

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE COMPIÈGNE

UTC

Maitrise des Risques

TD 2 : données et calcul du risque

UV TS01

Resp : christophe.proust@utc.fr

donnons un sens à l'innovation





Estimer les conséquences des accidents

AZF, BLAYE, La Mède, FEYSIN, BHOPAL

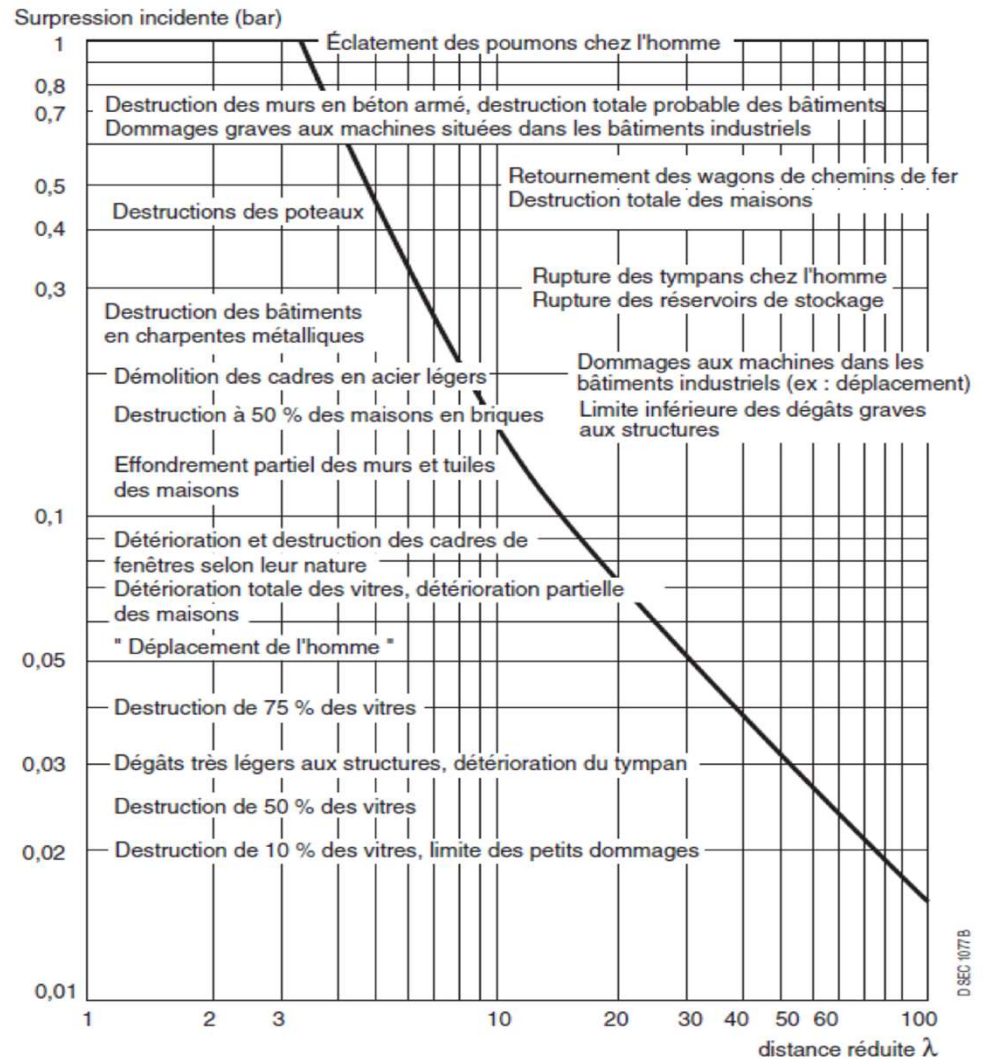
L'explosion d'AZF

Détonation de substances instables
(explosifs)

L'explosion de substances instables

- Méthode de « l'équivalent TNT » :
 - TriNitroToluène : explosif de référence délivrant 4,6 MJ/kg d'énergie thermique,
 - Beaucoup de substances instables ont un rendement de transformation en chaleur de 1 et une énergie comparable :

$$M_{eq_{TNT}} = M_{inventaire}$$



$$\text{Distance réduite } \lambda \text{ (m)} = \frac{\text{Distance au centre de l'explosion}}{\sqrt[3]{\text{masse de TNT explosant}}}$$

Effets des déflagrations en fonctions de la distance réduite au centre de l'explosion (abaque de Lannoy)

