

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE COMPIÈGNE

UTC

Maitrise des Risques

TD 9 : Risque Industriel

UV TS01

Resp : christophe.proust@utc.fr

donnons un sens à l'innovation

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 néfastes 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 <i>(les définitions entre guillemets ne sont valables que si le nombre d'installations et le retour d'expérience sont suffisants)</i>	« Évènement possible mais extrêmement peu probable » : <i>n'est pas impossible au vu des connaissances actuelles, mais non rencontré au niveau mondial sur un très grand nombre d'années -installations.</i>	« Évènement très improbable » : <i>s'est déjà produit dans ce secteur d'activité mais a fait l'objet de mesures correctives réduisant significativement sa probabilité.</i>	« Évènement improbable » : <i>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.</i>	« Évènement probable » : <i>s'est produit et/ou peut se produire pendant la durée de vie de l'installation.</i>	« Évènement courant » : <i>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.</i>
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 <i>(par unité et par an)</i>	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	

RELATIVE À L'ÉCHELLE D'APPRÉCIATION 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 léthalité 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					

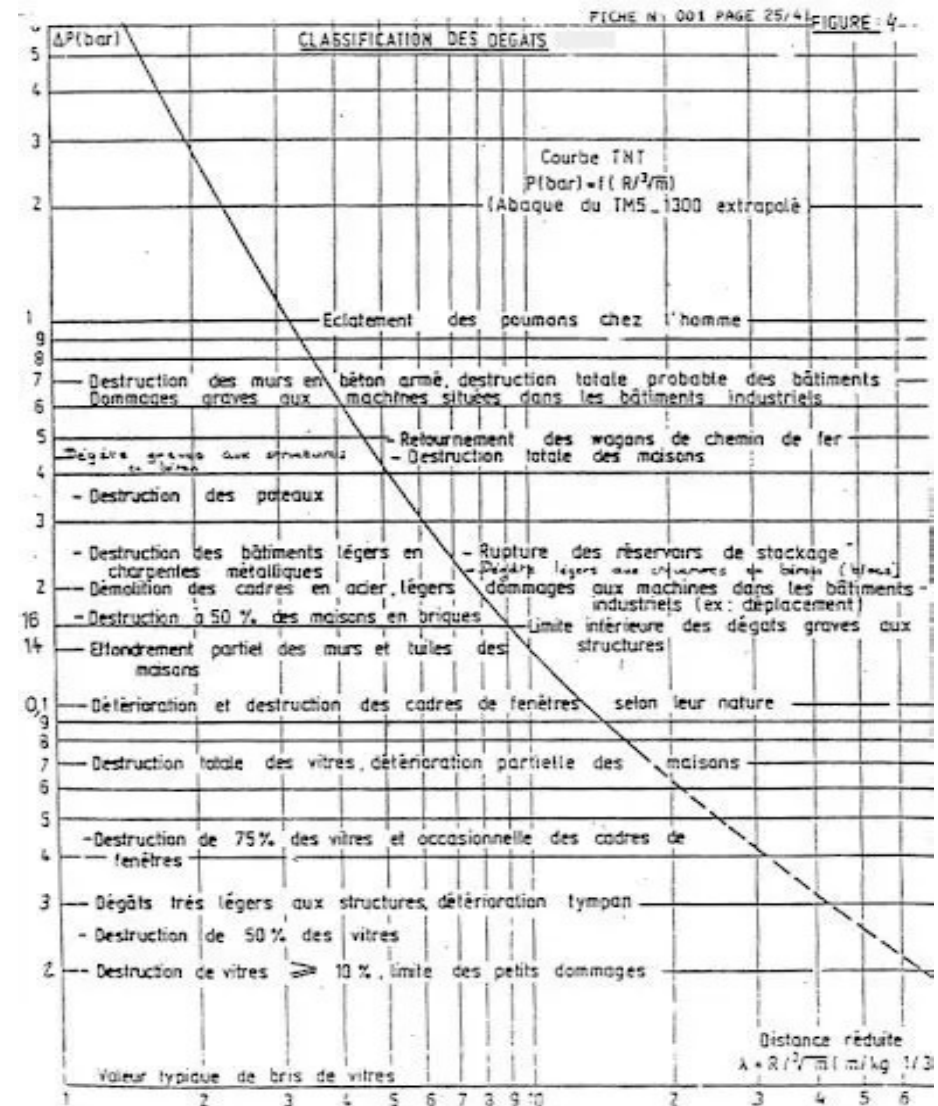
- Satisfaisant
- MMR Rang 1
- MMR Rang 2
- NON

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%...

