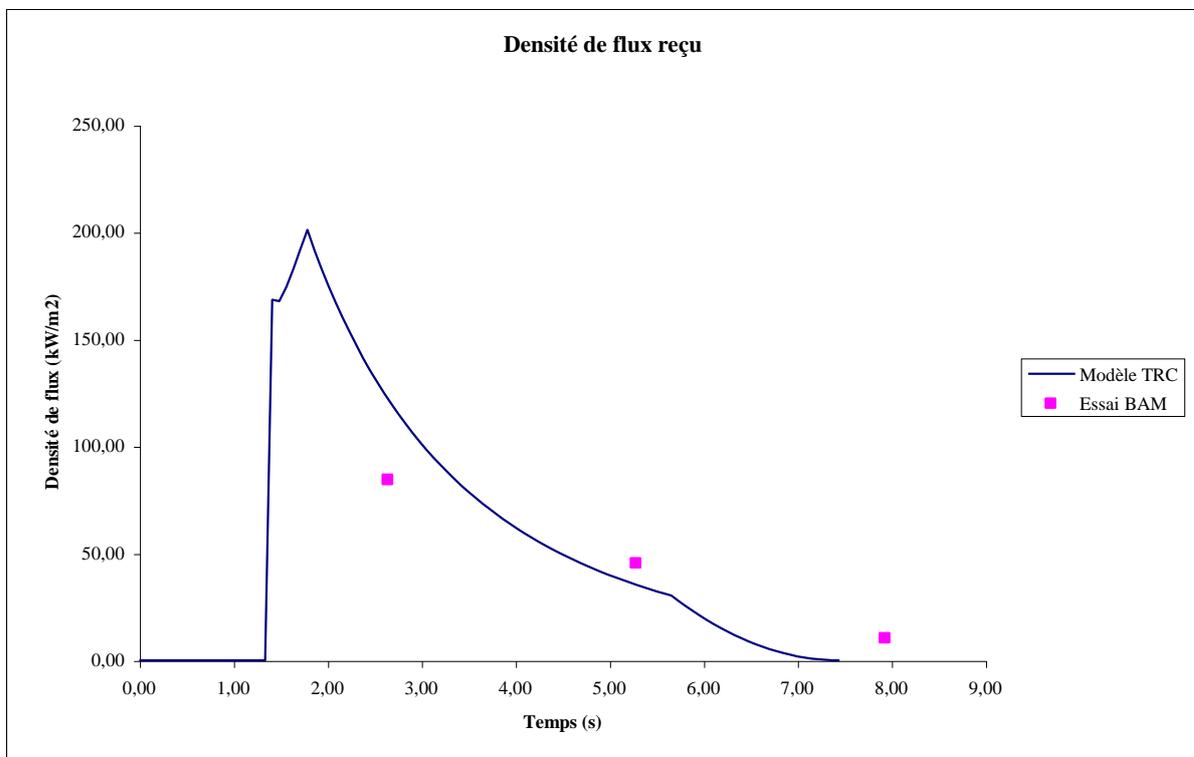


Figure D.20 : Flux thermique rayonné à 30 m au cours de l'essai B.A.M.

Le retour d'expérience

Lors de **l'accident de Mexico**, une sphère de 1600 m³ de G.P.L. aurait donné matière à un BLEVE, alors qu'elle était remplie à environ 50 % (Pietersen, 1984). Des témoins ont rapporté la formation d'une boule de feu dont le diamètre n'est pas connu avec précision, mais qui était de l'ordre de 300 à 500 m. L'observation des dégâts sur le terrain laisse plutôt penser que ce diamètre était compris entre 300 et 400 m. La boule de feu aurait duré une vingtaine de secondes.

Par ailleurs Pietersen a notamment relevé les dommages suivants en les reliant à des valeurs de flux thermique reçu :

- peinture cloquant sur le bois jusqu'à 400 mètres, ce qui correspondrait à un flux thermique compris entre 8 et 12 kW/m² et peut-être à une charge thermique équivalente de 900 à 1700 (kW/m²)^{4/3}.s¹¹ ;
- dommages aux vitres par effet thermique à 600 mètres, ce qui indiquerait qu'un flux de l'ordre de 5 kW/m² ait été perçu à cette distance et peut-être à une charge thermique équivalente de 500 (kW/m²)^{4/3}.s.

Il convient de préciser que Pietersen ne fournit pas d'estimation des dommages aux personnes. Mais il est précisé qu'une grande partie des personnes situées à moins de 300 mètres du site ont été tuées, au cours de leur sommeil, dans l'incendie de leur habitation.

Pour les calculs (tableau D.11), nous avons considéré une sphère de 1600 m³ remplie à 50 % de propane, la pression de rupture étant supposée égale, conformément aux hypothèses de Pietersen, à 13,4 bar absolus.

	Observations de Pietersen	Modèle du C.C.P.S.	Modèle T.N.O.	Modèle T.R.C.
Diamètre maximal de la boule de feu (m)	300 à 400	422	424	406
Durée de vie de la boule de feu (s)	20	22	24	31
Emittance moyenne de la boule de feu (kW/m ²)	-	350	392	344 à 207
Hauteur par rapport au sol du centre de la boule de feu (m)	-	211	424	0 à 411
Densité de flux thermique moyenne à 400 m (kW/m ²)	8 - 12	65	32	18
Charge thermique à 400 m (kW/m ²) ^{4/3} .s	900 - 1700	5750	2438	1725
Densité de flux thermique moyenne à 600 m (kW/m ²)	5	32	19	10
Charge thermique à 600 m (kW/m ²) ^{4/3} .s	500	2235	1216	719

Tableau D.11 : Simulation du BLEVE de l'accident de Mexico à l'aide de différents modèles

¹¹ La dose thermique remplace le flux à iso-effets constants en deçà d'une durée d'exposition de 1 mn. Très schématiquement la dose correspondant au seuil de 10 kW est de 10^{4/3}.60

Les trois modèles utilisés permettent de retrouver l'ordre de grandeur des principales caractéristiques de la boule de feu. A propos des densités de flux thermique estimées, le modèle T.R.C. permet d'obtenir les résultats les plus proches mais il s'agit d'évaluations très approximatives.

Lors de **l'accident de Kamena Vourla**, une citerne routière contenant environ 18 tonnes de GPL (80% de butane et 20% de propane) a produit un BLEVE. Des témoins ont observé une boule de feu d'environ 200 m de diamètre et 150 m de hauteur. Des personnes ont été brûlées dans un immeuble situé à environ 300 m du lieu de l'explosion. Il s'agit de brûlures légères (typiquement 250 à 700 $(\text{kW}/\text{m}^2)^{4/3} \cdot \text{s}$ selon Hymes, 1983) et de brûlures du second degré (1033 $(\text{kW}/\text{m}^2)^{4/3} \cdot \text{s}$).