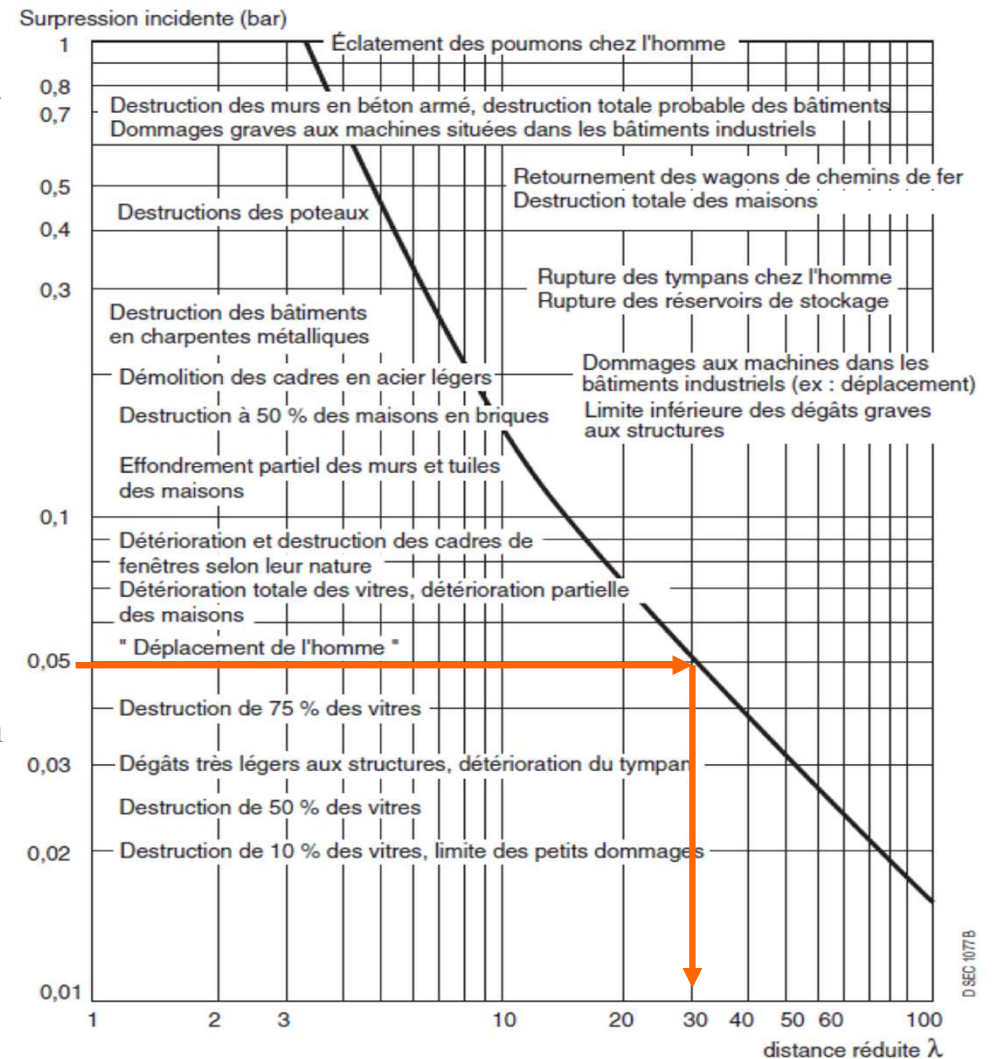
Explosion de substances instables



- AZF (2001), explosion d'ammonitrate explosion, 20 morts, 2000 blessés, ...
 - Détonation de 400 t d'ammonitrate
 - 4000 habitants/km²
 - 50 mbar ; seuils des effets irréversibles (blessures des soins)
 - 200 mbar: seuils des effets létaux significatifs (5% de la population exposée décède)
- Questions :
 - Calculez combien de personnes pourraient être blessées et comparez à ce qui s'est passé dans la réalité, commentez
 - Calculez combien de personnes pourraient mourir et comparez à ce qui s'est passé en réalité, commentez.

Solution

- L'ammonitrate est une substance instable qui conduit à des explosions similaires à des explosifs=> abaque TNT
- $M_{eq-TNT}=400\ 000\text{ kg}$
- **Les personnes peuvent être blessées** lorsque la surpression est supérieure à 50 mbar (0.05 bar)
- Sur le graphe TNT, la distance réduite correspondante λ est 30 (échelle logarithmique)
- Connaissant λ et M_{eq-TNT} , la distance R depuis l'explosion où la surpression est retombée à 50 mbar est 2200 m soit 2.2 kms.
- Le cercle de rayon 2,2 km a une surface de 15 km² et pourrait théoriquement accueillir 4000 x 15, soit 61 000 habitants, et tous peuvent être blessés à un degré ou un autre. Mais la réalité est bien moindre, pourquoi ?
- L'accident s'est produit dans une zone industrielle à la périphérie de la ville et au petit matin. Les environs étaient principalement la campagne avec très peu d'occupation. Seule une petite partie de la ville a été couverte par la vague alors que peu de personnes étaient sorties.

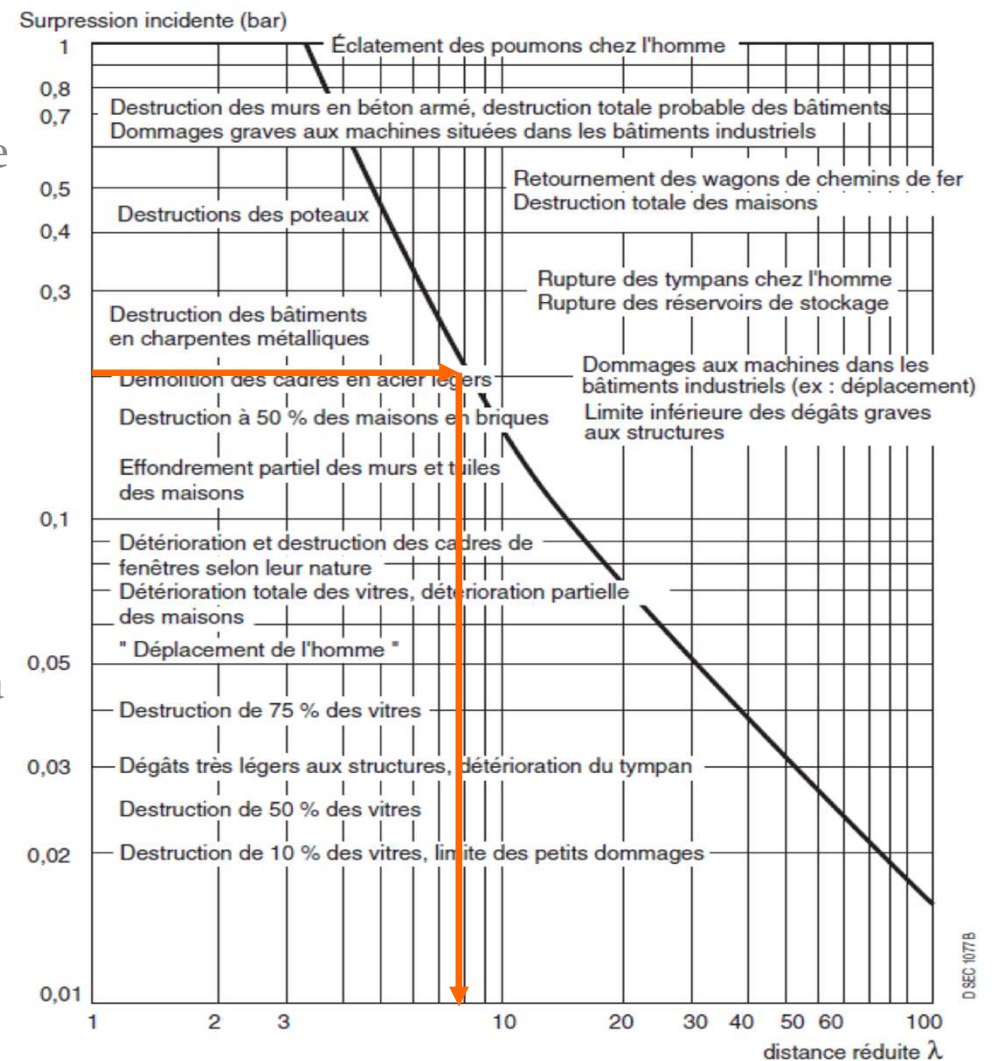


$$\text{Distance réduite } \lambda \text{ (m)} = \frac{\text{Distance au centre de l'explosion}}{\sqrt[3]{\text{masse de TNT explosant}}}$$