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

- Pour les explosions de gaz-vapeurs :
 - Energie de combustion entre 20 et 100 MJ/kg
 - **Rendement type = 10%**



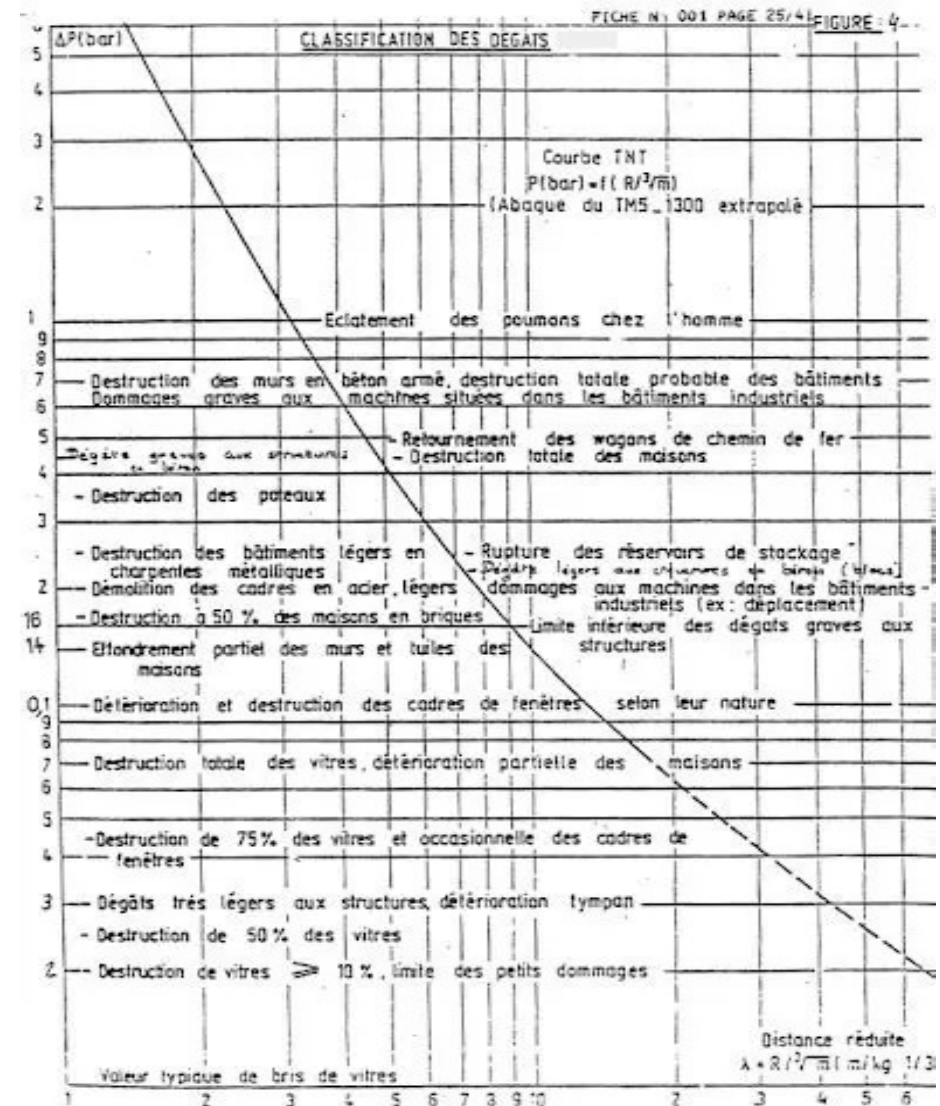
L'explosion de substances instables

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

$$M_{eqTNT} = M_{inventaire}$$

- Remarques pour les seuils de pression caractéristiques

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



Les éclatements de capacités

- Causes :
 - affaiblissement mécanique (corrosion, chocs, incendie)
 - surpression
 - explosion internes
- => 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

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/m ²)	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/m ²	[(kW/m ²) ⁴].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

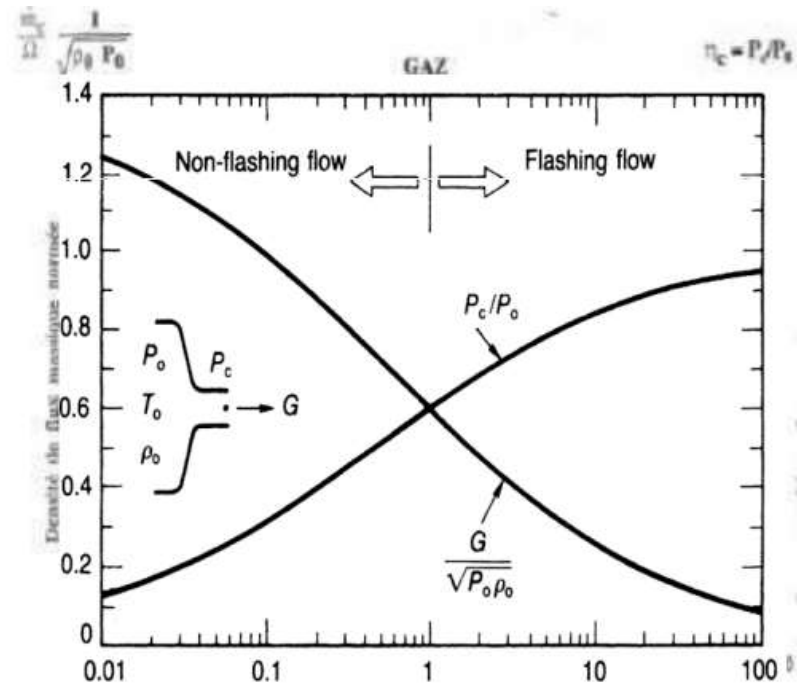
- Effets thermiques => **flux reçu** :

