**I. INTRODUCTION**

Les activités industrielles comportent des risques, certains d’entre eux qualifiés de risques technologiques majeurs qui sont des évènements accidentels de faible probabilité mais dont les conséquences peuvent être catastrophiques.

La prévention tend à réduire au maximum le degré d’occurrence et les conséquences des accidents majeurs, mais de part leurs nature et quelle que soit la qualité des mesures prises, certaines installations présentent un risque résiduel qu’il n’est pas techniquement et économiquement possible de supprimer totalement.

Face à de telles exigences, l’industriel doit être en mesure de :

* Connaître les risques que ses installations sont susceptibles de générer (explosion, incendie, nuage toxique) ou de subir (catastrophes naturelles, nuage toxique ou radioactif..)
* D’en dimensionner les conséquences accidentelles tant sur son site que sur l’environnement proche et notamment sur la population avoisinante,
* De se doter d’une organisation opérationnelle lui garantissant une gestion efficace de la crise afin d’en limiter les effets.

La seule approche acceptable et techniquement fondée pour l'affichage des risques en vue d'une maîtrise de l'urbanisation est de considérer l'ensemble des scénarios d'accident possibles, y compris les plus pénalisants, d'en déduire les effets maximaux et de les présenter.

Les principaux scénarios de référence qui serviront de base à la détermination de la zone de concertation autour de l’installation à risque sont les suivants :

* Risques liés aux installations de gaz combustibles liquéfiés.

**Scénario A : explosion de type BLEVE.**

**Scénario B : explosion de type UVCE, feux chalumeau (feux torche).**

* Risques liés aux capacités contenant des gaz toxiques liquéfiés ou non et risquant d’éclater lors de manipulations, lors des explosions internes ou lors des agressions externes.

**Scénario C : perte totale et instantanée de confinement.**

* Risques liés aux installations de gaz toxiques (lorsque la capacité est dimensionnée pour résister aux agressions externes ou réactions internes des produits).

**Scénario D : rupture instantanée de la plus grosse canalisation entraînant le plus fort débit massique.**

* Risques liés aux stockages de liquides inflammables de grande capacité.

**Scénario E : feu sur la plus grande cuvette, explosion de la phase gazeuse des bacs à toit fixe, boule de feu et projection de produit enflammé par phénomène de Boil-Over.**

* Risques liés à l’utilisation et au stockage d’explosifs ou de produits explosibles.

**Scénario f : explosion de la plus grande masse de produits présente ou pouvant se produire par réaction.**

Chacun des scénarios comporte des critères de référence, tels que :

* Un certain nombre d'hypothèses concernant les conditions de l'accident.
* Les seuils de gravité pour caractériser les effets de l'accident (toxicité, radiations thermiques, surpression).
* L'ensemble des critères permet d'évaluer l'étendue de zones à risques correspondant aux premiers décès et aux premières atteintes irréversibles sur l'homme, dont l'enveloppe représente la zone de concertation, où une maîtrise de l'urbanisation est nécessaire.

Chacun des scénarios d'accidents est étudié pour en évaluer les conséquences potentielles sur l'environnement (personnes, milieux naturels).

Les scénarios d'accidents qui ont été retenus sont majeurs par le fait que l'on ne prend pas en compte, au niveau des calculs, les systèmes de sécurité existants ou les moyens de protection.

L’intensité des effets des phénomènes dangereux est définie par rapport à des valeurs de référence exprimées sous forme de seuils d’effets toxiques, d’effets de surpression, d’effets thermiques et d’effets liés à l’impact d’un projectile, pour les hommes et les structures.

**II. DEFINITION ET IDENTIFICATION DES SCENARIOS D’ACCIDENTS MAJEURS**

**1. SCENARIOS D’ACCIDENTS MAJEURS**

# 1.1. Définition :

# Séquence d’évènements qui s'ils ne sont pas maîtrisés, s’enchaînent ou se combinent jusqu’à l’apparition de dommages majeurs au niveau des cibles de l’environnement.

Cette définition appelle les commentaires suivants :

* un scénario d’accident ne se résume pas à un seul événement comme une perte de confinement particulière. Il décrit un ensemble d'enchaînements d’évènements pouvant conduire à un accident.
* la gravité d'un scénario d’accident se rapporte à des effets potentiels au niveau de "cibles" présentes dans l’environnement. Dans le cas des accidents majeurs, il convient de distinguer les cibles suivantes :
  + les **personnes** (personnel du site concerné, populations habitant ou travaillant autour de sites industriels),
  + les installations et équipements pouvant être à l’origine de nouveaux accidents ou de suraccidents (**équipements dangereux**),
  + certains équipements indispensables pour maintenir le niveau de sécurité des installations (**équipements de sécurité critiques** comme une salle de contrôle, un local pomperie incendie, un réseau torche…),
  + les **biens et les structures** dans l’environnement des installations,
  + l’**environnement naturel** (nappes phréatiques, cours d’eau, sols…).
* un scénario d’accident majeur se rapporte à des effets majeurs sur les cibles identifiées.

