UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE COMPIÈGNE

UTC

Maitrise des Risques

TD 10 : Risque Industriel

UV TS01

Resp : christophe.proust@utc.fr

Rappels

Risque industriel : analyse ?

- Si EDD :
  - Au moins une APR (HAZid)
  - Scénarios critiques
  - Calculs d'effets
  - Éventuellement « nœuds papillons »
- Sinon analyse de risque reste nécessaire :
  - Cadrage existant pour ATEX, EvRP,..
  - Sinon définir grille de criticité et HAZoP souvent

Rappel : le risque industriel

- On peut définir le risque industriel comme les accidents qui, se produisant à l'intérieur d'une usine, ont des effets néfaste sur les biens, les personnes et l'environnement à l'extérieur des limites de propriétés de l'usine. Les « phénomènes dangereux » concernés sont :
  - les explosions de gaz et vapeurs (raffinerie de la Mède en 1994),
  - les explosions de « substances instables » (usine AZF en 2001)
  - les éclatements de réservoirs (Blaye, entrepôt GPL de Feysin en 1987),
  - les incendies (incendie de Lubrizol en 2021)
  - Les fuites de produits toxiques et la dispersion dans l'air (catastrophe de Bhopal en 1994)
  - Les fuites de produits toxiques dans l'eau et les sols (SIAAP).
- On parle de risque technologique majeur lorsque….

Criticité

Type d'appréciation	Classe de probabilité				
	E	D	C	B	A
Qualitative *(les définitions entre guillemets ne sont valables que si le nombre d'installations et le retour d'expérience sont suffisants)*	« Évènement possible mais extrêmement peu probable » : *n'est pas impossible au vu des connaissances actuelles, mais non rencontré au niveau mondial sur un très grand nombre d'années -installations.*	« Évènement très improbable » : *s'est déjà produit dans ce secteur d'activité mais a fait l'objet de mesures correctives réduisant significativement sa probabilité.*	« Évènement improbable » : *un évènement similaire déjà rencontré dans le secteur d'activité ou dans ce type d'organisation au niveau mondial, sans que les éventuelles corrections intervenues depuis apportent une garantie de réduction significative de sa probabilité.*	« Évènement probable » : *s'est produit et/ou peut se produire pendant la durée de vie de l'installation.*	« Évènement courant » : *s'est produit sur le site considéré et/ou peut se produire à plusieurs reprises pendant la durée de vie de l'installation malgré d'éventuelles mesures correctives.*
Semi-quantitative	**Cette échelle est intermédiaire entre les échelles qualitative et quantitative et permet de tenir compte des mesures de maîtrise des risques mises en place, conformément à l'article 4 du présent arrêté.**				
Quantitative *(par unité et par an)*	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	

RELATIVE À L'ÉCHELLE D'APPRÉCIATION D
DES CONSÉQUENCES HUMAINES D'UN ACCIDENT À L'EXT

NIVEAU DE GRAVITÉ des conséquences	ZONE DÉLIMITÉE PAR LE SEUIL des effets létaux significatifs	ZONE DÉLIMITÉE PAR LE SEUIL des effets létaux	ZONE DÉLIMITÉE PAR LE SEUIL des effets irréversibles sur la vie humaine
Désastreux.	Plus de 10 personnes exposées (1).	Plus de 100 personnes exposées.	Plus de 1 000 personnes exposées.
Catastrophique.	Moins de 10 personnes exposées.	Entre 10 et 100 personnes.	Entre 100 et 1 000 personnes exposées.
Important.	Au plus 1 personne exposée.	Entre 1 et 10 personnes exposées.	Entre 10 et 100 personnes exposées.
Sérieux.	Aucune personne exposée.	Au plus 1 personne exposée.	Moins de 10 personnes exposées.
Modéré.	Pas de zone de létalité hors de l'établissement		Présence humaine exposée à des effets irréversibles inférieure à « une personne ».

Gravité sur les personnes	Probabilité d'occurrence des accidents potentiels				
	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
5 : Désastreux					
4 : Catastrophique					
3 : Important					
2 : Sérieux					
1 : Modéré					

Satisfaisant
MMR Rang 1
MMR Rang 2
NON

on

L'explosion de substances instables

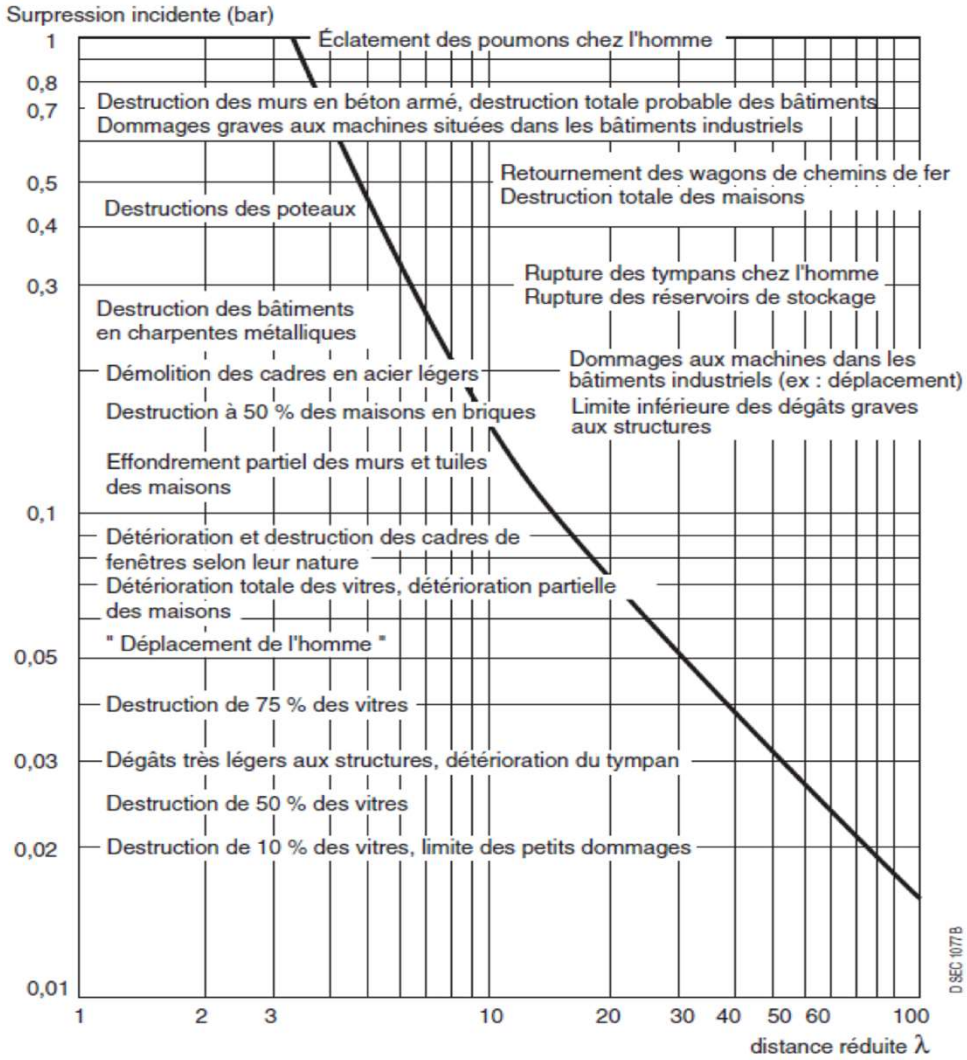
- Méthode de « l'équivalent TNT » :
  - TriNitroToluène : explosif de référence délivrant 4,6 MJ/kg d'énergie thermique,
  - On choisit un « rendement » de 1

