### SCENARIO E3  BOIL - OVER

### 1. GENERALITES

Certains feux peuvent causer des dommages considérables et de lourdes pertes humaines lorsque ces derniers sont mal maîtrisés et en présence de conditions particulières. Par exemple, « un hydrocarbure en combustion peut se retrouver violemment expulsé de son réservoir en raison de la vaporisation soudaine d’un second fluide présent au sein de celui-ci et possédant une plus forte densité et en revanche, un plus bas point d’ébullition que l’hydrocarbure ». Ce fluide correspond en général à de l’eau présente dans le fond du bac pour différentes raisons (condensation, eaux de pluie, d’extinction, présence naturelle dans l’hydrocarbure,…). Ce phénomène, caractérisé par **une vaporisation** de type particulier de l’eau, présente un caractère explosif avec projection intense de combustible pulvérisé au sein de la flamme . Il est ainsi dénommé **« boilover »** dans la littérature anglo-saxonne.

Le boil-over est un **phénomène grave**, qui peut intervenir au cours d’une intervention pour feu de réservoirs, impliquant certains produits tels que les pétroles bruts et tous autres produits pouvant donner des substances plus légères par distillation.

**2.** **EXEMPLES DE BOIL-OVER– RETOUR D’EXPERIENCE**

L’analyse des accidents passés permet de mettre en évidence les éléments caractéristiques d’un phénomène accidentel et particulièrement :

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

Six accidents sont synthétisés selon le tableau suivant :

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Date** | **Lieu** | **Type de bac et produits impliqués** | **Origines de l’accident** | **Evènements initiateurs** | **Caractéristiques du boil-over et conséquences** | **Moyens de protection** |
| 15  /  10  /  55 | Yokkaichi  (Japon) | Bac à toit fixe de  8 000 m3 contenant  7 000 m3 de FO | Pas de causes précisées | Incendie du bac puis formation d’une onde  de chaleur vaporisant le fond d’eau | Temps déclenchement boilover : 6,5 h  Formation d’une nappe en feu de 10 000 m²  Victimes : plusieurs pompiers Dégâts : + 4 M de yens, destruction  de 5 bacs | - Maîtrise du sinistre après 28 h  d’intervention,  - Utilisation de 79 fourgons pompes,  - Absence de cuvette de rétention et de merlon  - Stockage d’émulseur insuffisant |
| 19  /  12  /  82 | Tacao  (Venezuela) | Bac à toit fixe de  Centrale thermique de 40 000 m3  rempli au tiers de  FO n°6 | FO n°6 en phase gazeuse surchauffée à  80 °C au lieu de 65 °C | Explosion du ciel gazeux, éjection du toit fixe, incendie de bac… | Temps déclenchement boilover : 6 h  Rayon boule de feu : 150 m  Elévation boule de feu : entre 300 et 600 m  Formation d’une nappe en feu de 548 m de rayon  Victimes : 200 morts et 500 blessés | - Maîtrise du sinistre après 20j d’intervention,  - Destruction partielle du réseau d’eau incendie et des installations fixes de mousse du bac  - Evacuation de 40 000 personnes par l’armée. |
| 30  /  08  /  83 | Milford  Haven (GB) | Bac à toit flottant  de 94 110 m3  contenant 47 000 t  de brut léger | -Fissures dans le toit flottant (forts vents)  -Retombées  d’escarbilles provenant  d’une torchère  avoisinante | Inflammation des vapeurs de brut par escarbilles | Temps déclenchement boilover : 12 à 13 h pour le 1er boilover, 2 h plus  tard pour le second  Rayon boule de feu : 90 m  Elévation boule de feu : 150 m Formation d’une nappe en feu de 16 722 m² soit d’un rayon d’environ  73 m  Victimes : 6 pompiers blessés  Dégâts : 11 M$ | - Maîtrise du sinistre après 60 h  d’intervention  - Intervention de 150 pompiers  avec 50 véhicules dont 44 pompes et 6 plates-formes élévatrices,  - Utilisation 70 camions citernes d’émulseur et 763 m3 d’émulseurs |

