

**Evaluation des effets thermiques liés au
phénomène de pressurisation de bac
atmosphérique à toit fixe de liquides
inflammables pris dans un incendie
extérieur**

Table des matières

1.	Contexte	2
2.	Références	3
3.	Réserves quant à l'approche « par défaut » de la circulaire	3
4.	Données d'entrée	4
4.1.	<i>Produit considéré et assimilation à un corps pur</i>	4
4.2.	<i>Données relatives au stockage</i>	5
4.2.1	Diamètre, hauteur	5
4.2.2	Pression de rupture.....	5
4.3.	<i>Données météorologiques</i>	5
5.	Calculs intermédiaires	5
5.1.	<i>Etat initial du système</i>	5
5.1.1	Propriétés physico-chimiques	5
5.1.1	Quantité de produit	6
5.2.	<i>Etat final du système (à rupture)</i>	7
5.2.1	Propriétés physico-chimiques	7
5.2.2	Surchauffe.....	7
5.3.	<i>Détermination de la masse de produit participant à la boule de feu</i>	8
5.3.1	Taux de flash	8
5.3.2	Aérosols : coefficient de correction.....	8
5.3.3	Hauteur de liquide potentiellement surchauffé	10
5.3.4	Configuration de remplissage la plus pénalisante	11
5.3.5	Masse participant à la boule de feu	12
6.	Caractéristiques de la boule de feu	12
6.1.	<i>Dimensions de la boule de feu</i>	12
6.2.	<i>Durée de vie de la boule de feu</i>	13
6.3.	<i>Emittance de la boule de feu</i>	14
7.	Détermination du flux thermique reçu en un point	14
7.1.	<i>Facteur de forme</i>	14
7.2.	<i>Atténuation dans l'air</i>	15
7.3.	<i>Flux thermique reçu en un point</i>	15
8.	Conclusion	16

Cette note a pour objectif de proposer une approche simple, raisonnablement majorante et reproductible permettant de modéliser le développement d'une boule de feu consécutive au phénomène de pressurisation de bac atmosphérique tel qu'il est décrit dans la circulaire du 23 juillet 2007 [2], ainsi que les effets thermiques associés.

Plus précisément, ce document détaille les hypothèses de modélisation retenues pour déterminer les effets thermiques générés par la boule de feu associée au phénomène considéré. Le choix de chaque hypothèse de calcul présentée est clairement argumenté, en cohérence avec diverses données de la littérature scientifique, ainsi qu'avec les éventuels retours d'expérience et avis d'experts disponibles. En outre, les hypothèses de modélisation ont été formulées dans un souci constant de cohérence vis-à-vis des modèles ayant d'ores et déjà été proposés par le Groupe de Travail dédié aux Dépôts de Liquides Inflammables (GTDLI) pour d'autres phénomènes dangereux (boil-over en couche mince, boil-over « classique », feu de nappe...).

1. Contexte

La circulaire du 23 juillet 2007 [2] introduit, dans le cas d'un bac atmosphérique pris dans les flammes d'un incendie, un phénomène dangereux qui n'était jusqu'à lors pas considéré dans les études de dangers remises à l'administration : il s'agit du phénomène de pressurisation, qui se caractérise « *par une montée en pression relativement lente, du fait de la vaporisation du produit contenu dans un réservoir pris dans un feu enveloppant* ».

Il est précisé que « *la pression atteinte par le gaz peut alors être importante et lorsque l'enveloppe du réservoir cède, une boule de feu liée à une vaporisation partielle instantanée et une inflammation des produits peut être générée. A défaut de disposer d'investigations plus poussées pour caractériser cette boule de feu, elle peut être considérée comme assez similaire au boil-over classique tel qu'il apparaît dans l'instruction technique du 9 novembre 1989* ».

L'objectif de la présente note est donc de décrire une approche permettant d'évaluer les effets thermiques associés au phénomène de pressurisation de bac atmosphérique, et assise sur des hypothèses dont la pertinence est démontrée et justifiée, comme la circulaire du 23 juillet 2007 [2] le permet.

Il est important de souligner qu'un sous-groupe de travail a été créé spécialement dans le cadre du Groupe de Travail dédié au Raffinage (GT Raffinage) pour aboutir à un tel modèle et que l'approche décrite dans cette note a fait l'objet d'un consensus dans le cadre de ce sous-groupe de travail dédié à la « Pressurisation de bac atmosphérique ».