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

- Remarques pour les seuils de pression caractéristiques

Tableau 1 – Seuils de surpressions réglementaires

Seuil de surpression (mbar)	Effets correspondants
200	Seuil des effets létaux significatifs délimitant la zone des dangers très graves pour la vie humaine et seuil des effets dominos
140	Seuil des effets létaux délimitant la zone des dangers graves pour la vie humaine et seuil des dégâts graves sur les structures
50	Seuil des effets irréversibles délimitant la zone des dangers significatifs pour la vie humaine et seuil des dégâts légers sur les structures
20	Seuil des effets délimitant la zone des effets indirects par bris de vitre sur l'homme



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

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

Les éclatements de capacités

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

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

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 Cellules en béton : toits	150 à 1000 mbar 100 à 400 mbar
Cellule métalliques : parois Cellules métalliques : toits	300 à 1000 mbar 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'atmosphere)

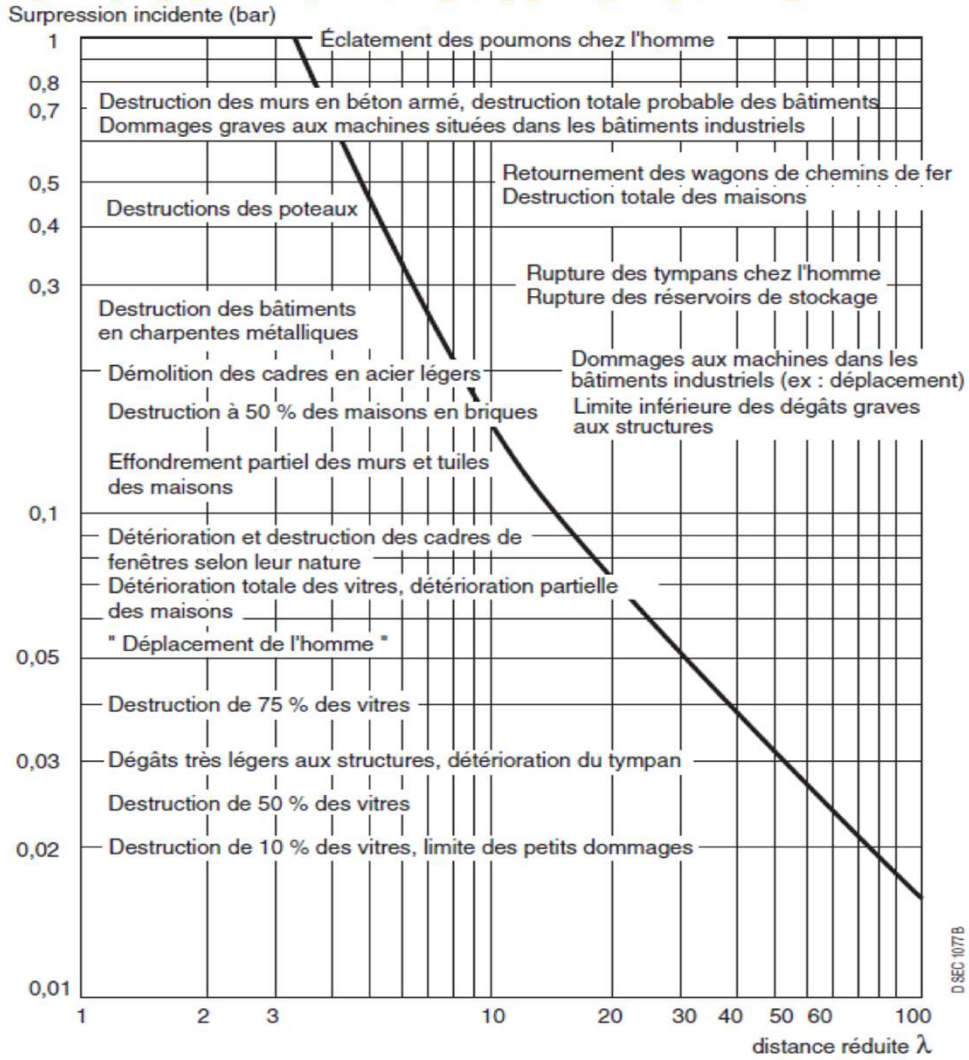
$$Proj_{dist} < \frac{P_{rupt} \cdot V_{capacity}}{g \cdot M_{fragment}}$$

Les explosions de gaz/vapeurs

- Méthode de « l'équivalent TNT » :
  - 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%…

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

- Pour les explosions de gaz-vapeurs :
  - Energie de combustion entre 20 et 100 MJ/kg
  - **Rendement *type* = 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)

Les incendies industriels

- Effets thermiques => flux reçu :
  - puissance du feu
  - distance
  - 3 ou 5 ou 8 kW/m²
- Puissance du feu :
  - Gaz : débit x chaleur de combustion
  - Autres : débit surfacique x surface du feu au sol x chaleur de combustion

Valeurs de référence (kW/m²)	Effets sur les structures
5	Seuil des destructions de vitres significatives
8	Seuil des effets domino et correspondant au seuil de dégâts graves sur les structures
16	Seuil d'exposition prolongée des structures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures, hors structures béton
20	Seuil de tenue du béton pendant plusieurs heures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures béton
200	Seuil de ruine du béton en quelques dizaines de minutes

Valeurs de référence		Effets sur l'homme
kW/m²	[(kW/m²) 4/³].s	
3	600	Seuil des effets irréversibles délimitant la « zone des dangers significatifs pour la vie humaine »
5	1 000	Seuil des effets létaux délimitant la « zone des dangers graves pour la vie humaine » - mentionnée à l'article L515-16 du code de l'environnement
8	1 800	Seuil des effets létaux significatifs délimitant la « zone des dangers très graves pour la vie humaine » - mentionnée à l'article L515-16 du code de l'environnement

$$Flux_{reçu} = 0{,}3 \cdot \frac{Puissance_{feu}}{4 \cdot \pi \cdot distance^2}$$

