

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE COMPIÈGNE

UTC

Maitrise des Risques

Cours 2 : les conséquences individuelles et collectives
des « accidents » dans l'industrie

UV TS01

Resp : christophe.proust@utc.fr

donnons un sens à l'innovation

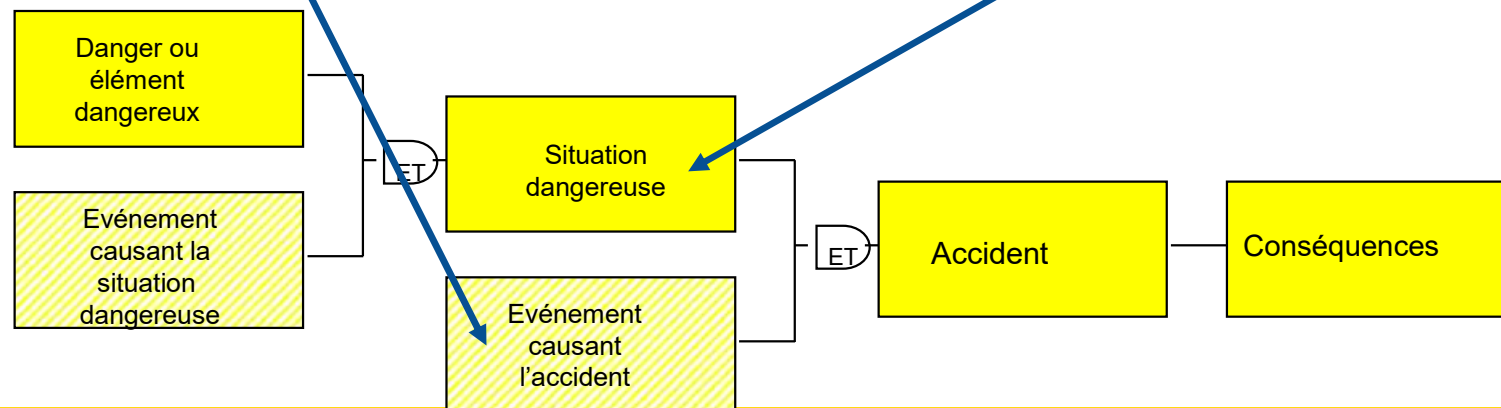


Rappel : nous n'abordons « que » :

- Risque industriel (majeur & procédés) :
 - Explosion, incendie, fuite toxique
- Risque environnemental :
 - Pollutions
 - Impact sanitaire
- Sécurité & santé au travail :
 - chutes
 - TMS
 - RPS
 - Risque chimique
 - Risque ATEX
 - Environnements spécifiques
- Risque « produit »
 - Atteinte directe ou indirecte à l'utilisateur final

Accidents vs exposition chronique

- Le **risque** renvoie à une situation d'accident c'est-à-dire à une dérive, parfois massive et brutale pour un accident industriel, par rapport à une situation nominale « inoffensive ». On ne s'intéresse qu'aux conséquences immédiates et jusqu'à quelques heures après « l'événement causant l'accident ». Il s'agit alors de maîtriser les déviations par rapport aux seuils d'acceptabilité associés.
- Un risque est donc à différencier de l'**exposition chronique** de l'environnement/personnes à des substances/situations (=>MP)



Le risque « produit »

Santé des consommateurs – image - ...

Un exemple typique : Lidl Juin 2011

- **Intoxication grave** de jeunes enfants (mi juin 2011)
- Recherche de l'origine : Steaks de la société SEB (140 salariés)
- Chute de 70% de son CA (fin juin)
- **Rupture de contrat** avec Lidl (60% du CA) (mi août)
- **Liquidation judiciaire** (début novembre)



LIDL INFORMATION À NOTRE CLIENTÈLE

Suite à la suspicion de contamination des steaks hachés surgelés de la marque Steak Country 10 x 100 g, LIDL FRANCE a immédiatement réagi et a procédé par précaution au retrait de la vente de l'intégralité des produits concernés, dans ses magasins livrés par la société SEB à Saint-Dizier.

Nous invitons les clients qui auraient acheté la référence portant les DLC (Date Limite de Consommation) concernées à savoir le 10, le 11 et/ou le 12/05/2012 à rapporter la marchandise en magasin où ils seront remboursés, même sans ticket de caisse.

Pour plus d'informations cliquez ici

Un exemple typique : Lidl Juin 2011

Enquête

- 50 à 60 fournisseurs différents pour trouver le meilleur prix
- Plan de maitrise sanitaire (PMS) impose contrôle systématique de E.Coli O157H7
- Changement unilatéral du PMS, contrôle aléatoire
- Libération des lots avant d'avoir les résultats

(steak pas suffisamment cuit et donné à un jeune enfant (< 2ans) => lésions neurologiques réduction de motricité de 80% et limitations des facultés intellectuelles)

Procès (2017)

- Deux accusés : le gérant et le responsable qualité et hygiène (décédé)
- Condamnation à 3 ans dont 1 avec sursis, + 50 k€ responsabilité particulière de gérant « influant » + interdiction d'exercer une responsabilité dans le domaine
- + différentes indemnisations au titre de la RC

Événement redouté

Contamination
lors de la fabrication
d'un produit alimentaire



Risque direct

Intoxication alimentaire
de clients, provoquant
des décès

Risques indirects :

- rappel des produits
- arrêt de la production => chômage technique (=> grève)
- perte d'image de marque =>
 - perte de clientèle
 - déréférencement
 - interdiction d'exportation
 - déstabilisation du personnel (démission, difficulté d'embauche,...)
 - coût de campagne publicitaire
- perte financière => faillite ou rachat de l'entreprise
- impact sur l'ensemble du marché (y compris les concurrents)

Quels dangers ?

- Dangers encourus par le consommateur (pas ceux de l'opérateur)
≠ non-qualité
- Les dangers :
 - **Biologiques** : bactéries (E-coli,...), levures/moisissures, virus, prions, parasites
 - **Chimiques** : pesticides, résidus vétérinaires, métaux lourds, dioxines, toxiques naturels (ricine, digitaline,...), allergènes, mycotoxines
 - **Physiques** : débris de verre, métal, plastiques, bois, insectes,...

Le risque « professionnel »

Sécurité et santé au travail

LES risques professionnels

- Risque industriel :
 - Explosion, incendie, fuite toxique
 - Risque environnemental :
 - Pollutions
 - Impact sanitaire
 - Sécurité & santé au travail :
 - chutes
 - TMS
 - RPS
 - Risque chimique
 - Risque ATEX
 - Environnements spécifiques
 - Le risque « produit »
 - Atteinte directe ou indirecte à l'utilisateur final
- https://www.youtube.com/watch?v=7JOCEAP-EqU&list=PLiXHXP_ftiS8GUfuVSxW6_utNVkb681rw&index=2&t=771s

LES risques professionnels : bilan

Accidents du travail et de trajet

Les données de sinistralité de l'année 2022 font apparaître, par rapport à l'année 2021, en nombre de sinistres :



564 189

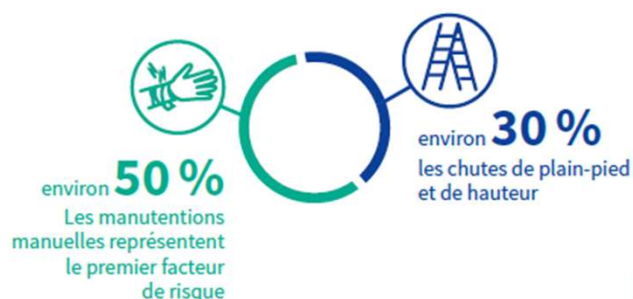
accidents du travail,
soit une diminution de 6,7 %

89 483

accidents de trajet,
en stagnation (+0,2 %)

En accidents du travail, des secteurs et des risques identiques aux années précédentes

Les accidents du travail (AT) surviennent majoritairement au sein des activités de la santé, du nettoyage et du travail temporaire (29 % des AT en 2022), de l'alimentation (17 %), du transport (15 %) et du BTP (14 %).