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 24  /  02  /  86 | Thessalonique  (Grèce) | a) Bac à toit fixe de  17 900 m3 plein de  brut léger  b) Bac à toit fixe de  10 350 m3 plein de  FO | - Feu de cuvette par  épandage de FO  - Fuite alimentant le  feu | a) Incendie du bac, formation d’une onde de chaleur vaporisant le fond d’eau  b) Echauffement  prolongé (5 h) du bac par feu de surface et feu de cuvette permettant la vaporisation de l’eau en fond de bac | a) Temps déclenchement  boilover : 30 h  Elévation boule de feu : 300 m Projections de brut enflammé à 150 m  Formation d’une nappe en feu de 35 000 m² soit d’un rayon d’environ 105 m  b) Temps déclenchement  boilover : 5j  Victimes : 8 pompiers blessés  Dégâts : destruction de 10 bacs sur 12 | 7 j d’intervention pour éteindre  35 000 m² de feu de cuvette et 10  bacs en feu,  - Faibles quantités d’agents extincteurs |
| 02  /  06  /  87 | Port Edouard Herriot (France) | Bac à toit fixe de  2 900 m3 rempli au  tiers de gazole | - Fuite d’additif  (PE=12°C)  - Flash de l’aérosol formé  - Embrasement de 4 000 m² de cuvette | Feu de cuvette  généralisé, surchauffe du bac de gazole,  vaporisation du fond d’eau présent dans le bac | Temps déclenchement boilover : 5,5 h  Rayon boule de feu : 100 m  Elévation boule de feu : 450 m  Formation d’une nappe en feu de 5 000 m²  Victimes : 2 morts et 15 blessésDégâts : destruction de 24 bacs | - Intervention de 200 pompiers  durant 22 h,  - Utilisation de 200 m3  d’émulseurs. |
| 04  /  07  /  95 | Eyguières  (France) | Bac de 2,5 m3 de  lubrifiant dans un  entrepôt | - Feu de bac  - Canalisation PV contenant de l’eau fondue d’où présence  d’eau dans le fond du bac | Incendie du bac puis formation d’une onde de chaleur vaporisant  le fond d’eau | Temps déclenchement boilover : + 2 h  Formation d’une boule de feu roulant au plafond  (embrasement généralisé de l’entrepôt)  Victimes : 3 pompiers blessés | - Utilisation lances à mousse  (extinction du feu en 5 h),  - Evacuation d’un supermarché et  de villas,  - Interruption de la circulation,  - Interruption de la circulation,  éviter la pollution des eaux. |

**3. CONCLUSION SUR LE RETOUR D’EXPERIENCE**

* **temps d’apparition du phénomène**

Les durées d’incendie avant le boilover étaient de l’ordre de :

* six heures après l’inflammation du bac pour le boilover survenu à TACOA au Vénézuela, le 19 décembre 1982,
* six heures trente après l’inflammation du bac pour le boilover survenu à YOKKAICHI au Japon, le 15 décembre 1955,
* douze heures quarante cinq et quinze heures vingt cinq après l’inflammation du bac pour les deux boilover survenus à MILFORD HAVEN en Angleterre, le 30 août 1983,
* trente heures après inflammation du bac n°8, et cinq jours d’échauffement dû au feu de cuvette pour les deux boilover (le premier impliquant du brut, l’autre concernant du fuel oil) survenus à THESSALONIQUE en Grèce, le 24 février 1986.
* **Conditions d’occurrence**

Ainsi, il ressort que l’occurrence d’un boil-over sur un bac industriel nécessite :

* un incendie préalable
* et une durée de l’ordre de plusieurs heures (dépendant surtout des masses en jeu).

**Le boilover avant déclenchement correspond à un effet domino retardé d’un incendie.**

De plus, pour qu’un tel phénomène se produise, si l’on considère que les bacs susceptibles d’être le siège d’un boil-over sont tous de type à toit fixe ou flottant, il est nécessaire :

* que le réservoir perde son toit fixe ou flottant,
* que le contenu de ce réservoir soit en feu.

Ensuite, les conditions d’occurrence peuvent être différentes suivant le produit stocké dans le bac. Il peut alors être fait la distinction entre les hydrocarbures du type gazole et Fuel Oil et ceux du type pétrole brut.