- 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

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



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

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

Les incendies industriels

- Chaleur de combustion :
 - En général : 40 MJ/kg
 - Sauf produit oxygénés et H₂
 - Solides 20 MJ/kg sauf (C_nH_m 40 MJ/kg)
- Débit surfacique:
 - 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

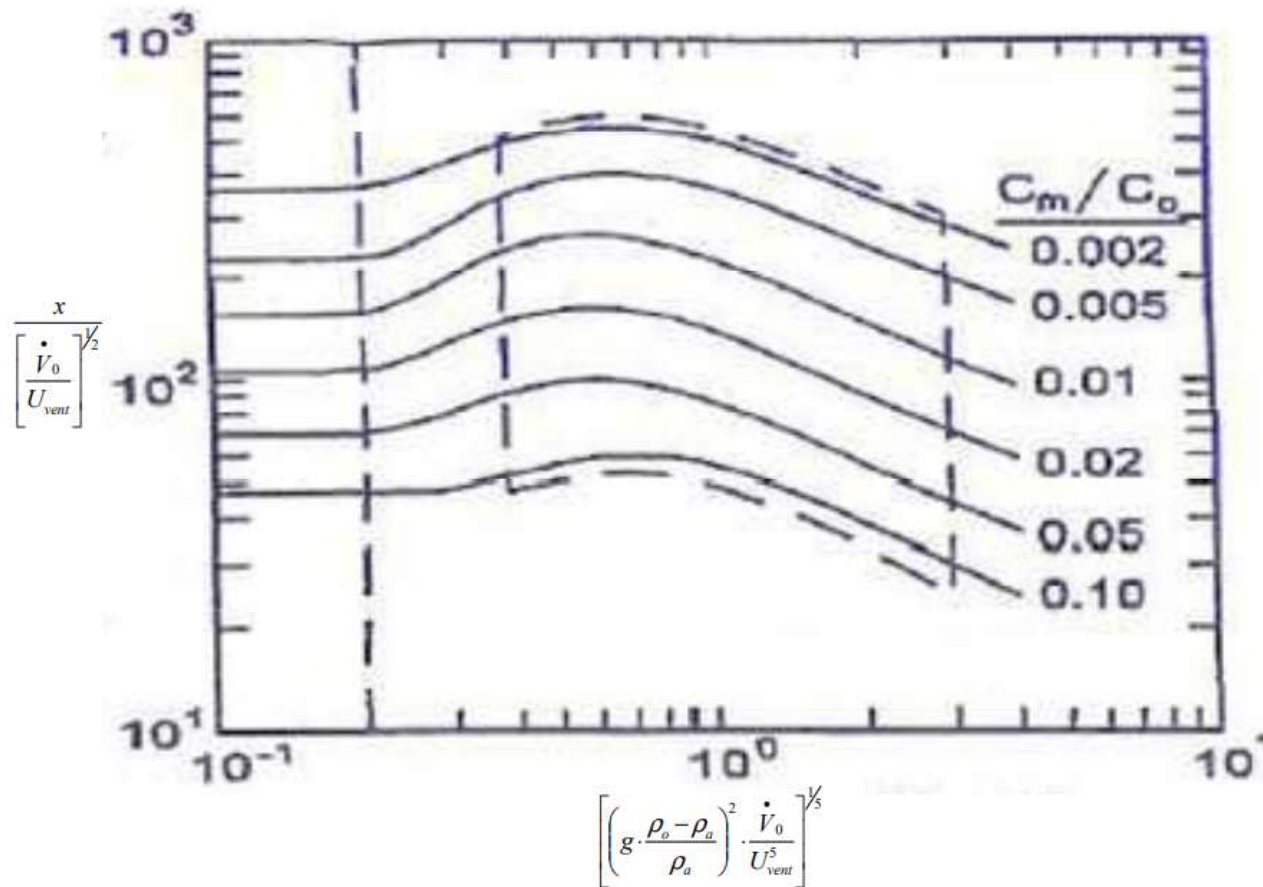
Nature du combustible	Densité (kg/m ³)	Δh _v (kJ/kg)	Δh _c (MJ/kg)	m _∞ ^{''} (kg/m ² .s)
Gaz liquéfiables				
H ₂ liquide	70	442	120,0	0,017 (±0,001)
Gaz naturel liquéfié (fréquemment CH ₄)	415	619	50,0	0,078 (±0,018)
Gaz de pétrole liquéfié (fréquemment C ₃ H ₈)	585	426	46,0	0,099 (±0,009)
Alcools				
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 ₆ 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