Les incendies industriels

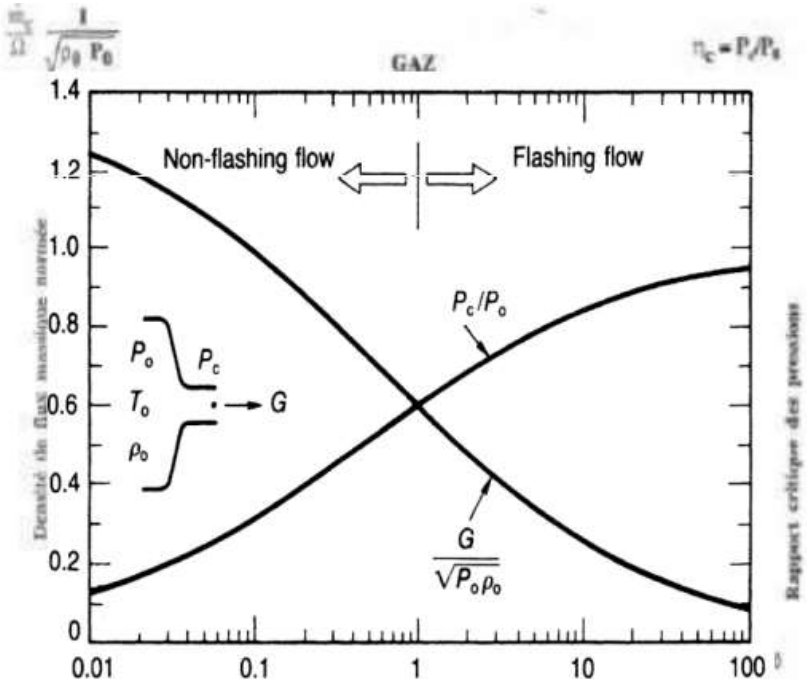
- Chaleur de combustion Δh_c :
  - En général : 40 MJ/kg
  - Sauf produit oxygénés et H2
  - Solides 20 MJ/kg sauf (CnHm= 40 MJ/kg)
- Débit surfacique m_∞'':
  - Liq très inflammables : 0,1 kg/m²/s
  - Liq inflammables : 0,05 kg/m²/s
  - Liq peu inflammables : 0,02 kg/m²/s
  - Solides : 0,02 kg/m²/s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

Nature du combustible	Densité (kg/m³)	Δh_v (kJ/kg)	Δh_c (MJ/kg)	m_∞'' (kg/m².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_3H_8)	585	426	46,0	0,099 (±0,009)
Alcools				
Méthanol (CH_3OH)	796	1195	20,0	0,017 ???
Ethanol (C_2H_5OH)	794	891	26,8	0,015 ???
Combustibles organiques classiques				
Butane (C_4H_{10})	573	362	45,7	0,078 (±0,003)
Benzène (C_6H_6)	874	484	40,1	0,085 (±0,002)
Hexane (C_6H_{14})	650	433	44,7	0,074 (±0,005)
Heptane (C_7H_{16})	675	448	44,6	0,101 (±0,009)
Xylènes (C_8H_{10})	870	543	40,8	0,090 (±0,007)
Acétone (C_3H_8O)	791	668	25,8	0,041 (±0,003)
Dioxane ($C_4H_8O_2$)	1035	552	26,2	0,018[b]
Diéthyl éther ($C_4H_{10}O$)	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

Les incendies industriels

- Effets thermiques => flux reçu :
  - puissance du feu
  - distance
  - 3 ou 5 ou 8 kW/m²
- Puissance du feu :
  - Gaz : débit x chaleur de combustion
  - Autres : débit surfacique x surface du feu au sol x chaleur de combustion

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



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

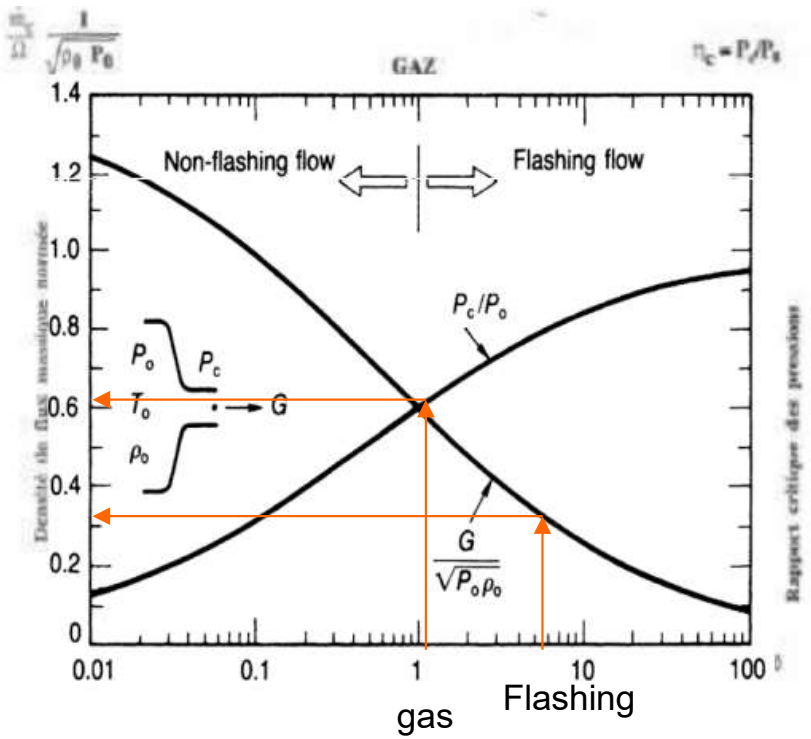
$$Flux_{reçu} = 0{,}3 \cdot \frac{Puissance_{feu}}{4 \cdot \pi \cdot distance^2}$$

Les fuites… (incendies, toxiques)

- Plusieurs types:
  - gaz
  - Liquide flashant ($T_{boil}<T_{amb}$)
  - Sinon liquide purs

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

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



- 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

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

Notes :