* **Remarques**

L’hydrocarbure en question doit avoir une densité 1; ne pas être soluble dans l'eau, et avoir une viscosité minimale (pour que l'effet piston puisse se produire. Ces conditions sont valables pour le brut lourd, le brut léger, G.O., mais le phénomène est impossible avec de l’essence, des solvants)

* **GAZOLE ET FUEL OIL**

Le **gazole** et le **Fuel Oil** sont des produits stockés à point éclair supérieur à la température ambiante et ne dégagent donc pas suffisamment de vapeurs à la température de stockage pour former une atmosphère inflammable. Dans le cas d’accidents mettant en jeu ces produits, seul un feu de cuvette préalable peut créer les conditions nécessaires pour :

* échauffer les produits liquides contenus dans les réservoirs de sorte qu’ils génèrent suffisamment de vapeurs inflammables ;
* échauffer les vapeurs qui s’accumulent sous le toit du réservoir jusqu’à que celles-ci atteignent leur température **d’auto-inflammation** (> 250 °C) et créer les conditions de l’explosion.

Pour les bacs à toit fixe contenant du gazoleou du Fuel Oil, l’explosion du ciel gazeux peut résulter en pratique d’un feu de cuvette non maîtrisé. Cette hypothèse correspond aux scénarios de boilover observés d’une part lors de l’incendie survenu le 02 juin 1987 sur le dépôt pétrolier du Port Edouard Herriot à Lyon et d’autre part, lors de l’incendie survenu en 1983 sur le terminal pétrolier de Thessalonique.

L’arbre d’événements suivant présente l'enchaînement des conditions qui ont permis la survenance d’un boilover sur des réservoirs à toit fixe dans les cas du Port Edouard Herriot (1987) et du terminal pétrolier de Thessalonique (1986, 2 e boilover sur bac Fuel Oil).

## PETROLE BRUT

Concernant les bacs de **brut,** qui sont en général de type à toit flottant (bacs de grande capacité), la variété des coupes pétrolières concernées par ce type de stockage et l’absence de traitement de ces produits ne permet pas d’exclure :

* la production d’une quantité suffisante de vapeurs à température ambiante pour former une atmosphère inflammable,
* la présence permanente d’un fond d’eau due à la nature même des bruts, qui aurait sédimentée en fond de bac.

Dans ces conditions, le boilover apparaît comme plus probable pour autant qu’une défaillance du toit flottant survienne (fissures) et que les vapeurs inflammables rencontrent un point d’inflammation .

En tout état de cause, l’accidentologie montre que le phénomène de boilover reste rare. De plus, étant donné que le phénomène de boilover est un phénomène à dynamique lente, c’est-à-dire que sa survenance n’intervient qu’après plusieurs heures de sinistre, il est généralement possible de mettre à profit ce délai afin d’évacuer les populations avoisinantes, si l’incendie n’a pu être maîtrisé dans les deux premières heures du sinistre.

1. **DESCRIPTION DU PHENOMENE**

Lors d’un feu, les fractions légères et volatiles brûlent. Les **fractions lourdes**, non distillées, sont alors chauffées en surface. De par leur densité, ces fractions lourdes se concentrent et **coulent**, réchauffant la couche adjacente qui distille à son tour. Ce phénomène se poursuit, formant ainsi une **onde de chaleur descendante**.

Il s’agit donc d’un **transfert de chaleur** d’une particule chaude de masse spécifique plus élevée vers une couche plus froide située plus bas. L’onde de chaleur est alimentée en continu par les résidus de la combustion de surface et son épaisseur peut augmenter plus rapidement que ne diminue la hauteur d’hydrocarbure dans le bac pour que le boilover soit envisageable.

Lorsque cette onde de chaleur rencontre une poche d’**eau**, celle-ci se **vaporise instantanément** en éjectant du réservoir le contenu en feu (Fig-3 )

Ceci permet d’écrire les conditions nécessaires à la formation d’une onde de chaleur :

* Naissance d’un feu dans le réservoir atmosphérique concerné, ceci implique que le toit soit déjà détruit ou expulsé.
* Vitesse de descente de l’onde de chaleur supérieure au taux de régression du foyer.
* Combustion d’un hydrocarbure à plage d’ébullition suffisamment large.