2. Références

- [1] **Rapport « Oméga 13 –Boilover »**, INERIS, mars 2003
- [2] **Circulaire du 23 juillet 2007 « relative à l'évaluation des risques et des distances d'effets autour des dépôts de liquides inflammables et des dépôts de gaz inflammables liquéfiés »**, MEEDDAT, juillet 2007
- [3] **Annexe technique de la circulaire du 23 juillet 2007 « Les boil over et autres phénomènes générant des boules de feu concernant les bacs des dépôts de liquides inflammables »**, GTDLI, juin 2007
- [4] **Guide bleu de l'UFIP « Guide méthodologique UFIP pour la réalisation des Etudes de Dangers en raffineries, stockages et dépôts de produits liquides et liquéfiés »**, UFIP, juillet 2002
- [5] **Rapport « Guidelines for evaluating the characteristics of vapour cloud explosion, flash fire and BLEVE »**, CCPS (Center of Chemical Process Safety), 1994
- [6] **Publication d'Hasegawa & Sato « Study on the fireball following steam explosion of n-pentane »**, K. Hasegawa and K. Sato, (1977)

3. Réserves quant à l'approche « par défaut » de la circulaire

La référence au phénomène de boil-over en général, et aux formules qui lui sont associées dans l'instruction technique du 9 novembre 1989 en particulier, est inadéquate et trop majorante pour plusieurs raisons.

Tout d'abord, les formules de l'IT89 permettant d'évaluer les effets thermiques du boil-over sont issues de travaux portant sur des phénomènes de combustion riche en phase liquide, qui sont à distinguer d'un feu de gaz tel que décrit dans la circulaire, ce type de combustion étant plus à rapprocher d'un phénomène de feu de nuage ou flash-fire.

Par ailleurs, les formules de l'IT89 avaient essentiellement vocation à définir des distances de sécurité dans un objectif de maîtrise de l'urbanisation, plus que de décrire finement les phénomènes physiques observés. On notera en particulier que l'INERIS, dans son rapport « Oméga 13 – Boil-over » [1] a écrit : « *La comparaison des deux modèles effectuée dans le cadre de l'étude référencée INERIS-DRA-Ymo/Ymo-01-28639 largement évoquée dans le présent document, montre que de toute évidence, les formules de l'IT 89 ne sont pas appropriées pour rendre compte de la nature et des propriétés des différents produits stockés* ». Il semble ainsi peu évident se référer à des formules, dont la pertinence à décrire la boule de feu associée au phénomène de boil-over est remise en cause, pour évaluer les effets thermiques associés au phénomène de pressurisation de bac atmosphérique.

Enfin, le phénomène de boil-over implique une masse participante beaucoup plus importante, puisque celle-ci se trouve en phase liquide au moment du déclenchement de « l'effet piston », que le phénomène de pressurisation décrit dans la circulaire [2], qui n'implique que le ciel gazeux et une très faible fraction de la masse liquide présente dans le bac considéré. En effet, les pressions de rupture envisagées pour la séquence accidentelle retenue (quelques dizaines de millibar (g)) ne sont pas suffisantes pour générer une vaporisation instantanée significative. Ainsi, l'hypothèse de la masse participante liée à l'utilisation des formules de l'IT89 (10% de la masse totale de liquide), n'est pas cohérente avec le phénomène de pressurisation tel qu'il est décrit dans la circulaire du 23 juillet 2007 [2]. On peut aussi noter que la masse de produit participant à la boule de feu est pratiquement indépendante de la quantité de liquide totale présente dans le réservoir. En effet seul le gaz et une couche de liquide de faible épaisseur sont concernés par ce phénomène.

En somme, le recours à une autre approche que celle proposée par défaut dans la circulaire du 23 juillet 2007 [2] est nécessaire si l'on souhaite décrire de façon plus réaliste le phénomène de pressurisation de bac atmosphérique.

4. Données d'entrée

Les données d'entrée retenues pour la modélisation sont les suivantes :

- ✓ Produit considéré
- ✓ Données relatives au stockage : diamètre, hauteur, pression de rupture considérée
- ✓ Données météorologiques : température ambiante et humidité relative

4.1. Produit considéré et assimilation à un corps pur

Les produits considérés dans le cas du phénomène de pressurisation de bac atmosphérique sont d'origines diverses : coupes pétrolières, alcools, produits chimiques...

Un des points clés de la modélisation du phénomène réside en la détermination pertinente de la fraction de liquide vaporisée au moment de l'ouverture du bac. Cette quantité de liquide flashée dépend plus particulièrement de la température au moment de la rupture, elle-même liée à la valeur de la pression de rupture considérée, ainsi qu'aux propriétés physico-chimiques du produit, et notamment sa température d'ébullition.

On comprend ainsi que la caractérisation fine des propriétés physico-chimiques du produit considéré est une étape cruciale du calcul.