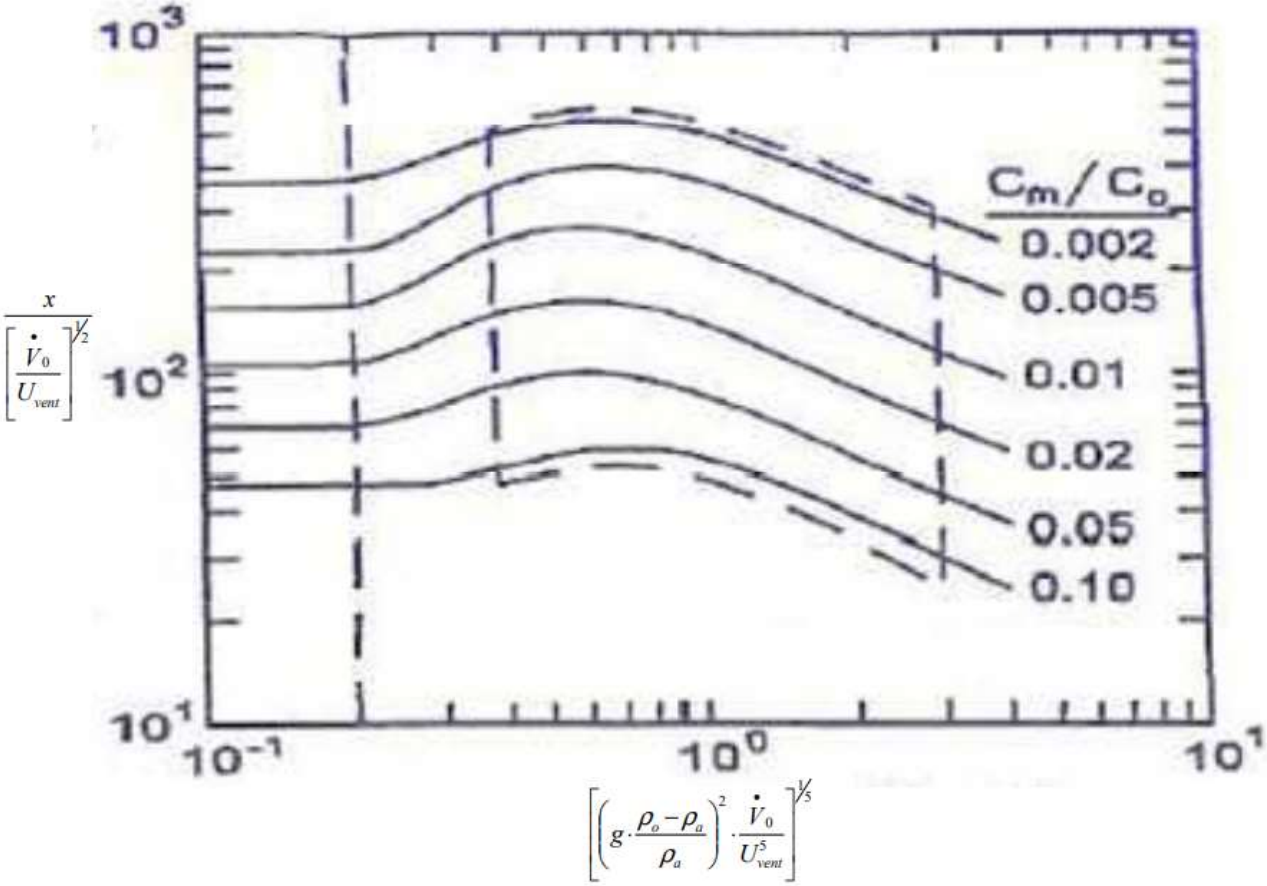
- *m_c débit massique*
- *Ω section de fuite*
- *Indice « 0 » conditions de réservoir*

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 »

SEUILS D'EFFETS TOXIQUES POUR L'HOMME PAR INHALATION			
	Types d'effets constatés	Concentration d'exposition	Référence
	Létaux	SEL (CL 5 %) SEL (CL 1 %)	Courbes de toxicité aiguë par inhalation – Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement - 1998.
Exposition de 1 à 60 minutes	Irréversibles	SEI	Seuils de toxicité aiguë - Emissions accidentelles de substances chimiques dangereuses dans l'atmosphère - Ministère de l'écologie et du développement durable - Institut national de l'environnement industriel et des risques - 2003.
	Réversibles	SER	

Les fuites de produits toxiques dans l'air



$$Concentration_{reçue} = \frac{Débit_{fuite}}{\pi \cdot U_{vent} \cdot \sigma^2}$$

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

Stockage de Styrène

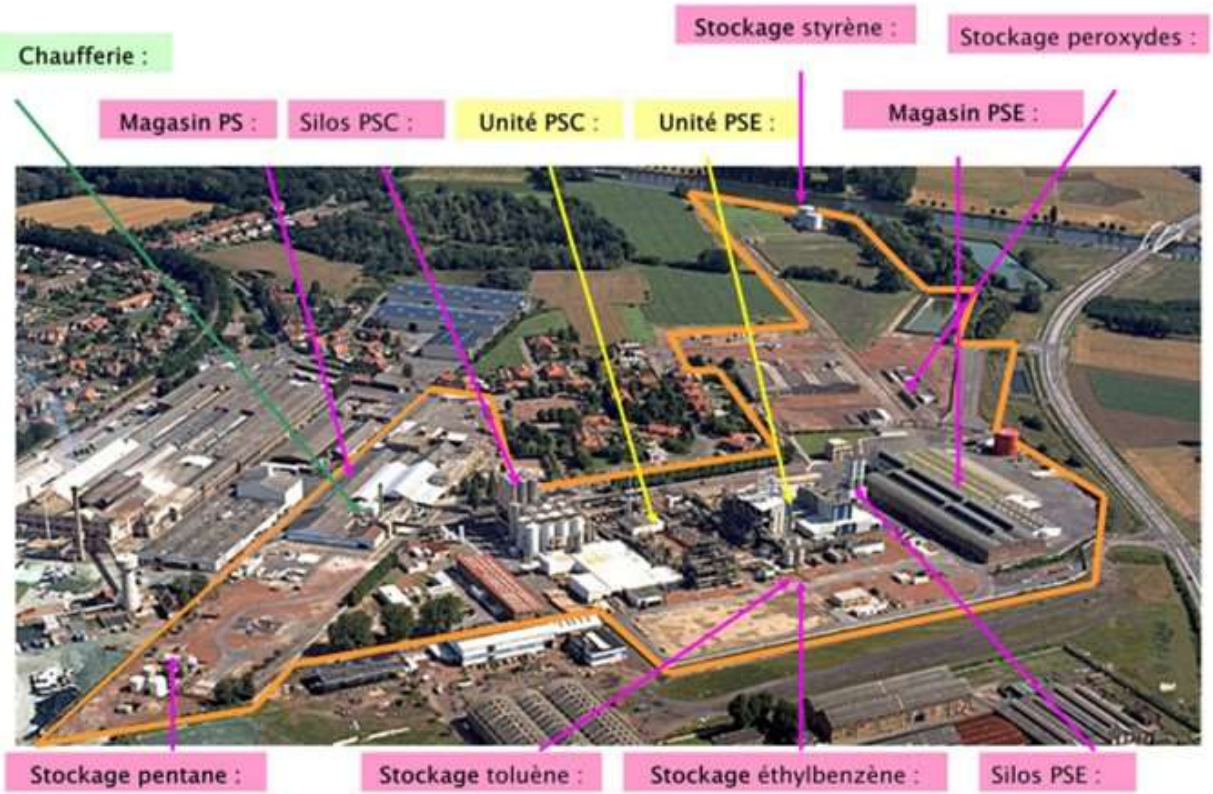


Figure 1 : l'usine (largeur de l'image = 500 m)