Une fois le volume de vapeur d’eau formé par contact de la zone chaude avec l’eau située en pied de bac, ce volume de vapeur ne pourra agir à l’instar d’un piston que si l’interface vapeur en expansion/couche d’hydrocarbure liquide offre des conditions d’étanchéité suffisantes. L'étanchéité sera réalisée par une **viscosité cinématique** suffisante, permettant la création de **l’effet piston** ou éjection du liquide par expansion de l’eau sous forme de vapeur. Dans le cas contraire, la vapeur d’eau générée s’échappera sous forme de bulles au travers de l’hydrocarbure liquide et le phénomène résultant s’identifierait plutôt à un *slopover* qu’à un *boilove*r. Pour qu’il y ait occurrence d’un effet piston, la viscosité cinématique de l’hydrocarbure stocké devra être supérieure pour la même température de 393 K à une valeur limite de 0,73 cSt.

Il faut noté q’une **infime quantité d’eau**, piégée dans le réservoir, peut suffire à la création d’un boil-over. En effet, Sous la pression de l’interface, la masse volumique de la vapeur est 1700 à 2 000 fois moindre que celle de l’eau liquide aux conditions normales de température et de pression. De ce fait, pour que le volume de vapeur engendré remplisse le bac, il suffit que l’épaisseur du fond d’eau soit, en ordre de grandeur, de l’ordre du 1 700 e au 2 000 e de la hauteur du bac, soit de l’ordre du centimètre pour les bacs les plus communs.

A l’issue de cet effet piston, l’hydrocarbure ainsi propulsé va donner lieu d’une part à une **boule de feu** se développant au-dessus du bac et d’autre part, à un **feu de nappe** aux alentours du bac en raison de jets liquides retombés au sol.

Donc pour qu’un boilover se produise, trois conditions doivent être réunies :

1. la présence d’eau dans le bac à transformer en vapeur,
2. la création d’une onde de chaleur qui entre en contact avec le fond d’eau et engendre ainsi une vaporisation explosive,
3. un hydrocarbure suffisamment visqueux pour que la vapeur d’eau ainsi créée ne traverse pas facilement l’hydrocarbure *(...HC > 0.73 cS*t).



**2 eme phase**

Onde de chaleur



**3 eme phase**

**Onde de chaleur**

**Eau**

**1 ere phase**

**Eau**



**4 eme phase**

**Vapeur d’eau**



**Vapeur d’eau**

**4 eme phase**

Fig-3 : Schéma de propagation de l’onde de chaleur

**REMARQUES:**

L’hydrocarbure en question doit avoir une densité 1; ne pas être soluble dans l'eau, et avoir une viscosité minimale ( pour que l'effet piston puisse se produire. Ces conditions sont valables pour le brut lourd, le brut léger, G.O., mais le phénomène est impossible avec de l’essence, des solvants)

**Effets :**

Flux thermique important, mais pas d'onde de choc.Le flux thermique est inférieur à celui de la boule de feu

**Φ0 B-O =150 KW / m2, alors que Φ0 Bdf =200 KW/m2,**

On calcule :

* La distance des effets du flux thermique
* La boule de feu

Il faut utiliser la méthode du BLEVE, en prenant un rendement de 3 %, soit une Masse réagissant égale à 3 % de la masse de produit considérée ⇒ Mréa = M X 0.03 (dans le cas du BLEVE , si le rendement n'est pas précisé il faut prendre 10%)

**Distances des effets thermiques:**

#### **Méthode décrite par l’instruction technique (réglementation française) du 09.11.1989**

Les formules suivantes ont été déterminées pour l'éloignement des habitations et routes d'une part, des établissements recevant du public et des voies a grande circulation d'autre part en retenant respectivement des seuils de 5 kW/m2 et 3 kW/m2 pour les flux thermiques et 170 mb et 50 mb pour les phénomènes de surpression.

**d5KW/m2 = 5.864 Mréa1/3** pour les ERP

**d3KW/m2 = 8.23 Mréa1/3** pour les habitations

où d est la distance en mètres et M la masse (en kilogrammes) réagissant ou à défaut 10 % de la masse contenue dans le réservoir.