Effets des déflagrations en fonctions de la distance réduite au centre de l'explosion (abaque de Lannoy)

Solution

- Des gens peuvent être tués lorsque la surpression dépasse 200 mbar (0,2 bar) avec une probabilité de 5 %. Sur les graphes TNT, la distance réduite correspondante λ est 8 (échelle logarithmique)
- Connaissant λ et M_{eq} -TNT, la distance R depuis l'explosion où la surpression est tombée à 200 mbar est de 590 m, donc 0,59 km.
- Le cercle de rayon 0,59 km a une surface de 1 km² et pourrait théoriquement accueillir 4000 x 1, soit 4000 habitants, avec possiblement jusqu'à 0,05 x 4000 = 200 morts, tous tués. Mais la réalité est bien moindre, pourquoi ?
- L'accident s'est produit au petit matin dans une zone industrielle où presque personne n'était présent, ce qui explique le très faible nombre de décès.



$$\text{Distance réduite } \lambda \text{ (m)} = \frac{\text{Distance au centre de l'explosion}}{\sqrt[3]{\text{masse de TNT explosant}}}$$

Effets des déflagrations en fonctions de la distance réduite au centre de l'explosion (abaque de Lannoy)

L'explosion de Blaye

Un cas d'éclatement de capacité

... extension aux éclatements

- Causes :
 - affaiblissement mécanique (corrosion, chocs, incendie)
 - surpression
 - explosion interne
- => libération de l'énergie de pression (« Brode ») et application de l'abaque TNT.

$$M_{eqTNT} = \frac{P_{rupture} \cdot V_{capacité}}{W_{TNT}}$$

Nature de la paroi	Surpression de ruine (statique) Prupture
Tour de manutention en béton	100 à 300 mbar
Tour de manutention en bardage métallique ou en fibrociment	15 à 100 mbar
Tour de manutention en palplanches (tôles résistantes, type profils Omega)	300 à 1000 mbar
Cellules en béton : parois	150 à 1000 mbar
Cellules en béton : toits	100 à 400 mbar
Cellule métalliques : parois	300 à 1000 mbar
Cellules métalliques : toits	100 à 200 mbar
Galeries sur-cellules en béton	100 mbar
Briques	100 à 300 mbar
Tuiles	5 mbar
Verre simple/armé	3 à 25 mbar
Plaque polyester transparente (fixations crochets)	10 mbar
Polycarbonate avec des fixations crochets	10 mbar
Plaque amiante-ciment (fixations crochets)	10 à 100 mbar

- Projection de fragments : chute libre (pas d'effets de freinage par l'atmosphère)

$$Proj_{dist} < \frac{P_{rupt} \cdot V_{capacity}}{g \cdot M_{fragment}}$$

De l'ATEX au risque majeur...



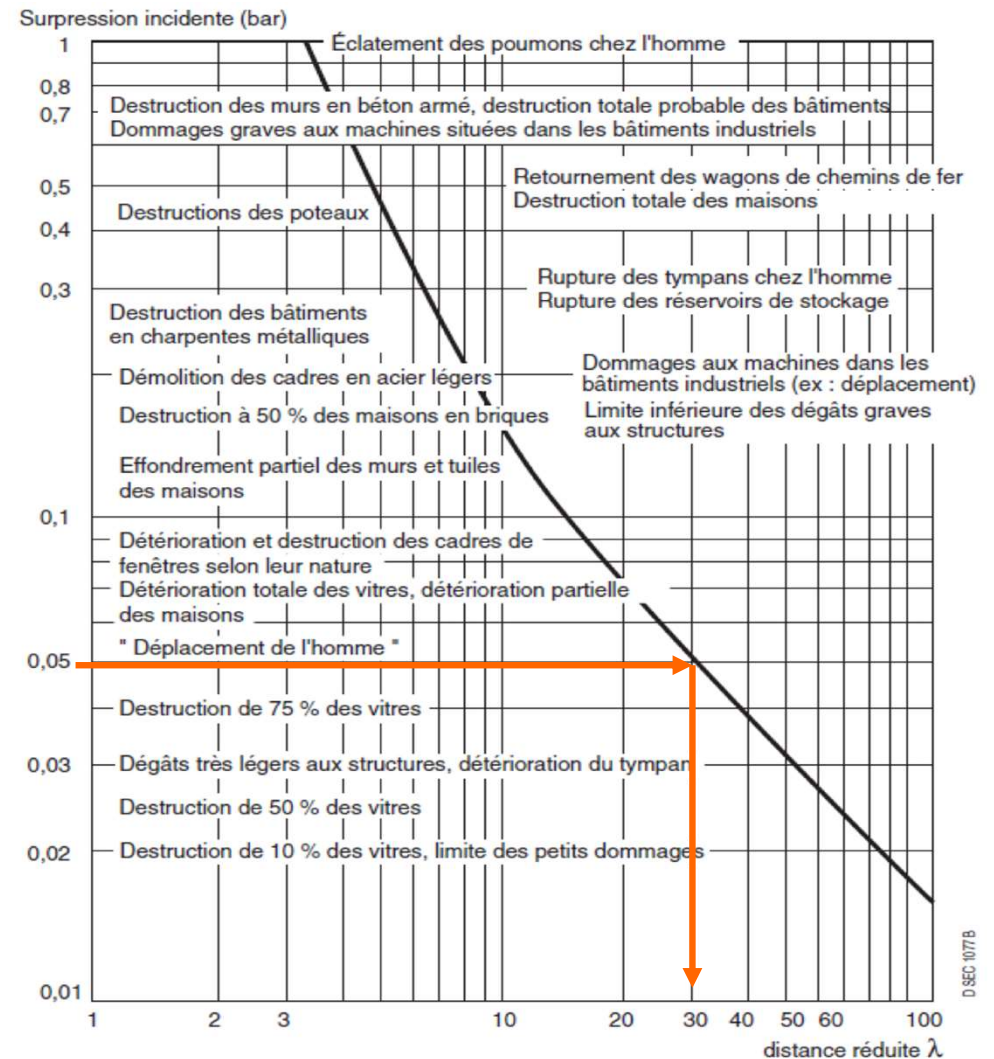
- Questions : Pour 1 cellule :
 - Calculer la distance aux dommages par effets de pression pour le voisinage (seuil 50 mbar)
 - Calculer la distance de projection des fragments
 - Commenter.