Appareil	Caractéristiques	Quantités/débits
Stockage de styrène	2 cuves de 1500 t	150 000 tonnes/an (péniches)
Stockage de pentane	1 cuve de 150 m^3	7 000 t/an (par citerne rout.)
Stockage de toluène	1 cuve de 150 m^3	1 000 t/an
Stockage d'éthylbenzène	1 cuve de 150 m^3	1 000 t/an
Stockage granulés PS	5000 m^2 x 6 m (hauteur)	7 000 t (débit 50 000 t/an)
Magasin perles PSE	10000 m^2 x 8 m (hauteur)	15 000 t (débit 100 000 t/an)
Stockage de peroxyde	90 m^2 x 3 m (hauteur)	500 m3 (débit 500 t/an)

Tableau 1 : données techniques

Remplissage 1 fois par semaine – 50 remplissages/an
4h pour remplir une cuve
Cuvette de rétention autour des stockage (50 m x 25 m)

Une canalisation (~100 m) de sous-tirage de styrène vers l'unité de production.
Canalisation longée par une route.

Propriété du styrène

- Solvant liquide
- Légèrement inflammable (cat 3)
- Point éclair = 31° C
- Lie=1% v/v
- Nocif (VME 100 ppm)
- MM=104 g/mole

STYRÈNE

Danger

- H226 - Liquide et vapeurs inflammables
- H332 - Nocif par inhalation
- H319 - Provoque une sévère irritation des yeux
- H315 - Provoque une irritation cutanée
- H361d - Susceptible de nuire au fœtus
- H372 - Risque avéré d'effets graves pour les organes (appareil auditif)

Quelques explications

A propos des propriétés du styrène. Dire qu'il s'agit d'un solvant inflammable de catégorie 3 signifie qu'il s'enflamme difficilement et que ses vapeurs mélangées à l'air explosent assez modérément. Cela veut dire aussi qu'il est peu volatil. À température ambiante ses vapeurs ne peuvent pas former un mélange explosif avec l'air. C'est ce que traduit le point éclair. À 31° seulement la pression de vapeur saturante atteint la limite inférieure d'explosivité (LIE) c'est-à-dire juste ce qu'il faut pour produire une atmosphère explosive.

À propos de sa nocivité la VME signifie valeur maximum d'exposition, c'est-à-dire la valeur à ne pas dépasser en concentration dans l'air, pour une exposition quotidienne de 08h00 de travail. On peut admettre que la SEI et environ 4 fois plus grande que la VME. C'est une approche conservative, par défaut.

Eléments de probabilité

Fréq/proba générique pour	
Fatigue, corrosion d'une canalisation fixe de quelques m (10 max) ou d'un réservoir	10^{-4}/an
Fuite sur organe (vanne, pompe, soupape)	10^{-3}/an
Défaillance branchement d'une installation sous pression	10^{-4}/an
Erreur de réalisation d'une opération unitaire par personnel entrainé	1 fois/1000
Erreur de réalisation d'une procédure par personnel entrainé	1 fois/100
Probabilité d'inflammation d'un nuage explosif de vapeurs d'hydrocarbures en milieu ouvert	1 fois/100

Quelques explications

Intéressons-nous maintenant aux éléments de probabilité. Les valeurs qui sont fournies dans ce tableau correspondent un retour d'expérience dans l'industrie traditionnelle, typiquement l'industrie des hydrocarbures. On a ajouté dans ce tableau une ligne correspondant à la probabilité qu'un nuage de vapeurs inflammables, de solvant par exemple, dans l'air trouve une source d'inflammation efficace c'est-à-dire suffisante pour créer l'explosion.

Pour un hydrocarbure on admet par expérience que cette probabilité est de un sur 100 c'est-à-dire qu'un nuage inflammable de vapeur d'hydrocarbures s'enflammera avec une probabilité de 1%. C'est à relativiser pour des produits très réactifs comme l'hydrogène pour lesquelles la probabilité est plutôt de 100 pour 100. Cet aspect sera peut-être repris dans le cours sur les ATEX.

Evaluation du risque

- Le site est classé SEVESO donc grille de criticité ministérielle..
- Accidents et ERC
  - …
- Réalisation de l'APR
- Effets
- Scénarios critiques ?
- Nœuds papillons
- MMR

	Classe de probabilité				
Type d'appréciation	**E**	**D**	**C**	**B**	**A**
Qualitative *(les définitions entre guillemets ne sont valables que si le nombre d'installations et le retour d'expérience sont suffisants)*	« Évènement possible mais extrêmement peu probable » : *n'est pas impossible au vu des connaissances actuelles, mais non rencontré au niveau mondial sur un très grand nombre d'années -installations.*	« Évènement très improbable » : *s'est déjà produit dans ce secteur d'activité mais a fait l'objet de mesures correctives réduisant significativement sa probabilité.*	« Évènement improbable » : *un évènement similaire déjà rencontré dans le secteur d'activité ou dans ce type d'organisation au niveau mondial, sans que les éventuelles corrections intervenues depuis apportent une garantie de réduction significative de sa probabilité.*	« Évènement probable » : *s'est produit et/ou peut se produire pendant la durée de vie de l'installation.*	« Évènement courant » : *s'est produit sur le site considéré et/ou peut se produire à plusieurs reprises pendant la durée de vie de l'installation malgré d'éventuelles mesures correctives.*
Semi-quantitative	**Cette échelle est intermédiaire entre les échelles qualitative et quantitative et permet de tenir compte des mesures de maîtrise des risques mises en place, conformément à l'article 4 du présent arrêté.**				
Quantitative *(par unité et par an)*	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	

Accidents et ERC

Accidents → Evénement Redouté Centraux

- Formation d'un nuage toxique
- Explosion d'un nuage explosif externe
- Explosion d'un nuage explosif dans un réservoir
- Incendie de Styrène

- Fuite sur le bras d'empotage lors du déchargement de la barge
- Inflammation de la fuite sur le bras…
- Débordement du réservoir fixe lors de l'empotage
- Inflammation de la fuite lors du débordement…
- Inflammation d'une l'atmosphère explosive (ATEX) dans le réservoir fixe
- Inflammation d'une l'atmosphère explosive (ATEX) dans le réservoir de la barge
- Fuite de la cuve de la barge
- Inflammation de la fuite de la cuve…
- Fuite sur le réservoir lors de l'exploitation (dépotage)
- Inflammation de la fuite sur le réservoir…
- Fuite sur la canalisation lors de l'exploitation (dépotage)
- Inflammation de la fuite sur la canalisation…

Accidents et ERC

Quelques explications.