Dans le cas de coupes pétrolières et plus généralement de mélanges de produits, il est important de remarquer que ces mélanges ne présentent plus un « point » d'ébullition mais « un intervalle de distillation ». Ainsi, il est probable qu'à la température de rupture, seules les fractions les plus légères du mélange soient théoriquement en mesure de se vaporiser, les fractions plus lourdes étant en dessous de leur point d'ébullition.

C'est pourquoi, il semble pertinent de retenir une des coupes les plus légères représentant une fraction non négligeable de l'ensemble et susceptible de décrire les propriétés de la phase gazeuse de façon représentative au moment de la rupture.

Compte-tenu de la difficulté de traiter de façon globale chaque cas particulier, et de tenir compte des spécificités de chaque composant d'un mélange, **il est proposé de recourir à des corps purs représentatifs de l'ensemble du mélange**. De cette façon, on peut raisonnablement estimer que la considération d'un point d'ébullition représentatif des coupes les plus légères, et par suite d'un taux de flash correspondant au corps pur considéré, constitue une hypothèse raisonnablement conservatoire.

Dans le cas particulier des coupes pétrolières, il est proposé de considérer le n-Hexane (C6) comme représentatif des bases essences et l'Isododécane (C12) comme représentatif des bases distillats (gazole, FOD...).

Il peut naturellement être fait appel à d'autres corps purs pour décrire le comportement du produit considéré si cela s'avère pertinent, le choix de l'assimilation étant laissé à l'utilisateur.

4.2. Données relatives au stockage

4.2.1 *Diamètre, hauteur*

Ces paramètres sont aisément accessibles et sont par ailleurs déjà utilisés pour la modélisation d'autres phénomènes dangereux.

Par hauteur, on entend hauteur maximale de liquide dans le bac.

4.2.2 *Pression de rupture*

Ce paramètre conditionne l'état du produit au moment de la rupture, et par suite la masse participant à la boule de feu. Il est donc nécessaire de le définir au mieux, en fonction des informations relatives au bac considéré.

Il est important de garder à l'esprit que la pression de rupture est un paramètre dépendant des caractéristiques du bac considéré, qu'elle varie dans le même sens que la pression de design et que sa valeur diminue lorsque le diamètre du bac augmente.

Ainsi, un soin tout particulier doit être accordé à la définition de ce paramètre, afin de s'assurer de la pertinence des résultats de la modélisation.

4.3. Données météorologiques

Ces paramètres sont de moindre importance dans l'ordre de grandeur des résultats obtenus mais il importe de se rapporter à des valeurs représentatives.

En l'absence de données spécifiques, il est proposé de considérer les valeurs suivantes :

- ✓ Température ambiante : 15°C
- ✓ Humidité relative : 70%

Naturellement, il reste possible de renseigner des valeurs spécifiques à un site donné afin de bénéficier de plus de précision.

5. Calculs intermédiaires

Une fois connus les paramètres d'entrées, plusieurs calculs intermédiaires sont nécessaires, pour décrire l'état initial et à rupture du système.

5.1. Etat initial du système

5.1.1 *Propriétés physico-chimiques*

On utilise préférentiellement la base de données produits UFIP pour déterminer les propriétés physico-chimiques des produits rencontrés en raffinerie. De même, on applique les lois de variations des propriétés de ces produits en fonction de la température, telles qu'elles sont décrites dans le Guide bleu de l'UFIP [4].

Par exemple, les données relatives au n-Hexane et à l'Isododécane, respectivement retenus pour représenter les bases essences et les bases distillats, sont les suivantes :

Propriétés	n-Hexane	Isododécane
Densité liquide à 288K	664 kg/m ³	748 kg/m ³
Densité gazeuse à 300 K	3.50 kg/m ³	6.44 kg/m ³
Température d'ébullition	342 K	490 K
Température critique	507 K	658 K
Chaleur spécifique du liquide à 288 K	2269 J/(kg.K)	1835 J/(kg.K)
Enthalpie de vaporisation	335070 J/kg	239750 J/kg
Chaleur de combustion	44750000 J/kg	43420000 J/kg
Masse molaire	86 kg/kmole	170 kg/kmole
LIE	0.011	0.006
LSE	0.075	0.049

5.1.1 Quantité de produit

A l'aide des données d'entrée, on détermine aisément la surface du bac considéré :

$$S = \frac{\pi d^2}{4}$$

où

d est le diamètre du bac [m]

Par suite on calcule le volume du bac :

$$V = S \times h$$

où

h est la hauteur maximale de liquide dans le bac [m]

Le volume initial de liquide est déduit de la relation suivante :

$$V_{Liq}^0 = V \times r$$

où

r est le taux de remplissage du bac tel que calculé au 5.3.4 [-]

De même, le volume initial de gaz :

$$V_{Gaz}^0 = V \times (1 - r)$$

5.2. Etat final du système (à rupture)

5.2.1 Propriétés physico-chimiques

Les propriétés du produit au moment de la rupture sont déterminées selon la méthodologie décrite dans le guide UFIP [4].

