

Analyse et management des risques industriels



- 1. Présentations**
- 2. Objectifs et « Règles du jeu »**
- 3. Contexte général du thème**
- 4. Présentation générale du cours**

- 1. Présentations**
2. Objectifs et « Règles du jeu »
3. Contexte général du thème
4. Présentation générale du cours

1. Rencontre

Nicolas BERRIOT (nicolas.berriot@epfl.ch)

- Parcours professionnel



- Activités d'enseignement

1. Rencontre

5'

Vous ?

- Sections (SIE, GC, Echange,...)
- Background (cours EIIE,...)

Analyse et management des risques industriels

1. Présentations
- 2. Objectifs et « Règles du jeu »**
3. Contexte général du thème
4. Présentation générale du cours

2. Objectifs et « Règles du jeu »

- Philosophie : A votre service
- Ce cours est adaptable selon :
 - Vos attentes
 - Vos commentaires de l'année n-1
 - Actualité (adaptation live)

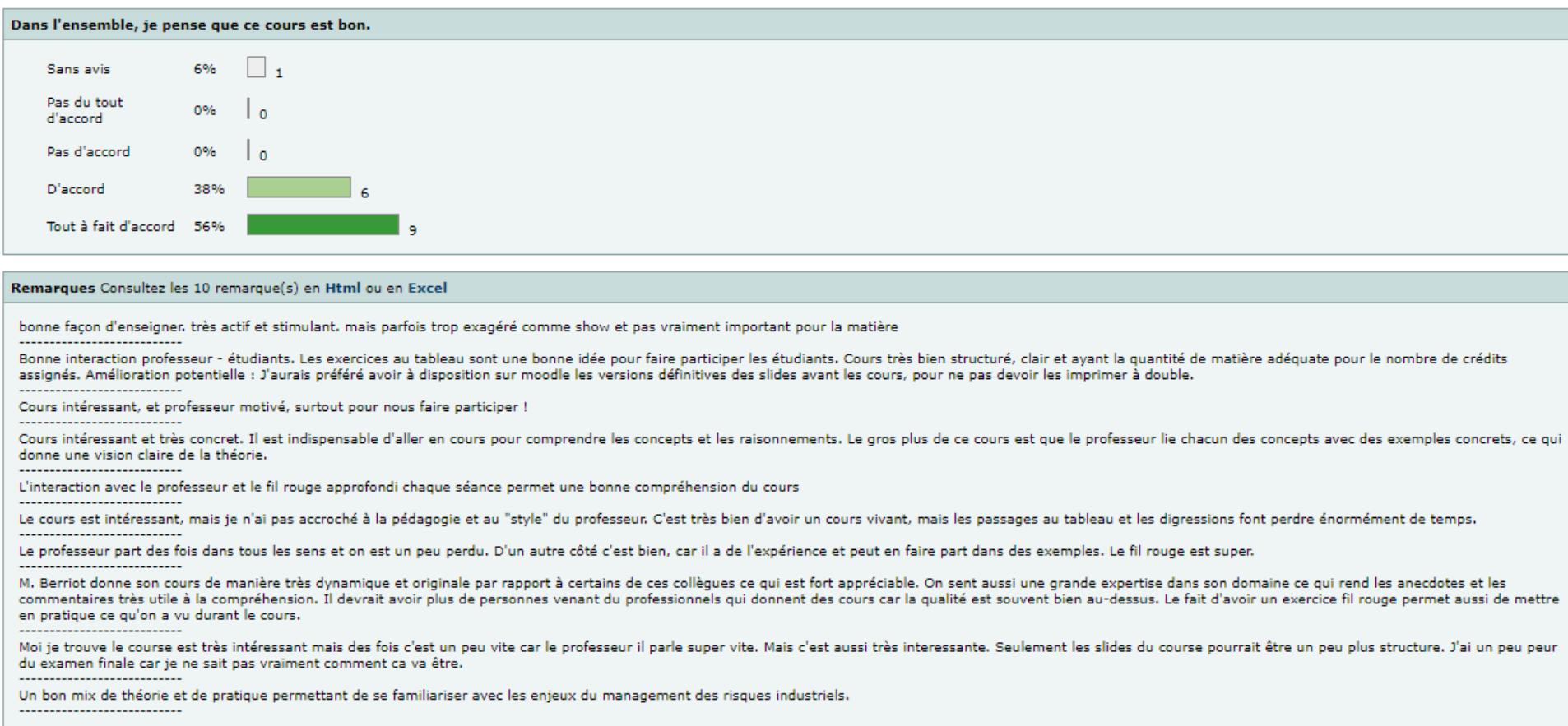
2. Objectifs et « Règles du jeu »

