**SCENARIO D installations de gaz toxiques Rupture**

 **instantanée de la plus grosse canalisation en phase liquide ou de la canalisation**

 **entraînent le plus fort débit massique**

* 1. **Méthode et critères de références pour l ’affichage des risques**

La méthode consiste à calculer le débit de gaz ou de vapeur toxique émis à la suite de la rupture de la canalisation, puis a évaluer la dispersion atmosphérique du panache toxique correspondant, a fin de calculer les distances aux quelles une personne exposée inhalera les doses causantes les premiers décès et les premières atteintes irréversibles a la santé.

On assimilera, en première approximation, la durée d’exposition aux vapeurs à la durée de la fuite (quelques minutes).

* + 1. **Estimation du débit gazeux de produit toxique**

 Pour un gaz liquéfié, le débit massique en phase liquide rejeté a la brèche est calculée par la formule détaillée au scénario B :

**Q = C.ρ.S. [ (2 (P-PA)/ρ + 2gh ]1/2**

 On considère que le panache toxique est principalement constitués des valeurs issues du flash initial de produit a la brèche et sur le sol (dans la réalité la fraction de liquide écoulé sur le sol ou dans la rétention se revaporise plus lentement grâce aux échanges thermiques avec l’extérieur et alimente également le panache).

 La fraction du débit à la brèche immédiatement vaporisée par le flash est calculée par la formule exposée au scénario C :

**Fv = 1- EXP**(**Cpl .ΔT/ΔHvap**)

Le débit gazeux de produit toxique est alors : Q.Fv

Cette fraction doit être multipliée par un facteur 2 à 3 pour tenir compte de la génération d’aérosols pour certains produits (voir scénario C).

* + 1. **Estimation de la dispersion atmosphérique du panache toxique et évaluation des zones à risque**

La méthode de référence est la même que celle exposée au scénario C. on évalue la dispersion atmosphérique du panache, dans des conditions atmosphériques défavorables : atmosphère stable et vent faible, et en prenant en compte la réflexion par le sol.

Nota : la durée d’exposition est prise égale à la durée de la fuite.

 La concentration varie de la façon suivante, à une distance X du rejet et pour un temps d’exposition Te:

 Concentration (ppm)

 Cmax

 Dose inhalée

 Te Durée

 d’exposition (min)

 A l’aide du modèle de dispersion, on recherche les deux distances auxquelles on est exposé aux concentrations C1 et c2 correspondant au début de la létalité et des effets irréversibles, pour une exposition Te.

 Concentration

 (ppm)

 C1

 C2

 Létalité 1%

 IDLH

 Début des

 effets irréversibles

 + +

 1 Te 10 30 100 Durée d’exposition

 (min)

* **Exemple d’application**

Rupture instantanée du plus gros piquage (en phase liquide) d’une installation de chlore (diamètre 40mm). La fuite est maîtrisée en 3 min.

* **Calcul du débit de chlore gazeux**

ρ = 1405 Kg m3 : masse volumique du chlore à 25 °C

S = 1,25 .10-3 m2 : section de la brèche

P-PA = 6,6 bars : différence de pression entre l’installation et l’extérieur

h = 2m : hauteur de liquide au-dessus de la brèche

Cpl =0,955 kJ.kg-1.K-1 : chaleur spécifique du chlore à pression constante

ΔHvap  = 287,58 kJ.kg-1 : chaleur latente de vaporisation

ΔT = 239 – 298 = -59 K : différence entre Teb et Tex

Débit totale à la brèche

Q = ,06.1405.1,25.10-3 [2.6,6.105/1405+2.9,81.2]1/2

**Q~33 Kg.s-1**

Pendant les trois minutes de la fuite 1800 Kg de chlore gazeux ont été rejetés.

* **Evaluation des zones à risque**
* Dose correspondant au début des effets mortels : 360ppm pendant 3minutes.
* Dose correspondant au début des effets irréversibles sur la santé : 65 ppm pendant 3minutes.

L’utilisation du modèle de dispersion atmosphérique permet de déterminer que ces concentrations sont rencontrées respectivement a des distances de 1380m et 3940m du lieu de l’accident. **La zone enveloppe retenue a donc un rayon de 3940m.**

Nota : on constate donc que pour certains produits toxiques les distances d’isolement peuvent être considérable. Il y a lieu de rechercher à les réduire, en demandant à l’industriel des améliorations telles que :

* Vannes automatiques (réduction de durée de la fuite)
* Limiteurs de débit
* Double confinement de stockage
* Stockage cryogénique

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

**SCENARIO E1**  **FEUX DE NAPPE**

### GENERALITES

 Le terme « feu de nappe », ou « feu de flaque », décrit un incendie résultant de la combustion d’une nappe de combustible liquide. Ce phénomène implique principalement la surface de la nappe en contact avec l’air. Les dimensions et la géométrie de la nappe peuvent être tout à fait variables. Il convient ainsi de distinguer :

• *les feux de réservoir* : le feu est alors contenu dans une enceinte dont la surface est déterminée par les dimensions du réservoir,

• *les feux de cuvette (de rétention)* : l’extension de la nappe peut alors être limitée par une cuvette de rétention dont le dimensionnement est imposé notamment par les exigences réglementaires applicables au stockage,

• *les feux de flaque libre*, en l’absence de moyens physiques prévus pour limiter l’extension de la nappe ou lorsque la cuvette de rétention n’est pas complètement envahie ; l’extension de la nappe est alors principalement fonction des caractéristiques du terrain, des conditions météorologiques et des conditions de rejet du combustible.

