

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

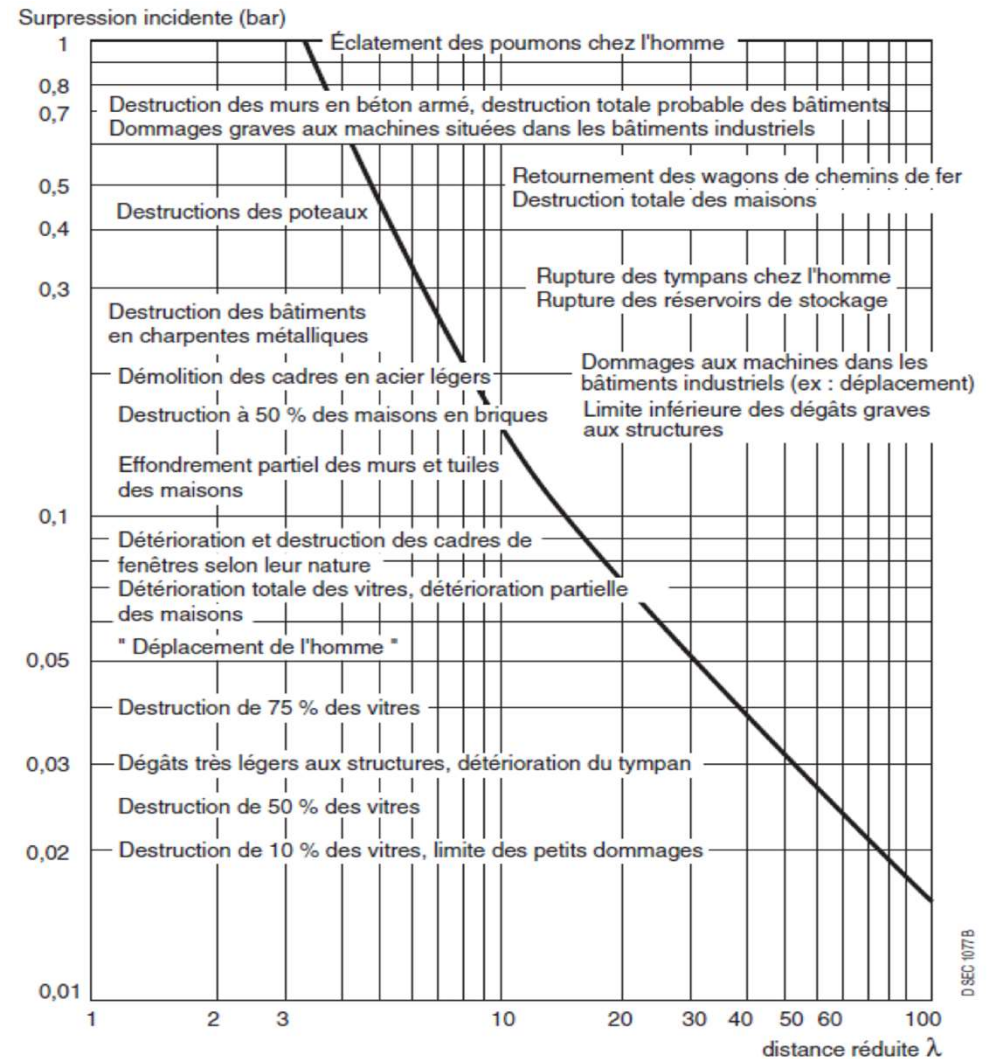
L'explosion d'AZF

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.

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
 - $P_{rupt} = 4 \text{ barg}$