- L'explosion a fait éclater les cellules : 11 morts.
 - Chaque cellule: ID=6 m, hauteur =40 m high, épaisseur béton=40 cm
 - $P_{rupt} = 4 \text{ barg}$

Solution

$$M_{eqTNT} = \frac{P_{rupture} \cdot V_{capacité}}{W_{TNT}}$$

- À partir de la pression et du volume interne de la cellule, l'équivalent TNT peut être calculé.
- Le volume est de 1100 m³ et la surpression (la surpression est une surpression) est de 4 bargs, donc Meq-TNT = 100 kg (environ)
- Sur les graphiques TNT, la distance réduite λ correspondant à 50 mbar est de 30
- Connaissant λ et M_{eq-TNT} , la distance R depuis l'explosion où la surpression est retombée à 50 mbar est 140 m ce qui n'est pas beaucoup, peut-être encore à l'intérieur des limites de la propriété.



$$\text{Distance réduite } \lambda \text{ (m)} = \frac{\text{Distance au centre de l'explosion}}{\sqrt[3]{\text{masse de TNT explosant}}}$$

Effets des déflagrations en fonctions de la distance réduite au centre de l'explosion (abaque de Lannoy)

Solution

$$Proj_{dist} < \frac{P_{rupt} \cdot V_{capacity}}{g \cdot M_{fragment}}$$

- La masse totale des fragments est celle de l'enveloppe de la cellule... La cellule est un cylindre. La surface extérieure correspond à celle de la partie cylindrique ainsi que celle des zones supérieures et inférieures (disques). L est la hauteur (40 m), D, le diamètre (D). Le volume de béton est cette surface totale multipliée par l'épaisseur e du béton. La masse est obtenue en multipliant par la masse spécifique du béton ($\rho_{concrete} = 2500 \text{ kg/m}^3$). $M_{fragments} = 810\,000 \text{ kg}$.

$$M_{fragments} = \rho_{concrete} \cdot e \cdot \left(\pi \cdot D \cdot L + 2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \right)$$

- Le volume est 1100 m^3 et la surpression est de 4 barg. Accélération $g = 9.81 \text{ m/s}^2$.
- La distance de projection est de 55 m, ce qui n'est pas énorme. En réalité, elle est plus grande car une partie du fragment s'éloigne du sommet de la cellule et non du sol, et devrait généralement atteindre 100 m à une plus grande distance (ajouter la hauteur initiale maximale).
- La distance de projection semble correspondre aux observations. Dans cette situation spécifique, les conséquences sont importantes mais semblent surtout limitées au site industriel, expliquant peut-être la létalité limitée.

L'explosion de gaz de la Mède

Exemple tout à fait typique d'un UVCE

... extension aux explosions de gaz

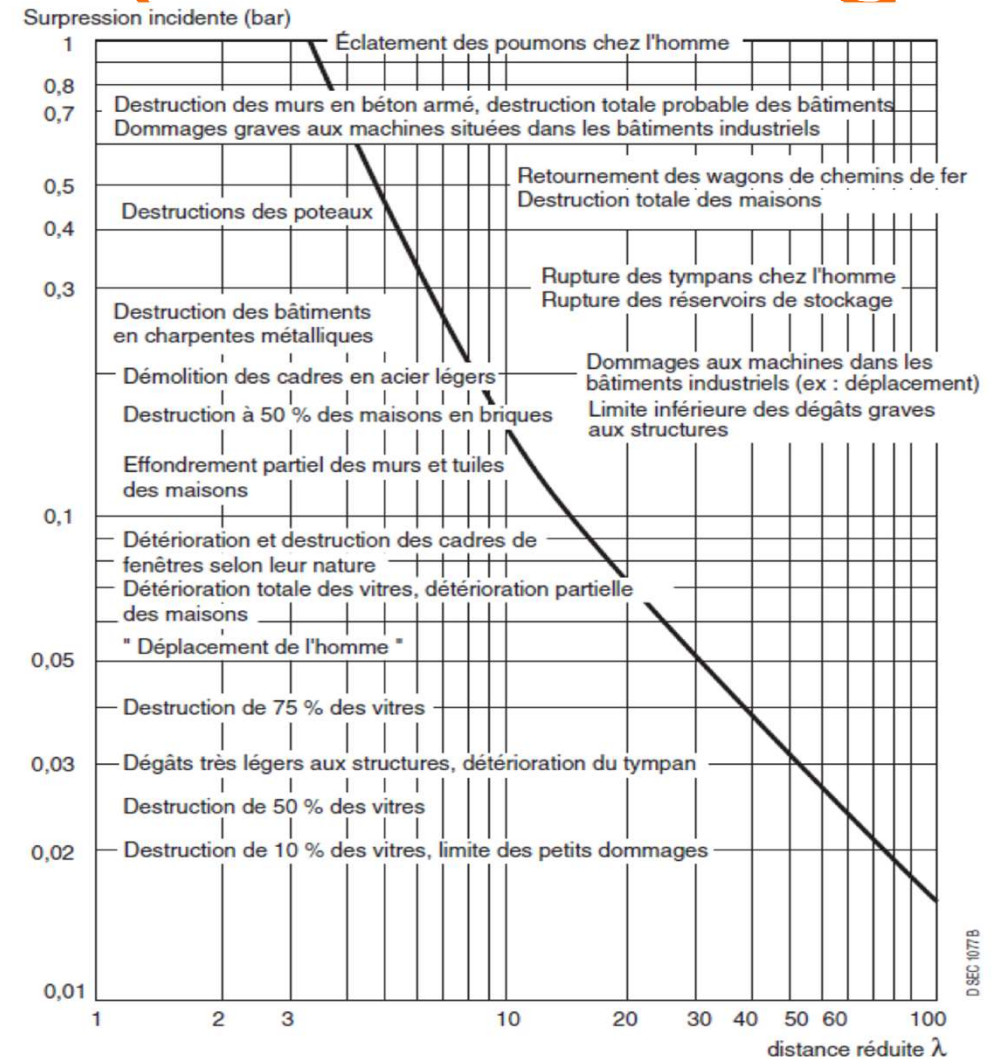
- Méthode» :

- TriNitroToluène : explosif de référence délivrant 4,6 MJ/kg d'énergie thermique,
- On choisit un « rendement » qui tient compte :
 - ❖ du ratio masse de combustible dans le nuage/inventaire dans le stockage,
 - ❖ de la réactivité du mélange gaz/air
 - ❖ Typiquement entre 2 et 15%...

$$M_{eqTNT} = \eta \cdot \frac{M_{inventaire} \cdot W_{combustion}}{W_{TNT}}$$

- Pour les explosions de gaz-vapeurs :

- Energie de combustion entre 20 et 100 MJ/kg
- **Rendement = 10%**



$$\text{Distance réduite } \lambda \text{ (m)} = \frac{\text{Distance au centre de l'explosion}}{\sqrt[3]{\text{masse de TNT explosant}}}$$