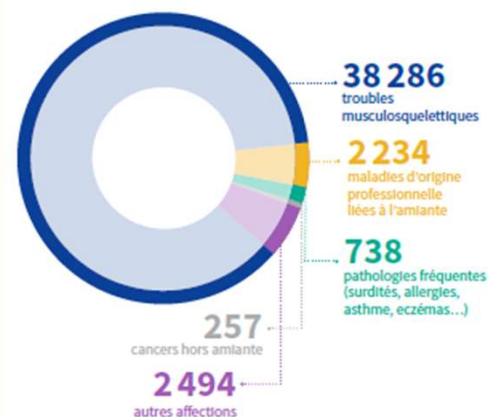
En 2022, les données font état de 738 accidents mortels reconnus, ce qui est comparable à 2019. Plus de la moitié (57 %) de ces décès sont les conséquences de malaises, et 13 % d'accidents routiers. Les décès, en 2022, concernent notamment les secteurs du BTP et des transports, à plus de 20 % chacun.

Maladies professionnelles



Le nombre de maladies professionnelles reconnues diminue d'un peu plus de 3000 cas par rapport à 2021, ainsi que le nombre de victimes, qui diminue également d'environ 1200.

Les principales pathologies reconnues comme maladies professionnelles en 2022



La reconnaissance du Covid-19 en maladie professionnelle - tableau 100

En 2022, 644 dossiers complets ont été déposés auprès des caisses primaires d'assurance maladie et CGSS. 548 dossiers ont été reconnus en maladie professionnelle, dont 321 après passage devant le comité d'experts national.

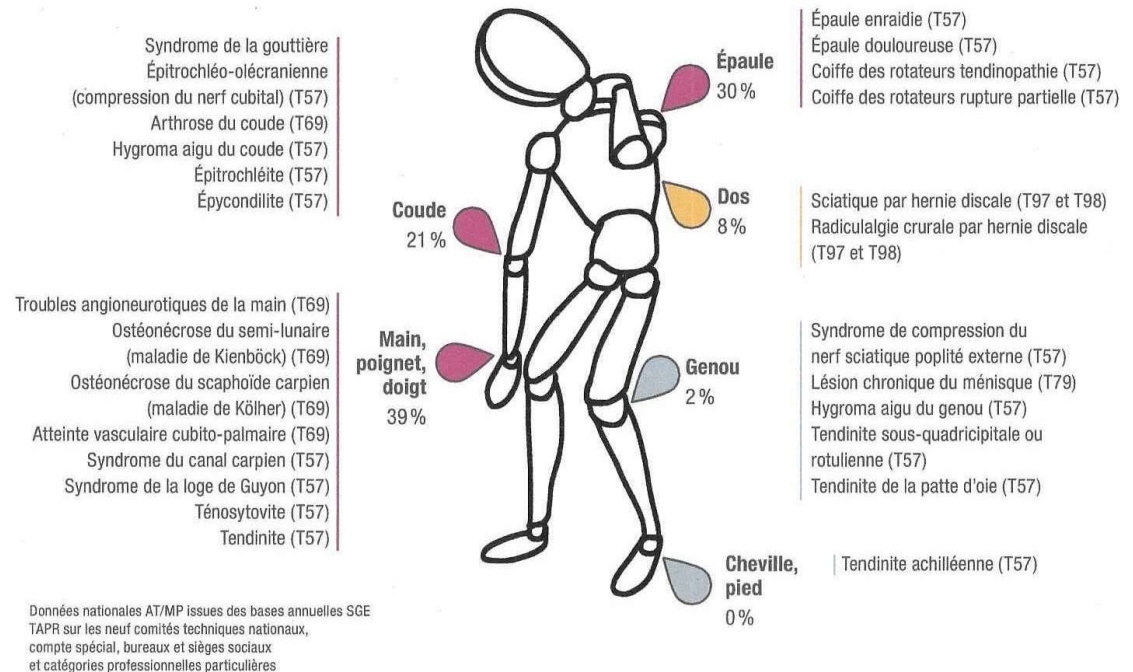
Au sein de cette dernière catégorie, 1 814 maladies professionnelles relèvent de maladies psychiques (16 % de plus qu'en 2021). Pour être reconnues, ces maladies professionnelles ont fait l'objet d'un avis favorable des comités d'experts médicaux saisis sur ces demandes.

Cette hausse s'explique par une augmentation, entre 2021 et 2022, de la reconnaissance au titre de maladies professionnelles des dépressions (+17 %), des troubles anxieux (+14 %) et des états de stress post-traumatiques (+11 %). Les risques psychosociaux sont également pris en charge en accidents du travail, puisqu'ils sont reconnus à hauteur d'environ 12 000 dossiers par an.

Les Troubles Musculo Squelettiques

- Principale cause d'IP.
- Recouvrent un large éventail de pathologies touchant les tissus mous à la périphérie des articulations. Ils résultent d'un déséquilibre entre les capacités fonctionnelles des personnes et les sollicitations qui apparaissent dans un contexte de travail notamment sans possibilité de récupération suffisante.
- On peut y intégrer les vibrations (engins de manutention et outils)

Répartition des syndromes de TMS par localisation en 2015



Les Troubles Musculo Squelettiques

Les TMS résultent principalement d'une combinaison de plusieurs facteurs de risques :

- Facteurs biomécaniques tels que répétitivité des gestes, efforts excessifs, postures et angles articulaires extrêmes ; l'exposition au froid ou aux vibrations constitue un facteur aggravant,
- Facteurs organisationnels, liés à l'organisation et à l'environnement de travail (possibilité de contrôle, clarté de la tâche, relations interpersonnelles...),
- Facteurs psychosociaux - la façon dont le travail est perçu par les salariés- tels que l'insatisfaction au regard d'un travail monotone, la tension engendrée par la pression du temps, le manque de reconnaissance, le vécu de relations sociales dégradées ou de l'insécurité de l'emploi.

LES RISQUES SELON LES SECTEURS D'ACTIVITÉ

167 000
lombalgies*

Part des lombalgies
en hausse dans les
accidents du travail



RISQUES FAIBLES

dans l'administration,
les banques et
les assurances

MODÉRÉS

dans la métallurgie,
la chimie et le
commerce (non alimentaire)

IMPORTANTS

dans l'agroalimentaire,
les transports et
les industries de l'énergie

FORTS

dans le
bâtiment et les
travaux publics

13,2 %



2005

16,9 %



2010

19,1 %



2015

* En 2015.

SOURCE : ASSURANCE MALADIE

UN INFOGRAPHIE C. TÊCHE

Les chutes...

- Près de la moitié des accidents de travail (avec AT).
- On distingue :
 - « Les chutes de plain-pied sont des glissades, trébuchements, faux-pas et autres pertes d'équilibre sur une surface plane. Sont considérées ici comme surfaces planes les surfaces ne présentant aucune rupture de niveau ou bien des ruptures de niveau réduites (trottoir, petites marches, plan incliné, etc.). » => fractures, entorses, contusions,...
 - « Les chutes en hauteur qui peuvent survenir depuis : des toitures, charpentes, terrasses de bâtiments... des moyens d'accès à des zones en surélévation : échelles, escaliers, passerelles...des pylônes ou d'autres équipements de travail (échafaudage, camion citerne...). Le travail à proximité d'une tranchée, d'une fouille ou d'une falaise, bien que n'étant pas à proprement parler un travail en hauteur, présente les mêmes risques. => plus grave que la situation précédente