**2. EXEMPLES DE FEUX DE NAPPE – RETOUR D’EXPERIENCE**

**2.1 Feux de nappe, incendies consécutifs a un débordement**

* **15/10/55 – Japon – YOKKAICHI**

**Raffinage de pétrole :** Dans une raffinerie, un bac à toit fixe de 8 000 m 3 rempli à près de 90 % de FO s’enflamme (l’origine de l’incendie reste inconnue). Après 6 h 30 de feu de surface de bac, un Boilover se produit. Environ 2 000 à 2 500 m 3 d’HC débordent du réservoir. En l’absence d’éléments de rétention, la vague de FO en feu se répand – dans un premier temps – jusqu’à plus de 120 m, et fait des victimes parmi les pompiers. Le sinistre se propage ensuite rapidement sur plus de 10 000 m 2 de surface. 4 autres bacs de Brut/FO/GO/Essence ainsi que l’immeuble des bureaux sont incendiés et détruits. L’extinction finale est réalisée 28 h après le début de l’accident. Le coût global de celui-ci est estimé à près de 420 Millions de Yens (1955).

* **14/03/81 – 36 – CHATEAUROUX**

**Commerce de gros de produits intermédiaires non agricoles :** Dans un dépôt de 9 000 m 3 (capacité 18 000 m 3 ) de FOD/GO/Essence répartis sur 9 bacs (8 toits fixes et 1 écran interne), un feu de cuvette d’origine malveillante est allumé. Par l’intermédiaire de la cuvette, l’incendie se généralise à tout le dépôt (bacs + 3 500/4 500 m 2 de cuvette). La phase gazeuse d’un bac de GO explose (.ouverture du toit). L’atmosphère libre de l’écran interne explose, la soudure robe/fond se déchire, le bac se soulève et retombe sur le merlon ; les 900 m 3 de super créent une vague qui submerge les merlons et infiltre le réseau pluvial (combustion/explosions .pollution évitée). La lutte (> 21 h)

* **30/08/83 – Royaume Uni – MILFORD HAVEN**

**Raffinage de pétrole :** Dans une raffinerie, la surface d’un toit flottant (fissuration chronique par contraintes mécaniques du vent) d’un bac de 94 000 m 3 rempli à ½ de Brut léger (PE=38°C) s’enflamme (ignition probable par des escarbilles issues d’une torche). En 2 h, les 4 800 m 2 de surface de bac sont embrasés. Le toit flottant s’enfonce. 12 h après, un Boilover survient et génère une boule de feu ainsi qu’un débordement d’HC (feu des 16 800 m 2 de cuvette). 2 h après, un second Boilover engendre la rupture partielle de la liaison robe/fond. De l’HC est libéré mais les merlons (H = 5 m) de la cuvette résistent. Le feu de bac persiste et ne sera éteint que 15 h plus tard. Au total, 150 pompiers interviennent durant 60 h. Plus de 700 m 3 d’émulseurs sont utilisés. 6 pompiers sont blessés.

* **14/08/95 – Russie – PERM**

**Raffinage de pétrole :** Un incendie se produit dans une raffinerie de pétrole. Du pétrole fuit au niveau d’un pipeline et se répand sur 300 m 2 . L’unité de raffinage du pétrole brut est mise hors service.

Un bassin de décantation est endommagé. 150 pompiers aidés de 30 camions ont pu réduire la zone incendiée à 100 m 2 . Selon l’ingénieur chef, un surcroît de capacité permettrait à l’installation de fonctionner normalement. La commission d’état enquête sur les origines de l’accident.

* **12/11/96 – Mexique – SAN JUAN IXHUATEPEC**

**Commerce de gros de produits intermédiaires non agricoles :** Dans un dépôt d’hydrocarbures, une fuite sur la vanne d’un bac de 16000 m3, contenant 12 800 m 3 d’essence, s’enflamme lors de l’intervention d’ouvriers. Le bac explose 1 h 40 plus tard et le feu s’étend à la cuvette. Un autre bac de 16 000 m 3 contenant 4 000 m 3 d’hydrocarbures implanté dans la même cuvette explose. Un 3 ème bac (800 m 3 ) est menacé. Une colonne de fumée s’élève à 1 200 m. Au moins 16 personnes sont blessées, dont 5 mortellement (brûlures) et 5 gravement. Les habitations proches et les écoles sont évacuées

(5 000 personnes). Des centres d’hébergement sont ouverts. Des consignes sont données à la population (se confiner, boire, etc). La Croix Rouge secourt 950 personnes. Plus de 17 000 m 3 d’essence ont brûlé. Le débit d’eau d’extinction atteint 30 m 3 /s. Le sinistre est éteint 48 h plus tard.