Effets des déflagrations en fonctions de la distance réduite au centre de l'explosion (abaque de Lannoy)

UVCE

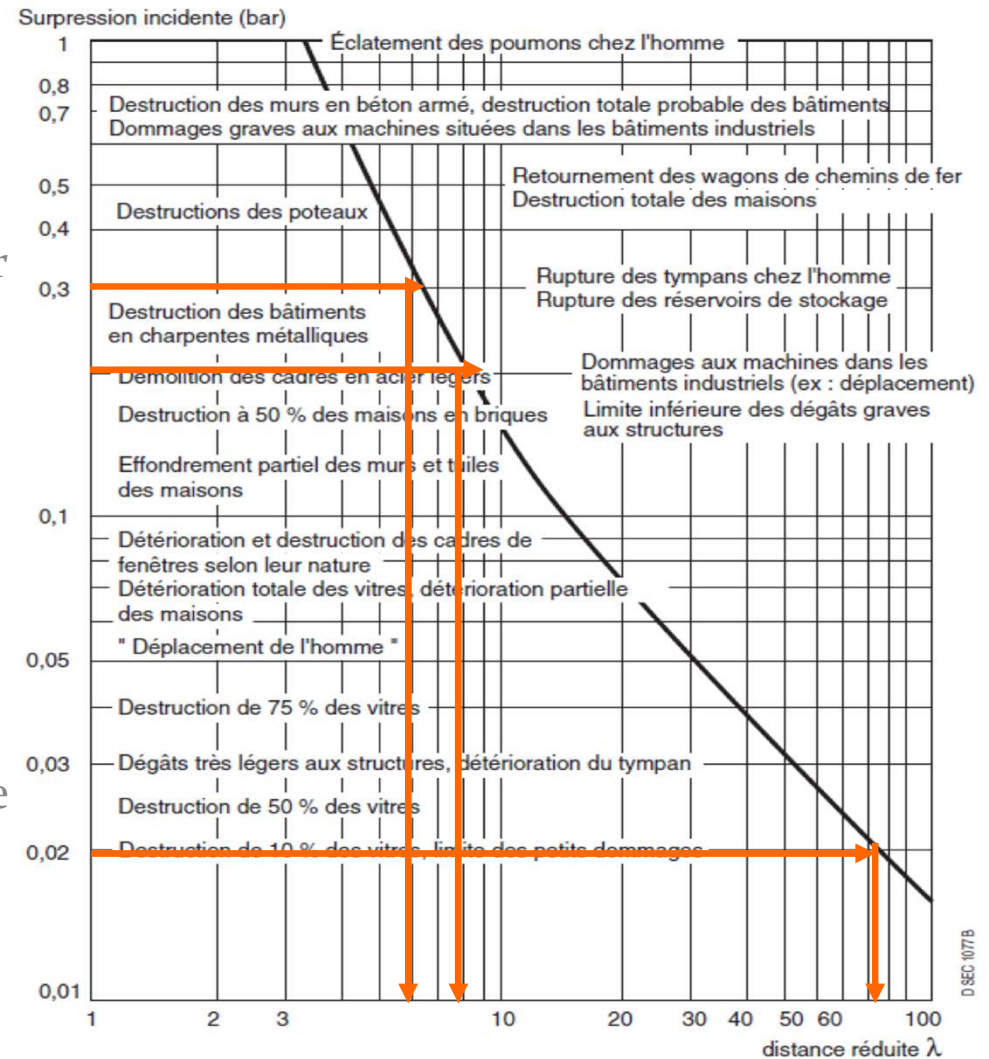


- 1992, La Mède : 6 morts
 - 5 t de propane/butane relachées
 - Des fenêtres brisées jusqu'à 2 kms
 - Tout détruit jusqu'à 100/200 m
 - $W_{\text{combustion}} = 46 \text{ MJ/kg}$

- Questions:
 - Sélectionnez des seuils représentatifs correspondant aux questions ci-dessous dans la description des dommages (cf abaque TNT)
 - Calculer jusqu'à quelle distance les fenêtres peuvent être brisées et commenter
 - De même, pour la destruction des tuyaux et supportages métalliques de la raffinerie

Solution

- Les fenêtres sont détruites jusqu'à 75 % à 50 mbar. Mais certaines fenêtres peuvent être cassées à une pression nettement plus basse, par exemple à 10 % à 20 mbar. Le seuil de bris est peut-être plus petit mais la courbe s'arrête à 20 mbar, ce qui peut être la valeur à choisir pour le calcul. Ainsi, pour 20 mbar : $\lambda=75$.
- Les tuyaux et les infrastructures en acier sont détruites entre 200 et 300 mbar. En choisissant 300 mbar, $\lambda = 6$.
- Enfin, des gens peuvent être tués lorsque la surpression dépasse 200 mbar (0,2 bar) avec une probabilité de 5 % : $\lambda = 8$.



$$\text{Distance réduite } \lambda \text{ (m)} = \frac{\text{Distance au centre de l'explosion}}{\sqrt[3]{\text{masse de TNT explosant}}}$$

Effets des déflagrations en fonctions de la distance réduite au centre de l'explosion (abaque de Lannoy)

Solution

- Pour calculer l'équivalent TNT de l'explosion gazeuse, 10 % ($\eta=0,1$) de l'inventaire (5 tonnes=5000 kg) est censé participer à la production de l'onde de pression en sachant que l'énergie de combustion = 46 MJ/kg. L'équivalent TNT est calculé avec l'équation suivante :

$$M_{eqTNT} = \eta \cdot \frac{M_{inventaire} \cdot W_{combustion}}{W_{TNT}}$$

- où $W_{TNT}=4.6$ MJ/kg si bien que $M_{eq-TNT}= 5000$ kg

- Des **fenêtres** sont brisées jusqu'au rayon autour de l'explosion où la surpression dépasse 20 mbar, correspondant à la distance réduite =75. Cette distance est de 1300 m, du même ordre de grandeur que les 2 km de l'enquête après l'accident. Avec un seuil de bris mieux adapté on aurait trouvé une distance plus grande.
- **Les infrastructures métalliques** sont détruites jusqu'au rayon autour de l'explosion où la surpression dépasse 300 mbar, correspondant à la distance réduite =6. Cette distance est de 100 m, en accord avec la photographie.
- Le **seuil de létalité** correspond au rayon autour de l'explosion où la surpression dépasse 200 mbar, correspondant à la distance réduite =8. Cette distance est de 140 m. Cette distance est dans l'usine, en particulier dans une zone ATEX à accès très restreint. Il est donc logique qu'il n'y ait que peu de victimes.