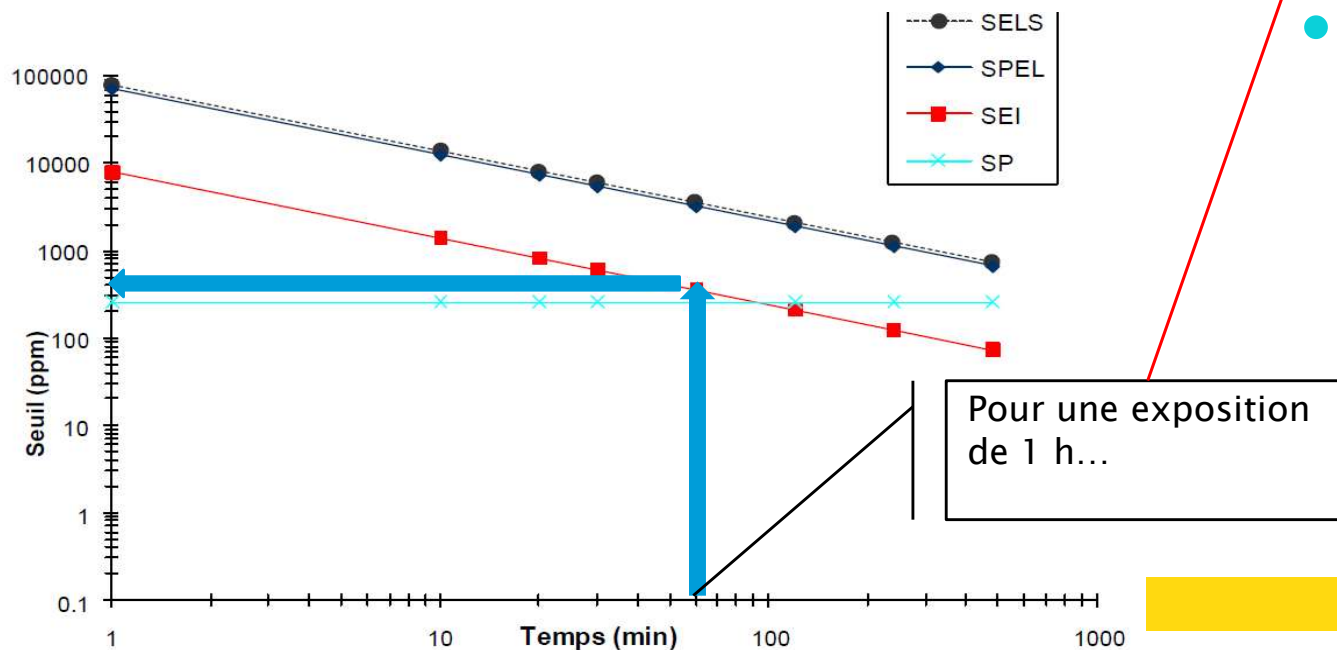
Le risque « chimique »

- Toutes les substances chimiques ne sont pas néfastes pour la santé mais toutes doivent être répertoriées (REACH, CLP, FDS).
- Les substances doivent être évaluées pour le risque :
 - Toxique (ingestion, peau, inhalation)
 - Irritant (peau, œil)
 - Sensibilisant (poumon, peau)
 - Mutagène
 - Cancérogène
 - Reprotoxique
 - Toxicité spécifique (organes cibles)



Le risque « chimique »

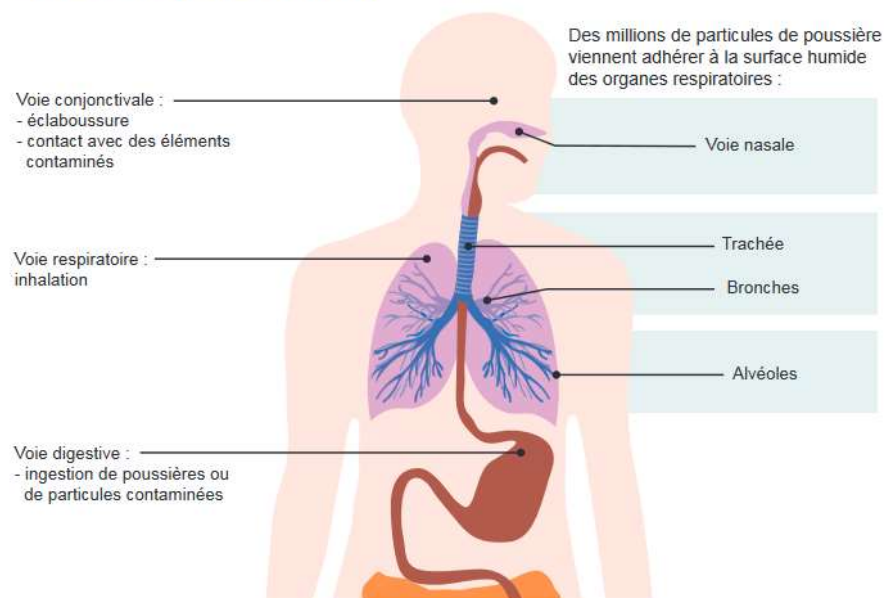
Concentration	Temps (min.)							
	1	10	20	30	60	120	240	480
Seuil des effets létaux significatifs – SELS • mg/m ³ • ppm	140 576* 78 098*	24 604 13 669	14 560 8 089	10 712 5 951	6 338 3 521	3 751 2 084	2 219 1 233	1 314 730
Seuil des premiers effets létaux – SPEL • mg/m ³ • ppm	129 071* 71 706*	22 590 12 550	13 365 7 425	9 837 5 465	5 819 3 233	3 443 1 913	2 038 1 132	1 206 670
Seuil des effets irréversibles – SEI • mg/m ³ • ppm	14 341 7 967	2 510 1 394	1 485 825	1 093 607	647 359	383 213	226 126	134 74
Seuil des effets réversibles – SER • mg/m ³ • ppm	ND ND	ND ND	ND ND	ND ND	ND ND	ND ND	ND ND	ND ND



- Seuils MP :
 - VLEP (valeur limite d'exposition professionnel (8h))
 - VME : valeur maximale d'exposition (VLEP x 4)

Le risque « chimique » : poussières

Voies de pénétration



Respiratoire, nasale, alvéolaire

Taille des poussières	Effets
De 10 à 100 microns	Aussi appelées « poussières totales », ces poussières sont retenues au niveau des fosses nasales.
De 5 à 10 microns	Poussières qui pénètrent dans la trachée, les bronches puis les bronchioles. Elles peuvent être crachées ou avalées dans l'œsophage ; mais si l'empoussiérage est trop élevé, elles iront jusqu'aux alvéoles.
0,5 micron	Poussières très fines qui se déposent dans les alvéoles pulmonaires.

Différentes natures de poussières

Organiques

- **Origine végétale :** farines, coton, céréales, sucres, bois, pollens, moisissures, pigments...
- **Origine animale :** acariens, déjections d'oiseaux, cuir, fourrures...

Minérales

Silice, amiante, fer, zinc, cobalt, étain, plomb, poudres décolorantes...

Ces poussières peuvent contenir des substances sensibilisantes, toxiques, microbiennes, fongiques selon leur provenance.

Les effets sur la santé

La quantité de poussières et la nature des particules en cause influent sur la gravité des lésions.

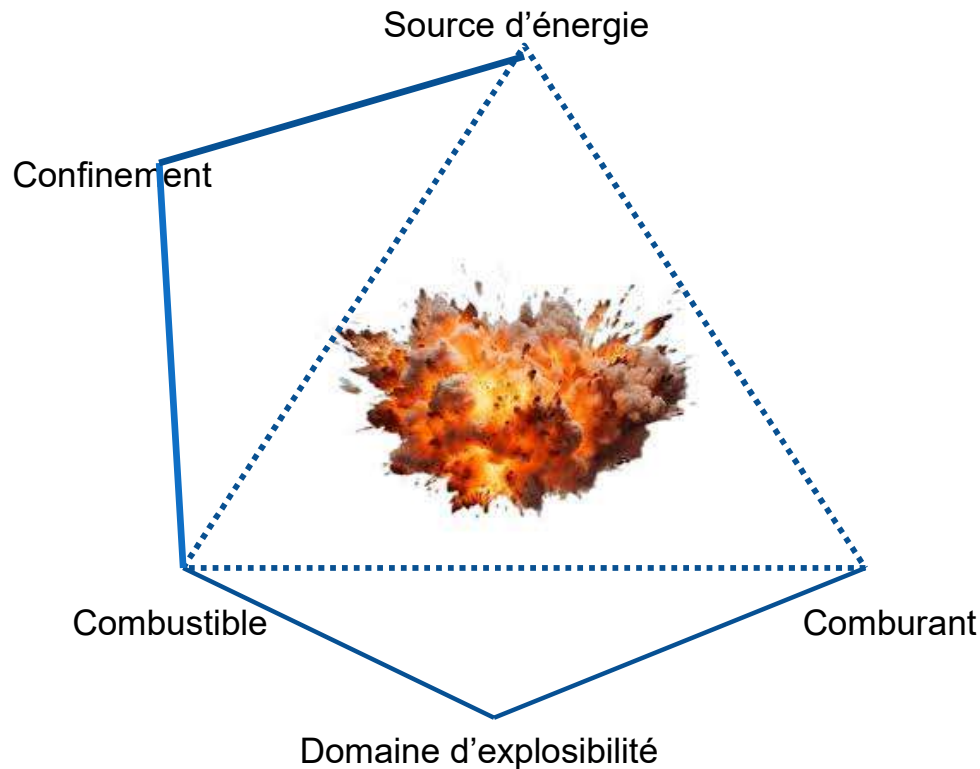
- **Irritations :** toux, rhinite, sinusite, gêne respiratoire (toutes les poussières même sans toxicité particulière).
- **Allergies :** asthme (farines, acariens, pollens...), eczéma (nickel, bois).
- **Cancers :** pulmonaire pour l'amiante, nasal pour le bois (cancer de l'ethmoïde).
- **Pneumoconioses :** poussières de silice ou de fer.
- **Toxicités :** certaines particules passent dans le sang et peuvent alors affecter le cerveau, les reins et d'autres organes (toxicité des poussières de plomb, de mercure, de béryllium...).