Donc la définition d’un scénario d’accident résulte d’un processus d’analyse de risques qui intègre généralement les résultats tirés :

* de l’analyse d’accidents survenus sur les équipements étudiés ou des équipements similaires,
* de la caractérisation des dangers associés aux produits mis en oeuvre,
* de l’identification des risques d’origine interne liés à l’exploitation de l’équipement considéré,
* de la prise en compte des sources potentiels d’agressions externes, d’origine naturelle (séisme, foudre…) ou non (transport, effet domino…).

Il est possible de présenter les scénarios d'accidents majeurs sous la forme d'un ou plusieurs nœuds papillons, comme le modèle présenté ci-après (fig-1).

Dans cette représentation, chaque chemin conduisant d'un ***évènement indésirable ou courant*** à l’apparition de dommages au niveau des cibles (***effets majeurs***) désigne un scénario d’accident particulier pour un même événement redouté central.

l'identification des scénarios d'accidents majeurs doit être réalisée en négligeant l'action de toutes les barrières de sécurité éventuellement présentes.

**1.2. Présentation de la démarche « nœud papillon »**

**1.2.1.Arbre des causes**

La partie gauche du schéma, ou arbre des causes, s’attache à identifier les causes d’un accident éventuel. Ainsi, l’origine d’un scénario d’accident peut résulter de :

* un ou la combinaison de plusieurs événements indésirables, notés EIN dans la figure 1. Un événement est qualifié d’indésirable lorsque son occurrence est exceptionnelle et extérieure au champ des conditions normales d’exploitation.
* un ou la combinaison d’événements courants, notés EC. A l’inverse d’un événement indésirable, un événement courant est récurrent dans des conditions usuelles d’exploitation et est donc prévisible dans une certaine mesure.
* La combinaison d’événements indésirables et d’événements courants.

En fonction de l’action d’éventuels systèmes de prévention, l’une des combinaisons précédemment citées conduit à considérer ou non un ou plusieurs événements initiateurs de l’accident, noté EI sur la figure 1.

En règle générale, il est possible d’identifier un nombre fini d’événements initiateurs susceptibles de se produire pour un équipement particulier.

A l’inverse, les combinaisons d’événements indésirables ou courants conduisant à cet événement initiateur, sont infinies.

Ainsi, si l’on considère l’événement indésirable suivant : « Perte de contrôle d’un véhicule de transport à proximité d’une tuyauterie », et si la dite tuyauterie n’est pas enterrée ou surélevée, l’événement initiateur de l’accident pourra être défini comme l’agression mécanique du véhicule sur la tuyauterie. En revanche, il existe une multitude d’événements indésirables et courants qui peuvent aboutir à la perte de contrôle du véhicule.

**1.2.2. Evènement redoute central (ERC)**

Un événement initiateur de l’accident peut conduire à l’Evénement Redouté Central, noté ERC.

L’événement redouté central se rapporte généralement soit à une perte de confinement conduisant à la mise à l’atmosphère d’une substance ou préparation dangereuse, soit à une réaction dangereuse de la substance considérée (ex. cas des produits solides). Dans l’exemple précédemment cité, cet événement redouté pourrait être une brèche dans la tuyauterie.

**1.2.3. Arbre des avènements**

L’événement redouté central peut se décliner en Événements Redoutés Secondaires (ERS) en fonction de l’action d’éventuelles barrières de protection et des caractéristiques de l’équipement et de la substance.

Un Evénement Redouté Secondaire caractérise ainsi les caractéristiques de la perte de confinement ou d’intégrité physique de la substance dangereuse. Par exemple, le rejet est-il biphasique ou gazeux? L’incendie est-il généralisé ou non ? Un événement redouté secondaire peut à son tour conduire ou non, en fonction des barrières de protection mises en place, à un ou plusieurs Phénomènes Dangereux (Ph. D).

Un Phénomène Dangereux représente un phénomène physique susceptible d’entraîner une atteinte significative, immédiate ou différé, pour l’homme, l’environnement ou les structures.

L’estimation des conséquences est effectuée à partir de la définition des Phénomènes Dangereux. En conséquence, l’événement majeur, noté EM sur la Fig-1sera défini par l’exposition des personnes, de l’environnement ou des structures aux effets du phénomène dangereux.

Afin d’illustrer la démarche présentée ci-avant, prenons le cas d’un réservoir contenant une substance toxique par inhalation (ammoniac par exemple). L’événement redouté central (ERC) relatif à cet équipement est **la perte de confinement** conduisant à la mise à l’atmosphère d’ammoniac. Cet événement redouté central peut résulter de plusieurs événements initiateurs (EI) tels que la corrosion, un choc… L’événement redouté Central (ERC) peut se décliner selon que la perte de confinement est liée à :

* + une rupture instantanée du réservoir,
  + une brèche dans le réservoir,
  + une brèche sur une tuyauterie reliée au réservoir.