L'explosion de gaz de la Mède

Exemple tout à fait typique d'un UVCE

... extension aux explosions de gaz

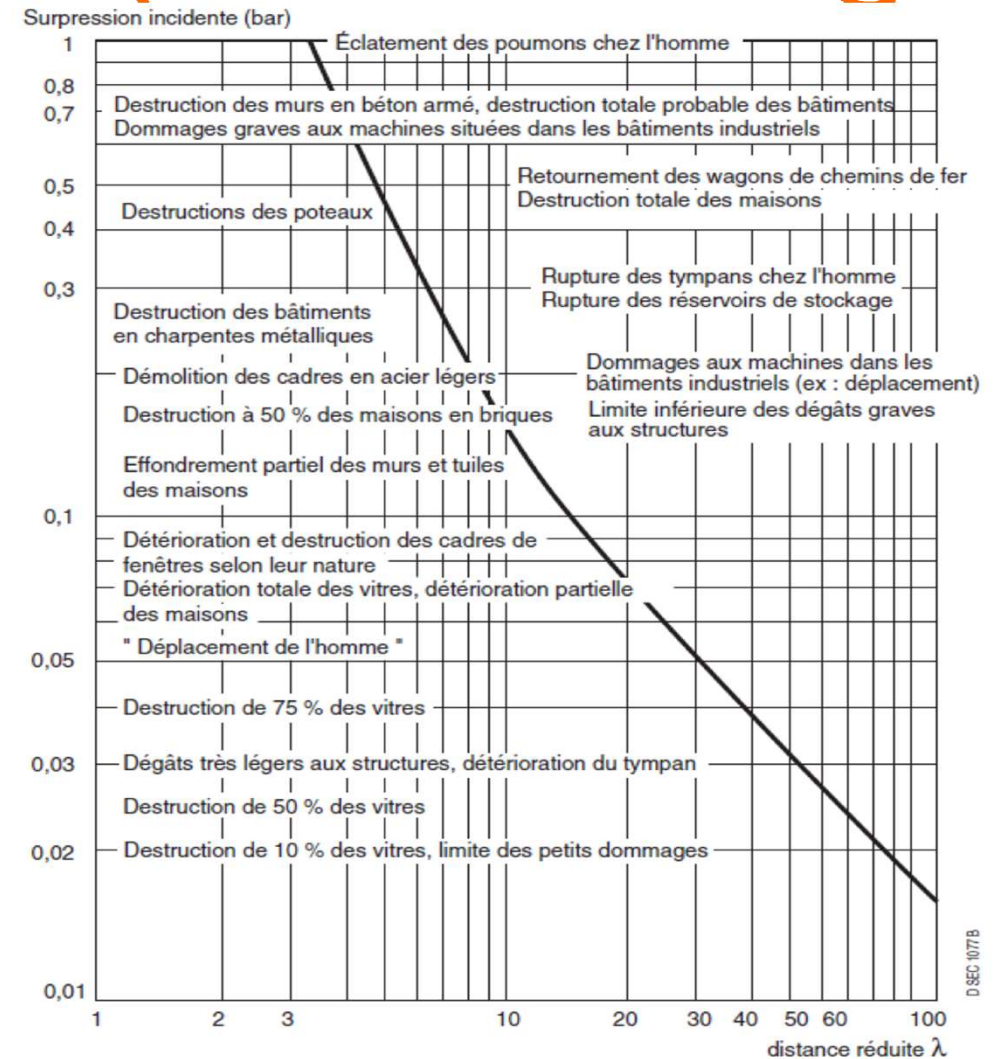
- Méthode» :

- 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

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:

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

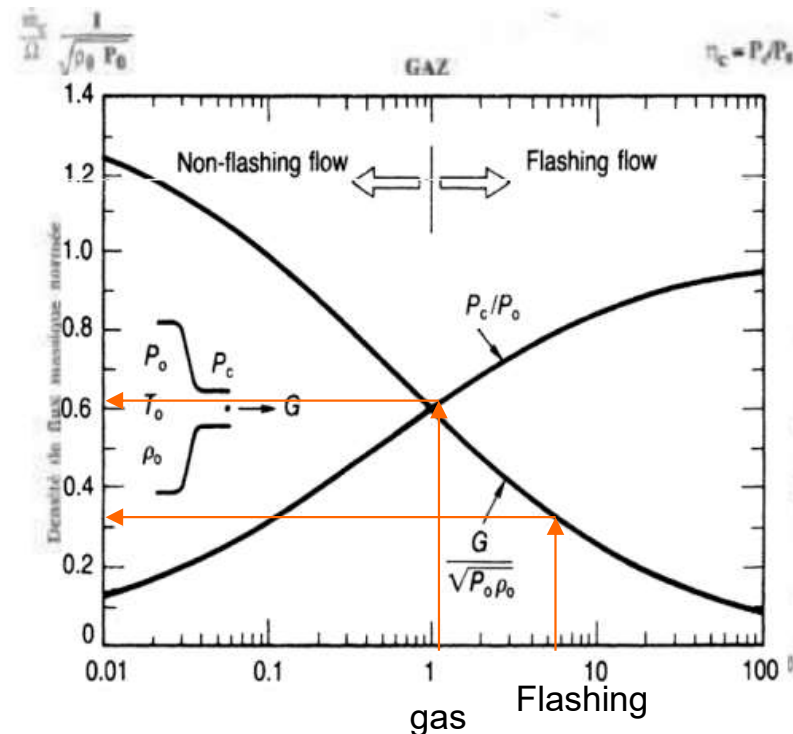
- Liquide flashant

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

- 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.