L'effort physique augmente le rythme de la respiration et donc la quantité de poussières inhalées.

Le risque chimique : limites

- La question des risques induits par les mélanges de substances reste difficile :
 - si les substances sont compatibles entre elles comment déterminer le profil de risque du mélange ?
 - si elles sont susceptibles d'être incompatibles (elles peuvent réagir entre elles). Comment évaluer l'incompatibilité et les effets, ex :
 - ❖ formation d'un composé instable (explosif)
 - ❖ dégagement d'un produit inflammable
 - ❖ dégagement d'un produit toxique
 - ❖ dégagement d'un produit irritant
 - ❖ Endommagement des contenants par augmentation de température ou corrosion
 - ❖ ...
- Enfin, les substances peuvent être inflammables et engendrer un risque collectif spécifique : ATEX

Le risque « ATEX »



- Statistiques (2000)
 - 0,04% des accidents mais :
 - 0,10% des accidents graves
 - 0,21% des incapacités permanentes
 - 0,27% des décès
- Potentialité de devenir un accident industriel...

Le risque « ATEX » et ...

...le risque industriel



- Blaye (1999) : de l'explosion locale à la catastrophe : Explosion de poussière dans un silo à grain --> 11 morts



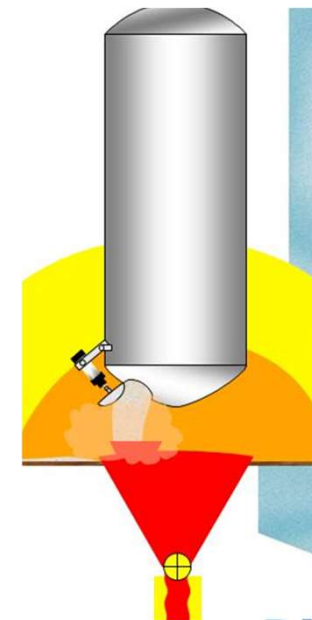
- Valenton (2008) : explosion locale suite à une fuite de biogaz

Le risque « ATEX »

- Directive 1994/9/CE exigences pour les appareils et les systèmes de protection
 - (destinée aux constructeurs – libre circulation)
 - En France : Décret du 30/04/02
- Directive 1999/92/CE prescriptions minimales pour protéger les travailleurs
 - (destinée aux utilisateurs)
 - En France : Décrets du 24/12/02 +arrêtés du 8/07/03 & 28/07/03



Probabilité d'un ATEX	Haute	Moyenne et faible	Très faible	improbable
Durée de présence	>1000heures /an	10<heures/ an<1000	1<heures /an <10	<1 heure
Définition	Emplacement où une atmosphère explosive est présente en permanence ou pendant de longues périodes ou fréquemment	Emplacement où une atmosphère explosive est susceptible de se présenter occasionnellement normal.	Emplacement où une atmosphère explosive n'est pas susceptible de se présenter en fonctionnement normal, ou si elle se présente néanmoins, n'est que de courte durée (fonctionnement	Emplacement non dangereux
Zone	20	21	22	hors zone

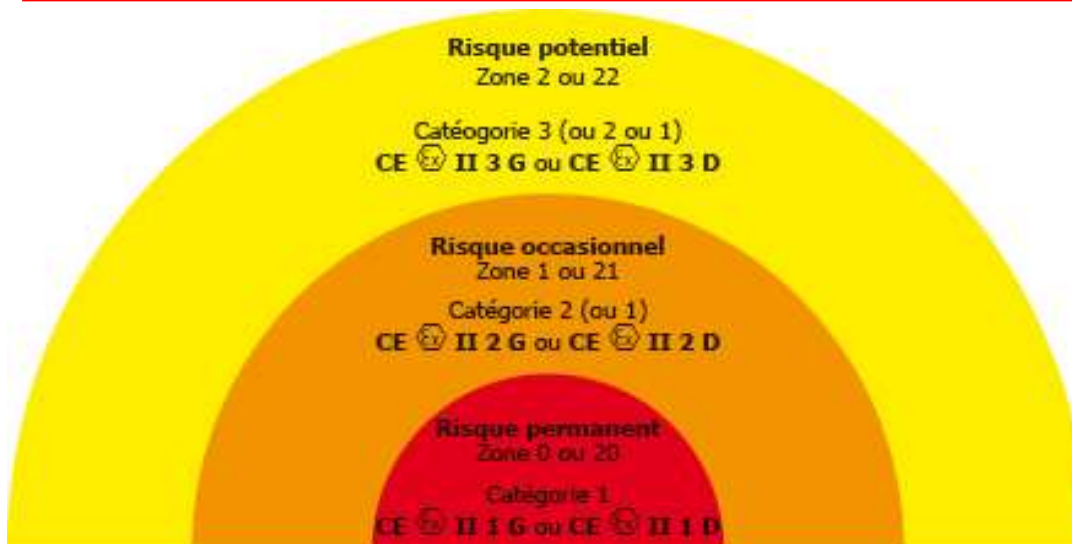


Classe	Température maximale de surface
T6	85 °C
T5	100 °C
T4	135 °C
T3	200 °C
T2	300 °C
T1	450 °C

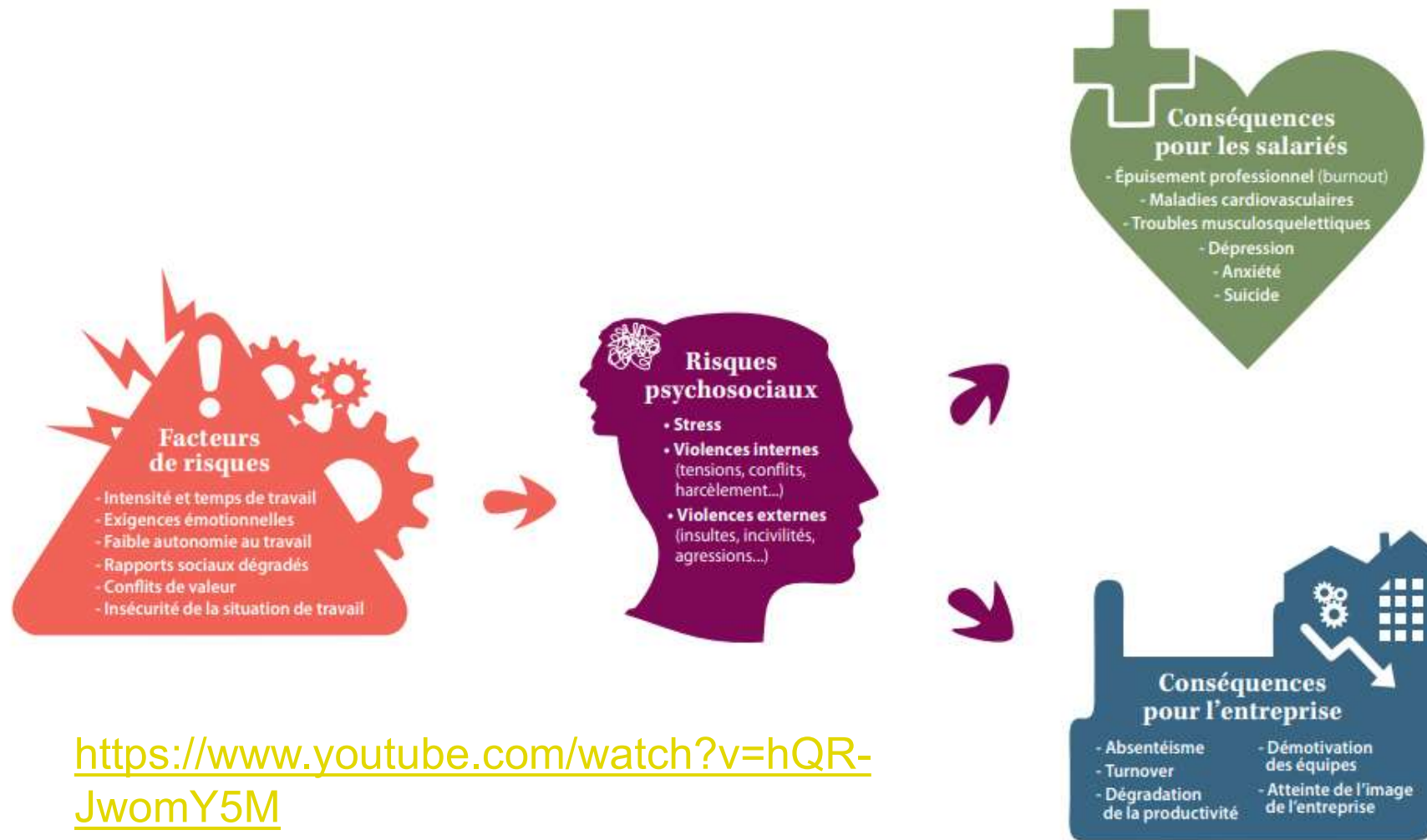
$$T_x < f(T_{nuage}, T_{auto \text{ échauf}})$$