Ainsi, dans ce cas, les évènements secondaires à considérer pourraient concerner la formation d’une flaque au sol, un rejet gazeux ou biphasique, une bouffée…

Ces événements, dénommés évènements redoutés secondaires (ERS) peuvent conduire au phénomène dangereux (Ph D) suivant, soit la dispersion d’un nuage d’ammoniac. Enfin, dans ce cas, l’événement majeur (EM) sera défini comme l’exposition de personnes à des concentrations d’ammoniac susceptibles d’entraîner des effets significatifs.

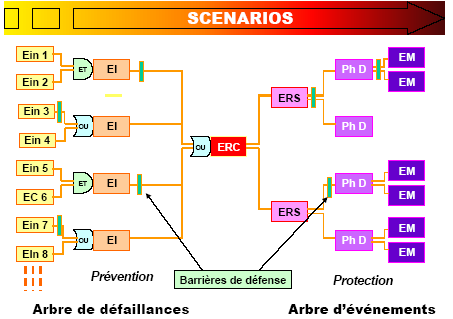


Fig-1 : Représentation des scénarios d’accidents selon le modèle du nœud papillon

**1.3. Importance des scénarios d’accidents majeurs dans l’étude des dangers :**

L’identification des scénarios d’accidents majeurs constitue le point-clé d’une étude des dangers. A l'issue de l'analyse des risques avec une méthode déductive, ont été identifiés des évènements ou situations critiques pour lesquels une étude plus approfondie en s'appuyant, si besoin, par une méthode inductive, doit être réalisée. L'analyse de ces scénarios critiques permettra d'identifier les scénarios d'accidents majeurs.

Les scénarios d’accidents majeurs désignent donc les séquences accidentelles qui devront être maîtrisées en priorité. La démonstration de la maîtrise des risques devra être réalisée pour chacun de ces scénarios d’accidents majeurs, notamment par l'évaluation de leur gravité et de leur fréquence d'occurrence.

Parmi les scénarios d’accidents majeurs identifiés, certains feront l’objet d’une estimation quantitative de leurs conséquences afin de fournir des éléments pour démontrer la robustesse de la maîtrise des risques.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| ***Désignat°*** | ***Signification*** | ***Définition*** | ***Exemples*** |
| EIn | Evènement  Indésirable | Dérive ou défaillance sortant du cadre des conditions d'exploitation usuelles définies. | Le surremplissage ou un départ d’incendie à proximité d’un équipement dangereux peuvent être des évènements initiateurs |
| EC | Evènement  Courant | Evènement admis survenant de façon  récurrente dans la vie d'une installation. | Les actions de test, de maintenance ou la fatigue d'équipements sont généralement des évènements courants. |
| EI | Evènement  Initiateur | Cause directe d’une perte de  confinement ou d’intégrité physique. | La corrosion, l'érosion, les agressions mécaniques, une montée en pression sont généralement des évènements initiateurs |
| ERC | Evènement  Redouté  Central | Perte de confinement sur un équipement dangereux ou perte d’intégrité physique d'une substance dangereuse | Rupture, Brèche, Ruine ou Décomposition d’une substance dangereuse dans le cas d’une perte d’intégrité physique |
| ERS | Evènement  Redouté  Secondaire | Conséquence directe de l’événement redouté central, l’événement redouté secondaire caractérise le terme source de l’accident | Formation d’une flaque ou d’un nuage lors d’un rejet d’une substance diphasique |
| Ph D | Phénomène  Dangereux | Phénomène physique pouvant engendrer des dommages majeurs | Incendie, Explosion, Dispersion d’un nuage toxique |
| EM | Effets Majeurs | Dommages occasionnés au niveau des cibles (personnes, environnement ou biens) par les effets d’un phénomène dangereux | Effets létaux ou irréversibles sur la  population  Synergies d’accident |
| Barrières ou Mesures de  Prévention | | Barrières ou mesures visant à prévenir la perte de confinement ou d’intégrité physique | Peinture anti-corrosion, Coupure  automatique des opérations de dépotage sur détection d’un niveau très haut… |
| Barrières ou Mesures de  Protection | | Barrières ou mesures visant à limite les conséquences de la perte de confinement ou d’intégrité physique | Vannes de sectionnement automatiques asservies à une détection (gaz, pression, débit), Moyens d’intervention… |

Tableau 1 : Légende des évènements figurant sur le modèle du nœud papillon

**III. Risques liés aux installations de gaz combustibles liquéfiés**

**SCENARIO A  *B.L.E.V.E***

**1- SIGNIFICATION**

Son nom anglais est B.L.E.V.E. : , **B**oiling **L**iquid **E**xpanding **V**apour **E**xplosion c'est à dire : ***« Explosion de Vapeurs en cours de Détente, Emises par un liquide en Ebullition »****.*

**2- GENERALITES**

Le phénomène de **B.L.E.V.E** est en règle générale la résultante d’un incendie enveloppant un stockage de gaz liquéfiés sous pression, inflammable ou non. C'est un accident très redouté dans le cas de feux de camion-citerne ou de réservoir d'hydrocarbures, surtout lorsqu'il s'agit de gaz liquéfiés : gaz naturel, propane, butane, GPL (gaz de pétrole liquéfié)... En effet, dans ce cas-là, il peut s'accompagner d'une boule de feu produisant une chaleur extrême.