Pour les simulations présentées dans le tableau D.12, nous avons envisagé le BLEVE d'un réservoir de 18 tonnes de butane. La pression de rupture n'étant pas connue, deux calculs ont été effectués, l'un avec une pression choisie arbitrairement à 15 bars, l'autre avec une pression de rupture de 25 bars, valeur qui correspond généralement aux pressions d'épreuve des citernes routières et ferroviaires. Il est à noter que la pression de rupture n'a aucune incidence sur les résultats obtenus par le modèle du C.C.P.S, car ce dernier retient par hypothèse une émittance constante de 350 kW/m^2 .

	Observations lors de l'accident	Modèle du C.C.P.S.	Modèle T.N.O. avec $P_{\text{rupt}}= 15 \text{ bar}$	Modèle T.N.O. avec $P_{\text{rupt}}= 25 \text{ bar}$	Modèle T.R.C. avec $P_{\text{rupt}}= 15 \text{ bar}$	Modèle T.R.C. avec $P_{\text{rupt}}= 25 \text{ bar}$
Diamètre maximal de la boule de feu (m)	200	152	157	157	164	182
Durée de vie de la boule de feu (s)	-	12	11	11	10,5	9,6
Emittance moyenne de la boule de feu (kW/m^2)	-	350	283	333	275 à 456	339 à 563
Hauteur par rapport au sol du centre de la boule de feu (m)	150	76	157	157	139	132
Charge thermique à 300 m ($(\text{kW}/\text{m}^2)^{4/3} \cdot \text{s}$)	300 à 1000	565	221	275	219	301

Tableau D.12 : Simulation du BLEVE de l'accident de Kamena Vourla à l'aide de différents modèles

Les conditions initiales de l'accident ne sont pas connues avec assez de précision pour permettre de valider les modèles. En particulier, la quantité de GPL ayant réellement contribué à la formation de la boule de feu n'est pas connue. Par exemple, il semble que le feu qui a enveloppé la citerne était alimenté par une fuite provenant de la citerne elle-même. Dans ces conditions, une partie des 18 tonnes a été consommée par la combustion d'un feu torche et non par la boule de feu. Les 18 tonnes considérées pour la simulation correspondent donc vraisemblablement à une quantité maximale. En outre, les propriétés thermodynamiques du gaz réellement mis en jeu ne sont pas connues précisément.

Cependant, l'application des différents modèles permet de retrouver, en ordre de grandeur, les dimensions de la boule de feu rapportées par les témoins de l'accident. En outre, la charge thermique à 300 m estimée par les modèles est comprise environ entre 150 et 600 (kW/m²)^{4/3}.s ce qui paraît assez compatible avec les effets constatés.

Lors de **l'accident de Los Alfaques**, une citerne routière de 45 m³ contenant 23,5 tonnes de propylène a produit un BLEVE. La pression de rupture n'est pas connue, mais la citerne s'est vraisemblablement rompue par plein hydraulique, car elle était remplie à plus de 90 %. Dans ces conditions, la pression de rupture a été évaluée à 17 bar absolus. On possède peu de données sur les dimensions de la boule de feu qui s'ensuivit, mais son rayon était vraisemblablement inférieur à 100 m. Le rayon des blessures irréversibles est estimé à 125 m. Toutes les victimes et les personnes atteintes de brûlures graves se trouvaient à l'intérieur de ce rayon. Nous n'avons pas d'information précise sur la présence éventuelle de personnes non atteintes qui se seraient trouvées à l'extérieur de ce périmètre, mais il est probable qu'il y en ait eu. Lees (Lees, 1996) rapporte en effet qu'environ 300 à 400 campeurs se trouvaient dans la zone la plus touchée par l'accident sur environ 500 présents dans le camping au moment de la catastrophe.

Malgré des informations partielles, cet accident est intéressant car il permet d'évaluer les modèles sur un BLEVE de propylène, pour lequel aucune donnée d'essai n'est disponible.

	Observations lors de l'accident	Modèle du C.C.P.S.	Modèle T.N.O.	Modèle T.R.C.
Diamètre maximal de la boule de feu (m)	< 200	166	170	167
Durée de vie de la boule de feu (s)	-	13	12	14
Hauteur par rapport au sol du centre de la boule de feu (m)	-	83	170	198
Emittance moyenne de la boule de feu (kW/m ²)	-	350	302	164 à 273
Charge thermique à 125 m (kW/m ²) ^{4/3} .s	-	5947	1684	1053

Tableau D.13 : Simulation du BLEVE de l'accident de Los Alfaques à l'aide de différents modèles

Malgré le peu d'informations disponibles sur les circonstances exactes de cet accident, les simulations à l'aide des différents modèles semblent en accord avec les quelques observations réalisées. Ainsi, le diamètre de la boule de feu est estimée de l'ordre de 170 m, à comparer avec le diamètre inférieur à 200 m observé. En outre, la charge thermique à 125 m calculée par les modèles T.N.O. et T.R.C. est comprise entre 1000 et 1700 (kW/m²)^{4/3}.s, ce qui correspond aux seuils de létalité retenus entre 1000 et 1800 (kW/m²)^{4/3}.s et est en bon accord avec localisation des victimes et des personnes atteintes de blessures irréversibles sur le terrain. La charge thermique calculée par le modèle du C.C.P.S. semble quant à elle assez fortement surestimée.

LES EFFETS DE PRESSION

Un débat « phénoménologique »

Le profil typique représenté sur la figure D.21 est mentionné par de nombreux auteurs (Shield 1993, Birk 1997, Baker 1983). Il met en évidence un premier pic suivi d'une phase négative prononcée, un deuxième pic rapproché d'amplitude voisine du premier, puis, plus tardivement, un troisième pic très large.

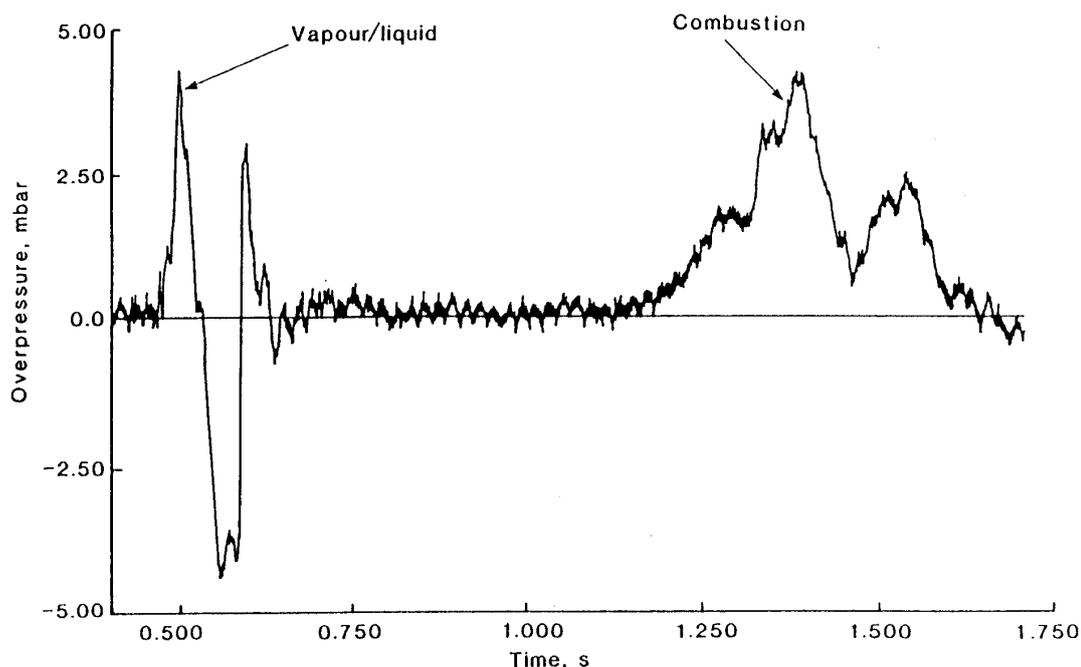


Figure D.21 : Surpression en fonction du temps à 150 m du réservoir, lors du test n°5 des essais British Gas