Exemple matériel EEX II 1 D T5

- IID type d'atmosphère (groupe IID, D comme Dust)
- 1 catégorie
- T5 température max de l'enveloppe



Les Risques Psycho Sociaux



<https://www.youtube.com/watch?v=hQR-JwomY5M>

Les Risques Psycho Sociaux

CHIFFRES CLÉS SUR LES RISQUES PSYCHOSOCIAUX

PARMI LES ACTIFS FRANÇAIS

45 %

déclarent devoir
(toujours, souvent)
se dépêcher
(2019)

27 %

déclarent devoir cacher leurs
émotions, faire semblant d'être de
bonne humeur (toujours, souvent)
(2019)

9 %

disent devoir faire
des choses dans leur travail
qu'ils désapprouvent
(2019)



30 %

signalent avoir subi au moins
un comportement hostile dans
le cadre de leur travail au cours
des 12 derniers mois
(2018)

25 %

disent devoir faire appel
à d'autres en cas d'incident
(2018)

20 %

craignent de
perdre leur emploi
(2018)

Source : enquête Dares « Conditions de travail-Risques psychosociaux », 2016, 2019

© pour l'INRS

www.inrs.fr/risques/psychosociaux



Les « environnements spéciaux »

- **Chaleur :**

- « Fatigue, sueurs, nausées, maux de tête, vertiges, crampes... Ces symptômes courants liés à la chaleur peuvent être précurseurs de troubles plus importants, voire mortels : déshydratation, coup de chaleur »
- « La chaleur **augmente les risques d'accidents** car elle induit une baisse de la vigilance et une augmentation des temps de réaction. La transpiration peut rendre les mains glissantes ou gêner la vue »

- **Froid :**

- « Fatigue accrue, perte de dextérité... Le froid peut provoquer des accidents (glissades, perte de dextérité...). Les effets sur la santé peuvent aller des simples engourdissements jusqu'aux gelures. L'effet d'ordre général le plus sérieux est l'hypothermie. Ses conséquences peuvent s'avérer dramatiques : troubles de la conscience, coma, décès »
- « Le travail au froid augmente également les risques de troubles musculo-squelettiques »

Les « environnements spéciaux »

- **Espaces confinés :**
 - « Les risques générés par une atmosphère appauvrie en oxygène, toxique ou explosive sont bien réels, et s'ajoutent à d'autres risques graves comme ceux de chute de hauteur ou de noyade »
- Le travail en **horaires atypiques** engendre des risques pour la santé. Les mécanismes sont différents selon les horaires pratiqués. Par exemple, pour le travail de nuit les effets sont liés à une désynchronisation de l'horloge biologique associés à une dette de sommeil. Bien que moins étudiés, les autres horaires atypiques semblent avoir des effets liés à la dette de sommeil et à des problématiques de surcharge horaire et à des décalages des rythmes de vie.
- **Travailleur isolé :** Travailler de façon isolée, c'est réaliser seul une tâche dans un environnement de travail où l'on ne peut être vu ou entendu directement par d'autres personnes, et où la probabilité de visite est faible.

Le risque environnemental

On balbutie encore...

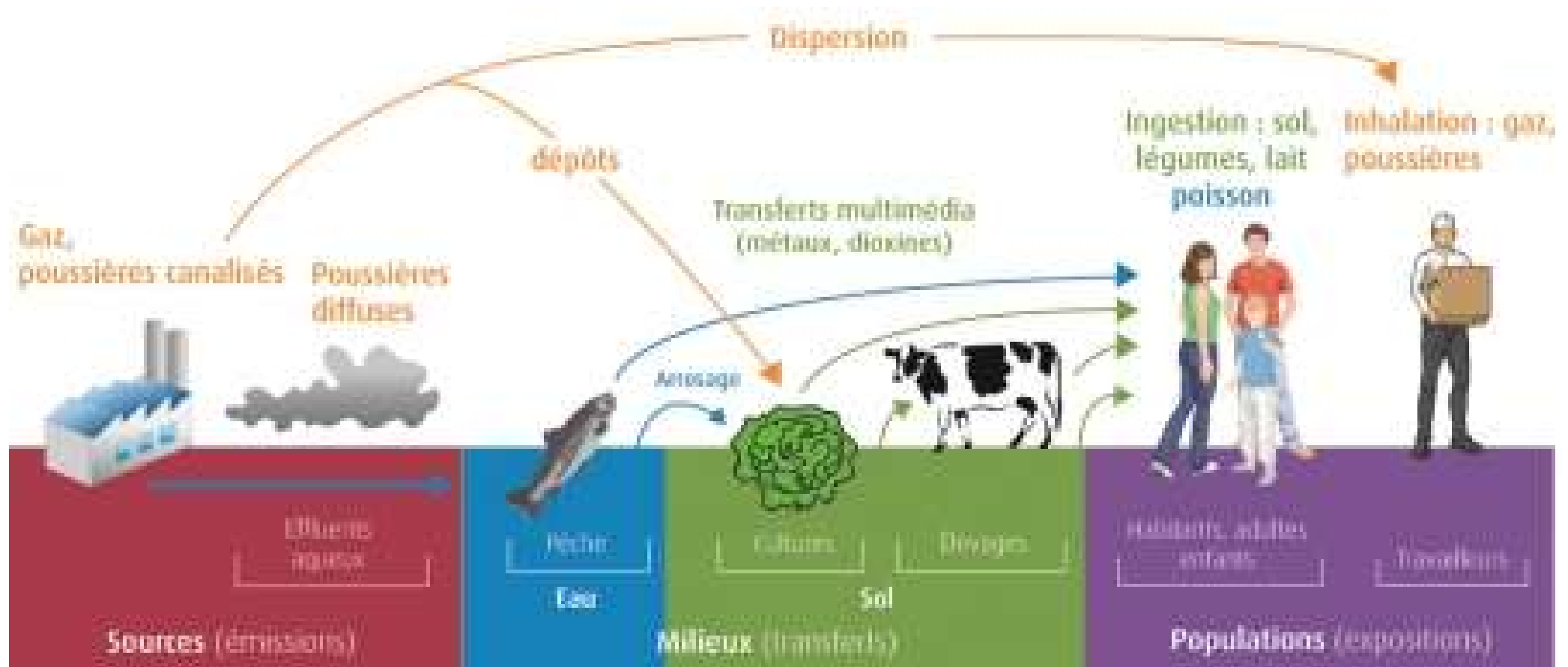
Les fuites toxiques dans l'environnement



- Incendie Sandoz, Bâle 1986
- Eaux de ruissellement incendie :
 - Feu d'un entrepôt 1250t (45 00 m², h=10 m)
 - herbicides, huiles, solvants, palettes...
- Effets :
 - Grave pollution du Rhin
 - 130 M€ de dégâts



Les fuites toxiques dans l'environnement



Les fuites toxiques dans l'environnement

- Pollutions en cascade :
 - accidentelle
 - chronique
 - historique
- P. historique a pour origine une P. chronique ou accidentelle.
- P. historique est souvent la plus coûteuse
- => Etude des Risques Sanitaires et Etude d'Impact
- Malheureusement les risques sanitaires sont difficiles à apprécier :
 - Accord sur les relations doses – effets
 - Pertinence des données statistiques
 - Liens de causalité
 - Dispersion-biochimie-géochimie...
 - Effets synergiques
- Approches possibles :
 - Empiriques à partir du REX
 - Semi quantitative
 - (quantitatives..)

Le risque industriel

Risque Majeur et risque Procédé ?

Le risque (industriel) majeur

- On peut définir le risque industriel majeur 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).