Le dégagement calorifique développé par l’incendie, à pour conséquence l’élévation de température de stockage qui voit sa pression interne augmenter.

La paroi métallique en contact avec le liquide, reste à une température convenable de part la mise en ébullition de ce dernier. Il n’en est pas de même pour la paroi en contact avec le volume gazeux.

En effet, le transfert thermique n’étant pas suffisant, les propriétés mécaniques de celle-ci sont affaiblies par l’augmentation de sa température.

Le déclenchement des soupapes de surpression ne suffisant pas, il y’a rupture du contenant, engendrant la chute de la pression interne à la pression atmosphérique.

Ainsi, le contenu retrouve sa phase initiale et de part la brutalité des modifications physico-chimiques, va être éjecté sous forme d’aérosol. Dans le cas d’un liquide inflammable, il s’ensuit la formation d’une boule de feu.

Une autre cause pouvant conduire à un **B.L.E.V.E** est l’existence d’un dard ou chalumeau provoqué par l’inflammation d’une fuite gazeuse sous pression de proximité.

Donc tous les stockages de gaz liquéfiés sous pression sont susceptibles d’être le siège d’un BLEVE. En effet, 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 parler de BLEVE.

**3- EXEMPLES DE BLEVE – RETOUR D’EXPERIENCE**

**3-1- BLEVE sans boule de feu**

* *Explosion d'un réservoir de stockage de DIOXYDE de CARBONE liquide*(REPCELAK, HONGRIE, 02/01/1969)

Cet accident s'est produit dans une centrale de production de dioxyde de carbone. Ce produit était liquéfié et refroidi par l'intermédiaire d'un circuit de réfrigération à l'ammoniac puis stocké dans des réservoirs sous une pression de 15 bars et à une température de l'ordre de 30°C.

L'installation comportait trois réservoirs de stockage situés approximativement à 15 mètres du bâtiment de production.

Les conditions de l'accident furent les suivantes :

A 1h50, le remplissage d'un réservoir (C), avec le dioxyde de carbone produit débute, et à 2h24, pendant le remplissage, le réservoir explose suivi quelques instants plus tard, de l'explosion d'un autre réservoir (D). Ces deux explosions produisent l'arrachement du réservoir (A) de ces fondations et sa perforation par l'un de ses supports, provoquant ainsi, dans son flan, une brèche dont la surface fut estimée à environ 90 cm2 . Le rejet de CO2 par cette brèche entraîne, par réaction, la mise en mouvement du réservoir à travers l'installation (effet fusée) provoquant ainsi la mort de cinq personnes.

Des fragments, projetés dans toutes les directions, provoquèrent la mort de 4 personnes supplémentaires et atterrirent à plus de 400 mètres.

Un fragment de 1000 kg fut notamment projeté à plus de 250 mètres. Une quinzaine de personnes furent blessées, dont certaines ont subi des gelures partielles.

La cause la plus probable retenue pour cet incident est un sur-remplissage dû à une défaillance du système de jauge (vraisemblablement le gel du détecteur de niveau). Par ailleurs, il semblerait que le matériau de fabrication de plusieurs cuves n'était pas adapté aux faibles températures.

**3-2- BLEVE ayant donne matière à la formation d'une boule de feu**

* *BLEVE dans une installation de stockage de G.P.L. dans une raffinerie* (FEYZIN, FRANCE, 04/01/1966)

L'installation de stockage de G.P.L. 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 .

Pour un prélèvement d'échantillons dans un des réservoirs, 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. Aucun fluide ne coulant, 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. Ne pouvant fermer cette dernière vanne, 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 entre dans le nuage de gaz et en provoque l’inflammation. 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 les réservoirs voisins à l'aide d'eau. Le réservoir d'où s'échappe le propane explose alors violemment et des fragments sont projetés aux alentours.

Quelques instants plus tard, une seconde sphère explose, et provoque la rupture des canalisations d'une troisième sphère qui se vidange, entretenant ainsi l'incendie.

Trois sphères de butane s'ouvrent sans donner matière à un BLEVE. Le village de Feyzin, distant d’environ 400 mètres est touché par les ondes de surpression successives. Au total 11 réservoirs sont détruits, des missiles sont projetés jusqu'à 800 mètres. L'accident causa 18 morts et 84 blessés, principalement lors du premier BLEVE.