Le troisième pic est souvent attribué à la combustion du produit stocké, sous forme d'une boule de feu. Ce pic peut être d'amplitude comparable, voire supérieure à celles des deux premiers pics, comme le suggère Shield, et comme cela a été constaté par (Johnson et Pritchard, 1990). D'après Shield, ce dernier pic présente les plus grands niveaux d'impulsion, et pourrait donc engendrer d'importants dégâts sur les structures.

Le premier pic résulte de la détente brutale de la phase gazeuse du réservoir.

L'interprétation du deuxième pic est plus délicate. Shield l'attribue à la vaporisation explosive du liquide, et note qu'il apparaît toujours dans la phase de dépression qui suit le premier pic. Mais Birk (Birk, 2007) fait remarquer que les deux premiers pics de pression sont également visibles lors de l'éclatement de réservoirs qui ne contiennent que du gaz. Comme dans les expériences de Birk, les effets de pression de la boule de feu sont passés inaperçus alors que le troisième est également présent, Birk conclut que ce troisième pic ne peut correspondre qu'à la

vaporisation du liquide, le second n'étant qu'un « écho » du premier. On constate donc que le sujet est loin d'être épuisé.

Il semble d'ailleurs d'autant plus nécessaire d'étayer cet aspect que des résultats forts contradictoires apparaissent. Ainsi, avec ses essais à moyenne échelle (400 à 2000 litres), Birk trouve que l'amplitude des deux premiers pic, relatifs à détente de la phase vapeur selon lui, décroît avec l'augmentation du taux de remplissage (figures D.22) et qu'elle est directement liée à l'énergie stockée dans la phase vapeur et indépendante de l'énergie stockée dans la phase liquide (figure D.23).

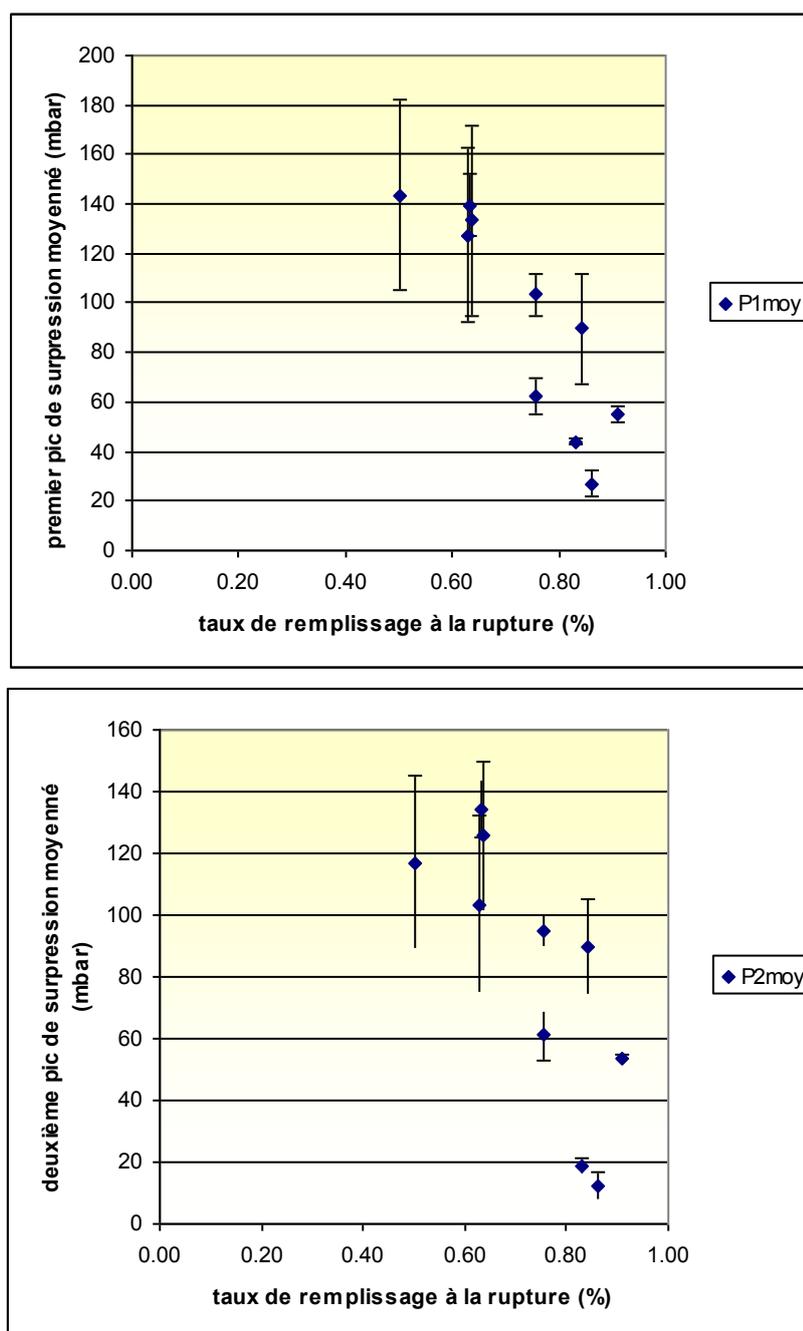


Figure D.22 : Moyenne du premier (graphe du haut) et du second (graphe du bas) pic de surpression mesurés (dans l'axe et sur le côté du réservoir) lors des essais Birk en fonction du taux de remplissage au moment de la rupture (Birk, 2007)