5'

- Vos objectifs ?
 - Pourquoi avoir choisi ce cours ?
 - Qu'en attendez vous ?

2. Objectifs et « Règles du jeu »

- Vos derniers commentaires



2. Objectifs et « Règles du jeu »

- **Mes Objectifs (finalité)**

Initiation pour votre future carrière

Prise en compte des risques industriels dans la gestion de projet

- sensibilisation non technique :culture, notions, enjeux
- bases techniques et documentaires :
savoir faire les calculs simples et comprendre les modèles numériques

2. Objectifs et « Règles du jeu »

- Format du cours : 3h
 - Aspects théoriques
 - Exemples pratiques (parfois historique)
 - Exemple concret traité - fil rouge
 - Réalisé ensemble progressivement
 - Entre chaque cours par vous même

2. Objectifs et « Règles du jeu »

- Visite site industriel
 - 1 matinée
 - Date (à confirmer)

2. Objectifs et « Règles du jeu »

- Evaluations
 - Un examen final (100%)
 - 23 mai 2018

2. Objectifs et « Règles du jeu »

- Moodle

Avant

- Slides partiels

Après

- Slides complets + documents de référence

2. Objectifs et « Règles du jeu »

- Calendrier

jeudi 21 février			jeudi 28 mars		jeudi 2 mai	
jeudi 28 février			jeudi 4 avril		jeudi 9 mai	
jeudi 7 mars			jeudi 11 avril		jeudi 16 mai	
jeudi 14 mars			jeudi 18 avril		jeudi 23 mai	Examen final
jeudi 21 mars			jeudi 25 avril	Vacances		

Analyse et management des risques industriels

1. Présentations
2. Objectifs et « Règles du jeu »
- 3. Contexte général du thème**
4. Présentation générale du cours

3. Contexte général du thème

5'

- Notions générales

- Dangers

- Ce qui constitue une menace pour la tranquillité ou l'existence même d'une personne, d'un bien

- Dommages

- Dégât matériel (préjudice) causé aux choses ou aux personnes
 - = $f(\text{intensité du danger} + \text{vulnérabilité})$

- Risques

- Dommages VS fréquence = $f(\text{probabilité})$
 - Langage courant risque = danger

3. Contexte général du thème

5'

- Grandes familles de dangers ?
 - **les dangers naturels**
(avalanche, feu de forêt, inondation, mouvement de terrain, cyclone, tempête, séisme et éruption volcanique)
 - **les dangers technologiques**
(dangers industriels: chimique, nucléaire, biologique et les ruptures de barrage, par exemple)

3. Contexte général du thème

- Grandes familles de dangers (suite)
 - **les dangers de la vie quotidienne**
(accidents domestiques, accidents de montagne ou accident d'avion ou de la route,.....);
 - **les dangers professionnels**
 - **les dangers liés aux conflits** (yc terrorisme).

3. Contexte général du thème

- Périmètre du cours
 - Origine
 - activités humaines ET industrielles
 - Importance
 - Catastrophes ou accidents majeurs
 - Dommages très importants
(société ≠ individu)
 - Durée de l'exposition
 - aigüe / événement brutal

3. Contexte général du thème

- Dans le cours
 - **Installations industriels**
 - Accidents liés au **transport des marchandises** dangereuses
- Périphérique au cours
 - **Installations nucléaires** (méthodologie propre)
 - **Sécurité au travail** (**accidents individuels**)
- Hors du cours
 - **Transports** passagers (hors process industriel)
 - **Pollution** (grand nombre mais chronique - expositions longues)

3. Contexte général du thème

5'

- Les risques industriels ces dernières années?
 - 3 exemples de différentes natures