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

 Les dépôts d’hydrocarbures sont naturellement identifiés comme des installations particulièrement concernées par le phénomène de feu de nappe. Les enseignements directement exploitables sont reportés ci-après :

* Concernant les causes identifiées, il convient de noter que:
* la malveillance a été à l’origine du sinistre de manière récurrente ;
* l’épandage accidentel de combustible est survenu de manière récurrente suite à une fuite sur des équipements de transferts (pompe, raccord de ligne de vidange, vanne, canalisation, regard de purge ) ;
* le surremplissage d’une capacité ;
* les sources d’inflammation du combustible peuvent être de nature diverse (moteur électrique, travaux de soudage, étincelle, foudre et mauvaise équipotentialité ).
* D’un point de vue factuel, les éléments suivants ont été relevés :
* des feux de bac ont été à l’origine de Boil Over, conduisant à un feu généralisé à l’ensemble de la cuvette ainsi qu’à la ruine par effet domino des autres réservoirs ;
* dans certains cas, la ruine d’un réservoir suite à une explosion aérienne a conduit à la création d’une « vague » de combustible enflammé qui a submergé le merlon et propagé l’incendie au-delà de la cuvette.
* Les facteurs pouvant être qualifiés d’aggravants sont :
* l’absence de capacités de rétention ;
* une cuvette commune à plusieurs bacs, voire à tout un dépôt ;
* l’alimentation continue du feu en combustible par la non fermeture des vannes, résultant d’un dysfonctionnement ou d’une erreur humaine associée à un défaut de conception du système de sécurité ;
* l’entraînement des hydrocarbures enflammés par les eaux d’extinction, facilitant la propagation de l’incendie.
* En ce qui concerne la gravité de tels évènements, les compte-rendus des accidents passés font part de victimes chez les pompiers ou le personnel de l’installation et d’importants dommages matériels sur l’installation ou sur l’environnement proche (habitations voisines, végétation, points d’eau, cours d’eau ou station d’épuration pollués, sols souillés par les hydrocarbures, pollution atmosphérique…).

**4. DEFINITIONS PRINCIPALES**

## Allumage spontané, auto-inflammation

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

## Brûler

Etre en état de combustion.

## Chaleur de combustion

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

## Chaleur spécifique

La chaleur spécifique, ou bien chaleur massique d’échauffement, d’un corps correspond à la quantité de chaleur absorbée par 1 g de ce corps pour que sa température s’élève de 1°K.

Cette grandeur s’exprime ainsi généralement en J/kg.K.

**Combustible**

Susceptible de brûler. Objet pouvant brûler.

**Combustion**

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

## Conduction

Mode de transmission de la chaleur à travers un corps solide en contact avec une source chaude. Le transport de chaleur s’effectue de proche en proche sans aucun transfert de matière.

## Convection

La convection est le mode de transport de chaleur par le mouvement d’un fluide. Dans le cas de feux de nappe, la chaleur est transportée par le mouvement de l’air autour de la flamme, dont l’écoulement est perturbé par la présence même de l’incendie.

## Débit masse surfacique de combustion

Quantité de combustible participant à l’incendie par unité de temps et de surface au sol mesurée dans des conditions d’essai spécifiées. Le débit masse surfacique de combustion s’exprime généralement en g/m².s.

## Facteur de vue / de forme

Le facteur de vue ou de forme traduit l’angle solide sous lequel la cible perçoit le rayonnement.

## Feu

Combustion autoentretenue qui a été délibérément organisée pour produire des effets utiles et dont l’extension dans le temps et l’espace est contrôlée. Lorsque cette extension ne peut être contrôlée, il convient alors de parler d’incendie.

## Flamme

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

## Flammes de diffusion / flammes de prémélange

Des flammes de diffusion sont créées lorsque la combustion a lieu sans mélange préalable de l’air comburant et du combustible gazeux. Dans le cas contraire, il convient de parler flammes de prémélange.

## Flux thermique radiatif

Quantité de chaleur transférée par rayonnement thermique, par unité de temps. Elle s’exprime en kW.

## Incendie

Combustion autoentretenue qui se développe sans contrôle dans le temps et dans l’espace.

## Incandescence

Emission de lumière produite par un corps chauffé intensément.

## Inflammable

Capable de brûler avec flamme, dans des conditions spécifiées.

## Inflammation

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

**Point feu, point de flamme (ou température d’inflammation)**

Température minimale à laquelle un matériau soumis à une petite flamme normalisée présentée à sa surface dans des conditions spécifiées, prend feu et continue à brûler pendant un temps spécifié.

**Point d’éclair**

Température minimale à laquelle doit être porté un matériau, un produit pour que les vapeurs émises s’allument momentanément en présence d’une flamme, dans des conditions spécifiées.

**Potentiel calorifique**

Synonyme de chaleur de combustion.