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	

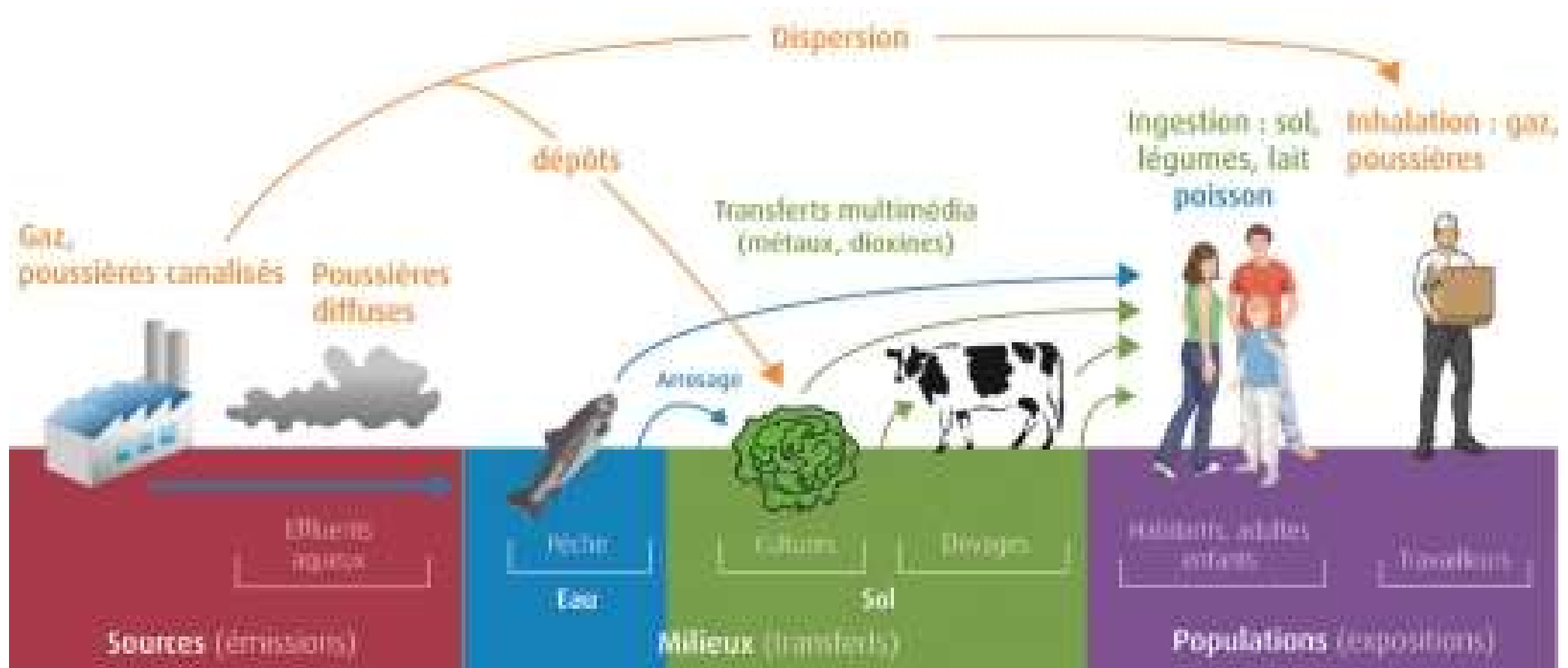
Les fuites de produits toxiques dans l'air



$$Concentration_{re\grave{c}ue} = \frac{Débit_{fuite}}{\pi \cdot U_{vent} \cdot \sigma^2}$$