Le risque (industriel) « procédé »

- On pourrait définir le risque procédé comme correspondant aux accidents qui n'ont pas d'effets néfastes à l'extérieur de l'entreprise sur les biens, les personnes et l'environnement mais **produit des dommages aux biens de l'entreprise et au personnel**. Les « phénomènes dangereux » concernés sont :
 - les explosions (gaz, vapeurs, poussières),
 - les emballements de réactions (emballements thermiques ou chimiques),
 - les feux
 - Les émanations de toxiques

D'abord les fuites...

- Plusieurs types:

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

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

- Formules **approximatives** :

- Gaz:

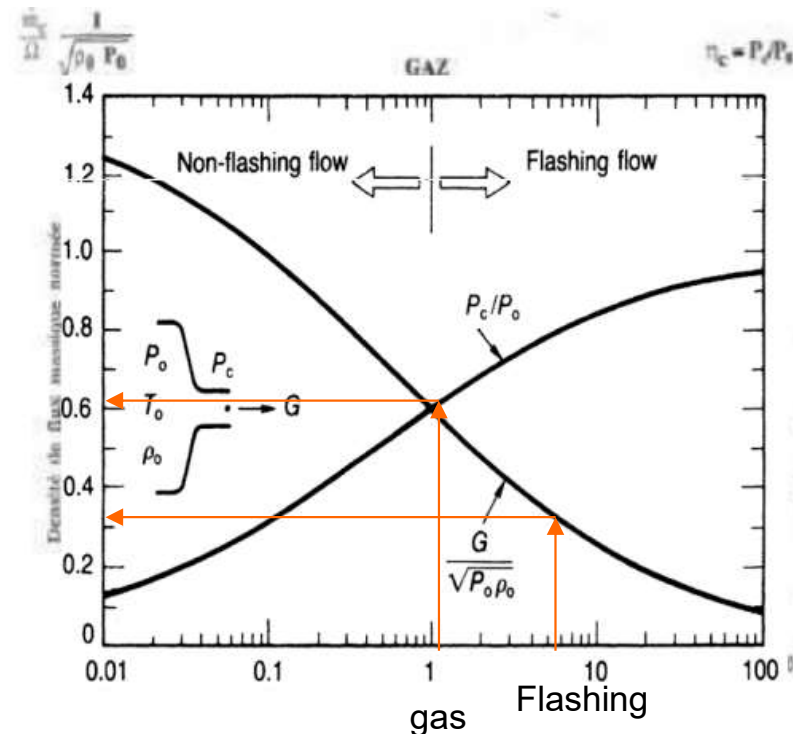
$$\frac{\dot{m}_c}{\Omega} \cdot \frac{1}{\sqrt{P_0 \cdot \rho_0}} = 0.6$$

- Liquide flashant

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

- Liquide pur

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



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

Notes :

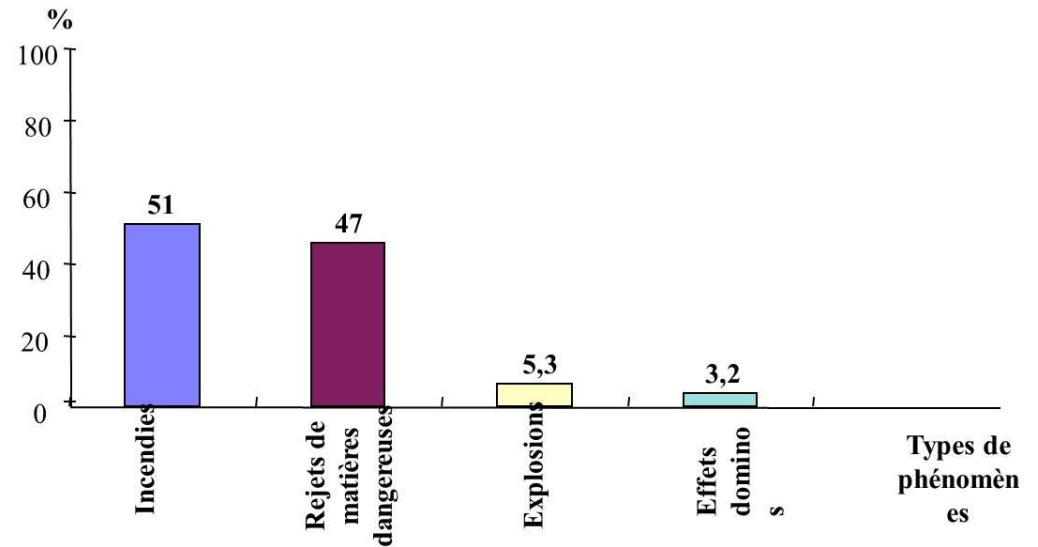
- $\dot{m}_c$ débit massique
- Ω section de fuite
- Indice « 0 » conditions de réservoir

Spécificité des liquides évaporants

- Pour calculer les feux et nuages toxiques, il faut connaître le débit de gaz/vapeur alimentant le nuage ou la flamme:
 - Quand il s'agit d'un gaz pur, c'est le débit de fuite
 - Lorsqu'il s'agit d'un liquide flashant, bien qu'une fraction de la fuite soit liquide, ce dernier sera brisé (par la vapeur en expansion) en fines gouttelettes qui se vaporisent immédiatement dans le jet. Tout le débit de fuite sera dispersé en phase gazeuse
 - Lorsqu'il s'agit d'un liquide non flashant, le liquide se répand sur le sol et la vapeur est produite par un « séchage », c'est-à-dire un échange de chaleur/masse avec le sol et l'atmosphère
- Quelles hypothèses?
 - Lorsque la couche liquide peut s'étendre librement, sa surface maximale correspondra à la situation où le débit du liquide vaporisé est égal au débit de fuite
 - Lorsqu'il y a des obstacles, comme une zone de rétention ou un bassin, la surface est limitée et le débit de vapeur est plus faible.
 - Pour les incendies, le taux d'émission des vapeurs par m^2 (m_{oo} ") est indiqué dans le tableau de relatifs aux incendies.
 - Il est conseillé de faire de même pour les nuages toxiques, c'est-à-dire d'utiliser la même valeur que pour le taux d'émission des vapeurs. C'est très conservateur (parfois par un facteur dix) mais sûr.

Explosions ?

- Transformation rapide d'un système s'accompagnant d'une libération brutale d'énergie avec expansion de gaz.



- PHYSIQUES :**

- BLEVE ;
- Vaporisation brutale 20% ;
- Eclatement 5%

- CHIMIQUES :**

- Réaction chimique exothermique 5% ;
- Décomposition substances instables 10 % ;
- Combustion mélanges air-vapeurs (gaz) 50 %;
- Combustion mélanges air-poussières 10% ...