Hongrie – octobre 2010



Hongrie – octobre 2010



Hongrie – octobre 2010



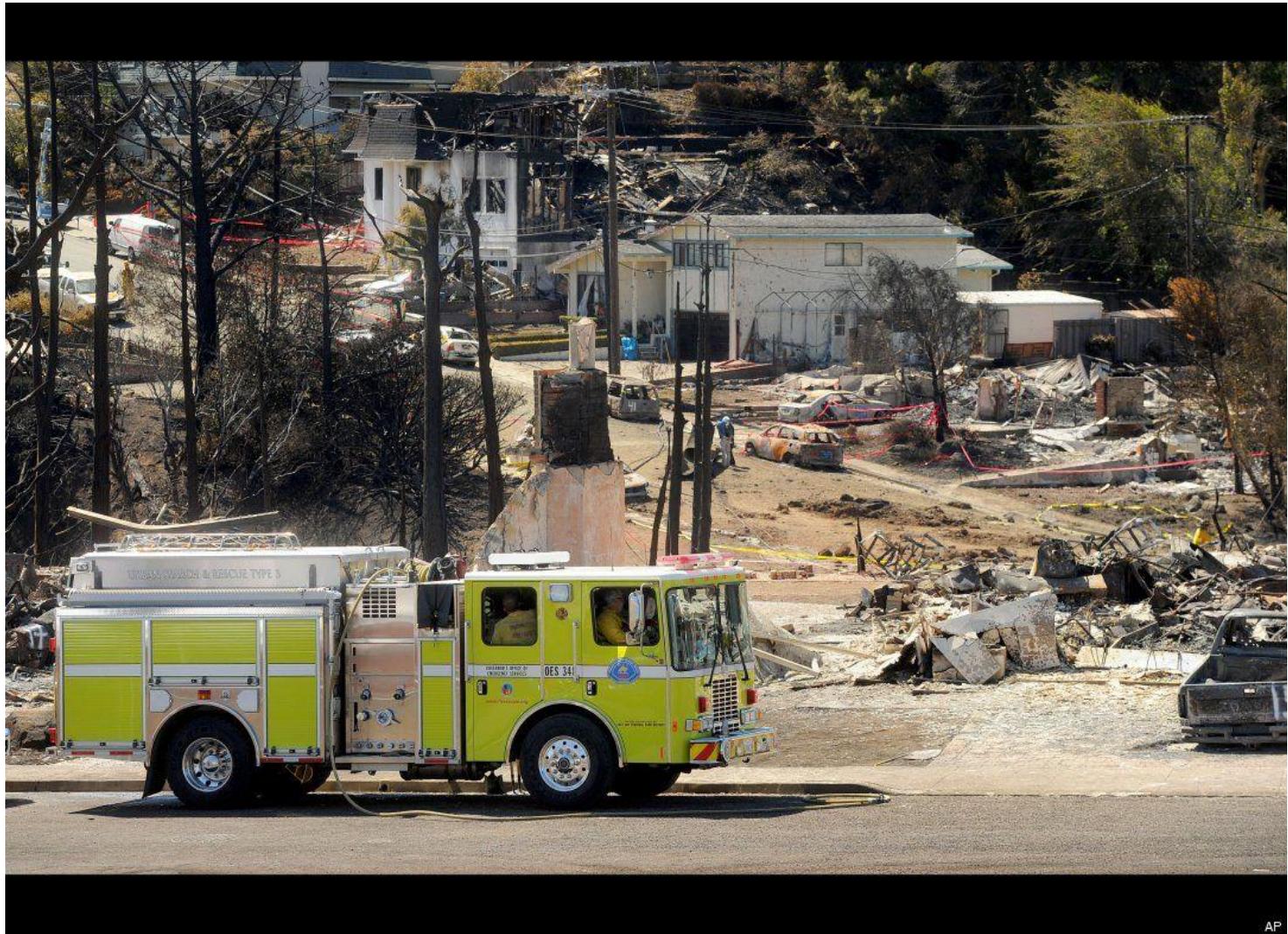
<https://www.youtube.com/watch?v=xEMWh6EjJoY>