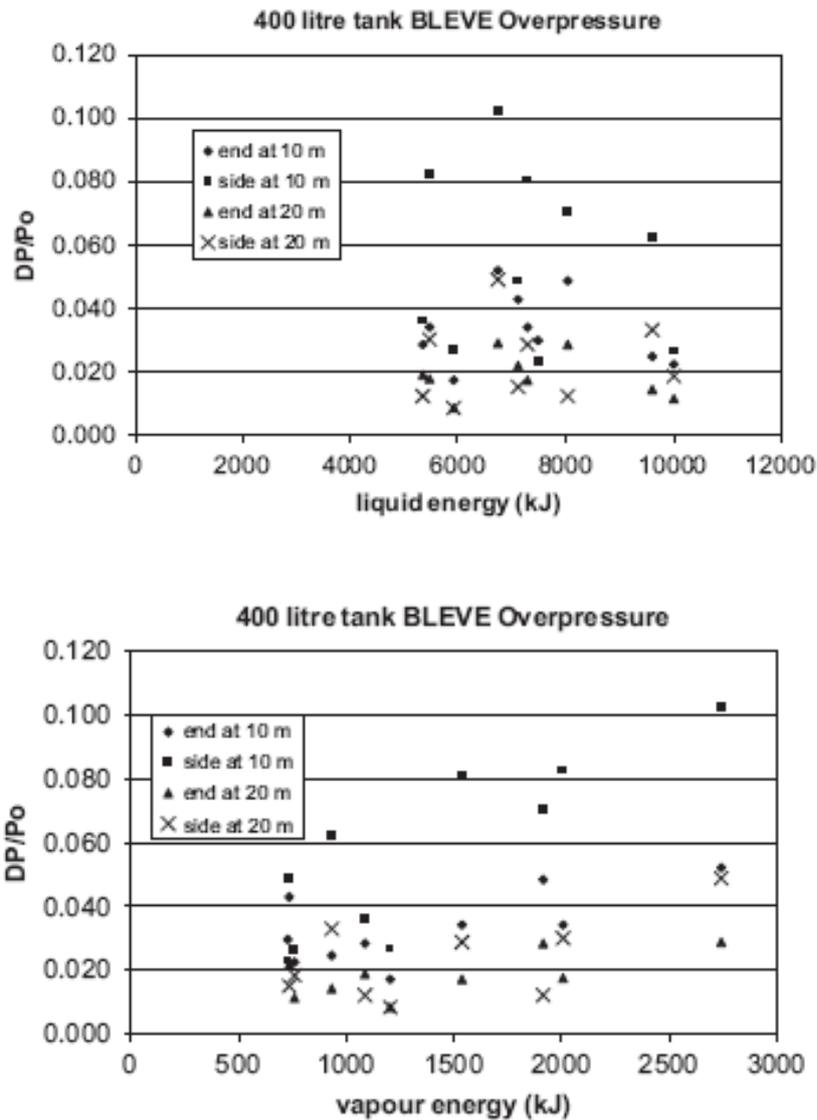


Figure D.23 : Niveaux de surpression mesurés (premier pic de pression) en fonction de l'énergie libérée par l'expansion isentropique de la phase liquide (en haut) et de la phase vapeur (en bas) (Birk, 2007)

En revanche, il a également été constaté expérimentalement que la distinction entre les effets de pression dus à la phase liquide et ceux dus à la phase vapeur n'est pas toujours évidente (Birk et al., 1997 et Johnson et Pritchard, 1990). Par exemple, lors des essais British Gas (Johnson et Pritchard, 1990), réalisés à plus grande échelle, les effets de la détente de la phase vapeur et de la vaporisation du liquide se sont souvent combinés pour former une onde de surpression unique. Il en résulte notamment que l'effet du taux de remplissage est complètement différent (Figure D.24).

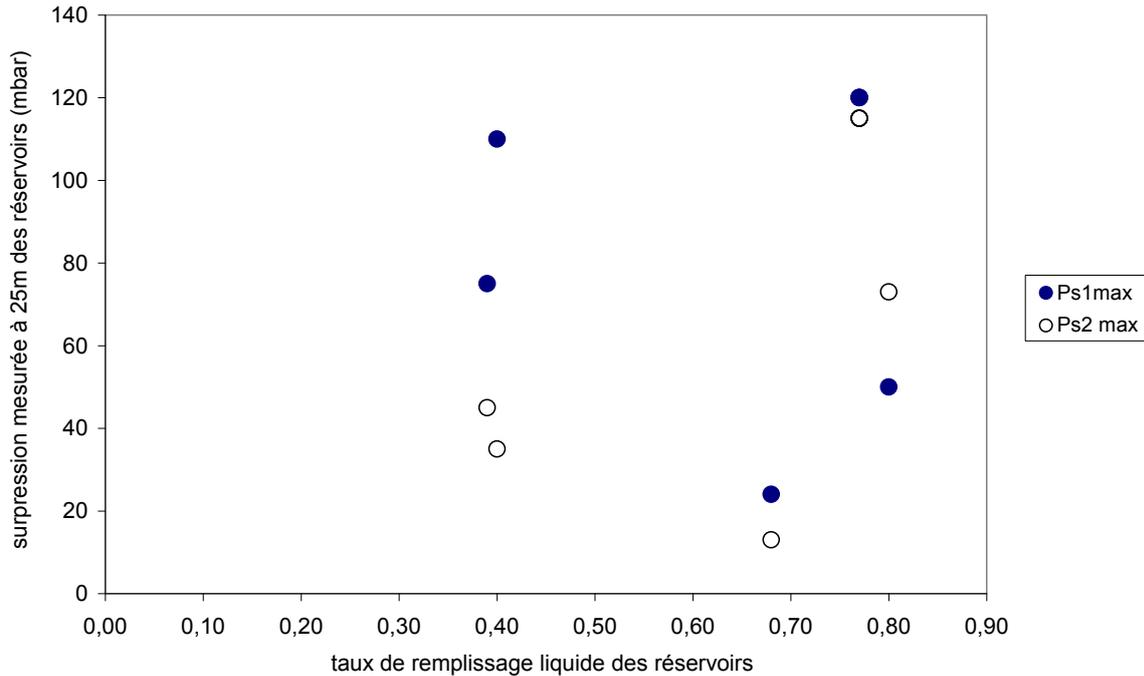


Figure D.24 : Evolution des surpressions mesurées à 25 m des réservoirs lors des essais British Gas en fonction du taux de remplissage

Les essais du N.F.P.A.

En 1993, le N.F.P.A. (National Fire Protection Association) a réalisé une série de six tests de BLEVE sur des réservoirs cylindriques horizontaux, d'environ 1,9 m³ de capacité unitaire, remplis de propane (Mehlem et al., 1993). Ces tests, qui ont fait l'objet d'un film produit par le N.F.P.A., ont consisté à exposer des réservoirs à des feux de flaques, ou à des jets enflammés de propane (liquide ou gazeux) (Tableau D.14). Des mesures de surpression ont été effectuées dans deux directions différentes, à 15 et 46 m du réservoir (les directions dans lesquelles ont été effectuées ces mesures ne sont pas mentionnées clairement).

Numéro du test	Taux de remplissage (%)	Source de chaleur	Temps à l'instant de la rupture (min.)	Distance la plus importante parcourue par un fragment (m)	Observations
1	25	Jet enflammé de propane gazeux	14	118	Surpression significative dans le champ proche
2	40	Jet enflammé de propane gazeux	Pas de rupture	-	La soupape ne fonctionne pas. La surpression s'est échappée par une brèche
3	40	Feu de flaque de propane liquide	8	74	Apparition d'une onde de choc significative, et d'une boule de feu d'environ 60 m de diamètre

Numéro du test	Taux de remplissage (%)	Source de chaleur	Temps à l'instant de la rupture (min.)	Distance la plus importante parcourue par un fragment (m)	Observations
4	40	Feu de flaque de propane liquide	Pas de rupture	-	Fonctionnement correct de la soupape de sécurité (rejet monophasique)
5	40	Jet enflammé de propane liquide	Pas de rupture	-	Fonctionnement correct de la soupape de sécurité (rejet monophasique)
6	50	Jet enflammé de propane liquide	12	195	Apparition d'une onde de choc significative (voir texte), et d'une boule de feu d'environ 65 m de diamètre

Tableau D.14 : Principaux résultats des essais effectués par le N.F.P.A.