L'explosion de substances instables

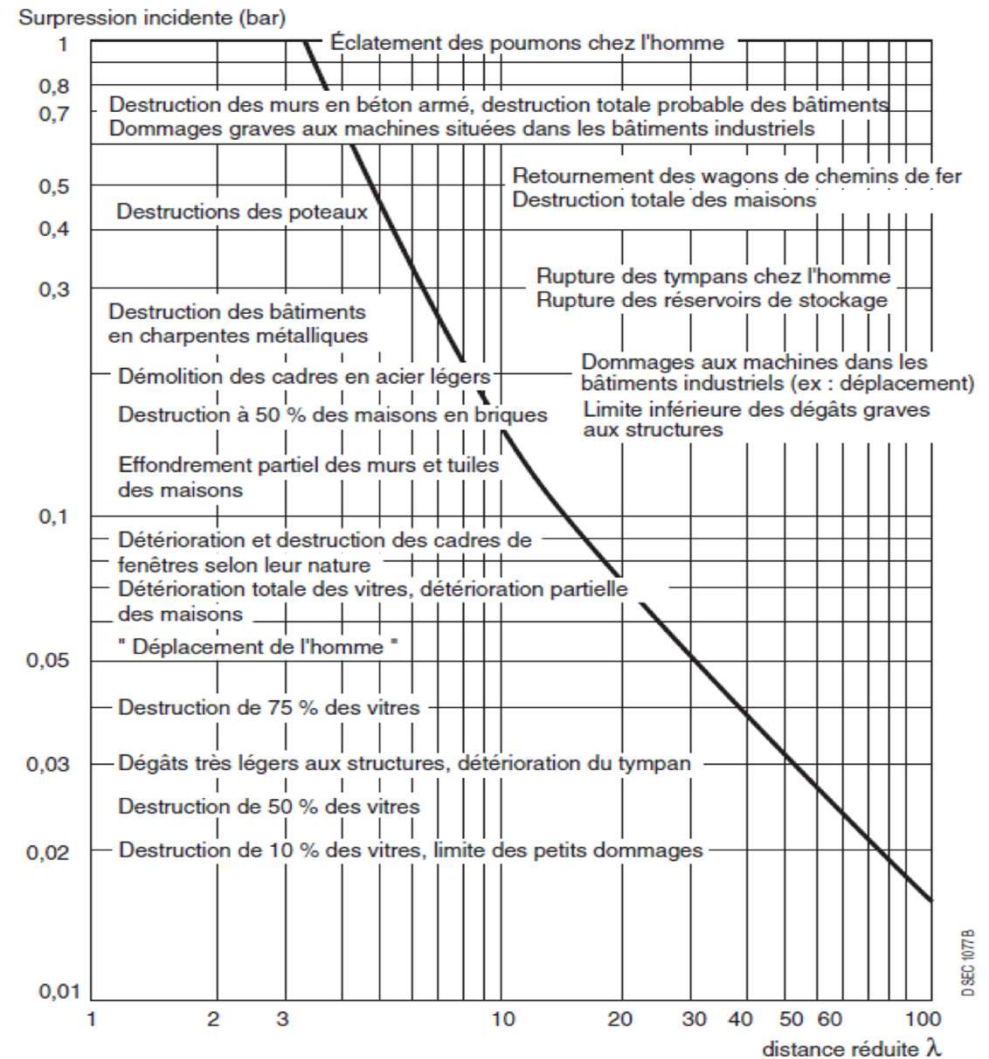


- AZF (2001), 20 morts, 2000 blessés, ...
- Détonation d'ammonitrates suite à une pollution du vrac

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 :

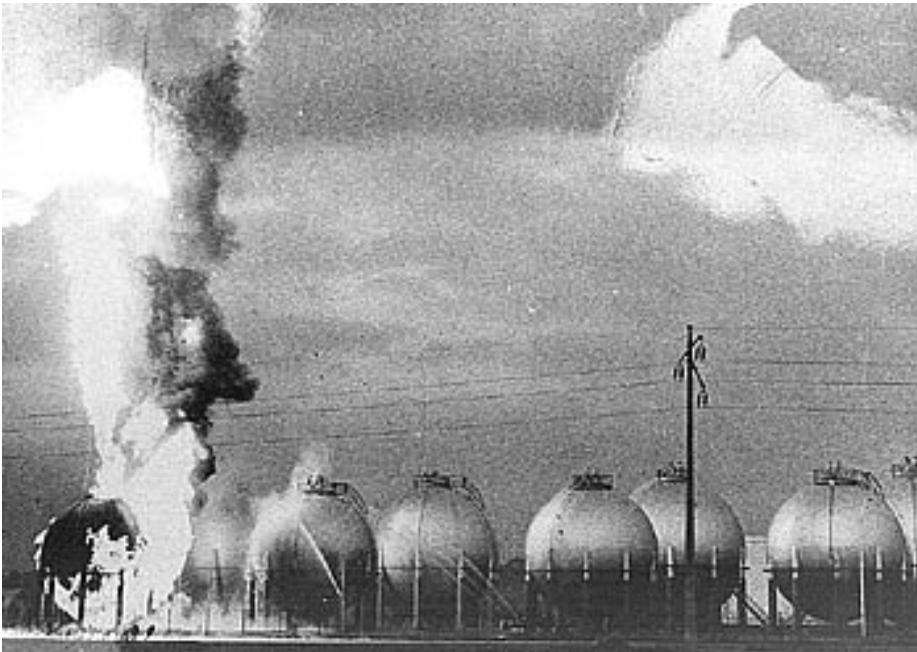
$$M_{eq_{TNT}} = M_{inventaire}$$



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

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

Les éclatements de capacités



- 1966, Feysin, 18 morts :
 - Fuite et feu sous une sphère de GPL
 - Eclatement de plusieurs sphères



- 1997, Blaye, 11 morts :
 - Explosion de poussières
 - Propagation et renforcement

... 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)

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

Les explosions de gaz/vapeurs



- 1992, La Mède : 6 morts
- Rupture d'une canalisation corrodée

Les explosions de gaz/vapeurs

Source d'INFLAMMATION

- Surface chaude ($>400^{\circ}\text{C}$)
- Etincelles
- Flamme, travaux

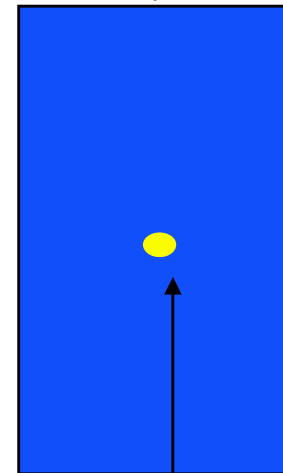
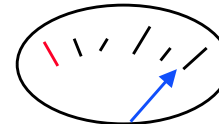
UVCE

Fuite de gaz/vapeur COMBUSTIBLE

- Méthane, propane, ...
- Essence, solvants, ...
- Gaz de pyrolyse

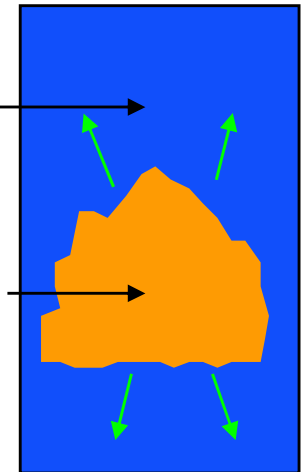
Air (comburant)