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

Les fuites toxiques dans l'environnement





Stockage de Styrène

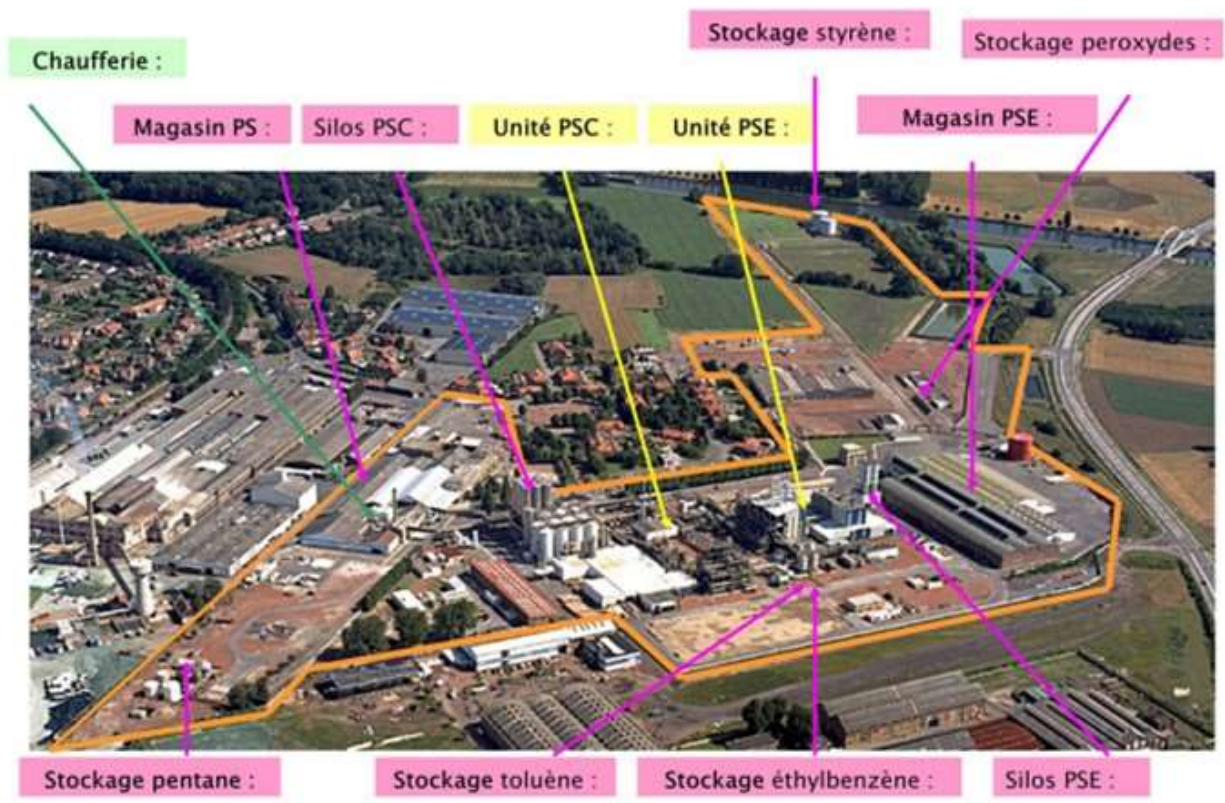


Figure 1 : l'usine (largeur de l'image = 500 m)

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 m ³ (débit 500 t/an)

Tableau 1 : données techniques





1 fois par semaine

Propriété du styrène

- Solvant liquide
- Légèrement inflammable (cat 3)
- Point éclair = 31° C
- Lie=1% v/v
- Nocif (VME 25 ppm)



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 c'est vapeur 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 admet que le 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	$10^{-4}/\text{an}$
Fuite sur organe (vanne, pompe, soupape)	$10^{-3}/\text{an}$
Défaillance branchement d'une installation sous pression	$10^{-4}/\text{an}$
Erreur de réalisation d'une opération unitaire par personnel entraîné	1 fois/1000
Erreur de réalisation d'une procédure par personnel entraîné	1 fois/100
Probabilité d'inflammation d'un nuage explosif de vapeurs d'hydrocarbures en milieu ouvert (inflammation ET propagation de la flamme)	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

Type d'appréciation	Classe de probabilité				
	E	D	C	B	A
Qualitative <i>(les définitions entre guillemets ne sont valables que si le nombre d'installations et le retour d'expérience sont suffisants)</i>	« Évènement possible mais extrêmement peu probable » : <i>n'est pas impossible au vu des connaissances actuelles, mais non rencontré au niveau mondial sur un très grand nombre d'années -installations.</i>	« Évènement très improbable » : <i>s'est déjà produit dans ce secteur d'activité mais a fait l'objet de mesures correctives réduisant significativement sa probabilité.</i>	« Évènement improbable » : <i>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.</i>	« Évènement probable » : <i>s'est produit et/ou peut se produire pendant la durée de vie de l'installation.</i>	« Évènement courant » : <i>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.</i>
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 <i>(par unité et par an)</i>					
		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 Styrene
- Fuite sur le bras d'emportage lors du déchargement de la barge
- Débordement du réservoir fixe lors de l'emportage
- 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
- Fuite sur le réservoir lors de l'exploitation (dépotage)
- Fuite sur la canalisation lors de l'exploitation (dépotage)

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)	<ul style="list-style-type: none"> • Erreur procédure OU • Mesure défaillante (ET amorçage pour Inc et Expl) 	<ul style="list-style-type: none"> • Nuage toxique • Explosion • incendie 	A	<ul style="list-style-type: none"> • Des • Imp • Ser 	
	Fuite bras chargement (dia=0,3 m)	<ul style="list-style-type: none"> • 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) 	<ul style="list-style-type: none"> • Nuage toxique • Explosion • incendie 	B	<ul style="list-style-type: none"> • Des • Imp • Ser 	
	Fuite cuve de la barge	<ul style="list-style-type: none"> • 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) 	<ul style="list-style-type: none"> • Nuage toxique • Explosion • Incendie 	A	?	Difficultés à estimer (données ?). Au pire = fuite sur stockage fixe

Phase ou sous phase	ERC	Causes	Conséquences	P	G	Remarques
Dépotage	Fuite sur canalisation (Dia =0,1 m)	<ul style="list-style-type: none"> Corrosion OU Fuites sur organes (10) OU Séisme, effets dominos de l'usine,... (ET amorçage pour Inc et Expl) 	<ul style="list-style-type: none"> Nuage toxique Explosion incendie 	B	<ul style="list-style-type: none"> Ser Ser Mod 	
	Fuite sur stockage	<ul style="list-style-type: none"> Corrosion OU Déchirure jupe (Domino ci dessous) (ET amorçage pour Inc et Expl) 	<ul style="list-style-type: none"> Nuage toxique Explosion incendie 	D	<ul style="list-style-type: none"> Cat Cat Mod 	
	Inflammation d'ATEX dans stockage	<ul style="list-style-type: none"> Suffisamment chaud ($10^{-2}/an$) pour créer une ATEX dans le ciel du réservoir ET Nuage atteint sources d'inflammation efficaces (argumentaire ci après) 	<ul style="list-style-type: none"> Éclatement du réservoir (idem explosion) Domino (déchirure jupe) 	C	<ul style="list-style-type: none"> 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 (1/9)

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 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 événements 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 et de l'ordre de 1 m/s sinon les pertes de charges sont trop importantes.