La catastrophe de Feysin

Le combo : fuite, feu, éclatement, ..

Incendies industriels

- Effets thermiques = > flux reçu dépend de:
 - Puissance
 - distance
- **Puissance :**
 - **Gaz et liquides flashants :**
débit x chaleur de combustion
 - **Autres:** Débit surfacique X
Surface de l'incendie au sol X
Chaleur de combustion

$$Flux_{at-receiver} = 0.3 \cdot \frac{Firepower}{4 \cdot \pi \cdot distance^2}$$

Dommages	Seuils (kW/m²)
Coups de soleil	1-2
Brûlures au 2e degré - dégâts aux fenêtres	3
Grandes brûlures-Fenêtre brisée	5
Risques pour la vie des pompiers-domino	8
Propagation seuil du feu	10
Dommages aux structures hors béton	16
Dommages aux structures en béton (heures)	20
Propagation d'un incendie dans les zones de stockage de pétrole et de gaz	36

Débits des fuites...

- Plusieurs types:

- gaz
- Liquide flashant ($T_{\text{boil}} < T_{\text{amb}}$)
- Sinon liquide purs

- Formules **approximatives** :

- Gaz:

$$\frac{\dot{m}_c}{\Omega} \cdot \frac{1}{\sqrt{P_0 \cdot \rho_0}} = 0.6$$

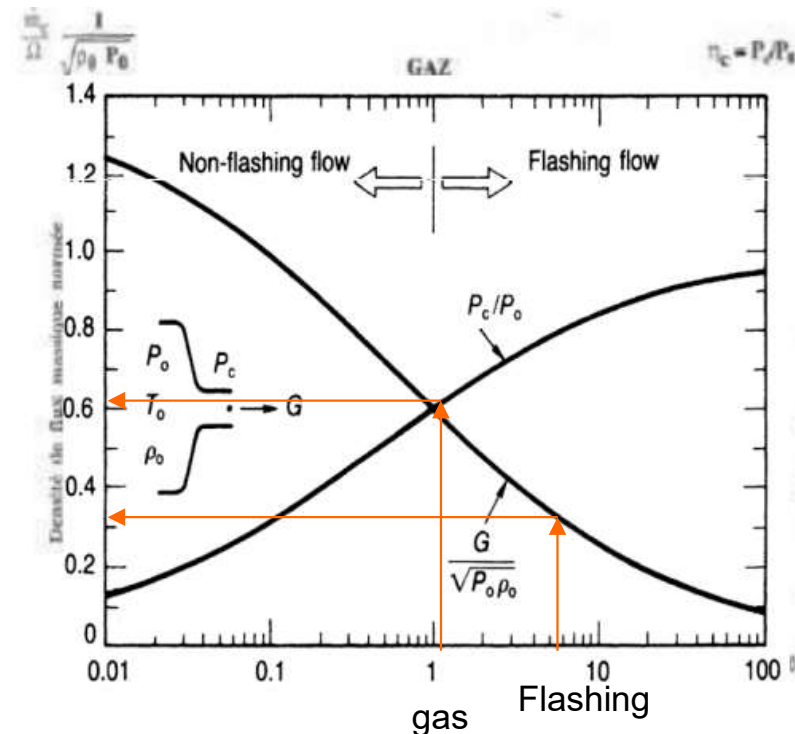
- Liquide flashant

$$\frac{\dot{m}_c}{\Omega} \cdot \frac{1}{\sqrt{P_0 \cdot \rho_0}} = 0.3$$

- Liquide pur

$$\frac{\dot{m}_c}{\Omega} \cdot \frac{1}{\sqrt{(P_0 - P_{\text{atm}}) \cdot \rho_0}} = 1$$

$$\frac{\dot{m}_c}{\Omega} \cdot \frac{1}{\sqrt{P_0 \cdot \rho_0}}$$



$$\eta_c = \frac{P_c}{P_0}$$

Notes :

- $\dot{m}_c$ débit massique
- Ω section de fuite
- Indice « 0 » conditions de réservoir

Données sur les feux industriels

- Chaleur de combustion Δh_c :
 - En général : 40 MJ/kg
 - Sauf produit oxygénés et H₂
 - Solides 20 MJ/kg sauf (C_nH_m= 40 MJ/kg)
- Débit surfacique m_∞ ":
 - Liq très inflammables : 0,1 kg/m²/s
 - Liq inflammables : 0,05 kg/m²/s
 - Liq peu inflammables : 0,02 kg/m²/s
 - Solides : 0,02 kg/m²/s
- Dimensions du feu (nappe):
 - Diamètre correspondant à la surface au sol
 - Hauteur < 2 x Diamètre

Nature du combustible	Densité (kg/m ³)	Δh_v (kJ/kg)	Δh_c (MJ/kg)	m_∞ '' (kg/m ² .s)
Gaz liquéfiables				
H ₂ liquide	70	442	120,0	0,017 (±0,001)
Gaz naturel liquéfié (fréquemment CH ₄)	415	619	50,0	0,078 (±0,018)
Gaz de pétrole liquéfié (fréquemment C ₃ H ₈)	585	426	46,0	0,099 (±0,009)
Alcools				
Méthanol (CH ₃ OH)	796	1195	20,0	0,017 ???
Ethanol (C ₂ H ₅ OH)	794	891	26,8	0,015 ???
Combustibles organiques classiques				
Butane (C ₄ H ₁₀)	573	362	45,7	0,078 (±0,003)
Benzène (C ₆ H ₆)	874	484	40,1	0,085 (±0,002)
Hexane (C ₆ H ₁₄)	650	433	44,7	0,074 (±0,005)
Heptane (C ₇ H ₁₆)	675	448	44,6	0,101 (±0,009)
Xylènes (C ₈ H ₁₀)	870	543	40,8	0,090 (±0,007)
Acétone (C ₃ H ₈ O)	791	668	25,8	0,041 (±0,003)
Dioxane (C ₄ H ₈ O ₂)	1035	552	26,2	0,018 ^b
Diéthyl éther (C ₄ H ₁₀ O)	714	382	34,2	0,085 (±0,018)
Hydrocarbures				
Ether de pétrole	740	-	44,7	0,048 (±0,002)
Essence	740	330	43,7	0,055 (±0,002)
Kérosène	820	670	43,2	0,039 (±0,003)
JP-4	760	-	43,5	0,051 (±0,002)
JP-5	810	700	43,0	0,054 (±0,002)
Huile pour transformateur	760	-	46,4	0,039 ^b
Fioul lourd	940-1000	-	39,7	0,035 (±0,003)
Brut	830-880	-	42,5-42,7	0,022-0,045