On se rappelle que l'ERC c'est à dire l'événement redouté central est l'événement qui clôt la chaîne causale qui décrit l'accident. Les événements qui suivent sont inéluctables, ils ne dépendent que du temps qui passe. Et non d'une causalité. Très souvent on admet qu'une explosion, qu'on appelle souvent « l'accident", résulte très directement de la formation un nuage explosif qui elle-même résulte de la fuite d'un produit inflammable. La probabilité de l'explosion est alors assimilée à celle de la fuite. Cette dernière dépend en revanche d'un nombre de causes reliées par des relations de causalité OU et ET. Dans notre cas, il est plus facile de partir de l'accident, typiquement une explosion un incendie, un éclatement, et rechercher la fin de la chaîne causale qui le produit, qu'on appelle l'événement redouté central.

Dans notre cas, on introduit une probabilité d'inflammation ce qui signifie que l'explosion ne résulte pas uniquement de la formation d'un nuage explosif mais aussi de la présence d'une source d'inflammation efficace. Dans ce cas-là l'événement redouté central est la mise à feu d'un nuage inflammable.

Phase	ERC	Causes	Conséquences	P	G	Remarques
Empotage	Débordement par l'évent (dia=0,1m)	• Erreur procédure OU • Mesure défaillante (ET amorçage pour Inc et Expl)	• Nuage toxique • Explosion • incendie	A B	• Des • (Imp) • (Ser)	
	Fuite bras chargement (dia=0,3 m)	• Corrosion OU • Fuite sur organes (1 vanne, 2 à 3 joints tournants) OU • Rupture suite à mouvement (ex si explosion sur zone stockage **Domino > 200 mb**) (ET amorçage pour Inc et Expl)	• Nuage toxique • Explosion • incendie	B D	• Des • (Imp) • (Ser)	
	Fuite cuve de la barge	• Choc sur quai (erreur de pilotage) OU • Mouvements de houle suite à explosion sur zone stockage (**Domino > 1 bar ?**) OU • Inflammation ATEX interne (**Domino**) (ET amorçage pour Inc et Expl)	• Nuage toxique • Explosion • Incendie	A B	?	Difficultés à estimer (données ?)

Phase ou sous phase	ERC	Causes	Conséquences	P	G	Remarques
Dépotage	Fuite sur canalisation (Dia =0,1 m)	• Corrosion OU • Fuites sur organes (10) OU • Séisme, effets dominos de l'usine,… (ET amorçage pour Inc et Expl)	• Nuage toxique • Explosion • incendie	B	• Imp • (Ser) • (Mod)	
	Fuite sur stockage	• Corrosion OU • Déchirure jupe (**Domino** ci dessous) (ET amorçage pour Inc et Expl)	• Nuage toxique • Explosion • incendie	D E	• Cat • Cat • (Mod)	
	Inflammation d'ATEX dans stockage	• Suffisamment chaud (10^{-2}/an) pour créer une ATEX dans le ciel du réservoir ET • Nuage atteint sources d'inflammation efficaces (argumentaire ci après)	Éclatement du réservoir (idem explosion) **Domino** (déchirure jupe)	C	• Mod	

RQs :

- On ne retient, pour chaque ERC que l'accident (phénomène dangereux) qui produit les effets extrêmes
- Pour l'incendie et l'explosion, on modifie la fréquence en arguant qu'il faut aussi que le nuage s'enflamme (1 chance/100).

Explications (1/8)

Dans notre exercice on distingue 2 phases de fonctionnement. La phase de remplissage des stockages que l'on va appeler l'empotage qui dure typiquement quelques heures (4h) pendant laquelle une barge est à quai. Et une phase de vidange des stockages qui peut durer plusieurs jours entre chaque remplissage des réservoirs que l'on va appeler dépotage.

On a besoin de connaître les dimensions comme par exemple la taille de évents qui permet de maintenir l'intérieur des stockages à la pression atmosphérique pendant le remplissage ou la vidange, le diamètre du bras de chargement entre la barge et les stockages et enfin le diamètre de la canalisation de dépotage entre les stockages et le procédé industriel. On dispose pour cela d'un truc: la vitesse d'écoulement d'un liquide dans une canalisation industrielle est de l'ordre de 1 m/s sinon les pertes de charges sont trop importantes.

Explications (2/8)

On connaît le débit de consommation de styrène dans l'usine, 150000 tonnes par an, la masse volumique du styrène liquide, et de l'ordre de 1000 kilos par mètre cube comme pratiquement tous les liquides, ce qui permet de calculer, en posant une vitesse limite d'un mètre par seconde le diamètre de la canalisation de dépotage. On trouve 10 cm à peu près (8 cm).

On procède de la même manière pour la barge qui doit remplir 2 réservoirs de 1500 tonnes. On suppose qu'il faut une demi-journée, soit 4 h, pour remplir chaque réservoir. Avec la même limite de vitesse, on calcule que le diamètre du bras de dépotage doit être de l'ordre de 0,3 m.

Pour le calcul du diamètre de l'évent de maintien à la pression atmosphérique on peut utiliser une vitesse plus grande typiquement 10 m/s. Le débit d'air à évacuer correspond au volume de liquide qui rentre dans le réservoir soit 1500 m^3 en 04h00. Avec cette vitesse de 10 m/s, on calcule que le diamètre de l'évent et de l'ordre de 0,1 m.

Explications (3/8)

En principe l'étude de sécurité pour une étude de danger comporte d'abord une analyse préliminaire des risques ou APR, relativement qualitative, que l'on construit à partir d'un tableau d'analyse préliminaire des risques et de données issues du retour d'expérience. Il peut s'agir du retour d'expérience interne, celui de l'équipe qui fait l'analyse, où du retour d'expérience global que l'on peut trouver en examinant la base Aria du ministère de l'environnement. La probabilité est estimée qualitativement en groupe de travail un peu à la manière dont nous avons procédé lors des exercices de cartographie des risques. On peut aussi directement utiliser les statistiques du ministère. C'est plus compliqué d'estimer la gravité. Une façon élégante de faire consiste à éplucher les rapports d'accident de la base Aria de manière à extraire une information sur les effets sur l'environnement. Si on note des destructions d'habitation par exemple alors on peut relier ça à un niveau de pression s'il s'agit d'une explosion.

Explications (4/8)

Après l'APR on identifie à l'aide de la matrice de criticité du ministère, les accidents qui méritent qu'on fasse une analyse détaillée. Cette analyse recense de manière plus précise toutes les causes possibles et leur lien de causalité en constituant un arbre des défaillances. Cela permet de calculer la probabilité de l'événement redouté central à partir de l'algèbre de Boole après réduction de l'arbre.