On peut y associer les commentaires suivants :

- Pour le test n° 1, le jet enflammé de propane gazeux touchait le réservoir légèrement au-dessus du niveau de la phase liquide. Le réservoir n'était pas équipé d'une soupape. Lorsqu'il a explosé (pression interne inconnue, le pressostat a saturé à partir de 82 bar), le réservoir ne contenait plus que de la vapeur. Aucune boule de feu n'a été observée mais une onde de pression (tableau D.15) ;

Distance (m)	Direction	Surpression (mbar)
15	1	300
15	2	328
46	1	56
46	2	95

Tableau 2 : Mesures de surpressions du test n°1

- Lors du test n° 2, réalisé pour un taux de remplissage de 40 %, le réservoir étant équipé d'une soupape. Il semble que le jet enflammé de propane gazeux était dirigé vers la partie du réservoir en contact avec la phase liquide. 290 secondes après le début du test, un trou de la taille d'une tête d'épingle est apparu au voisinage de la soupape de sécurité. 300 secondes plus tard, la soudure fixant la soupape s'est rompue, et une brèche d'environ 51 x 6,35 mm² est apparue sur laquelle s'est formé un jet enflammé. Le petit trou et la brèche se sont formés alors que la pression interne du réservoir était supérieure à la pression de tarage de la soupape. C'est donc que cette dernière n'a pas assuré pas sa fonction. Le réservoir s'est vidé sans éclater ;

- Pour le test n° 3, le réservoir a été soumis à un feu de flaque. Le réservoir n'était pas muni d'une soupape. Une fissure s'est d'abord développée sur le haut du réservoir produisant un jet enflammé vertical. La pression interne avant la rupture était de l'ordre de 52 bar. Une onde de choc s'est formée (tableau D.16)

Direction	Distance (m)	Surpression (mbar)
1	15	308
2	15	255
1	46	78
2	46	54

Tableau D.16: Mesures de surpressions associés au test n°3

- Le test n° 4 était semblable au test n° 3, le réservoir étant toutefois, dans ce cas, équipé d'une soupape tarée à 17,2 bar. La soupape s'est ouverte environ 735 secondes après le début du feu de nappe. Un feu de jet s'est accroché sur la soupape. Après deux cycles de fonctionnement, la soupape s'est bloquée ouverte et le réservoir s'est vidé sans se rompre ;
- Le test n° 5, au cours duquel un jet de propane liquide enflammé était dirigé vers le réservoir, se déroule de manière analogue au test 4 ;
- Pour le test n° 6, un jet de propane liquide enflammé était dirigé vers le réservoir rempli à 50 % et ne comportant pas de soupape. 12 minutes après le début de l'essai, le réservoir s'est rompu, produisant une boule de feu d'environ. A 15 m du réservoir, on a mesuré une surpression maximale de 372 et 321 mbar. Immédiatement avant l'éclatement, la pression interne était de l'ordre de 66 bar.
- Les auteurs notent encore que, dans les tests 3 et 6, la pression dans les réservoirs a continué à augmenter encore légèrement après la formation d'une brèche de taille pourtant suffisante pour évacuer l'énergie de pression de vapeur contenue dans le réservoir. Ce phénomène va dans le sens de l'explication de Venart (Venart, Rutledge et al, 1993). L'ébullition consécutive à la chute de pression conduirait à un rejet diphasique choqué à la brèche, à la repressurisation du réservoir puis à la reprise de la propagation de la fissure et enfin, peu après, à la rupture du réservoir. Les auteurs remarquent que le développement rapide des bulles dans le liquide engendre son fractionnement en aérosols qui sont entraînés dans le nuage formé après la ruine du réservoir.

Une comparaison avec les modèles est proposée sur la figure D.25.

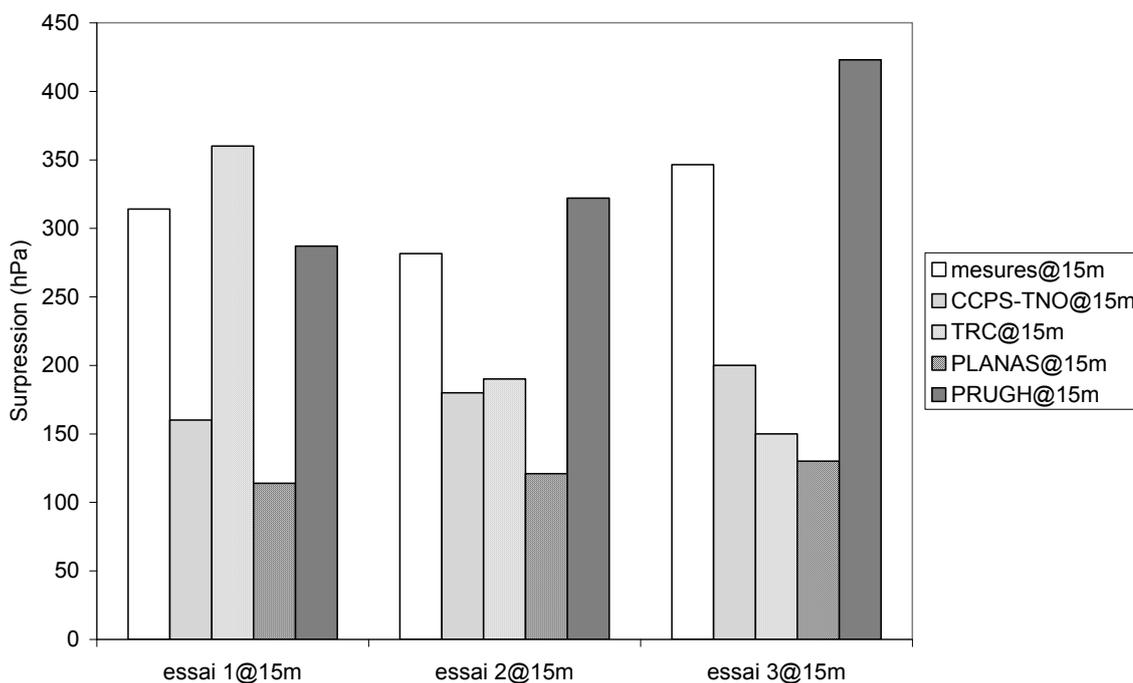


Figure D.25 Comparaison entre les niveaux de surpression mesurés et prédits (à 15 m)

Les essais de Birk

Les conditions d'essais sont rappelées dans le tableau D.1. Les niveaux de surpression ont été mesurés à 10 m du réservoir, dans l'axe et perpendiculairement à l'axe (tableau D.17).