Le feu de Feysin



- Feysin, 1966, 18 morts (pompiers) :
 - Fuite et feu sous (liquide) et au-dessus (gaz) d'une sphère de GPL (remplie à 50 % de liquide, diamètre de 14 m)
 - Rupture de tuyaux en haut et en bas : acier de 2", ID 40 mm
 - Rupture @ 500° C // 30 barg

- Questions :
 - Info : Même des pompiers bien entraînés et équipés peuvent mourir si le flux de chaleur reçu dépasse 8 kW/m²
 - Calculez la distance de sécurité pour les pompiers. Commenter.
 - Sur la photo, les pompiers se tiennent assez près de la sphère en feu et essaient de refroidir la sphère voisine. Le seuil pour la propagation d'un feu dans un dépôt de pétrole et gaz est de 36 kW/m². Calculez où ce flux est atteint. Commentez la décision des pompiers de se tenir si près du feu et de pulvériser la sphère d'eau.

Solution

- Il est d'abord nécessaire pour calculer la puissance du feu. Pour cela, nous avons besoin du débit massique de GPL (propane) participant au feu et de la chaleur de combustion. La ligne correspondant au GPL est identifiée dans le tableau de la diapositive précédente. La chaleur de combustion est $W_{\text{combustion}} = 46 \text{ MJ/kg}$.
- Le propane est gazeux dans la partie supérieure de la sphère. Les soupapes de sécurité supérieures sont ouvertes, des vapeurs de propane fuient par le tuyau correspondant (ID 40 mm) et brûlent violemment. Le débit massique est calculé à l'aide de la première formule de la diapositive 20. $P_0 = 30 \text{ bars}$ ($3 \cdot 10^6 \text{ Pa}$). Pour calculer la masse spécifique @30 bars/500° C, la loi des gaz parfaits peut être utilisée en connaissant la masse molaire du propane (0,044 kg/mole) et on trouve $\rho_{\text{ovapeurs}} = 20 \text{ kg/m}^3$ environ. Le débit de vapeur est alors d'environ 6 kg/s.
- Le propane est liquide au fond, où il fuit et brûle aussi : même diamètre de tuyau (ID=40 mm). Mais le point d'ébullition de ce liquide est bien en dessous de l'ambiante (-40° C), ce qui en fait un liquide flashant. La deuxième formule de la diapo 20 est à utiliser avec $P_0 = 30 \text{ bars}$ et $\rho_{\text{oliq}} = 585 \text{ kg/m}^3$ (tableau). Le débit du liquide est alors d'environ 16 kg/s.
- Le débit total alimentant la flamme est de $16+6=22 \text{ kg/s}$ (car le liquide flashant forme un jet tout comme la vapeur et qu'aucune flaque ne se forme). La puissance théorique totale du feu est de $22 \times 46 = 995 \text{ MW}$.
- Nous calculons **la distance de sécurité pour les pompiers**. On trouve 155 m. Ils semblent beaucoup plus proches. Ils semblent essayer de se protéger derrière la sphère intacte, pourquoi prendre ce risque ?
- Le **seuil de propagation du feu** dans un dépôt pétrolier est atteint à environ 25 m. Si le feu se propage à partir de la sphère en feu, des conséquences extrêmes sont attendues. Les pompiers prennent donc le risque de s'approcher de la sphère intacte pour la refroidir autant que possible avec de l'eau. Dans une certaine mesure, ils ont réussi, mais beaucoup sont morts....

La tragédie (qui perdure) de Bhopal

Un accident de type SEVESO=nucléaire

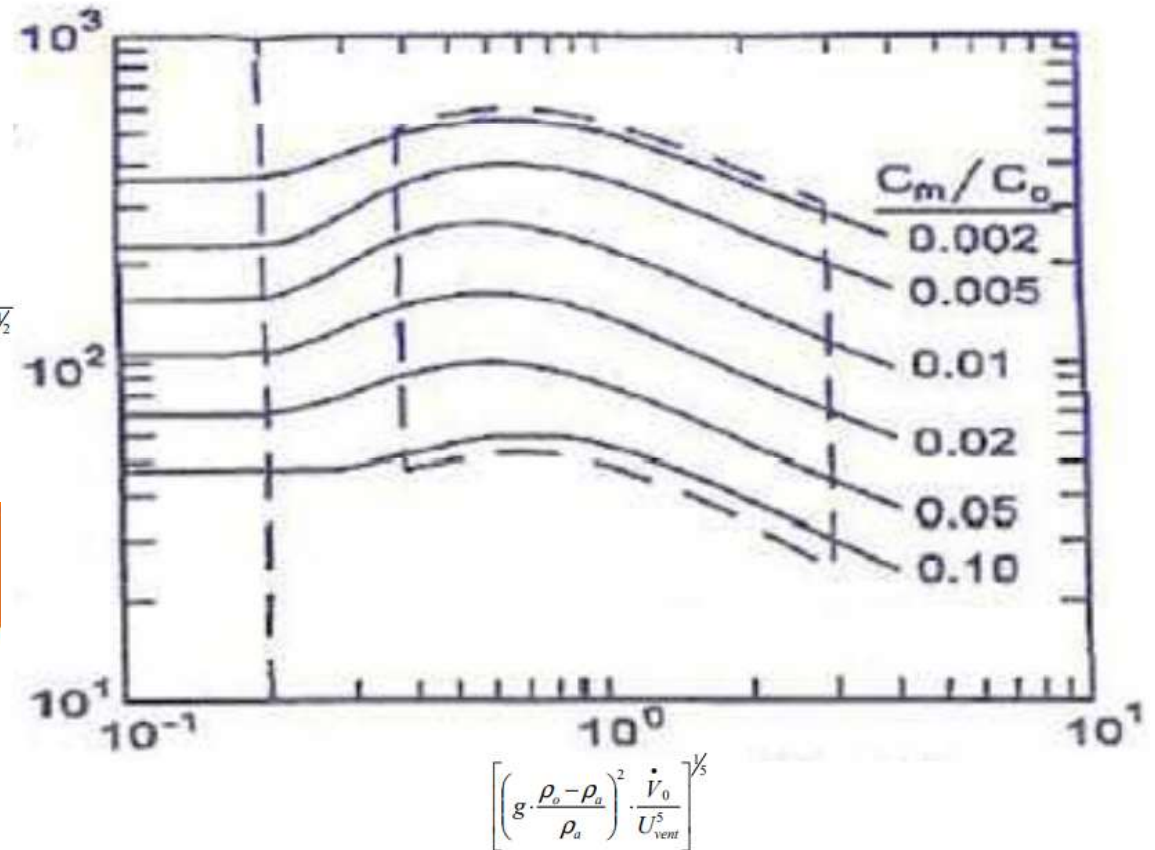
Les fuites de produits toxiques dans l'air

- Les seuils à prendre en compte =
- Facteurs importants :
 - Débit de la fuite
 - Conditions atmosphériques
 - Valeur des seuils
- Loi de diffusion « classiques »

$$\left[\frac{\dot{V}_0}{U_{vent}} \right]^{\frac{x}{2}}$$

$$Concentration_{at-receiver} = \frac{Flowrate_{volumetric}}{\pi \cdot Speed_{wind} \cdot \sigma^2}$$

$$\sigma = 0,07 \cdot distance^{0,9}$$



Débits des fuites...