**Potentiel calorifique inférieur (PCI)**

Chaleur de combustion d’une substance lorsque la combustion est complète et que l’eau produite reste à l’état de vapeur dans des conditions spécifiées.

**Potentiel calorifique supérieur**

Chaleur de combustion d’une substance lorsque la combustion est complète et que l’eau produite est entièrement condensée, dans des conditions spécifiées.

**Pouvoir émissif (surfacique)**

Puissance thermique rayonnée par la flamme par unité de surface. Elle est exprimée en kilowatts par m² (kW/m²).

## Pyrolyse

Partie de la décomposition chimique irréversible provoquée uniquement par une élévation de température. La pyrolyse peut être accompagnée par une décomposition due à d’autres actions telles qu’une attaque chimique.

## Rayonnement thermique

Transfert d’énergie par ondes électromagnétiques

## Réaction au feu

Comportement d’un matériau qui, par sa propre décomposition, alimente un feu auquel il est exposé, dans des conditions spécifiées.

## Régime laminaire / turbulent

Le régime laminaire est un mode d'écoulement dans lequel les particules du fluide se déplacent parallèlement les unes aux autres. A l’inverse, le régime turbulent est un mode d'écoulement désordonné, caractérisé par la formation de tourbillons ou d’un mouvement d'agitation aléatoire dans le milieu. Le passage du régime laminaire au régime turbulent est traduit par la valeur d’une grandeur physique, le nombre de Reynolds. Le régime laminaire correspond ainsi à un nombre de Reynolds inférieur à 2000.

## Résistance au feu

Aptitude d’un objet à conserver, pendant une durée déterminée, la stabilité au feu, l’étanchéité au feu, l’isolation thermique requises et/ou toute autre fonction exigée, spécifiées dans un essai normalisé de résistance au feu.

## Suie

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

## Rendement de combustion

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

## Température d’auto-inflammation ou d’allumage spontané

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

## Tension de vapeur

Pression développée par les vapeurs d’un produit en espace clos ; elle correspond à l’aptitude d’un liquide à émettre des vapeurs.

## Vitesse massique de combustion

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

**5. DESCRIPTION DU PHENOMENE**

**5.1 Principe de la combustion**

 La combustion est une réaction physico-chimique exothermique entre un comburant et un combustible, déclenchée par une énergie d’activation :

* le comburant (oxygène de l’air dans un incendie) joue le rôle d’oxydant,
* le combustible joue le rôle de réducteur.

 La combustion est ainsi une réaction d’oxydo-réduction. Elle est notamment entretenue par la formation de radicaux libres, atomes ou groupes d’atomes électriquement neutres très instables donc très réactifs. Ces derniers participent fortement au développement des réactions de combustion et à la propagation des flammes.

**5.2 Différentes formes de combustion**

 Les différentes formes de combustion se caractérisent notamment par leur cinétique chimique:

* **La combustion lente** : elle se distingue par une absence de flamme et d’incandescence ainsi que par la faible exothermicité de la réaction. Cette combustion peut, sous couvert de modifications réactionnelles, se transformer en combustion vive et conduire à des feux de surface ;
* **La combustion très vive et la combustion instantanée** : ces types de combustions caractérisées par une vitesse de réaction très élevée ne relèvent pas a priori de l’étude des feux de nappe et ne seront donc pas abordés dans le présent document ;
* **Combustion vive** : cette forme de combustion caractérise les feux de surface. Le feu de nappe est en effet une combustion vive, généralement accompagnée de l’émission de lumière et de chaleur. La vitesse d’émission de calories est relativement élevée ce qui entraîne une forte exothermicité de la réaction. Les paragraphes à venir seront donc essentiellement consacrés à ce dernier mode de combustion.

**5.3 Processus de combustion pour un feu de nappe**

**5.3.1 Combustibles liquides**

 Le degré d’inflammabilité pour les liquides inflammables est défini par le point d’éclair du produit, c’est à dire la température la plus basse à laquelle un produit formera un mélange vapeur/ air inflammable. Ce n’est pas le liquide qui brûle, mais ces vapeurs, plus le liquide est chaud, plus il émet des vapeurs.

L’inflammation du mélange gazeux composé des vapeurs de combustibles et de l’air est fonction de la concentration de vapeurs de combustibles dans l’air. Chaque produit possède ainsi un domaine d’inflammabilité spécifique, représenté de manière schématique dans la Figure1 ci-dessous.

Les trois conditions nécessaires pour qu’il y ait feu sont :

* Présence de combustible (vapeur d’essence),
* Présence de comburant (oxygène de l’air),
* Température suffisante (point chaud, étincelle ou flamme).

**5.3.2 Combustibles solides**

 Pour un combustible solide, l’émission de vapeurs ou gaz inflammables reste toutefois plus complexe puisqu’elle met généralement en jeu des réactions de distillation, de pyrolyse, de fusion et éventuellement de sublimation..