Ainsi, étant donné la valeur de la pression de rupture considérée, on calcule la température d'équilibre correspondante du produit. Il s'agit de la température de rupture que l'on note T_{rupt} .

La relation suivante (équation d'Antoine) est utilisée pour déterminer la température d'équilibre du produit correspondant à la pression de rupture :

$$T_{Rupt} = \left(\frac{-ANTB}{\ln(0.0075 P_{Rupt}) - ANTA} - ANTC \right)$$

où

ANTA, ANTB et ANTC sont les coefficients d'Antoine du produit pur considéré

P_{Rupt} est la pression de rupture [Pa]

T_{Rupt} est la température d'équilibre au moment de la rupture [K]

De même, on détermine la masse volumique de la phase gazeuse à la température de rupture selon les lois de variations des propriétés produits en fonction de la température décrite dans le Guide UFIP [4].

$$\rho_{Gaz}^{T1} = \rho_{Gaz}^{300K} \times \frac{300}{T1}$$

où

T1 est la température considérée [K]

5.2.2 Surchauffe

On évalue ensuite la surchauffe comme étant la différence entre la température de rupture (à pression de rupture) et la température d'ébullition (à pression atmosphérique) du produit :

$$\Delta T = T_{Rupt} - T_{Bul}$$

où

T_{Bul} est la température d'ébullition du produit à P_{atm} [K]

Si cette valeur est négative, cela signifie que le produit n'est pas surchauffé et par conséquent qu'aucune vaporisation instantanée n'a lieu.

5.3. Détermination de la masse de produit participant à la boule de feu

5.3.1 Taux de flash

Dès lors que les conditions thermodynamiques du système au moment de la rupture sont connues, il devient possible d'évaluer l'état du produit au moment de l'ouverture du bac, c'est-à-dire au moment de sa mise à l'atmosphère.

En fonction de la surchauffe déterminée précédemment, il est possible qu'une fraction de la phase liquide subisse une vaporisation instantanée : il s'agit du phénomène de flash thermodynamique.

Conformément à l'approche décrite dans le guide UFIP [4] ainsi qu'à celle de nombreuses références de modélisation (PHAST, cahiers de l'UIC, TNO...), on retient une description isenthalpique. C'est-à-dire que l'enthalpie du fluide subissant la détente reste constante tandis que son entropie diminue, cette perte étant équilibrée par l'énergie de friction mise en jeu par l'écoulement.

On calcule ainsi le taux de flash de la façon suivante :

$$\beta = 1 - e \left(C_{plt} \frac{T_{Bul} - T_{Rupt}}{\Delta H_{vap}} \right)$$

Avec :

β	:	taux de flash [-]
C_{plt}	:	chaleur spécifique du liquide à la température T_{Rupt} [J/(kg.K)]
ΔH_{vap}	:	chaleur de vaporisation du liquide à la température T_{Rupt} [J/kg]
T_{Bul}	:	température d'ébullition [K]
T_{Rupt}	:	température d'équilibre à la pression de rupture [K]

NB : Il est à noter que, dans le cas où le produit n'est pas surchauffé (ie température de rupture inférieure à la température d'ébullition), aucun flash ne se produit et la valeur de β est nulle.

5.3.2 Aérosols : coefficient de correction

Le paragraphe qui suit fait référence à des éléments de modélisation se rapportant à la description du phénomène de BLEVE. Dans l'optique de définir de la façon la plus réaliste possible les caractéristiques de la boule de feu associée au phénomène de pressurisation de bac atmosphérique, et à défaut de modèles plus pertinents, il n'est pas incohérent de rechercher des sources d'inspiration dans la littérature relative au BLEVE. Cela dit, **il reste nécessaire de bien faire la distinction entre une boule de feu « gazeuse » générée par l'inflammation du ciel gazeux d'un bac atmosphérique et d'une très faible fraction du liquide contenu dans le bac et celle générée par la vaporisation explosive de la phase liquide d'un gaz liquéfié dans le cas d'un BLEVE. Les mécanismes physiques, et notamment l'ordre de grandeur de la pression de rupture, intervenant dans ces deux phénomènes sont très différents et il convient de ne pas les assimiler.**

Dans le cas où un liquide surchauffé subit un flash thermodynamique et passe brutalement à l'état gazeux, il est possible qu'une fraction de la phase liquide résiduelle soit entraînée avec le gaz sous forme d'aérosols. Cette génération d'aérosols augmente avec la valeur de la pression de rupture et avec le taux de flash (ces deux paramètres étant liés). Ainsi s'attend on à obtenir de très faibles entraînements d'aérosols dans le cas du phénomène de pressurisation de bac atmosphérique, compte-tenu des faibles pressions de rupture et de la nature des produits considérés (bien moins volatils que des gaz liquéfiés).