* *Série de BLEVE sur une installation de stockage de G.P.L.* (SAN JUAN IXHUATEPEC, MEXICO, MEXIQUE, 19/11/1984)

Le site de stockage était constitué de 4 sphères de G.P.L. (mélange 80 % butane, 20 % propane) d'un volume unitaire de 1600 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 11000 à 12000 m3 de G.P.L. 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 bar 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 donnent matière à des BLEVE, engendrant la formation d'une boule de feu (d'un diamètre évalué, sans certitude, à 350 ou 400 mètres) ainsi que l'éjection d'un ou deux réservoirs cylindriques. Les effets thermiques et l'éjection de fragments entraînent, par effet domino, d'autres BLEVE.

En définitive, les quatre petites sphères furent détruites. Les sphères plus grosses restèrent intactes, bien que leur supporte fût brisé. Seulement 4 des 48 cylindres demeurèrent dans leur position initiale. Dans un rayon de 300 mètres, toutes les personnes furent tuées ou blessées. Cet accident causa au total le décès de plus de 500 personnes. Il y eut environ 7000 blessés, et 39000 personnes évacuées. Les secours mobilisèrent de l'ordre de 4000 personnes.

Des fragments de sphères furent retrouvés à plus de 600 mètres et 12 parties de réservoirs cylindriques horizontaux furent projetées, par "effet fusée", à des distances pouvant atteindre 1200 mètres.



*BLEVE de Mexico en 1984 (500 morts)*

* *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 1er 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. 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.

**4- CONCLUSIONS SUR LE RETOUR D'EXPERIENCE**

L'analyse du retour d'expérience permet de tirer quelques traits essentiels quant aux accidents ayant donné matière à des BLEVE :

* Il existe des produits non inflammables, tels par exemple le dioxyde de carbone et l'oxygène liquide qui ont entraîné des BLEVE. C'est notamment le cas de l'accident qui s'est produit à Repcelak (Hongrie) en 1969, au cours duquel un réservoir de stockage de dioxyde de carbone a explosé. Les caractéristiques essentielles du BLEVE sont alors l'explosion physique et l'onde de choc qui lui est associée. Cette onde de choc peut s'accompagner de l'émission de fragments.
* Lorsque le produit mis en œuvre est inflammable (butane, propane, propylène ...), le BLEVE peut donner matière à une boule de feu. C'est le cas de l'accident de Mexico (Mexique) qui, en 1984, entraîna le décès de plus de 500 personnes au voisinage d'un dépôt de G.P.L. C'est ce type de BLEVE qui s'avère le plus meurtrier.
* Les causes identifiées de BLEVE sont multiples. On distingue notamment :
  + Fuite sur une tuyauterie,
  + Sur-remplissage,
  + Les différents accidents : routier, ferroviaire et maritime,
  + Erreur humaine,
  + Erreur de conception, matériau non adapté,
  + Incendie extérieur.
* Les fragments peuvent impacter le sol à plusieurs centaines de mètres du lieu de l'accident (lors de l'accident de Mexico des fragments furent retrouvés à plus de 1200 mètres du lieu de l'accident.
* Un BLEVE peut, par synergie d'accident, en engendrer d'autres.
* Le BLEVE n'est en aucune façon un phénomène retardé. Les temps d'occurrence sont ainsi de l'ordre de la dizaine de minutes dans le cas de l'exposition du réservoir à un flux thermique important. Ils peuvent toutefois être moindres, notamment en cas de sollicitation mécanique du réservoir.
* Lorsque, localement, un jet enflammé vient impacter un réservoir, un BLEVE peut s'ensuivre, si l'extinction du jet n'est pas assurée dans un délai très bref.

**5- CONTRAINTES PHYSIQUES EXIGEES POUR LA CREATION D’UN B.L.E.V.E**

Dans les cas les plus graves, la rupture du réservoir est due à un échauffement par un feu extérieur, par exemple lorsqu'un réservoir est soumis à un rayonnement du à un incendie (gaz liquéfié inflammable), *L'explosion aura lieu en trois temps :*

 **Etape n° 1**



**Etape n° 2**

L’élévation de la température du liquide entraînant un phénomène de vaporisation donc une augmentation de la pression du ciel gazeux.

Diminution du niveau de liquide

En se vaporisant la phase liquide

Absorbe des calories



**P**

**T**

**Etape n° 3**

La pression interne ajoutée à l’effet de la température extérieure la paroi de la citerne cède.



En fonction de la température du liquide il peut y’a avoir, à la rupture de l’enceinte, une nucléation spontanée, c’est-à-dire une vaporisation immédiate et explosive. En dessous de cette température on parlera de flash thermodynamique.



**P**



**Nucléation**

**Spontanée**

**6- LES DIFFERENTS TYPES DE BLEVE**

**6-1 RAPPEL**

* *Température limite de surchauffe*

La définition du phénomène de BLEVE a longtemps fait appel à la notion de Température Limite de Surchauffe (T.L.S.) présentée ci-dessous.

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 n'y ait d'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 . Cette limite est la limite de surchauffe d'un liquide, appelée encore température de nucléation homogène.

Ceci est illustré sur la figure1 suivante qui donne, à titre d'exemple, la température limite de surchauffe en fonction de la pression d'un gaz liquéfié pur.