 Dans le cadre du présent cours, il y a lieu de considérer plus particulièrement les combustions solides susceptibles de se comporter comme des combustibles liquides et ainsi générer des incendies de type « feu de nappe ». Ainsi, il convient de retenir notamment les produits suivants :

* certains corps solides, telles de nombreuses matières plastiques, qui fondent et se décomposent totalement sous l’action de la chaleur en gaz et vapeurs ;
* d’autres corps solides, telle la paraffine, qui fondent au préalable et se comportent alors comme des liquides inflammables ;
* les copeaux ou déchets de matières solides combustibles qui engendrent des feux de surface d’une aptitude à la propagation comparable à des feux de nappe.

**5.4 Flamme**

Une flamme est composée essentiellement de trois parties :

* en partie basse, une zone dite « persistante »
* dans le reste de la partie lumineuse, une zone qualifiée «d’intermittente»
* en partie haute, la zone des fumées constituées des produits issus de la combustion.

 Par ailleurs, les flammes peuvent être caractérisées par la façon dont se mélangent le combustible et le comburant, ainsi que par le régime d’écoulement gazeux.

 Dans le cas des feux de nappe de taille industrielle, il s’agit de flammes de diffusion qui correspondent généralement à des zones de mélange turbulent.

**5.5 Transfert de chaleur**

 Trois mécanismes fondamentaux du transfert de chaleur à partir de la flamme coexistent :

* la convection ;
* la conduction ;
* le rayonnement.

**5.6 Dégagement de fumées**

 En plus des effets thermiques ou lumineux induits par la flamme, les réactions de combustion s’accompagnent généralement d’émissions de fumées. Ces dernières contiennent en particulier des suies, particules produites en quantité plus ou moins importante selon les produits en feu et les caractéristiques de la combustion.

La dispersion de ces fumées représente une source de danger potentielle pour l’environnement du site de par :

* la toxicité des produits de combustion ;
* la gêne visuelle occasionnée, sur les voies de communication à proximité.

Air 0%

Air 100%

Gaz 100%

Gaz 0%

ZONE

DANGEREUSE

**LII**

**LSI**

**Zone 1**

**Zone 3**

**Zone 2**

**6. EFFETS ET SEUILS RETENUS**

Les conséquences associés à un feu de nappe sont essentiellement liées :

* + au rayonnement thermique, sur l’homme et les équipements ;
	+ aux dégagements de fumées, particulièrement aux gaz toxiques qu’elles véhiculent, mais aussi à la diminution de la visibilité induite ;
	+ à la pollution des eaux ou des sols lie par exemple, au transport de substances dangereuses pour l’environnement via les eaux d’extinction.

**6.1 Effets du rayonnement thermique**

 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. Elles ont été établies pour des produits pétroliers ou équivalents.

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

* Les distances calculées, du bord de la cuvette aux locaux habités, ou occupés par des tiers, aux voies extérieures ne desservant pas le dépôts, doivent correspondrent à la formule suivante sans être inférieures à 50 mètres:

**d =2,8 L0,85 (1-2,3.10-3 L0,85)**

* Les distances calculées du bord de la cuvette aux ERP, IGH, voies à grande circulation (>2000 VL/jour) et voies ferrées ouvertes au transport de voyageurs, doivent correspondre à la formule suivante sans être inférieures à 100 mètres:

**d=3,7 L0,85 (1-3.10-3 L0,85)**

L : longueur du plus grand coté de la cuvette ou, pour des cuvettes irrégulières, longueur du côté

 d’une cuvette carrée de surface équivalente.

**SCENARIO E2**  **LES ECLATEMENTS DE RESERVOIRS**

**1-GENERALITES**

 L’éclatement d’un réservoir peut être la conséquence de phénomènes affectant les caractéristiques de l’enveloppe (la fatigue de l’enveloppe, une corrosion excessive), ou de phénomènes mettant en cause le contenu du réservoir (une explosion interne ou encore une augmentation plus lente et accidentelle de la pression sous l’effet d’un échauffement, d’un surremplissage...).

 Les conséquences de l’éclatement d’un réservoir traitées dans ce cour sont d’une part l’émission d’une onde de pression et d’autre part la projection de fragments.

 L’onde de pression résulte de la détente brutale du gaz contenu dans le réservoir, ou de la vapeur si le réservoir contient un liquide surchauffé.

**2-EXEMPLES – RETOUR D’EXPERIENCE**

**2.1 Essai de rupture d’un réservoir pris dans un feu**

 Le 28/07/73, à White Sands Missil Range, New Mexico, USA, un essai de rupture d’un wagon citerne de 120 m3 de propane a été réalisé. Le wagon-citerne, spécialement conçu pour l’essai, a été construit identique à ceux utilisés pour le transport d’ammoniac, de GPL, de chlorure de vinyle… mis à part la présence d’équipements de mesures. Il a été soumis à un incendie ; la montée en température a entraîné une augmentation de la pression interne du réservoir.

 Un flux de chaleur moyen sur la surface mouillée de la citerne de 105 kW/m² a été mesuré.

 La soupape de sécurité s’est soulevée après 2,2 min lorsque la pression de 19 bars a été atteinte. Elle a effectué trois cycles avant de rester ouverte.