D'après le CCPS [5], la masse impliquée dans la boule de feu dépend du taux de flash :

✓ si le taux de flash β est supérieur ou égal à 1/3 alors : $M_{BF} = M_{Liq}$

✓ si le taux de flash β est inférieur à 1/3 alors : $M_{BF} = F_{correction} \times \beta \times M_{Liq}$

Avec :

M_{BF}	:	masse de produit participant à la boule de feu [kg]
$F_{correction}$:	facteur de correction (sans unité)
β	:	taux de flash (sans unité)
M_{Liq}	:	masse totale de liquide surchauffé à la rupture [kg]

Pour le facteur de correction, $F_{correction}$, la valeur 3 est recommandée par le CCPS, dans le cas des GPL.

Ainsi, il semble raisonnable et conservatoire d'affecter une valeur de 3 au facteur de correction au-delà d'un taux de flash de 30%.

Cette approche est cohérente avec d'autres publications sur le sujet : Roberts (1982), Hasegawa & Sato (1977)...

Considérant des produits bien moins volatils que les gaz liquéfiés ayant servi à l'élaboration de ce critère, on estime que la valeur du facteur de correction augmente progressivement avec le taux de flash jusqu'à la valeur de 3, atteinte pour un taux de flash de 30%.

L'hypothèse d'un entraînement d'aérosols nul pour un taux de flash nul est cohérente avec les mécanismes de rupture (faible pression d'ouverture du bac) ainsi qu'avec la nature des produits qui sont des liquides stabilisés dans les conditions ambiantes.

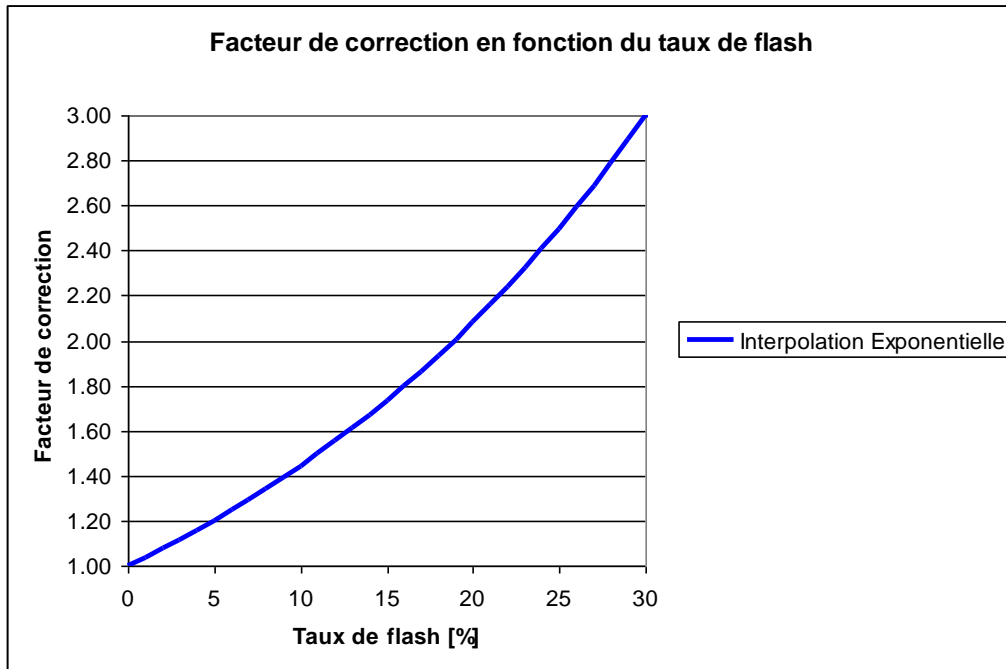
Ainsi, une valeur unitaire du facteur de correction est retenue pour un taux de flash nul.

Cette hypothèse est confirmée par l'interprétation de la littérature.

Deux valeurs ayant été fixées, il devient possible d'interpoler une fonction permettant de déduire la valeur du facteur de correction de celle du taux de flash sur l'intervalle [0 ; 0.3].

L'hypothèse d'une fonction exponentielle du type $f = A e^{B \times \beta}$ est faite.

On obtient ainsi l'évolution suivante sur l'intervalle [0 ; 0.3] :



5.3.3 Hauteur de liquide potentiellement surchauffé

Au moment de la rupture, seule une couche de liquide se trouve dans un état de surchauffe. En effet, compte-tenu de la pression hydraulique due au poids de cette couche de liquide, le liquide situé en dessous se trouve à une pression supérieure au point de bulle et le liquide ne se vaporise donc plus.