Considérons, par exemple, un gaz liquéfié pur à l’équilibre thermodynamique dont l’état est présenté par le point A de la figure1. 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 même avoir un caractère explosif.

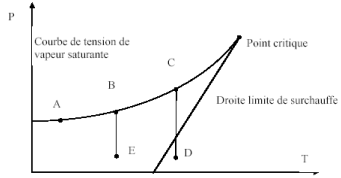


Fig 1-Température limite de surchauffe en fonction de la pression

* *Les* [*gaz*](http://fr.wikipedia.org/wiki/Gaz) *liquéfies*

Les [gaz](http://fr.wikipedia.org/wiki/Gaz) liquéfiés sous [pression](http://fr.wikipedia.org/wiki/Pression) présentent un risque important en cas de rupture du réservoir. Lorsque l'on comprime un gaz, à partir d'une certaine pression, il se transforme en [liquide](http://fr.wikipedia.org/wiki/Ã‰tat_de_la_matiÃ¨re) ; cette propriété permet de stocker de grandes quantités de gaz dans des réservoirs : [butane](http://fr.wikipedia.org/wiki/Butane), [propane](http://fr.wikipedia.org/wiki/Propane), GPL ([gaz de pétrole liquéfié](http://fr.wikipedia.org/wiki/Gaz_de_pÃ©trole_liquÃ©fiÃ©))... On a au-dessus du liquide un « ciel gazeux » (la plus grande partie du produit est liquide, une petite partie est gazeuse et occupe le volume restant). Lorsque l'on soutire du gaz du réservoir, le liquide bout (à température ambiante) et la vapeur ainsi produite vient compenser le volume retiré ; c'est le fonctionnement normal.

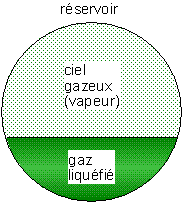
[](http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Bleve_reservoir.png)

Fig. 2 - Dans le réservoir, le gaz liquéfié est surmonté d'un ciel gazeux sous pression

**7- THEORIE DU BLEVE**

Divers essais ont été réalisés à partir de réservoirs de butane et de propane dont la capacité est de l'ordre de la tonne.

Ces essais sont récents ( BRITISH GAS 1990, BIRCK 1992, N.F.P.A. 1993, projet J.I.V.E. en 1994/95, B.A.M. 1998).

Pour ce qui est de la phénoménologie du BLEVE, on pourra retenir les conclusions qualitatives de BIRCK :

* Les BLEVE 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 BLEVE les plus redoutables 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.

BIRCK a qualifié de "chaud" ce type de BLEVE, et, par opposition, a nommé "BLEVE froid" les BLEVE 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 que 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 des BLEVE « chauds ».

* Les résultats suggèrent que les effets d’un BLEVE « chaud » 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 ».

Les BLEVE recensés par (Birck, Ye et al., 1993) ont une cause commune: une perte de confinement amenant à la dépressurisation du contenu du réservoir. Cette perte de confinement peut être notamment due :

* à l'impact d'un projectile,
* à l'exposition du réservoir à un incendie,
* à la fatigue du réservoir,
* à de la corrosion,
* à une construction ou à des équipements défectueux.

Lorsqu'un réservoir est exposé au flux thermique d'un incendie, sa pression interne augmente alors que sa résistance mécanique diminue. Ainsi, la rupture initiale se produit généralement sur la partie du réservoir en contact avec le ciel gazeux. En effet, cette partie est susceptible de s’échauffer plus rapidement que la partie du réservoir en contact avec le liquide (les transferts de chaleur s’effectuant moins bien avec la phase gaz) et les propriétés mécaniques de l'enveloppe s’y dégradent donc d'autant plus vite.

Birck et Cunnignham, ont également travaillé sur le déclenchement des BLEVE. Ils ont ainsi exposé la partie en contact avec le ciel gazeux des réservoirs de propane à des incendies et à des torches. Ils ont observé que le processus de ruine du réservoir commençait toujours par l'apparition d'une fissure ou d'une brèche, et qu'une fois cette dernière formée, de la vapeur s'échappait. Ils ont alors noté trois possibilités :

* La fissure s'arrête,
* La fissure se développe conduisant ainsi à une perte totale de confinement et à un BLEVE froid,
* La fissure s'arrête provisoirement, puis repart pour conduire à une perte totale de confinement et à un BLEVE chaud ou intermédiaire.

Il apparaît que la résistance des parois de réservoir et l'évolution de la pression dans ce dernier sont des facteurs déterminants pour ce type de phénomènes. L'évolution de la pression est fonction de la géométrie de la brèche.

Si la brèche est suffisamment petite, le liquide se vaporise pour maintenir la pression dans le réservoir. En l'absence d'incendie externe, l'énergie de vaporisation provient du liquide, ce qui conduit sa pression d'équilibre et sa température à baisser, et ce jusqu'à la pression atmosphérique. C'est le principe de la soupape de sécurité, il y a auto-réfrigération du réservoir.