La pression interne avait atteint 24 bars au bout de 24,5 min lorsque le réservoir a éclaté.

 Les pression et température internes atteintes au moment de l’éclatement étaient inférieures à celles déclenchant les dispositifs de sécurité.

127 fragments provenant du wagon-citerne et des équipements nécessaires aux différentes mesures ont été retrouvés, leurs positions ont été répertoriées. Parmi ces fragments, 63 proviennent du wagon-citerne en lui-même et une dizaine (9, 10 ou 11) proviennent de la citerne en elle-même, les distances et directions de ces derniers ont été répertoriées. La plus grande distance parcourue par un fragment est de 407 m.

 Le gradient de température sur la citerne au moment de la rupture est assez important et confirme que la répartition de température lorsqu’un réservoir est pris dans un incendie peut être très hétérogène et que ce sont les points les plus chauds qu’il faut prendre en considération.

**2.2 Mise sous pression accidentelle**

 La mise sous pression accidentelle d’un réservoir peut être due par exemple à la perte de régulation de débit ou à une injection accidentelle de produit dans le réservoir.

 Le 14/04/1983, en Indonésie, une colonne d’échangeur de chaleur de GNL de 47 m et de 5 m de diamètre maximal a été purgée avec un hydrocarbure gazeux chaud et sec afin de la dégivrer et de la déshydrater. La pression maximale de service de la colonne était de 2 bars et la soupape était tarée à 4 bars. La source du gaz de purge était à plus de 35 bars. Le dysfonctionnement d’une soupape a entraîné la pressurisation de la colonne. Une pression de 5 bars a été enregistrée ; 20 minutes plus tard, la colonne s’est rompue. Le réservoir s’est fragmenté en trois morceaux principaux, l’un a heurté une construction à 50 m.

 Il convient de remarquer que la pression à laquelle la rupture a été observée paraît compatible avec les règles classiques de conception qui fixent la pression de service à environ un tiers de la pression de rupture du réservoir.

**2.3 Affaiblissement mécanique**

 Un affaiblissement mécanique de l’enveloppe d’un réservoir sous pression peut en provoquer la rupture. La recherche bibliographique relative au retour d’expérience, réalisée dans le cadre de ce document, n’a pas permis d’identifier d’accidents de ce type, en dehors de ceux dus à une élévation de température sous l’effet d’un incendie, traités au paragraphe 2.1.

**2.4 Explosion interne**

 L’explosion conduit souvent à la rupture de la capacité dans laquelle elle se produit. Une explosion est une libération brutale d’énergie ; différents phénomènes peuvent être à l’origine d’une explosion interne : une combustion, un emballement de réaction chimique, un changement de phase brutal…

 Un exemple d’éclatement d’une capacité de stockage suite à une explosion interne est fourni par l’accident survenu le 20/08/1997 à Blaye. Une violente explosion de poussières a largement détruit une installation de stockage de céréales.

 Ce silo, de type vertical, se composait de trois rangées de cellules (44 au total) de section circulaire (6,2 m de diamètre et 33 m de hauteur) en béton armé (15 cm d’épaisseur). Une dalle en béton armé les recouvrait et servait de plancher à une galerie aérienne. Les produits à stocker étaient introduits par des orifices de 60 cm sur 60 cm pratiqués dans ce plancher. La galerie de manutention abritait des convoyeurs à bandes. Elle communiquait à chaque extrémité avec des tours en béton armé de 50 m de hauteur.

 On estime que les fûts des cellules étaient capables de supporter une pression interne de l’ordre de 1 bar. Pourtant, l’explosion a complètement détruit les cellules de la partie centrale, les tours, la galerie de manutention et les cellules attenantes à l’une des deux tours. De gros morceaux (dimension métrique ou plus) ont été retrouvés jusqu’à une distance de l’ordre de 50 m et des morceaux plus petits (de l’ordre de 10 cm) jusqu’à 150 m. Des vitrages ont été brisés jusqu’à une distance de 500 m du lieu de l’explosion.

**3. DESCRIPTION DU PHENOMENE**

**3.1 Présentation générale du phénomène**

 Lors de l’augmentation de la pression dans un réservoir, les parois les plus fragiles se rompent lorsque la contrainte ultime (de ruine) est atteinte. La rupture du confinement permet la libération de la pression contenue qui se traduit par la propagation externe d’une onde de pression aérienne (déplacement d’une surpression dans l’air). Pour utiliser une analogie simple, le réservoir peut être assimilé à un haut-parleur. Le son délivré par ce haut-parleur est directement proportionnel à l’énergie qu’on lui soumet. L’impression ressentie par un observateur sera fonction, outre de cette énergie, de la distance et de la taille du haut-parleur.

 On comprend ainsi que l’amplitude de l’onde aérienne produite par un éclatement pneumatique doit être fonction de la distance, de la taille du réservoir et de la surpression interne maximale. Cette amplitude dépend en fait du paramètre *(PruptV)1/3*, où *Prupt* est la pression de rupture du réservoir et *V* son volume de gaz.