Surpression



inflammation

$t_0 : P_{\text{exp}} = 0$

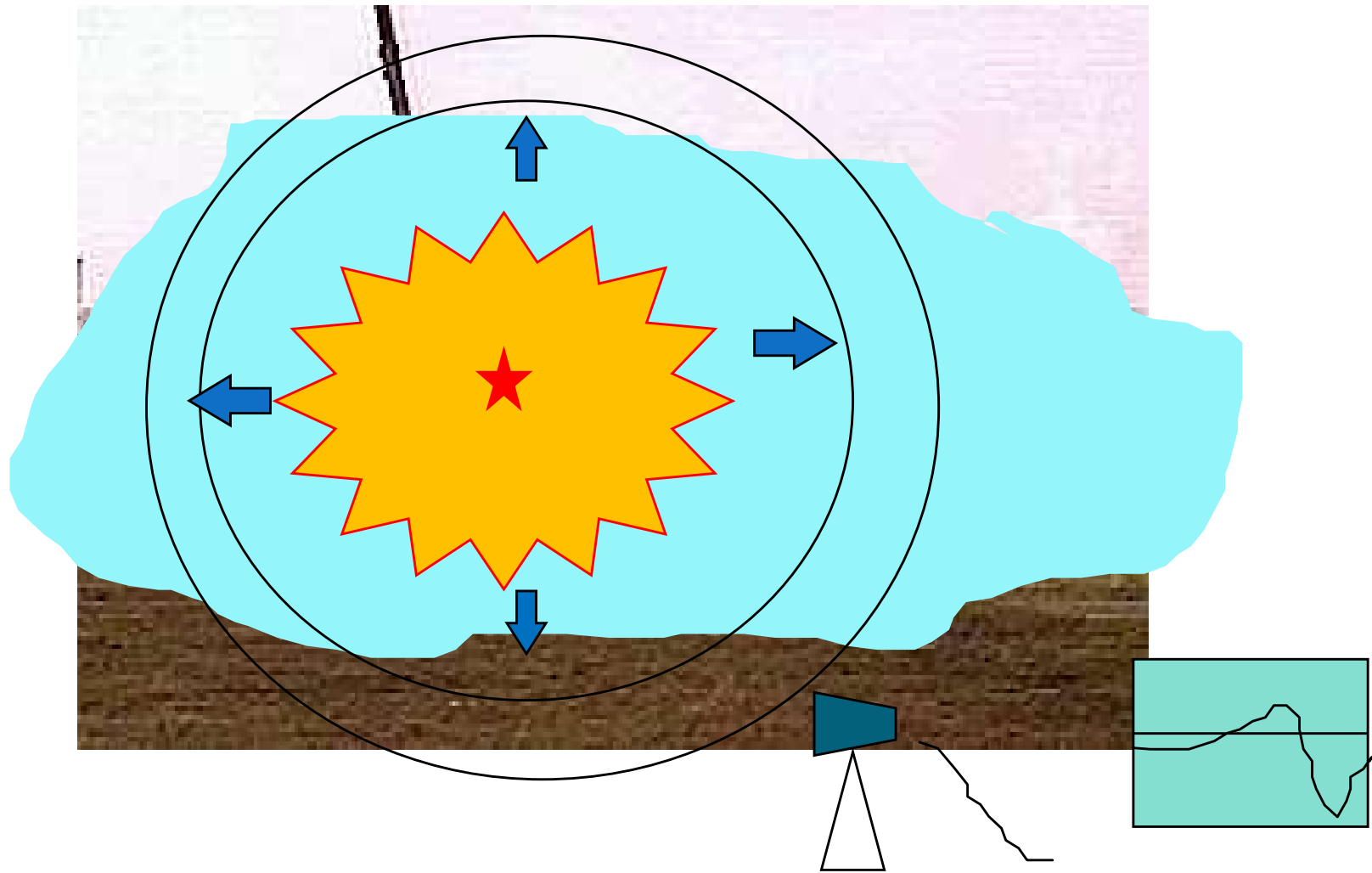


20°C

2000°C

$t_1 : P_{\text{exp}} > 0$

Les explosions de gaz/vapeurs



... extension aux explosions de gaz

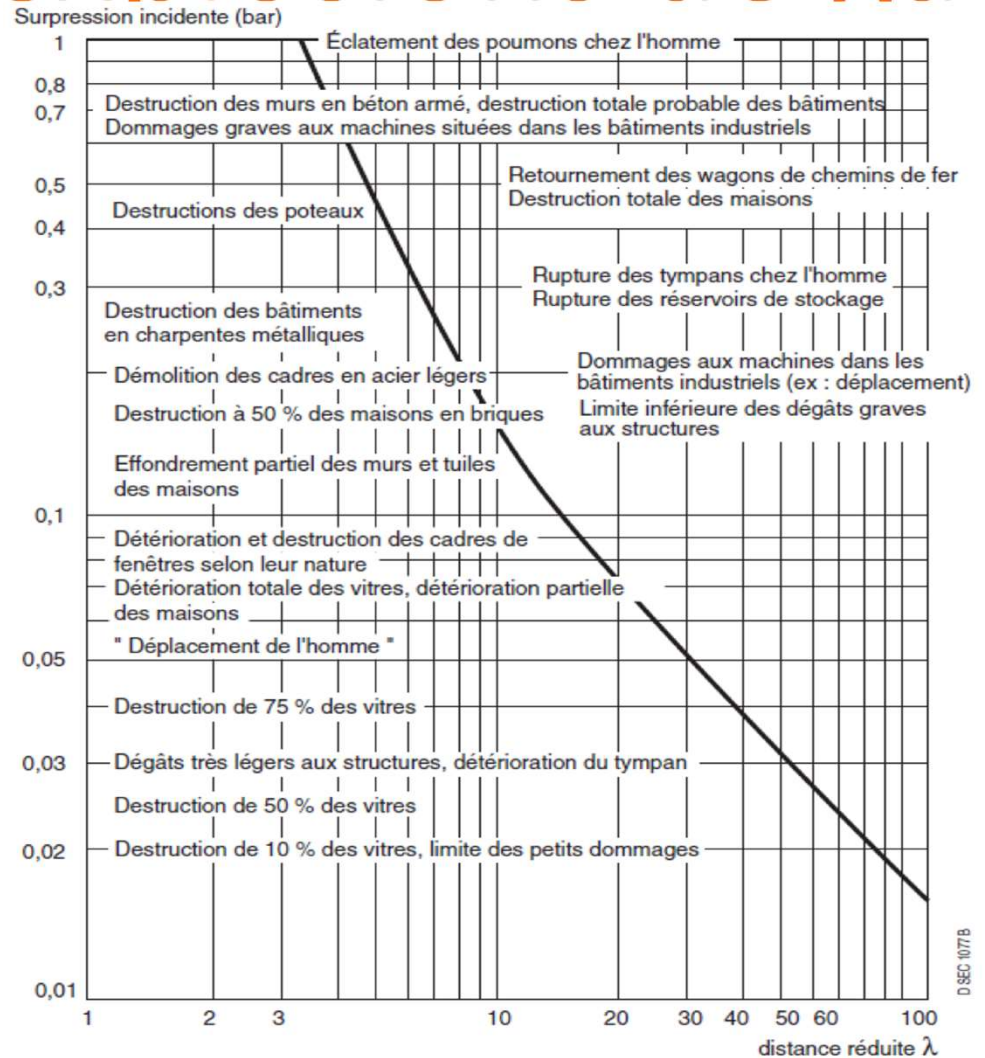
- Méthode» :

- 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)

Les incendies industriels



- 2019, Lubrizol, Rouen
- Feu d'un entrepôt

Les incendies industriels

Source d'INFLAMMATION

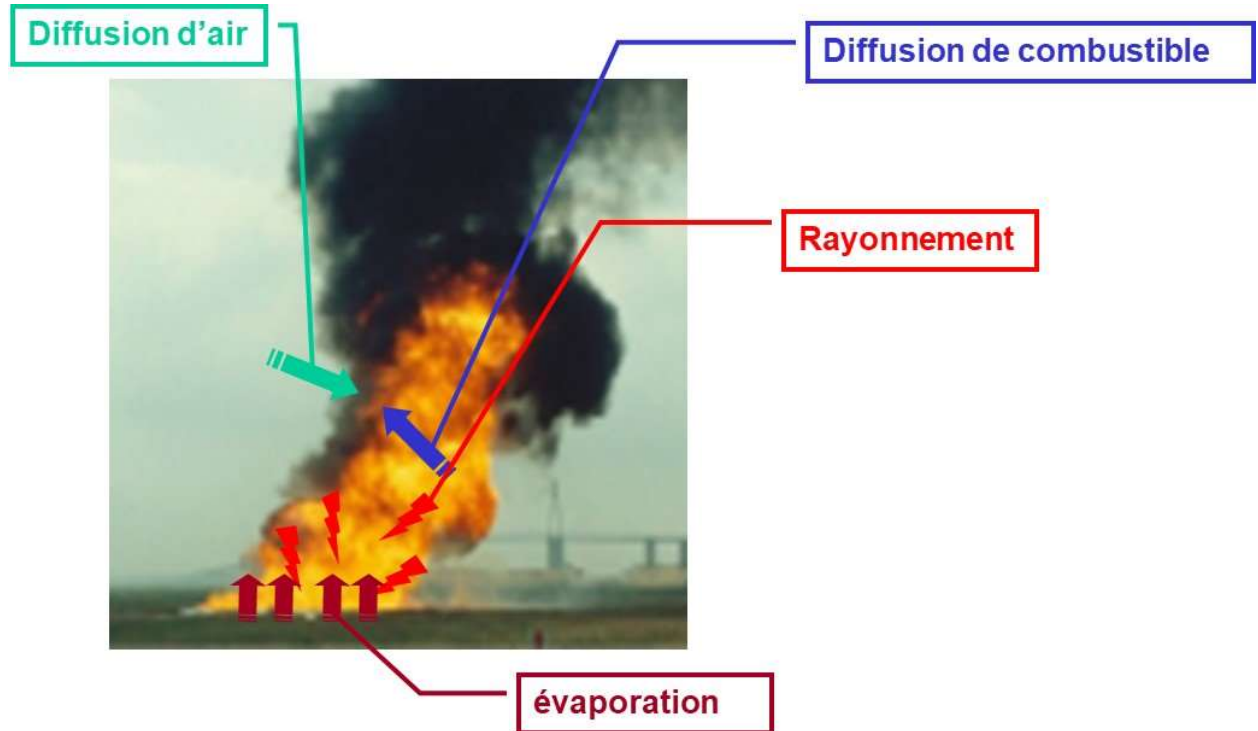
- Surface chaude ($>400^{\circ}\text{C}$)
- Etincelles
- Flamme, travaux

Incendie

Combustibles en vrac

- Fuite de gaz, ...
- Liquides combustibles...
- Solides combustibles

Air (comburant)



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

Les incendies 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

Les fuites de produits toxiques dans l'air



- 1984, Bhopal, Inde
- Fuite d'isocyanate de méthyle suite à fausse manœuvre, 20 000 morts, 300 000 blessés

Les fuites de produits toxiques dans l'air

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

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

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

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