Explications (2/9)

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 m³ en 04h00. Avec cette vitesse de 10 m/s, on calcule que le diamètre de l'évent est de l'ordre de 0,1 m.

Explications (3/9)

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, ou 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 (4/9)

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 (5/9)

Commentaires sur les fréquences :

- Empotage / débordement par événement = > classe de fréquence A car on retient la plus grande des fréquences des événements :
 - Erreur de procédure (non-surveillance des niveaux/quantités) : 50 procédures par an avec un risque d'erreur de 1/100 soit $50 \times 1/100$ 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 un 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 $50/\text{an} \times 1/100 = 0,5$ soit un événement de **classe A**.
- Empotage / fuite du bras de chargement = > classe B car :
 - Corrosion ($10^{-4}/\text{an}$) => **classe D**
 - Fuite sur organes : 3 organes avec une probabilité individuelle de fuite de $10^{-3}/\text{an}$ soit $3 \times 10^{-3}/\text{an}$ => **classe >B**
 - Mouvement de la barge : étudié après l'APR car résultant d'un effet domino

Explications (6/9)

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 $50 \times 1/100$ 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 ($50 \times 10^{-2}, 1/100, 1/100, \dots$) => **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 (7/9)

Commentaires sur les fréquences :

- Dépotage / fuite sur canalisation = > classe B car :
 - Corrosion ($10^{-4}/\text{an}$ pour 10 m). La canalisation mesure quelques centaines de m soit une fréquence de fuite par corrosion de $10 \times 10^{-4}/\text{an} \Rightarrow$ **classe C**
 - Fuite sur organes (10 organes) : $10 \times 10^{-3}/\text{an}$ soit $10^{-2}/\text{an} \Rightarrow$ **classe B**
 - Séisme, effets dominos (explosion dans l'usine),... : cela dépend des menaces. On pourrait aussi penser à un accident de véhicule. Il faut un séisme très violent pour rompre une canalisation soit une fréquence bien plus faible que $10^{-3}/\text{an}$. De même une explosion dans l'usine capable de rompre la canalisation. On peut se permettre de négliger ces possibilités devant les deux autres causes sans chercher à chiffrer, on argumente seulement...
- Dépotage / fuite sur stockage = > classe D car :
 - Corrosion ($10^{-4}/\text{an}$): \Rightarrow **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 pour cet événement particulier au stade de l'APR

Explications (8/9)

Commentaires sur les fréquences :

- Dépotage / Inflammation d'ATEX dans le stockage = > classe C car :
 - Formation d'une ATEX si $T > 31^\circ \text{ C}$. Cette situation pourrait se produire 1 à semaines par an typiquement soit sur fréquence annuelle de $10/365 = 0,03$ (200 à 300 h). Il faut aussi que cette ATEX « trouve » une source d'inflammation efficace. On peut raisonner ATEX. Compte tenu du temps de présence de l'ATEX dans le stockage, l'intérieur est une zone 0. Comme l'intérieur est en contact avec l'extérieur l'espace en face des événements est une zone 1. Compte tenu de la petite taille de ces événements, cette zone 1 est petite (quelques dizaines de fois le diamètre au plus).
 - Il y a peu de chance pour que la zone inflammable atteigne une source d'inflammation située sans doute à plusieurs mètres (éclairage, pompes, vannes, véhicules,...). Il faut donc des circonstances exceptionnelles pour cela, vent bien orienté, peu turbulent, pour que cela soit envisageable soit au mieux, une situation de zone 2. On sait que le temps de présence de la zone 2 est de moins de 10 h par an soit une fréquence $< 10/10000$ (10000 h/an) soit $< 10^{-3}/\text{an}$.
 - Et que la source d'inflammation puisse amorcer (1/100).
 - Au global, la classe de probabilité est min (0,03, $< 10^{-3}$, 1/100) soit une **classe C**

Explications (9/9)

Commentaires sur les fréquences :

- 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 D, il ne reste pour l'événement fuite sur la cuve de stockage que l'erreur de manœuvre comme cause principale de probabilité suffisante.
 - 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 (réservoir fixe et barge)

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 stockage (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'emportage (pompe) soit 1500 t en 4 heures soit 100 kg/s
- Par l'évent de 10 cm en cas de débordement = débit d'emportage 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. Mais on ignore aussi la capacité d'absorption du sol, donc on majore. Une autre solution serait de majorer le débit d'évaporation en retenant 100 kg/s soit le débit de fuite ce qui revient à supposer que la nappe s'étend latéralement sans limite jusqu'à ce que sa surface soit telle que le débit d'évaporation soit égal au débit d'alimentation de la flaque (le débit d'évaporation dépend principalement de la nature du liquide).

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 connaître 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 U_{vent} 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.

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

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

débit massique (kg/s)	débit volumique (m ³ /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 ou du village seront atteints pour les scénarios de rupture de la jupe du stockage et par celui de la rupture du bras de chargement (effets identiques pour le débordement). Le niveau de sévérité pourrait être « catastrophique » et « désastreux » respectivement. Pour le scénario de dépotage, uniquement les propriétaires des champs seraient concernés soit quelques personnes au plus (« Sérieux »). Pour la fuite de la barge, on manque d'informations...