Mais il est aussi possible, comme montré ici, de faire une analyse préliminaire des risques plus complète sans nécessité de réaliser une analyse détaillée. Pour cela on peut utiliser les probabilités qui sont données dans le tableau éléments de probabilité » et les associer de manière très approximative en prenant la plus grande des fréquences pour l'événement sommet dans l'hypothèse d'une logique OU et en prenant la plus petite des fréquences sous l'hypothèse d'une logique ET. Pour la gravité, on fait des estimations très approximatives des effets possibles par calcul comme on va le faire. Pour placer les barrières de sécurité en revanche il est souvent nécessaire (pour les scénarios inacceptables) de réaliser au moins un arbre de défaillance pour savoir combien de barrières sont nécessaires et où il faut les placer.

Explications (5/8)

Commentaires sur les fréquences :

- Empotage / débordement par évent = > **classe de fréquence A** car on retient la plus grande des fréquences des évènements :
  - Erreur de procédure (non-surveillance des niveaux/quantités) : 50 procédures par an avec un risque d'erreur de 1/100 soit 50 x 1/100 soit un événement de **classe A.**
  - Mesure défaillante : cela suppose que le capteur ait un défaut et que l'opérateur ne s'en rende pas compte. Si on suppose un capteur passif sans microprocesseur, on pourrait estimer son niveau de confiance comme pour les BTS et retenir une niveau SIL (=NC) de 1 soit une probabilité de défaillance de 1/10. Que l'opérateur ne s'en rende pas compte suppose une probabilité d'erreur de 1/100 soit une probabilité que la détection soit défaillante lors d'un empotage est min (1/10, 1/100)=1/100. Comme il y a 50 empotages par an cela fait une fréquence cumulée de 50/an x 1/100= 0,5 soit un événement de **classe A**.
- Empotage / fuite du bras de chargement = > **classe B** car :
  - Corrosion (10^{-4}/an) => **classe D**
  - Fuite sur organes : 3 organes avec une probabilité individuelle de fuite de 10^{-3}/an soit 3 x 10^{-3}/an => **classe >B**
  - Mouvement de la barge : étudié après l'APR car résultant d'un effet domino

Explications (6/8)

Commentaires sur les fréquences :

- Empotage / fuite de la cuve de la barge = > **classe A** car :
  - Choc sur quai (erreur d'apontage) : 50 procédures par an avec un risque d'erreur de 1/100 soit 50 x 1/100 soit un événement de **classe A.** Certainement surestimé car il faut que le choc soit aussi assez violent….
  - Mouvement de houle : dû à un violent effet domino non pris en compte au stade de l'APR.
  - Inflammation d'ATEX dans la cuve : il faut que la température externe soit caniculaire (de l'ordre de 10^{-2}/an) alors que le remplissage se passe à cette période (au moins une erreur de jugement : 1/100!) et simultanément que l'amorçage se produise (probabilité de 1/100) soit min (50 x 10^{-2},1/100,1/100,…) => **classe B** (probablement bcp moins en fait). La question de la nature de la source d'inflammation se pose. On peut supposer que la pompe immergée puisse être responsable ou que la flamme transite depuis le stockage où elle aurait été initiée.. C'est une étude ATEX qu'on mettra en œuvre pour les scénarios de dépotage!

Explications (7/8)

Commentaires sur les fréquences :

- Dépotage / fuite sur canalisation = > **classe B** car :
  - Corrosion (10^{-4}/an pour 10 m). La canalisation mesures quelques centaines de m soit une fréquence de fuite par corrosion de 10 x 10^{-4}/an => **classe C**
  - Fuite sur organes (10 organes) : 10 x 10^{-3}/an soit 10^{-2}/an => **classe B**
  - Choc : un véhicule doit longer la canalisation 1 fois par semaine pour l'empotage sans doute soit 50 fois dans l'année (1 aller et 1 retour soit 100 passages). Pour que la canalisation soit endommagée, il faut que le conducteur perde le contrôle (1/100), qu'il atteigne la canalisation (1/10?) et que le choc soit assez violent (1/10?) soit une fréquence possible de 100 x 1/100 x 1/10 x 1/10 => **classe B**
- Dépotage / fuite sur stockage = > **classe D** car :
  - Corrosion (10^{-4}/an): => **classe D.**
  - Rupture de la jupe : séparation fond de cuve//virole sous l'effet d 'une surpression (explosion) dans le ciel gazeux. L'effort est le plus grand en bas de la cuve à la jonction fond/virole. C'est un effet domino non pris en compte au stade de l'APR

Explications (8/8)

Commentaires sur les fréquences :

- Dépotage / Inflammation d'ATEX dans le stockage = > **classe C** car :
  - Formation d'une ATEX si T> 31° C. Cette situation pourrait se produire 2 semaines par an typiquement soit sur fréquence annuelle de 14/365 =0,04. Il faut aussi que cette ATEX « trouve » une source d'inflammation efficace et la probabilité est de 1/100. La fréquence de cet événement est 0,04 x 1/100 soit une **classe C.**
- Remarque sur les effets dominos :
  - Pour faire bouger la barge suffisamment pour endommager la cuve, il faut une explosion très puissante qui ne pourrait résulter que d'un nuage très important. Le niveau de pression devrait être de l'ordre de 1 bar (seuil de renversement de wagons). Probablement seule la rupture de la cuve pourrait parvenir à produire une explosion aussi puissante. Comme la fréquence de l'événement susceptible d'induire cela est de classe E, il ne reste pour l'événement fuite sur la cuve de stockage que l'erreur de manouvre comme cause principale.
  - Pour désolidariser/briser le bras de déchargement une explosion moins puissante pourrait convenir. On peut choisir comme seuil de pression de référence 200 mb (dégâts graves aux infrastructures).

Effets (choix)

Il s'agit d'estimer les effets produits par :

- une fuite de styrène qui peut conduire à
  - la formation d'un nuage toxique si pas d'inflammation
  - une explosion à l'air libre si inflammation suivie d'un feu de flaque (incendie)
- l'éclatement des stockages de styrène

Modalités de calcul des scénarios de fuite :

- Par un diamètre de 10 cm pour les scénarios de débordement et de fuite sur la canalisation de dépotage
- Par un diamètre de 30 cm pour les scénarios de fuite sur le bras de déchargement de la barge
- Par l'évaporation du styrène qui se répand sur la dalle de support des stockages (50 m x 25 m) sachant que le surplus qui s'écoule dans la nature au-delà de la dalle est absorbé par le sol.

Les habitations sont à 500 m (le reste de l'usine aussi) et la limite de propriété est au moins à 100 m.