San Bruno (Etats-Unis) – Septembre 2010

<https://youtu.be/P-2xdwSm44>



San Bruno (Etats-Unis) – Septembre 2010



AP

San Bruno (Etats-Unis) – Septembre 2010



Gazoduc



Gazoduc



Gazoduc



Gazoduc



Gazoduc



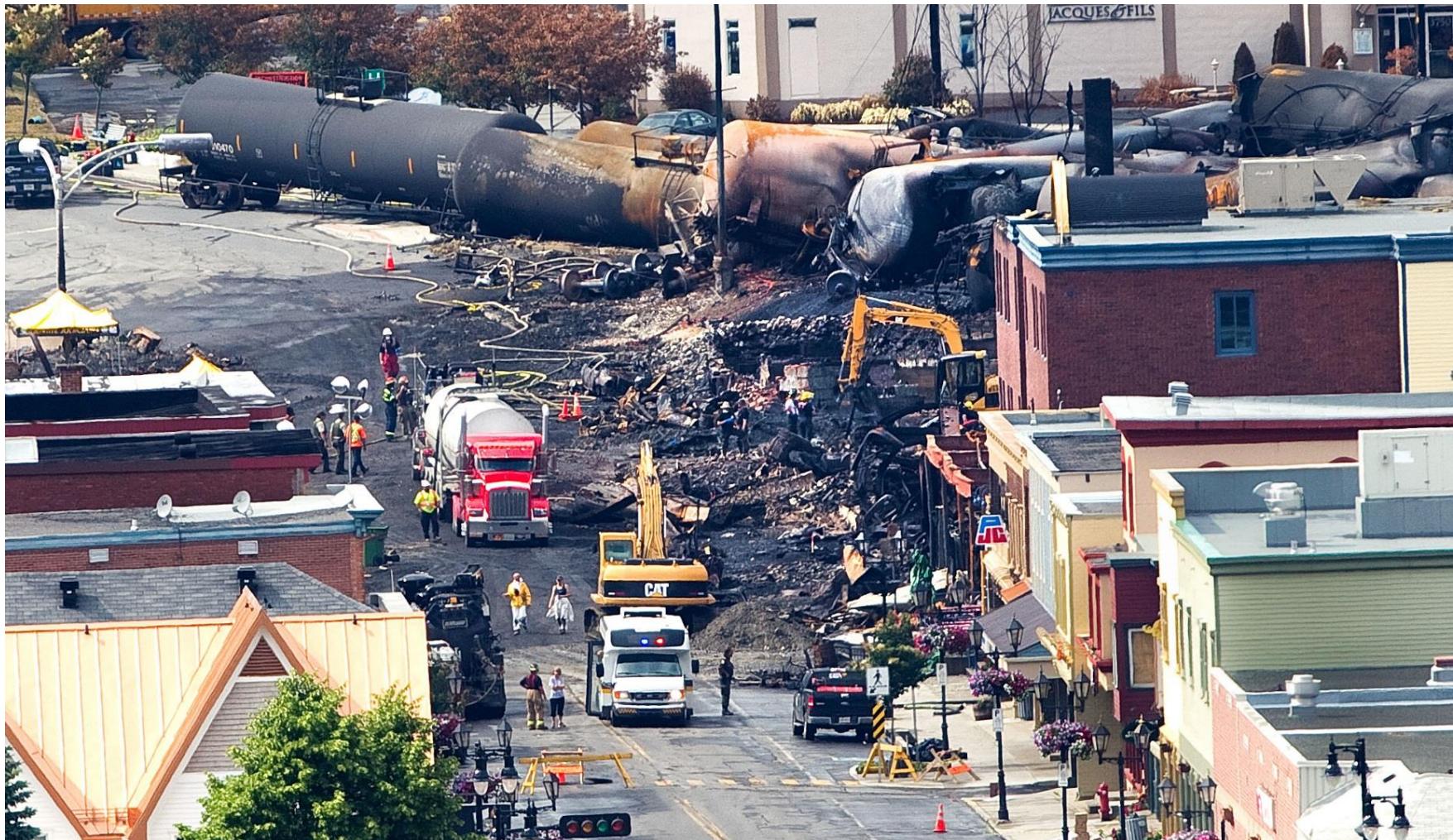
Lac-Mégantic (Canada) – juillet 2013



Lac-Mégantic (Canada) – juillet 2013



Lac-Mégantic (Canada) – juillet 2013



Lac-Mégantic (Canada) – juillet 2013



Analyse et management des risques industriels

1. Présentations
2. Objectifs et « Règles du jeu »
3. Contexte général du thème
- 4. Présentation générale du cours**

4. Présentation générale du cours

5'

- Notions techniques

Boil over

LIE

Poussières sont-elles
dangereuses ?