La tragédie (qui perdure) de Bhopal

Un accident de type SEVESO=nucléaire

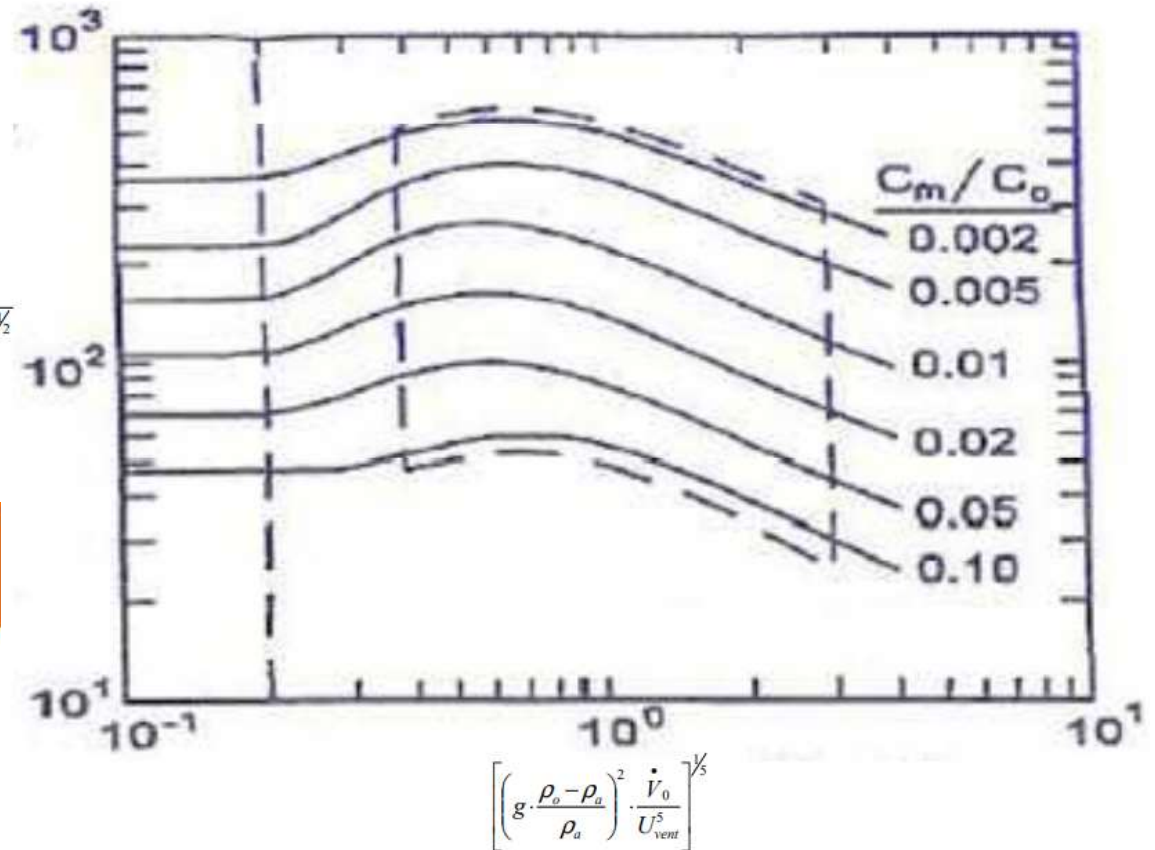
Les fuites de produits toxiques dans l'air

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

$$\left[\frac{\dot{V}_0}{U_{vent}} \right]^{1/2}$$

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

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



Débits des fuites...

- Plusieurs types:

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

- Formules **approximatives** :

- Gaz:

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

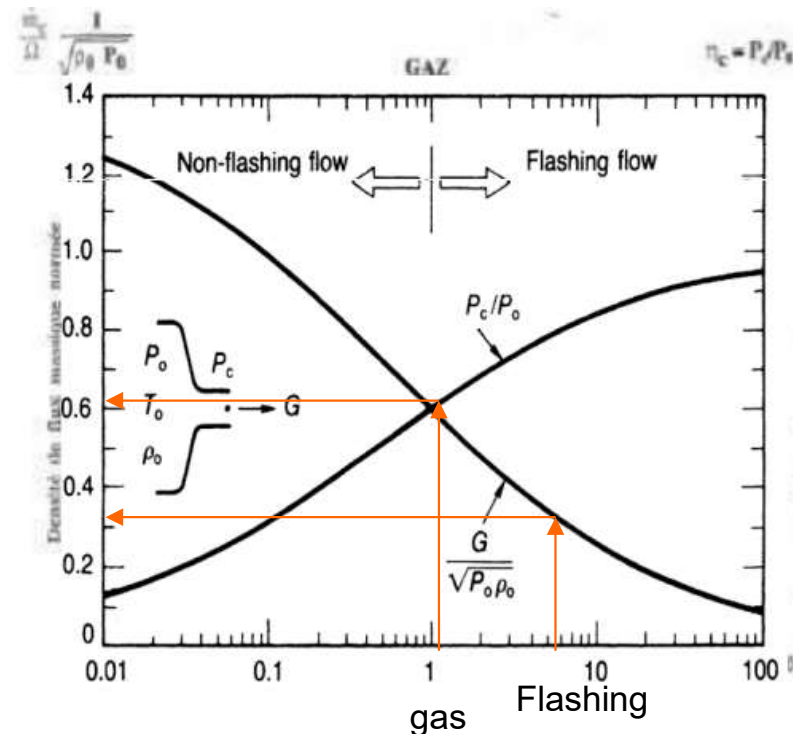
- Liquide flashant

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

- 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

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.