L'énergie nécessaire pour conduire à la perte totale de confinement provient du contenu du réservoir. L'énergie de la phase vapeur est disponible immédiatement, alors que celle du liquide n'est disponible qu'après un délai correspondant à la durée du changement de phase.

En revanche, pour des réservoirs plus résistants, une dépressurisation peut conduire à une ébullition plus ou moins violente, voire explosive, susceptible de mener à la ruine totale du réservoir.

### « Diagramme résumant les différents type de BLEVE possibles »

**oui**

**non**

**oui**

**non**

**non**

**oui**

**non**

**non**

**oui**

**oui**

**Impact**

**mécanique**

**Exposition a un incendie**

BLEVE froid

**Perte de**

**confinement**

**La fissure**

**s’arrête**

**Rupture initiale**

**Construction**

**défectueuse**

## Corrosion

**Fatigue**

**mécanique**

**Chute rapide de pression**

## T > TLS

**Vaporisation**

**explosive**

**Le réservoir résiste**

**Propagation de la fissure, ruine du réservoir**

**Propagation de la fissure, Ruine du réservoir**

**Ebullition**

**violente**

**Rejet diphasique**

**BLEVE « chaud »**

**BLEVE « intermédiaire »**

**Pression> résistance du réservoir**

**Pression> résistance du réservoir**

### Comparaison des BLEVE "froids" et "chauds" :

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | **BLEVE chaud** | **BLEVE Froid** |
| Instants initiaux | 1. Température du liquide initialement au-dessus de la température limite de surchauffe. 2. Le réservoir se rompt localement. 3. Formation d’un jet. 4. Dépressurisation. 5. Remontée en pression du réservoir du fait de l’ébullition. 6. Ruine du réservoir. | 1.Liquide en dessous de la limite de surchauffe.  2.Ruine du réservoir due a des effet essentiellement mécaniques. |
| Durée entre la rupture initiale et le rejet à caractère explosif | Quelques dixièmes de secondes après la formation d’une fissure de 20cm. | Quelques centièmes de secondes. |
| Géométrie du réservoir après le BLEVE | Le réservoir est aplati au sol avec émission possible de missiles. | Le réservoir est aplati au sel avec émission possible de missiles. |
| Mode de rejet | Tout ou majeure partie du liquide est vaporisée instantanément. | Une partie du liquide se vaporise instantanément. Le reste est dispersé sous forme de gouttelettes. |
| Boule de feu | Boule de feu classique ascendante | Nuage d’aérosol en feu au niveau du sol avec une boule de feu ascendant. |
| Effets de suppression | Le bruit de l’onde de chose suggère d’importantes surpressions | Apparaissent relativement réduits d’après le niveau sonore de ce type de BLEVE |
| Projectiles | De grandes pressions de rupture ont le potentiel d’envoyer des projectiles sur d’importantes distances. | Les faibles pression de rupture limitent probablement la distance parcourue par les projectiles. |
| Conditions nécessaires | Liquide chaude et rupture locale afin de déclencher une explosion par surchauffe. | Réservoir peu résistant conduisant a sa raine totale. |

**8- EFFETS DU B.L.E.V.E :**

Les conséquences associés à un BLEVE sont :

* **L’onde de surpression due à la détente de la phase gaz lors de la rupture du réservoir.**

Peut être calculée en fonction de la pression dans le réservoir, du volume du ciel gazeux et du type de gaz.

Plus la capacité est remplie de liquide plus le volume de gaz est faible plus la surpression sera faible.

* **L’onde de surpression due à la vaporisation explosive.**

La vaporisation de la phase liquide. Ce phénomène est celui qui est générateur des plus fortes surpressions notamment lorsque la température du produit est supérieure à sa température limite de surchauffe.

Les surpressions peuvent être calculées au moyen d ’abaque.

* **Boule de feu par inflammation du nuage gazeux.**

le rayonnement de la boule dimensionne les effets de ce scénario.

* **Effets missiles jusqu ’à 1200 m pour des « missiles »  de tailles importantes.**

Les projectiles peuvent être classées en deux catégories distinctes :

* + Les projectiles primaires issus de l’enveloppe du réservoir. Ce sont les projectiles les plus énergétiques, dont le nombre et la portée sont aléatoires. Toutefois dans le cas des ballons de chaudière et des collecteur de vapeur, le nombre de projectiles est peu élevé, généralement inférieur à 5 pour des réservoirs cylindriques. De ce fait le risque potentiel est très limité si l’on intègre la notion de probabilité d’atteinte.
  + Les projectiles secondaires issus de la présence d’objets voisins de la capacité (tuyauteries...). Ces projectiles sont nettement moins énergétiques que les premiers.

**8-1. Évaluation quantitative**

* **Calcul de la masse de produit en jeu**

Selon HASEWAGA et SATO, lors du B.L.E.V.E., le taux de vaporisation F «  Taux de FLASH » (quantité de produit liquéfié subissant une évaporation explosive) est toujours élevé, la masse de la boule de feu sera toujours égale à la masse initiale de liquide dans le réservoir.