On estime la hauteur de cette couche de liquide surchauffé par la relation suivante :

$$h_s = \frac{(P_{Rupt} - P_{Atm})}{\rho_{liq} \times g}$$

où

- h_s est la hauteur de liquide surchauffé [m]
- ρ_{liq} est la masse volumique du liquide [kg/m^3]
- g est la valeur du champ de pesanteur terrestre [m/s^2]

Il est important de souligner que cette approche est intimement liée à une hypothèse d'homogénéité de la température dans le produit, du moins à l'intérieur de la couche ainsi définie.

Par comparaison avec une approche simple, basée sur le calcul d'un gradient thermique linéaire au sein du liquide, l'approche proposée apparaît comme majorante. En effet, si l'on considère une température de rupture au niveau de l'interface liquide/ciel gazeux d'une part, une température égale à la température ambiante au niveau du fond du bac d'autre part, et une variation linéaire au sein du liquide entre ces deux points pour estimer la hauteur de liquide potentiellement surchauffé, il ressort que l'approche précédemment proposée est toujours plus pénalisante.

Il est en outre important de rappeler qu'un gradient linéaire, considéré pour cette « vérification », constitue aussi une hypothèse conservatoire puisque le gradient réel aurait tendance à ne générer qu'une « épaisseur de peau » limitée sous l'interface liquide/ciel gazeux.

Il est à préciser que, pour tenir compte de la possibilité d'un remplissage faible, pour lequel cette valeur pourrait être supérieure à la hauteur initiale de liquide dans le bac, il convient de considérer le minimum entre la hauteur de liquide surchauffé, obtenue à l'aide de la formule précédente, et la hauteur initiale de produit dans le bac

On déduit ensuite aisément de cette hauteur de liquide potentiellement surchauffé la masse de liquide potentiellement surchauffé, notée M_{Liqs} , qui seule participera à la génération d'aérosols.

NB : Il est à remarquer que, bien que le calcul de la hauteur de liquide potentiellement surchauffé fasse intervenir la masse volumique du liquide au dénominateur, celle-ci n'a pas d'influence sur la masse de produit participant au final à la boule de feu, car le volume participant est ensuite multiplié par cette même masse volumique pour obtenir la masse réagissante. Cette tendance signifie que la quantité maximale de produit liquide participant à la boule de feu est surtout déterminée par la pression de rupture. En outre, il est important de garder à l'esprit que si la température de rupture n'a ainsi pas d'impact sur la masse participante par le biais de la masse volumique, elle en a une non négligeable par le biais du taux de flash.

5.3.4 Configuration de remplissage la plus pénalisante

Etant donné que seule la masse de liquide correspondant à la hauteur de liquide potentiellement surchauffée est susceptible de participer à la boule de feu, il existe une configuration « la plus pénalisante » de remplissage.

Cette configuration est obtenue lorsque le niveau initial de remplissage du bac est tel que la hauteur initiale de liquide dans le bac est égale à la hauteur de liquide potentiellement surchauffé. En effet, dans une telle configuration, la masse participante à la boule de feu, constituée du ciel gazeux et du liquide potentiellement surchauffé (générant le flash et l'entraînement d'aérosols), est maximisée.

Ainsi, on se place systématiquement dans cette configuration (hauteur de liquide initiale égale à la hauteur de liquide potentiellement surchauffé, telle que définie précédemment) pour estimer la masse de produit participant à la boule de feu.

On a donc :

$$M_{Liq} = S \times h_s \times \rho_{liq}$$

où

h_s est la hauteur de liquide surchauffé [m]

S est la surface du bac [m²]

ρ_{liq} est la masse volumique du liquide [kg/m³]

De même

$$M_{Gaz} = S \times (h - h_s) \times \rho_{gaz}$$

avec les mêmes notations et où

h est la hauteur du bac [m]

ρ_{gaz} est la masse volumique de la vapeur [kg/m³]

Le remplissage correspondant à cette configuration est alors le suivant :

$$r = \frac{h_s}{h}$$

avec les mêmes notations

5.3.5 Masse participant à la boule de feu

A l'aide des paramètres explicités précédemment, on détermine la masse totale de produit participant à la boule de feu. Elle est donnée par la relation suivante :

$$M_{BF} = M_{Gaz} + (F_{correction} \times \beta \times M_{Liq})$$

Avec :

M_{BF}	:	masse de produit participant à la boule de feu [kg]
M_{Gaz}	:	masse totale de gaz dans le stockage à la rupture [kg]
$F_{correction}$:	facteur de correction (sans unité)
β	:	taux de flash (sans unité)
M_{Liq}	:	masse de liquide potentiellement surchauffée [kg]

A noter que pour un taux de flash dépassant 30%, le produit $f \times \beta$ ne peut excéder 1, c'est-à-dire que la masse de liquide participant à la boule de feu ne peut être supérieure à la masse initiale de liquide.