 Pour mémoire, la propagation d’une onde de pression aérienne dans l’environnement se traduit par des variations plus ou moins brusques et de plus ou moins grande amplitude de la pression en tout point de l’espace. En un point donné, ces variations de pression sont notamment caractérisées par :

* + une phase de surpression, de durée △*t+* et d’amplitude maximale notée △*P+*,
	+ une phase de dépression, de durée △*t-* et d’amplitude maximale notée △*P-*.

****

Fig-1 Profil d’une onde de pression

 La rupture s’accompagne d’un éclatement du réservoir et de la formation éventuelle de plusieurs fragments qui peuvent être propulsés sous l’effet du différentiel de pression entre l’intérieur et l’extérieur.

**3.2 Production et propagation de l’onde de pression**

 Pour évaluer la production d’une onde de pression, on suppose que les parois disparaissent instantanément au moment de la rupture. On observe alors une mise en vitesse brutale de l’atmosphère environnante opérée par une onde de choc qui se propage dans l’atmosphère.

 Une onde de choc est une onde de pression aérienne pour laquelle la montée en pression est très brutale.

**3.3 Mécanismes de rupture**

**3.3.1 La rupture fragile**

 Si la rupture se produit alors que les déformations sont élastiques (réversibles), le comportement du matériau et la rupture sont dits "fragiles". Le verre, la fonte grise, les aciers bruts de trempe, les céramiques, le béton, la plupart des polymères thermodurcissables et certains alliages haute résistance, sont des matériaux qui ont un comportement fragile.

 La rupture fragile correspond à une situation où la propagation des fissures est difficile. C’est le cas par exemple des alliages métalliques dans lesquels ont été augmentées fortement les caractéristiques de résistance. Ainsi, très généralement, la fragilité augmente avec la limite d’élasticité. La rupture fragile se produit lorsque les liaisons inter-atomiques se rompent sans déformation plastique globale.

 Comme le phénomène de rupture est relativement local, un nombre important de petits fragments peut être formé suite à une multiplication des bifurcations de fissures. Il peut être admis, par simplification, que la rupture fragile peut être quasi-instantanée.

**3.3.2 La rupture ductile**

 Si la rupture se produit après une déformation plastique permanente, le comportement du matériau et la rupture sont dits "ductiles". La majorité des métaux, des alliages et certains polymères thermoplastiques présentent ce type de comportement.

 La rupture ductile résulte de l’agrandissement des micro-fissures et la propagation de la fissure résultante.

 La rupture ductile, génératrice de fissures importantes, forme peu de fragments, mais généralement de grande taille. La propagation du phénomène est limitée par la vitesse du son dans le matériau.

**3.3.3 Incidence du mode de sollicitation**

* **Incidence de la fatigue :**

Sous l'action de charges répétées ou alternées, la rupture d'un matériau peut se produire sous des contraintes inférieures à la résistance du matériau en statique : c'est la rupture par fatigue.

Ce mécanisme de rupture proviendrait d’une augmentation de la fissuration lors des chargements répétés.

* **Incidence de la température :**

Les caractéristiques mécaniques des matériaux dépendent de la température.

La contrainte de rupture des aciers par exemple diminue au-delà d’une température de quelques centaines de degrés Celsius, si bien qu’un réservoir pris dans un incendie voit sa pression interne augmenter et sa contrainte de rupture diminuer.

* + **La formation des fragments**

 La Fig-2 illustre un exemple extrême de déformation d’un réservoir cylindrique contenant un gaz sous pression initiée par une fissure axiale.

La fissure initiale se propage le long de l’axe vers chaque extrémité du réservoir où la fracture bifurque. Ensuite, des fractures circonférentielles tournent dans des directions opposées autour de chacune des extrémités.



Fig-2 Les déformations successives du réservoir (Baum, 2001)

1. **LES EFFETS SUR L’ENVIRONNEMENT**

 Le phénomène d’éclatement de réservoir induit une onde de pression et, dans certains cas, éjection du toit du réservoir ou de l’ensemble de son toit et de sa robe. Donc il est cohérent de considérer deux sortes d’effets sur l’environnement extérieur : **les effets de surpression** dus à l’onde de pression, et **les effets d’impact des fragments projetés**.

**4.1 Les effets de surpression**

 La surpression aérienne considérée est la conséquence d’une explosion qui se manifeste par la propagation depuis la zone de l’explosion d’une onde de pression dans l’atmosphère à une vitesse de l’ordre de celle des ondes acoustiques (340 m/s dans l’air à 150c).

* Des seuils d’effets sur l’homme sont proposés dans la littérature et, à l’heure actuelle, les seuils utilisés sont les suivants :

- le seuil **140 mbar** qui exprime l'apparition d'effets létaux,

- le seuil **50 mbar** qui exprime l'apparition des effets irréversibles.

* Pour les effets sur les structures les seuils utilisés sont les suivants :

- **20 mbar**, seuil des destructions significatives des vitres.

- **50 mbar**, seuil des dégâts légers sur les structures.

- **140mbar**, seuil des dégâts graves sur les structures.

- **200mbar**, seuil des effets domino.