- gaz
- Liquide flashant ($T_{\text{boil}} < T_{\text{amb}}$)
- Sinon liquide purs

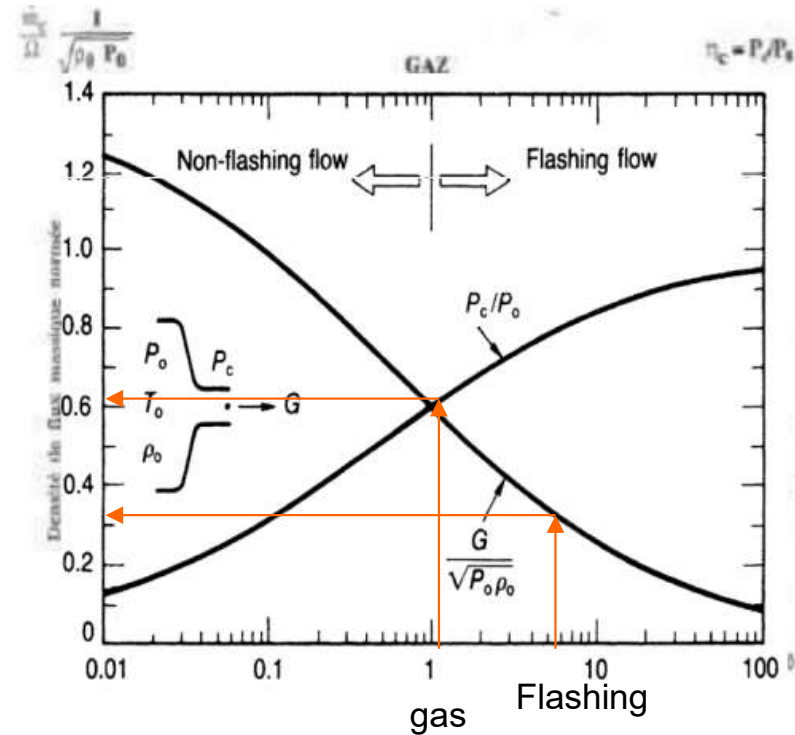
$$\frac{\dot{m}_c}{\Omega} \frac{1}{\sqrt{P_o \cdot \rho_o}}$$

- Gaz:

$$\frac{\dot{m}_c}{\Omega} \cdot \frac{1}{\sqrt{P_0 \cdot \rho_0}} = 0.6$$

- $$\frac{\dot{m}_c}{\Omega} \cdot \frac{1}{\sqrt{P_0 \cdot \rho_0}} = 0.3$$

- $$\frac{\dot{m}_c}{\Omega} \cdot \frac{1}{\sqrt{(P_0 - P_{atm}) \cdot \rho_0}} = 1$$



$$\eta_c = \frac{P_c}{P_o}$$

Notes :

- m_c débit massique
- Ω section de fuite
- Indice « 0 » conditions de réservoir

Formation du panache toxique

- Methyl isocyanate (MM = 57 g/mole) leak:
 - 10 000 morts
 - 300 000 malades/handicapés
 - 10 000 hab/km²
- Fuite @4 bar g/100° C, à travers cheminée ID 12”
 - SELS 10 ppm (5% de la population exposée décède)
 - U vent = 2 m/s.



- Questions:
 - Calculer la distance à laquelle SELS est atteint
 - déduire le nombre potentiel de victimes
 - Comparer à la réalité et commenter.

Solution

- Il faut d'abord calculer le débit de fuite.
L'isocyanate de méthyle était émis par une cheminée au-dessus d'un réservoir de stockage, donc en phase de vapeur. Le débit massique est calculé à l'aide de la première formule de la diapositive 26. $P_0 = 5$ bars (surpression moyenne de 4 barg + 1 bar puisque la pression absolue est requise $= 4 + 1 \Rightarrow 5 \cdot 10^5$ Pa). Pour calculer la masse spécifique @ 5 bars / 100° C, la loi des gaz parfaits peut être utilisée en connaissant la masse molaire de l'isocyanate (0,057 kg/mole) et on trouve d'environ $\rho_0 = 8,7$ kg/m³. Le débit de vapeur est alors de 88 kg/s.
- Il est maintenant nécessaire de « traduire » ce débit massique en un débit volumétrique adapté aux conditions de dispersion atmosphérique, soit @ 1 bar et 20° C. Encore une fois, en utilisant la loi des gaz parfaits, on obtient $\rho = 2,34$ kg/m³ et le débit volumique est alors d'environ 38 m³/s.
- L'allongement maximal du nuage est donné par l'équation de la diapositive 25 en utilisant comme pour la concentration SELS transformée en concentration volumétrique (molaire) ($10 \text{ ppm} > 10 \cdot 10^{-6}$). Et on trouve : $31\,000 \text{ m} = 31 \text{ km}$. ($\sigma = 750 \text{ m}$)
- Le nombre d'habitants dans la zone circulaire de 31 km de rayon est de $10\,000 \times 31^2 = 30 \text{ M}$ et environ 5 % d'entre eux devraient être décédés, soit 1,5 M.
- C'est bien plus que ce qui a été observé. La raison en est que le nuage ne couvre pas toute la surface du cercle SELS et est en fait un ellipsoïde très allongé. Son épaisseur maximale typique dans la direction perpendiculaire au vent est de $2 \times \sigma$ (information donnée par l'enseignant !) donc environ 1,5 km. L'ordre de grandeur de la superficie de la zone toxique est alors plus de $1,5 \times 31 = 46 \text{ km}^2$. Un maximum de 460 000 habitants à été soumis au seuil SELS et environ 5 % mourraient, soit 25 000, ce qui correspond mieux à la réalité.