Conditions	N° essai	Prupture (kPa)	T°liq rupture (°C)	P1side 10m	P1end 10m
15bar-76%	93-4	1500	43	112	95
24bar-63%	93-8	2446	66	152	127
21bar-83%	93-9	2122	22	45	43
27bar-50%	93-11	2680	73	182	105
21bar-63%	93-12	2108	58	163	92
22bar-64%	93-13	2170	57	172	95
24bar-86%	93-14	2377	25	32	22
15bar-76%	93-15	1494	43	55	70
20bar-84%	94-5	2000	58	112	67
20bar-91%	94-12	1950	55	58	52

Tableau D.17 : mesures de surpression lors des essais de Birk.

La figure D.26 représente les niveaux de surpression prédits des différents modèles. On constate qu'ils ne suivent que médiocrement les tendances et que les modèles de Shield et Planas sont parfois en défaut.

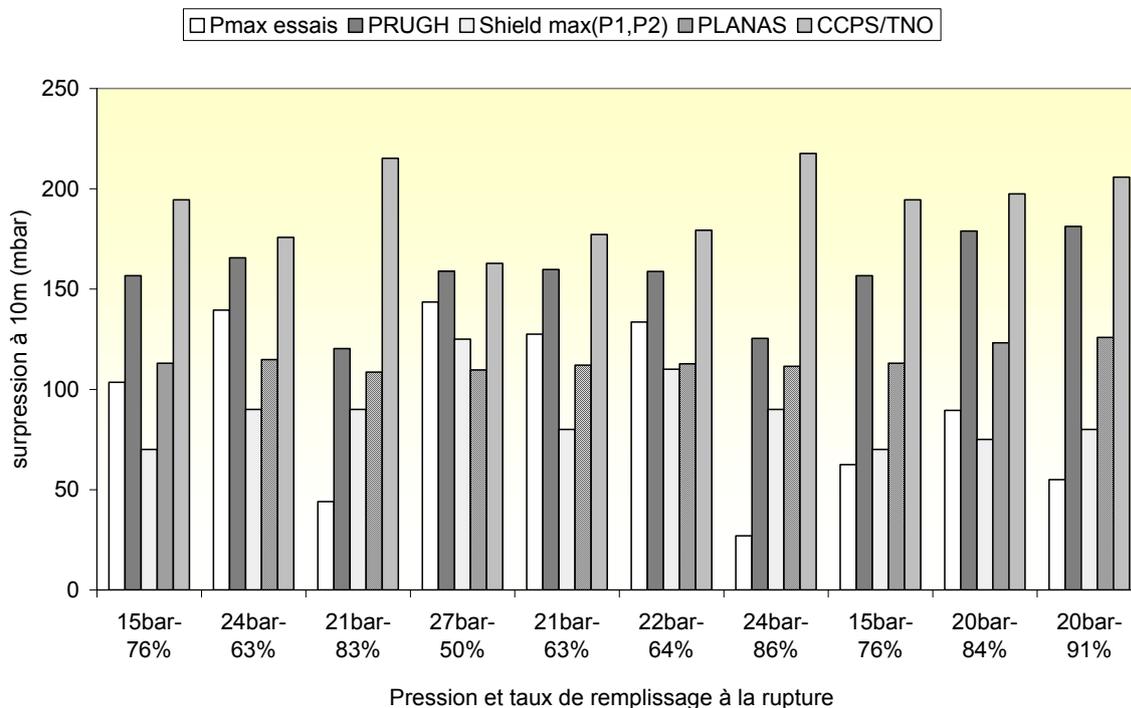


Figure D.26 : Comparaison entre les niveaux de surpression prédits et observés à 10 m du réservoir lors des essais de Birk

Les essais British Gas

Les essais ont été présentés dans le tableau D.5. (réservoirs de propane de 5,6 m³ et 10,8 m³, taux de remplissage au moment de la rupture entre 39 et 80%., contenu chauffé électriquement, rupture pyrotechnique). Les niveaux de surpression ont été mesurés à 25 m du réservoir (Tableau D.18).

Conditions	N° essai	Produit	Masse (kg)	Prupture (kPa)	Volume (litres)	Taux de remplissage	Projection max (m)	Pmax (hPa)
B-5,6m3-15bars-77%	1	butane	2000	1500	5,569	0,77	208	120
B-5,6m3-15bars-77%	1R	butane	2000	1500	5,569	0,77	230	120
B-5,6m3-15bars-39%	2	butane	1000	1500	5,569	0,39	216	75
B-5,6m3-7,5bars-68%	3	butane	2000	7,5	5,569	0,68		24
B-10,8m3-15bars-40%	4	butane	2000	1500	10,80386	0,40	163	110
P-5,6m3-15bars-80%	5	propane	2000	1500	5,569	0,80	262	50
B-5,6m3-15bars-77%	6	butane	2000	1500	5,569	0,77		120

Tableau D.18 : mesures de surpression lors des essais de British Gas.

Une comparaison avec les modèles est proposée sur la figure D.27.

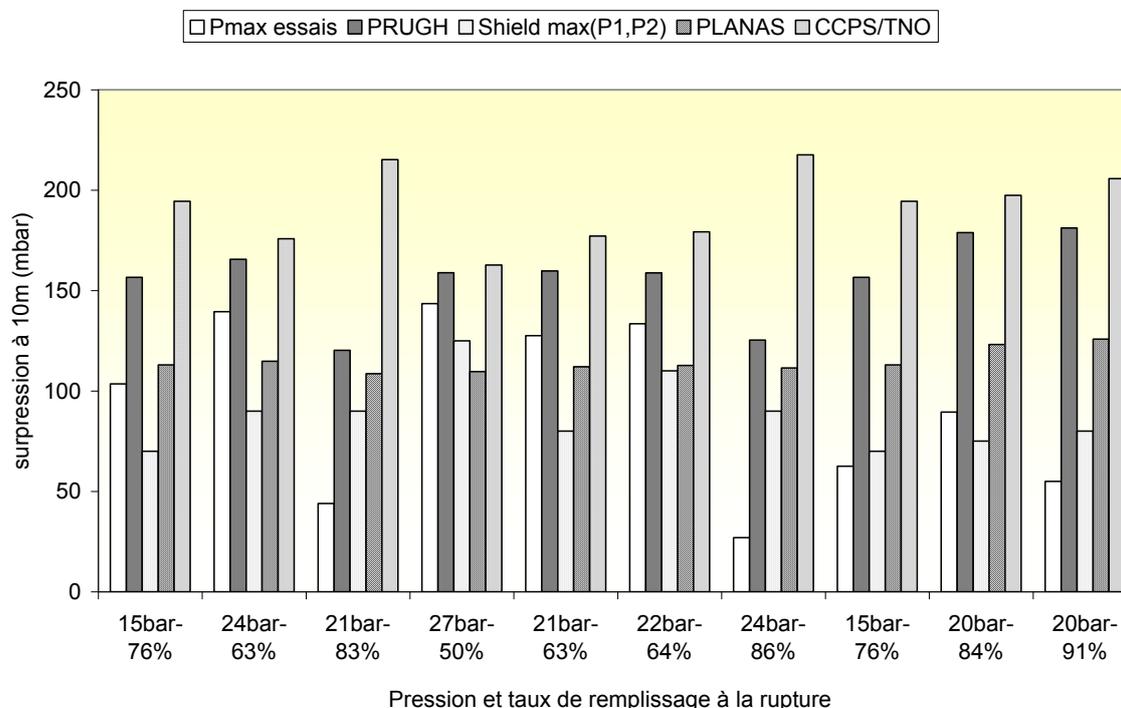


Figure D.27 : Comparaison entre les niveaux de surpression prédits et observés à 25 m du réservoir lors des essais de British Gas

L'essai du BAM

Cet essai réalisé sur un BLEVE d'une citerne ferroviaire de 45 m³ contenant du propane et soumise à un feu de flaque a été présenté ci-dessus. Avant l'éclatement, la pression dans le réservoir a augmenté linéairement jusqu'à la valeur de 25 bar où s'est produite la rupture. Cette valeur est inférieure à la pression d'épreuve de 28 bar. La citerne n'était pas munie de soupape.