6. Caractéristiques de la boule de feu

6.1. Dimensions de la boule de feu

Connaissant la masse de produit participant à la boule de feu (intégrant les contributions des phases gazeuse et liquide flashée et aérosolisée), il devient possible de déduire le volume correspondant, sous réserve d'effectuer une hypothèse sur la concentration dans la boule de feu au moment de l'inflammation.

Compte-tenu du fait que le ciel gazeux résulte d'une distillation lente, il semble pertinent de considérer que sa concentration est alors supérieure à la Limite Supérieure d'Inflammabilité (LSI) au moment de la rupture.

L'expansion des gaz consécutive à la rupture du bac, ainsi que l'entraînement d'air frais permettent aux vapeurs de se diluer jusqu'à atteindre la LSI : à ce moment, l'ignition intervient. La combustion du nuage est alors progressive et se propage de l'extérieur du nuage (enveloppe LSI) vers l'intérieur. Au fur et à mesure de la combustion, les gaz brûlés sont expulsés vers l'extérieur du nuage du fait de l'expansion thermique. Un apport d'air frais est créé parallèlement vers l'intérieur du nuage par conservation de la quantité de mouvement : il contribue à diluer le nuage de gaz riche jusqu'à la LSI, entretenant ainsi la combustion. L'extension maximale de la boule de feu est donc inscrite dans le volume de gaz de concentration inférieure à la LSI.

On représente ainsi le volume de la boule de feu par celui d'une sphère équivalente à la masse de produit participant à la combustion, en supposant une concentration homogène du mélange air/combustible égale à la LSI :

$$V_{BF} = \frac{M_{BF}}{\rho \times C_{LSI}}$$

Avec :

V_{BF}	:	Volume de la boule de feu [m ³]
ρ	:	Masse volumique du gaz à la température de rupture [kg/m ³]
C_{LSI}	:	LSI du produit (sans unité)

Par suite, on calcule le rayon de la boule de feu de la façon suivante :

$$R_{BF} = \left(\frac{3 \times V_{BF}}{4 \times \pi} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Considérant une inflammation quasi-immédiate de la boule de feu, et compte-tenu des faibles valeurs des pressions de rupture étudiées, il ne semble pas évident que la boule de feu présente un développement ascendant.

La hauteur du centre de la boule de feu est fixée égale à son rayon de sorte qu'elle soit toujours tangente au sol. Ainsi, il n'y a pas d'élévation de la boule de feu : cette approche est naturellement majorante du point de vue des effets thermiques ressentis au niveau du sol.

6.2. Durée de vie de la boule de feu

Les corrélations de la littérature, permettant de calculer la durée de vie de la boule de feu associée au BLEVE de GPL, sont toutes de la forme $t = a M^b$.

Dans un souci de cohérence avec l'approche retenue dans le cadre du modèle de boil-over « classique » décrit dans le rapport « Oméga 13 » de l'INERIS [1], on retient la formule empirique de HIGH (Bagster, 1989) pour déterminer la durée de vie de la boule de feu :

$$t_{BF} = 0.295 M_{BF}^{0,32}$$

Avec :

t_{BF}	:	durée de la boule de feu [s]
M_{BF}	:	masse inflammable = masse participant à la boule de feu [kg]

6.3. Émittance de la boule de feu

Pour les hydrocarbures, le guide UFIP [4] précise que « l'effet de suie et de fumée est proportionnel au nombre d'atomes de carbone dans la molécule de combustible. Pour le GNL, assimilé à du méthane, il n'y a qu'un atome de carbone par molécule : l'effet de fumée noire est minimum et l'émittance va très rapidement croître en fonction de la surface en feu pour atteindre une valeur proche de la valeur théorique calculée par la loi de Planck (qui est estimée à 239 kW/m^2) [...] ».

L'INERIS fournit respectivement les valeurs maximales de pouvoir émissif de 37 kW/m^2 et de 30 kW/m^2 pour des feux de nappe d'hexane et de dodécane, dans son rapport « Oméga 2 – Feu de nappe ». Pour information, la valeur relative au propane est de 74 kW/m^2 .