**4.2 Les effets d’impact des fragments**

 Lors de l’éclatement d’un réservoir, une distinction est faite entre :

* les « missiles » primaires qui proviennent de la source elle-même, il s’agit des fragments du réservoir ; ils sont déterminés par leur nombre, leur masse, leur forme, leur vitesse et leur trajectoire,
* et les « missiles » secondaires : il s’agit d’objets dans l’environnement du réservoir qui sont soulevés par l’onde de pression de l’éclatement. L’effet de ces missiles est moindre car ils possèdent beaucoup moins de quantité de mouvement. Cependant, ils doivent être pris en compte en cas d’absence de fragments primaires.

 L’impact d’un projectile est susceptible de produire deux types d’effets sur l’homme ou sur des structures :

* le choc qui peut être la cause de fractures sur le corps humain, et entraîner la déformation des structures, éventuellement jusqu’à leur effondrement et leur destruction ;
* la pénétration, que ce soit dans le corps humain ou dans un équipement cible.
	1. **Modélisation des conséquences**

 Les méthodes permettant de décrire les conséquences d’un éclatement de réservoir sont essentiellement fondées sur les principes de la thermodynamique.

**4.3.1 Méthodes équivalent T.N.T**

**Principe général**

 Ces méthodes reposent sur l’hypothèse selon laquelle, il doit être possible de reproduire le champ de surpression qui est engendré par une explosion donnée (de gaz, d’un explosif condensé, ...) en faisant exploser du TNT. Ainsi, l’équivalent TNT d’un mélange gazeux explosible correspond à la masse de TNT qui en explosant engendrerait le même champ de surpressions que celui engendré par l’explosion d’un kg du mélange explosible considéré. Cet équivalent TNT, noté par la suite **M1** , est calculé au moyen de la relation ci-après.

**r =(M1) x 4690 / (M2 x Q)**

- M1 masse équivalente de TNT en Kg

- M2 masse de produit considéré comprise entre LIE et LSE en Kg

- Q chaleur de combustion du gaz KJ/kg (pour les hydrocarbures usuels, la Chaleur de combustion égale : 47 000 KJ/Kg

 )

- 4690 KJ/Kg chaleur de combustion du TNT

- M1x4690 énergie de décomposition du TNT

- **r** (Rendement de l'explosion)

 = 50% ou 10% si le réservoir travaille en pression.

# Après calcul de la masse d ’équivalent TNT on calcule la distance réduite

**λ =R/M1/3**

R rayon au centre de l'explosion (m)

M masse équivalent TNT (Kg).

Puis on se reporte à un abaque pour connaître la surpression à la distance voulu (R) (fig-3)

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

* Zone délimitée par une surpression de 140mbar, correspondant aux premiers effets de mortalité dus à l’onde de choc :

**d = 0,068.(Ps.D2.H)1/3**

* Zone délimitée par une surpression de 50mbar, correspondant aux premiers dégâts et blessures notables :

**d = 0,076.(Ps.D2.H)1/3**

d : distance en mètres

Ps : pression absolue de service en Pa

D : diamètre du bac en mètres

H : hauteur du bac en mètres



**λ**: distance réduite = distance au centre de l'explosion / (masse de TNT détonante)1/3

« Fig-3. Surpression engendrée en champ libre par l’explosion d’une charge de TNT au niveau du sol en fonction de la distance au centre de l’explosion »

**5. MESURES DE PREVENTION ET DE PROTECTION**

**5.1 Réduction du risque a la source**

 Les effets de pression sont fonction du paramètre (Prupt V)1/3; la pression de rupture *Prupt* de l’enceinte et le volume gazeux *V* sont les principaux facteurs influençant la quantification du phénomène. Ainsi, une diminution de la pression de rupture par deux, à volume constant, dans le but de réduire le potentiel de danger, n’entraînerait qu’une réduction modeste des distances d’effets (20%). Un raisonnement analogue peut être fait à propos du volume.

**5.2 Mesures de prévention**

* Limiter le risque d’incendie, qui peut être totalement indépendant du réservoir.
* Envisager le calcul d’une soupape tarée à une pression inférieure au **seuil de rupture** (lorsque la pression interne atteint environ la moitié de la pression de rupture standard).
* Pour les situations de sur-remplissage, la mise en place de soupapes ou de siphons pourrait également être préconisée.
* L’entretien des équipements.
* A propos de l’explosion interne, il est possible d’envisager la pose d’évents de décharge ou l’installation d’un système d’extinction automatique de façon à ce que la pression maximale de l’explosion ne dépasse pas, a priori, la moitié de la pression de rupture standard.

**5.3 Mesures de protection**

 Il s’agit de se protéger contre les effets des ondes de pression et des fragments.

* La mise en place de merlons.
* Envisager des zones de rupture préférentielle permettant la pose d’un système de retenue et l’installation d’un mur de clôture pourrait limiter les angles de projection à des incidences quasi-verticales de façon à réduire les distances de projection.
* La protection d’installations sensibles est possible grâce à des écrans pare-éclats.