Des signaux de pression ont été mesurés à 100 m, 150 m et 200 m (figure D.28). Les capteurs ont été fortement perturbés par le flux thermique (dérive vers le bas). On peut d'ailleurs s'en convaincre en remarquant que le délai nécessaire pour que l'onde de pression atteigne les capteurs est de l'ordre de 0,3 s alors que l'inflammation du nuage et le développement de la boule de feu se sont produits 0,4 s après l'éclatement. On constate que la dérive des signaux apparaît 0,15 s après la première impulsion de pression soit $0,3+0,15=0,45$ seconde après l'éclatement c'est-à-dire pendant l'inflammation du nuage. En poussant ce raisonnement, on peut d'ailleurs remarquer qu'une éventuelle impulsion de pression représentant l'effet de la combustion du nuage ne serait détectée par les capteurs que bien après l'inflammation, c'est-à-dire au moins 0,4 après la première impulsion caractéristique de l'éclatement. On constate alors que le « troisième pic de pression » est déjà passé ce qui signifie clairement qu'il n'est pas induit par la boule de feu.

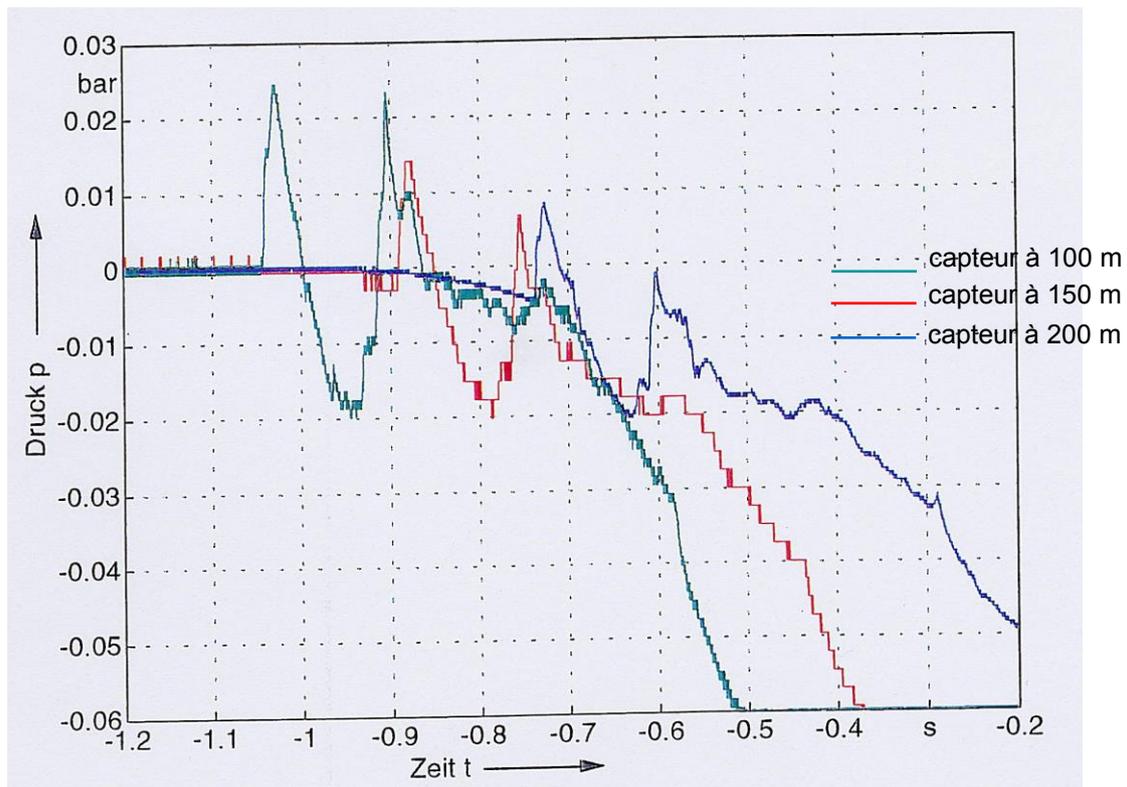


Figure D.28: courbes de surpression à 100, 150 et 200 m du réservoir

Les auteurs se sont inquiétés de la relative faiblesse des amplitudes et conseillé une certaine prudence dans l'exploitation. Une comparaison des résultats des modèles est proposée dans le tableau D.19.

Surpression à	Observations hPa	CCPS-TNO hPa	TRC hPa	PLANAS hPa	PRUGH hPa
100 m	25	52	80	36	54
150 m	15	33	50	24	35
200 m	15	25	40	17	25

Tableau D.19 : essai du BAM – confrontation entre observations et prédictions

Le retour d'expérience

Le retour d'expérience ne mentionne que rarement l'étendue des effets de pression, en particulier parce qu'ils sont souvent « masqués » par les effets thermiques, ou par d'autres explosions lorsqu'il a des effets dominos.

Ainsi, dans son rapport d'expertise sur **l'accident de Mexico**, Pietersen (Pietersen, 1985) mentionne que « la majeure partie des dégâts ont été causés par un intense rayonnement thermique de plusieurs heures¹² » et que « les effets de surpression sont relativement faibles ». Il cite des destructions de vitres par effet de pression (20 mbar) dans un rayon de 300 m, et par effet du rayonnement thermique dans un rayon de 600 m. Une comparaison avec les modèles est proposée dans le tableau D.20.

Surpression à	Observations hPa	CCPS-TNO hPa	TRC hPa	PLANAS hPa	PRUGH hPa
300 m	20	70	55	48	72

Tableau D.20 : accident de Mexico – confrontation entre observations et prédictions (hypothèse : éclatement 25 bar remplissage à 50%)

Un rapport relatif à un BLEVE de wagon (110 m³ rempli à 35%) survenu à **Perpignan** en 1970 (Bonnet, 2003) mentionne des distances aux effets de pression très élevées, jusqu'à 750 m pour le seuil de 30 mbar, et des dommages sévères (140 mbar) jusqu'à 250 m. Il semblerait que les effets thermiques aient été beaucoup plus limités. Une comparaison avec les modèles est proposée dans le tableau D.21. On constate que les niveaux de surpression prédits sont moindres que ceux observés. Une explication est que le wagon se trouvait dans une fosse de dépotage, au milieu d'un environnement urbain. Ce confinement partiel a pu favoriser le renforcement du pic de pression par réflexion sur les obstacles dans le voisinage de la fosse. Un doublement du pic de pression (par rapport à un champ libre) est plausible. Ce point illustre les limites de tous les modèles plutôt plus précis à grande distance et souvent uniquement dans un facteur 2...