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 (identique au scénario de débordement). Les personnes dans les champs (1 personne ?) pourraient être exposées au SEL soit une sévérité « sérieux ». Les autres scénarios sont « modérés ».

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

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 (λ) 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 ($\lambda=3$).

Puis on cherche la masse de TNT équivalant 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).

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

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 $100 \times 600 = 60\,000$ 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 $5 \times 3600 = 18\,000$ 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 du village au seuil SELS, ce qui le place en « catastrophique ». Le second (rupture/décrochage du bras de chargement/évent) atteint le quartier le plus proche, moins dense, 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.

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

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 ».

On peut revenir sur les effets Dominos. Il y a fort peu de chance pour que le seuil de 1 bar soit atteint, il faudrait pour cela une explosion très puissance (rendement 10% au moins). Pour la même raison, il est aussi assez peu probable que le seuil de 200 mbar (SELS) soit atteint. Si on admet cependant que c'est possible alors l'effet domino conduisant à la rupture du bras de chargement suite à une explosion sur la zone du stockage fixe est envisageable. La classe de fréquence associée est B comme pour les autres causes. Une étude assez fine des scénarios sera nécessaire..

Criticité

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

Satisfaisant
MMR Rang 1
MMR Rang 2
NON

+ cana
Tox-Exp

- Les scénarios les plus critiques concernent le nuage toxique.

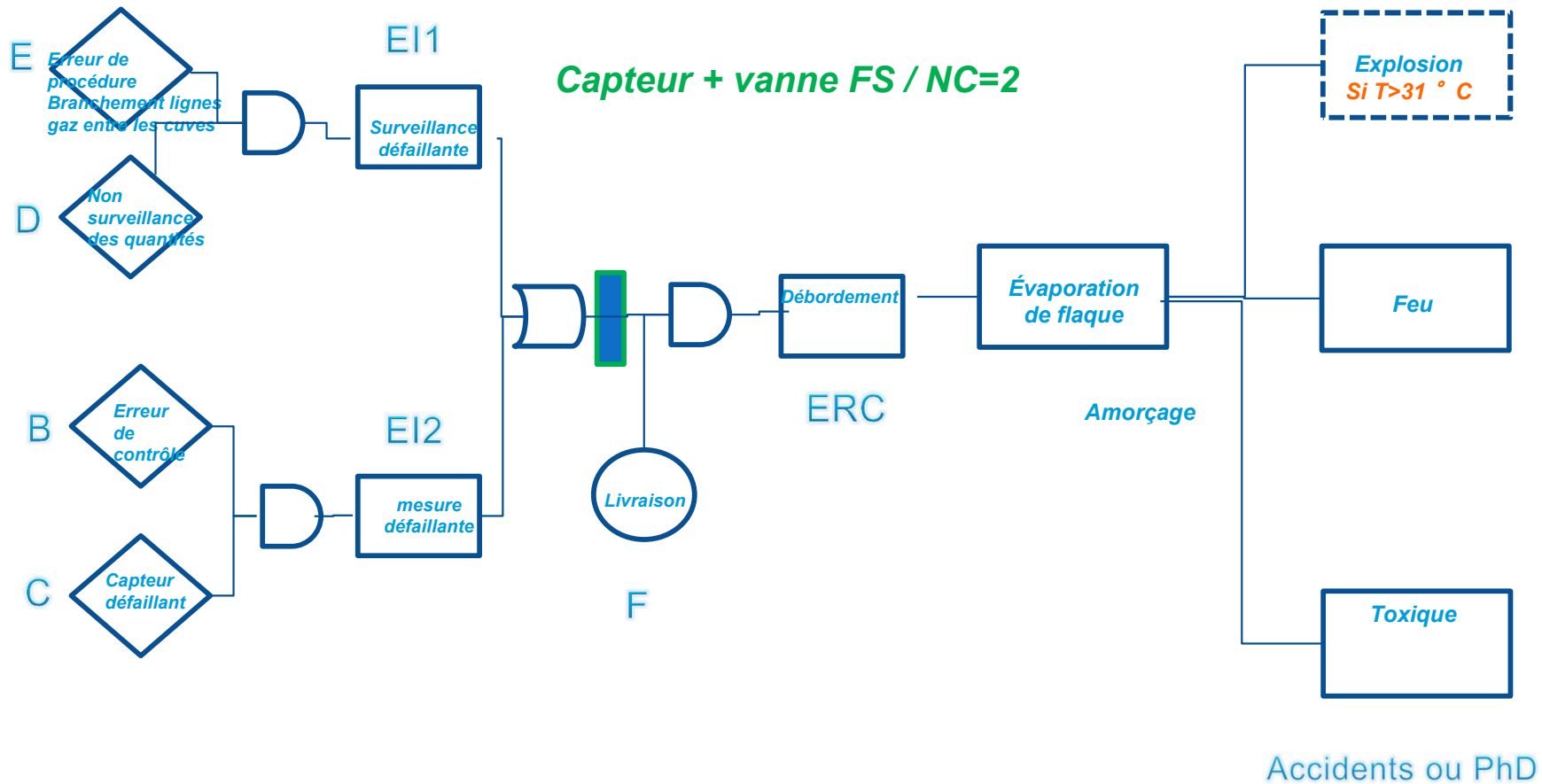
Analyse détaillée des risques

L'un des objectifs de l'ADR est de raffiner la modélisation des scénarios critiques c'est-à-dire le calcul de la fréquence, par la constitution d'arbres et l'application stricte de l'algèbre de Boole, et le calcul des conséquences avec des modèles plus précis que ceux utilisés pour l'APR. A l'issue de ce travail, il se peut que certains scénarios deviennent moins critiques ou même non critiques.