Par ailleurs, les données disponibles dans la littérature, relatives à des boules de feu d'hydrocarbures, indiquent des valeurs d'émittance :

- Hasegawa et Sato [6] ont déterminé une température de flamme de la boule de feu de n-pentane égale à 1180-1225 K. Si on assimile la boule de feu à un corps noir, l'application de la relation de Stefan-Boltzmann en supposant $\varepsilon = 1$ conduit à estimer une émittance de l'ordre de 130 kW/m^2 .
- Il peut être considéré que l'émittance d'une boule de feu est égale à celle d'un feu de nappe du même produit, affectée d'un coefficient. L'INERIS donne le ratio « de deux à trois fois supérieure ». Selon cette approche, l'émittance moyenne maximum d'une boule de feu serait de l'ordre de 90 kW/m^2 pour le dodécane et de 111 kW/m^2 pour l'hexane.

Il est à ajouter que, compte-tenu de la nature des produits considérés (plusieurs atomes de carbones par molécule), et des conditions de combustion non idéale, des fumées et des suies vont être produites en quantité, contribuant à diminuer de façon significative l'émittance moyenne de la boule de feu.

Il est en outre à ajouter que la valeur de 150 kW/m^2 est utilisée dans les modèles de boil-over [1] et de boil-over en couche mince [3].

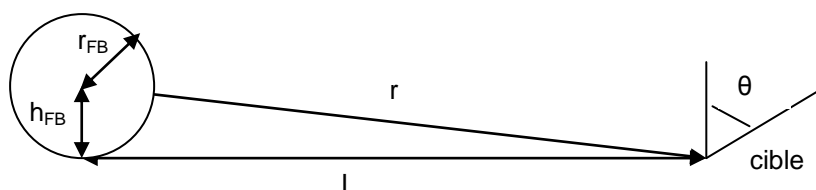
Ainsi, une émittance moyenne de 150 kW/m^2 est retenue, dans une approche simple et conservatoire et dans un souci de cohérence avec les modèles existants, pour décrire le flux thermique généré par la boule de feu associée au phénomène de pressurisation de bac atmosphérique.

7. Détermination du flux thermique reçu en un point

7.1. Facteur de forme

Le facteur de forme représente le ratio entre la surface émettrice et la surface réceptrice.

De façon simplifiée on considère une cible disposée perpendiculairement à la surface de la boule de feu :



Le facteur de vue s'exprime alors de façon simplifiée :

$$F_v = \left[\frac{4\pi R_{BF}^2}{4\pi r^2} \right] \cos\theta$$

avec $r^2 = L^2 + H_{BF}^2$

soit, en posant de façon majorante $\theta = \pi/2$:

$$F_v = R_{BF}^2 / (L^2 + H_{BF}^2)$$

Il s'agit donc d'une estimation conservatoire du facteur de forme, négligeant l'influence de l'orientation de la cible ainsi que celle d'éventuels obstacles masquant le rayonnement de la boule de feu.

7.2. Atténuation dans l'air

La vapeur d'eau et le dioxyde de carbone présents dans l'air absorbent une partie du rayonnement émis par la boule de feu. Il existe plusieurs méthodes permettant de calculer cet effet.

Dans notre cas, la formule suivante a été retenue (corrélation de Bagster) :

$$\tau = 2.02 \times (P_{H_2O} \times L)^{-0.09}$$

Avec :

- P_{H_2O} : Pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air à température ambiante [Pa]
- L : Distance entre la cible et la surface d'émission [m]
- T : Température ambiante [K]

7.3. Flux thermique reçu en un point

Au final, le flux thermique reçu en un point est calculé selon la formule suivante :

$$\phi = F_v \times \tau \times SEP$$

Avec :

- F_v : facteur de forme (sans unité)
- τ : transmittivité atmosphérique (sans unité)
- SEP : émittance de la boule de feu en kW/m²

8. Conclusion

En somme, cette note décrit une approche permettant de modéliser les effets thermiques de la boule de feu associée au phénomène de pressurisation de bac atmosphérique. Toutes les hypothèses de calcul nécessaires à la reproductibilité de cette approche sont clairement détaillées et justifiées.

Les hypothèses de modélisation ont toutes fait l'objet de discussions et ont abouti à un consensus dans le cadre du sous-groupe de travail dédié au phénomène de « Pressurisation de bac atmosphérique ».

Il reste à préciser que ce phénomène n'implique que des bacs à toits fixes et certains types de produits susceptibles de générer une pressurisation lente.

Il est important de garder à l'esprit que, si certaines étapes de modélisation ont été définies en faisant appel à des modèles existants dans la littérature scientifique adaptés au phénomène de BLEVE ou de boil-over, il est nécessaire de bien distinguer ce dernier du phénomène de pressurisation de bac atmosphérique, qui met en jeu des produits de nature différente et dans des conditions de rupture beaucoup moins pénalisantes. Ainsi, les ordres de grandeurs relatifs des effets thermiques associés à ces phénomènes ne sauraient être assimilés.