¹² Ce rayonnement très long s'explique par la succession de plusieurs explosions, BLEVE et incendies.

Surpression à	Observations hPa	CCPS-TNO hPa	TRC hPa	PLANAS hPa	PRUGH hPa
250 m	140	30	35	20	30
750 m	30	10	12	7	10

Tableau D.21 : accident de Perpignan – confrontation entre observations et prédictions (hypothèse : éclatement à 25 bar)

Suite à l'**accident de Dagneux**, au cours duquel 2 citernes de 20 m³ de propane ont éclaté (l'une était vide de liquide, l'autre remplie à 25%), une cartographie assez précise des effets de pression a été réalisée par relevé de points dégâts confortés par des calculs plus précis de résistance des structures brisées). Les données sont présentées sous forme de graphe (tableau D.22) avec les estimations des modèles.

Surpression à	Observations hPa	CCPS-TNO hPa	TRC hPa	PLANAS hPa	PRUGH hPa
50 m	60 à 100	90	120	60	90
100 m	30 à 50	40	60	28	40

Tableau D.22 : accident de Dagneux – confrontation entre observations et prédictions (hypothèse : éclatement à 25 bar)

LA PROJECTION DE FRAGMENTS

Les essais de Baum

Les essais considérés (au nombre de 26) concernent (Baum, 1999) la rupture circonférentielle d'un petit réservoir cylindrique horizontal rempli d'eau surchauffée. Le réservoir est fixé de façon à ce que seulement l'extrémité soit éjectée (end-cap). La vitesse de cette extrémité a été mesurée par cinématographie rapide et comparée aux prédictions (Figure D.29). Sans trop de surprise, le modèle proposée par l'auteur lui-même convient. Les méthodes énergétiques sont très éloignées.

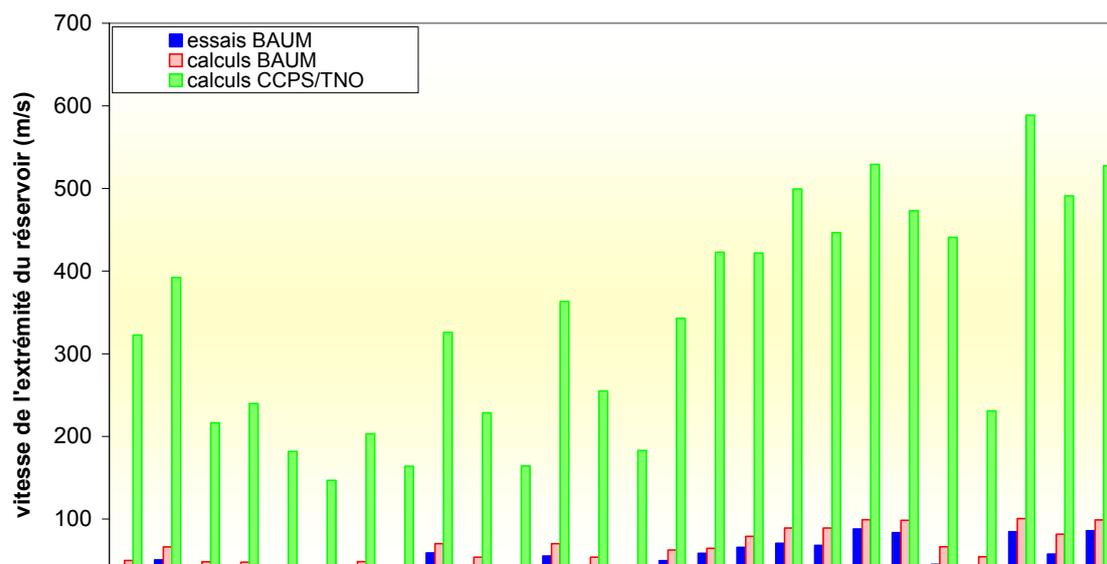


Figure D. 29 : comparaison des modèles entre eux et par rapport à l'expérience

Les essais du N.F.P.A.

Les six essais du N.F.P.A. (Mehlem et al., 1993) ont été réalisés avec des réservoirs cylindriques horizontaux, d'environ 1,9 m³ de capacité unitaire, remplis de propane. Quelques BLEVEs se sont produits pour lesquels les distances de projections ont été relevées (Tableau D.14). Les observations sont confrontées aux prédictions dans le tableau D.23. Les caractéristiques des fragments ne sont pas fournies. Nous avons forfaitairement retenu une masse spécifique des fragments de 150 kg/m² et un Cx de 1 et un ratio diamètre sur longueur de 3 pour les dimensions des réservoirs.

Test n°	Observations m	CCPS/TNO	Baum+Baker
1	118	310	190
3	74	310	190
6	195	380	190

Tableau D.23 : Essais du NFPA – confrontation entre observations et prédictions

Les essais British Gas

Les essais ont été présentés dans le tableau D.5. (réservoirs de propane de 5,6 m³ et 10,8 m³, taux de remplissage au moment de la rupture entre 39 et 80%, contenu chauffé électriquement, rupture pyrotechnique). Les observations sont confrontées aux prédictions dans le tableau D.22. Les caractéristiques des fragments ne sont pas fournies. Nous avons forfaitairement retenu une masse spécifique des fragments de 150 kg/m² et un Cx de 1 et un ratio diamètre sur longueur de 3 pour les dimensions des réservoirs.

Test n°	Observations m	CCPS/TNO	Baum+Baker
1	208	437	75
1R	230	437	75
2	216	375	75
4	163	437	62
5	262	437	75

Tableau D.22 : Essais du NFPA – confrontation entre observations et prédictions

L'essai du BAM

Cet essai réalisé sur un BLEVE d'une citerne ferroviaire de 45 m³ contenant du propane et soumise à un feu de flaque a été présenté ci-dessus. Les observations sont confrontées aux prédictions dans le tableau D.22. Les caractéristiques des fragments ne sont pas fournies. Nous avons forfaitairement retenu une masse spécifique des fragments de 150 kg/m² et un Cx de 1 et un ratio diamètre sur longueur de 3 pour les dimensions du réservoir.

Observations m	CCPS/TNO	Baum+Baker
100 à 200	437	75

Tableau D.22 : Essai du BAM – confrontation entre observations et prédictions

L'accident de Dagneux

On possède quelques éléments quantitatifs sur les projections de fragments. On a retrouvé un fond hémisphérique (160 kg/m², coefficient de traînée = 0,5) à 900 m et un morceau de virole (100 kg/m², coefficient de traînée = 1) à 70 m.

Observations m	CCPS/TNO	Baum+Baker
900	530	80
70	300	75

Tableau D.22 : Essai du BAM – confrontation entre observations et prédictions



INERIS

*maîtriser le risque
pour un développement durable*

Institut national de l'environnement industriel et des risques

Parc Technologique Aiaia
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>