Des progrès importants sont à apporter à la modélisation de la **formation du nuage toxique** notamment. Il faudrait estimer plus précisément les seuils d'effet. Le SEI est certainement bien au-delà de 100 ppm. Par ailleurs, la taille de la flaque ne peut être illimitée si bien que tout le débit de fuite ne participe pas à la formation du nuage (cf par ex le raisonnement tenu pour le scénario de fuite sur le stockage). Enfin le débit d'évaporation de la nappe est sans doute bien inférieur à 0,02 kg/m²/s (plutôt quelques g/m²/s). Il est vraisemblable que les effets « réels » soient bien moindres, typiquement de l'ordre de ceux estimés pour la rupture de la canalisation de dépotage. De même, l'utilisation d'une méthode plus fine pour estimer les **effets de l'explosion** des nuages externes est recommandée. Le point de départ serait le calcul de la taille de la zone explosive du nuage (au-delà du seuil de concentration de 1% v/v). On pourrait en déduire une masse de vapeurs explosives présente dans le nuage et appliquer sur cette masse, le rendement max de 15% (ou une autre méthode que l'équivalent TNT). Par exemple, en prenant comme scénario d'évaporation extrême plausible celui de la rupture de la jupe et un seuil de concentration de 1% (10000 ppm) on trouve une distance pour ce seuil de 100 m soit un volume extrême de nuage de 6 000 000 m³ (demi sphère de rayon 100 autour du point de fuite) dont 1% de vapeurs de styrène inflammable soit 60 000 m³ ou encore 270 kg de styrène (masse volumique 4,3 kg/m³). MeqTNT=350 kg. Les effets sont bien plus faibles que ceux évalués en première intention.

Des gains sont aussi à attendre en matière de fréquence. Par exemple, il ne peut y avoir de scénario d'explosion que si le sol est suffisamment chaud pour que la pression de vapeur saturante sur la flaque soit telle que la concentration est au-delà de la LIE. Il suffit que la température du sol soit au-delà de 31° C, c'est-à-dire un climat très chaud. Un exemple d'arbre est présenté pour le scénario de débordement du stockage pendant l'emportage.

Analyse détaillée des risques



Visite NC=1

Analyse détaillée des risques

Algèbre de Boole :

$ERC = (EI_1 + EI_2) \cdot F = (D \cdot E + B \cdot C) \cdot F = D \cdot E \cdot F + B \cdot C \cdot F = 1/100 \times 1/100 \times 50 + 1/10 \times 1/100 \times 50 = 0,055$ soit une **classe B** (on avait trouvé A initialement). Cela vient du fait qu'il est obligatoire de poser une ligne de récupération des vapeurs qui normalement devrait aussi récupérer un trop plein. Le scénario reste inacceptable même en tenant compte d'une réduction des effets comme expliqué ci-dessus (probablement B / « Imp »).

Il faut prévoir des barrières de sécurité.

MMR

C'est l'autre objectif de l'ADR est de définir une stratégie de prévention et de protection en choisissant des barrières de sécurité qui, agrégées, permettent de maîtriser le risques (MMR). On les choisit, on en étudie les performances (dont niveau NC), puis on calcule le « risque résiduel » en fréquence et en gravité. Pour l'aspect gravité, il ne faut oublier aucun phénomène dangereux. Il se peut que les conséquences d'un phénomène dangereux soient diminuées tandis que celles d'un autre soient inchangées.

On pourrait imaginer la mise en place d'une vanne d'isolement « Fail-Closed » en cas de perte d'utilités (électricité) maintenue sous tension au moyen d'un pressostat positionné en fond de cuve (par ex en entrée de canalisation de dépotage). Ce pressostat est normalement fermé et s'ouvre lorsque la pression est trop forte, c'est-à-dire quand le niveau de liquide est trop élevé dans la cuve de stockage. Le contacteur du pressostat est en série avec la vanne FC. Le fonctionnement de ce dispositif est indépendant des circonstances de l'accident et peut donc être considéré comme une Barrière Technique de Sécurité. Son efficacité est de 100% quand il fonctionne. C'est un système actif de type A. Son NC est au moins de 1.

Avec cette disposition (MMR), ce scénario revient dans la zone « orange » de la matrice et devient tolérable. Cette MMR diminuera la probabilité des autres accidents associés. On notera que si elle est dysfonctionnelle, tout le « potentiel » de l'accident se produira. La MMR n'affecte que la fréquence et non la gravité