Effets : débits

Modalités de calcul des scénarios de fuite :

- Par le bras de chargement, au débit d'empotage (pompe) soit 1500 t en 4 heures soit 100 kg/s
- Par l'évent de 10 cm en cas de débordement = débit d'empotage soit 100 kg/s de 10 cm pour les scénarios de débordement et de fuite sur la canalisation de dépotage
- Par la canalisation de dépotage au débit nominal de soutirage 150 000 t/an soit 4 à 5 kg/s.
- Par l'évaporation du styrène sur la dalle de support. On peut retenir comme valeur extrême du taux d'évaporation celui retenu sous incendie de liquides peu inflammables soit 0,02 kg/m²/s. soit pour une surface de 50 m x 25 m, un débit d'évaporation de 25 kg/s sans doute assez surestimé.

Effets : nuage toxique (cf diapo 13)

Les débits de fuite par les canalisations se répandent sur le sol et se vaporisent, Pour appliquer l'équation ci-dessous il faut connaitre le débit volumique de vapeur produite. C'est le rapport entre le débit de fuite en kg/s et la masse spécifique des vapeurs dans les conditions atmosphériques (20° C, 1 bar). La masse molaire du styrène est 104 g/mole. En appliquant la loi des gaz parfaits on estime une masse spécifique de 4,3 kg/m³.

On suppose une vitesse de vent Uvent de 10 m/s. On rappelle que la concentration cible (SEI ici) est donnée en ppm. 100 ppm est une fraction volumique dans l'air de 100/1000000.

$$Concentration_{reçue} = \frac{Débit_{fuite}}{\pi \cdot U_{vent} \cdot \sigma^2}$$

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

débit massique (kg/s)	débit volumique (m3/s)	sigma (m)	x (m)
5	1,2	19	513
25	5,8	43	1254
100	23,3	86	2709

On ne peut raisonner que sur le SEI. Les habitants du quartier seront atteints pour les scénarios de rupture de la jupe du stockage et par celui de la rupture du bras de chargement (=évent). Le niveau de sévérité pourrait être « catastrophique » et « désastreux » respectivement.

Effets : incendie (cf diapo 9 & 11)

Pour appliquer la formule suivante, il faut connaître la puissance théorique du feu. C'est le débit massique multiplié par l'énergie de combustion, typiquement 40 MJ/kg pour le styrène (hydrocarbure sans oxygène). Les flux reçus à considérer sont les seuils caractéristiques SEI (3 kW/m²) , SEL (5 kW/m²), SELS (8 kW/m²). On en déduit la distance. Attentions aux unités !

débit massique (kg/s)	Puissance feu kW	Distance SEI m	Distance SEL m	Distance SELS m
5	200000	40	31	24
25	1000000	89	69	55
100	4000000	178	138	109

L'environnement ne semble mis en danger que pour le dernier scénario, soit la rupture du bras de chargement (=évent). Les personnes dans les champs (1 personne ?) pourraient être exposées au SEL soit une sévérité « sérieux ».

$$Flux_{reçu} = 0{,}3 \cdot \frac{Puissance_{feu}}{4 \cdot \pi \cdot distance^2}$$

Effets : explosion (cf diapo 6)

On s'intéresse aux explosions externes (nuages de vapeurs). Sur l'abaque de la diapo 6 on cherche les distances réduites (lambda) correspondant aux seuils caractéristiques SEI (22 pour 50 mbar) , SEL (10 pour 140 mbar), SELS (8 pour 200 mbar). On cherche aussi pour 1 bar pour l'effet domino sur la barge (3).

Puis on cherche la masse de TNT équivalent à la puissance de l'explosion. Cette dernière est fonction de l'inventaire disponible et du rendement de l'explosion qui tient à la fois compte de la part d'hydrocarbure qui peut participer à l'explosion et de la violence de cette dernière. Il y a tout lieu de croire que l'explosion sera peu intense car le produit est assez peu réactif (liquide inflammable de catégorie 3) et l'endroit est dégagé (peu d'obstacles pour confiner et accélérer l'explosion). On prendra un rendement de 2% (mini).

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

Effets : explosion (cf diapo 5 & 6)

L'inventaire maximum est de l'ordre de 1000 t (citernes peut être pas tout à fait pleines lors de la fuite) et peut effectivement se trouver déverser lors de la rupture de la jupe du stockage. On peut penser qu'une fuite massive sur le bras de déchargement (ou sur l'évent) sera détectée et stoppée en quelques minutes (10 par exemple) soit un inventaire de 100 x 600 = 60 000 kg. La fuite sur la canalisation de dépotage sera aussi détectée par défaut de débit à l'atelier mais il faudra peut être plus de temps, disons 1 h soit un inventaire de styrène mis à l'air libre de 5 x 3600 = 18 000 kg. La chaleur de combustion est la même que pour l'incendie.

masse t	Meq TNT kg	Distance SEI m	Distance SEL m	Distance SELS m	distance 1 bar
1000	173913	1228	558	447	167
60	10435	481	219	175	66
18	3130	322	146	117	44

Compte tenu de la faible violence de l'explosion il n'est pas évident que les niveaux de pression les plus élevés puissent être atteints mais la méthode ne permet pas de s'en assurer. Mais le SEI pourrait être atteint. Le premier scénario du tableau (rupture de la jupe) pourrait atteindre les habitants au seuil SELS, ce qui le place en « catastrophique ». Le second (rupture/décrochage du bras de chargement/évent) atteint la même zone au seuil SEI soit plutôt « important ». Le dernier dépasse le seuil SEI dans les champs plutôt peu occupés soit « sérieux ».

Effets : explosion (cf diapo 5 & 8)

Pour le scénario d'éclatement du bac sous l'effet de l'explosion interne on peut supposer que la rupture se produira à 1 bar typiquement la pression exercée par la hauteur de liquide sur les parois (10 m de liquide). Le volume est sans doute de 1500 m3 ou un peu plus car le stockage est taré pour 1500 t. On applique l'expression de la diapo 8 pour calculer l'équivalent TNT. On trouve 33 kg TNT. On utilise la même méthode calcul des effets de l'explosion que précédemment pour trouver les distances d'effet.

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

P.V MJ	Meq TNT kg	Distance SEI m	Distance SEL m	Distance SELS m	distance 1 bar
150	33	70	32	26	10

Aucun effet à l'extérieur donc « modéré ».

Criticité

	Probabilité d'occurrence des accidents potentiels				
Gravité sur les personnes	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
5 : Désastreux			Rupt bras Tox		EventTox
4 : Catastrophique		Rupt Jupe Exp/tox			
3 : Important				DépotageTox	
2 : Sérieux					
1 : Modéré		ATEX stock			

Satisfaisant
MMR Rang 1
MMR Rang 2
NON

- Les scénarios les plus critiques concernent le nuage toxique.