Néanmoins, il apparaît de manière plus conforme à la réalité que:

- Si F > 35 % = 1, tout le liquide est entraîné dans la boule de feu.

mb

mi

Masse réagissante = Masse totale

**mi = mb**

- Si F<35% la masse participant est la masse flashée

mb = masse de la boule de feu

mi = masse initiale de liquide dans le réservoir

F = taux de FLASH

* **Diamètre de la Boule de Feu**
  + Dmax = 6,48 M 0,325
  + Rmax = 3,24 M 0,325
  + D : Diamètre en mètre

M : Masse de la Boule de Feu en kg (fonction du taux de flash)

Durée de combustion et hauteur d’élévation de la boule de feu:

***t = 0,852 M 0,26***

t = en secondes

M = Masse de la boule de feu en Kg

#### ***H(m)=0,5xD***

* **Flux thermique radiant de la boule de feu**

Le flux thermique radiant varie de:

***100< Q rad (kW / m2 ) < 300***

La valeur moyenne est Φ = 200 kW / m2

Φ = flux à la surface de la boule :

- 105 kW / m2 pour les liquides

- 544 kW / m2 pour les gaz

* **Effets thermique au sol et distance de sécurité**

Dg:limite de danger létal ***Dg=1,26xD***

Rf : distance à laquelle les effets du rayonnement sont considérés comme suffisamment faible

***Rf=2xR***

* **Effets des radiations thermiques** (**Méthode de l’arrêté (français) GCL du 09 Nov. 89**).

#### Sont visés par le présent arrêté les "gaz inflammables liquéfiés" (à l'exception de l'hydrogène, de l'ammoniac et du gaz naturel liquéfié) dont la pression absolue de vapeur à 15 °C est supérieure à 100 000 Pa.

Les distances d'isolement sont fonction de la capacité du réservoir. Pour les constructions et voies extérieures elle est égale à :

- distance correspondant au seuil de létalité

**d= 3.12 M0.425**

- distance correspondant au seuil des brûlures significatives **d= 4.71 M0.405**

**Modification de l’arrêté (français) GCL du 09 Nov 89 par la Circulaire du 5 Juin 2003 relatif aux conditions d'éloignement auxquelles est subordonnée la délivrance de l'autorisation des nouveaux réservoirs de gaz inflammables liquéfiés.**

- **butane** distance correspondant au seuil de létalité **d= 1.72 M 0.437**

**- butane** distance correspondant au seuil des brûlures significatives

**d= 2.44 M 0.427**

**- propane** distance correspondant au seuil de létalité **d= 1.92 M 0.442**

**- propane** distance correspondant au seuil des brûlures significatives

**d= 2.97 M 0.425**

d en mètres (mesurée à partir des parois du réservoir de gaz combustible liquéfié si celui-ci est aérien ou de la sortie des piquages à l'air libre si le stockage est sous talus), m masse maximale de GPL en Kg.

* **Effets de surpression**

Pour un tel scénario les zones correspondantes sont inférieures à celles des effets thermiques.

**9. PREVENTION DU BLEVE**

Afin de prévenir et limiter les fuites des produits inflammables stockés susceptible de conduire à un BLEVE, il y a lieu :

* de protéger les équipements susceptibles de contenir de tels produit contre, les agressions mécaniques, la corrosion et le gel.
* de prévenir les sur-remplissages par la mise en œuvre de procédures et de détections de niveau haut et très haut redondées de manière indépendante entraînant automatiquement, le cas échéant, la mise en sécurité des installations (fermeture des vannes, arrêt des pompes et compresseurs, ...).
* de prévenir les surpressions par des dispositifs limiteurs de pression correctement dimensionnés et des détecteurs de pression haute, entraînant automatiquement la mise en sécurité des installations.
* disposer des détecteurs d’atmosphère explosive.

Pour prévenir l’inflammation d’une éventuelle atmosphère explosive, il y a bien sûr lieu, notamment :

* d’employer des matériels adaptés aux atmosphères explosives,
* de soumettre les travaux par point chaud à la délivrance d'un permis de feu et à la mise en œuvre de toutes les précautions nécessaires,
* bien évidemment d’interdire de fumer dans les zones susceptibles d’être explosives et même, sauf nécessité justifiée, d’interdire le port et la mise en œuvre de toute source d’inflammation potentielle.

Malgré tout, il est nécessaire d’envisager le cas où une situation dégradée est matérialisée.

* Il convient alors de donner l’alarme au plus tôt. On conçoit que la mise en place de détecteurs de fumées ou de flammes judicieusement disposés contribuent à permettre l’activation rapide d’une alarme.

En cas d’incendie, il y a lieu de prendre les mesures suivantes :

Protéger thermiquement le réservoir par un écran liquide et retarder ainsi l’échauffement du produit qu'il contient.