Etiquetage N

NIOSH

Zones Atex

Différence

Point éclair

INERIS

Détonation/déflagration ?

BLEVE

TNO

DL50

Conditions de base
explosion/incendie ?

4. Présentation générale du cours

- Introduction
 - Historique
 - Accidents industriels de référence
- Bases réglementaires
 - Réglementation suisse
 - Réglementations européenne et internationale

4. Présentation générale du cours

- Identification des dangers
 - Typologie des dangers
 - Caractéristiques
 - Identification des dangers
 - Vecteurs de propagation

4. Présentation générale du cours

- Evaluation des dommages
 - Caractérisation des cibles
 - Méthodologies d'évaluation des dommages aux cibles
 - Présentation des logiciels de références et de leur mise en œuvre

4. Présentation générale du cours

- Estimation des probabilités
 - Bases de données
 - Choix des scénarios
 - Arbres des causes et des conséquences
- Evaluations des risques
 - Concept d'acceptabilité
 - Stratégies de réduction des risques

Semaine prochaine

- Thèmes :
 - Un peu d'Histoire
 - Accidents industriels de référence
 - Réglementations
 - Présentation du « fil rouge »

Analyse et management des risques industriels



- Cours – 1
 - Feedback général

- 1. Historique**
- 2. Accidents industriels de référence**
- 3. Réglementations**
- 4. Présentation du « fil rouge »**

1. Historique

2. Accidents industriels de référence
3. Réglementations
4. Présentation du « fil rouge »

1.Historique

5'

- **Quelles sont les grandes phases historiques?**

1. Historique

- **Temps 1 : temps préhistoriques > milieu xviii**
 - Risque punition divine (fatalisme)
 - Romains appréhension dangers
 - 1^{ère} mesures pour limiter les dangers
 - premiers concepts probabilistes xvii (jeux de hasard)
 - bases probabilités / mathématiques (Pascal, Bernouilli)

1. Historique

- **Temps 2 : milieu xviii > 1980**
 - Risque ignoré (révolution industrielle)
 - Fin xix : émergence du fait social
 - Sécurité au travail (1ère réglementation)
 - WW2 + guerre froide > développement de nouvelles méthodes d'analyse des risques
 - Fiabilité militaire (dont aéronautique)
AMDEC, HAZOP, Arbre des défaillances
 - Adaptation aux industries

1. Historique

- **Temps 3 : 1980 > Aujourd’hui**
 - Développement des économies de marché : risque devient opportunité , cela induit de l'insécurité et une aversion au risque et un refus du changement.
 - Inacceptabilité sociale du risque (zéro risque)
 - Pertinence de la sursécurité (surdimensionnement, surcoûts,...)...immobilisme

1. Historique
- 2. Accidents industriels de référence**
3. Réglementations
4. Présentation du « fil rouge »

2. Accidents industriels de référence

- Accidents industriels de référence?
 - A la base des premiers textes
 - À l'origine d'évolutions réglementaires
- En 27 (Sous Tibère), à Fidènes, un amphithéâtre s'effondre 50 000 morts et blessés

2. Accidents industriels de référence

- 21 septembre 1921
Une explosion à l'usine chimique BASF d'Oppau, en Allemagne, fait **561 morts**.
- 10 juillet 1976
Un nuage toxique de dioxine se propage au-dessus de la ville italienne de Seveso, après une explosion dans une usine du groupe suisse Hoffmann-La Roche.
Plus de **200 personnes sont victimes de lésions**, des centaines d'animaux sont tués.

Accident fondateur pour la législation européenne

2. Accidents industriels de référence

- 19 novembre 1984

L'équivalent de 80 000 barils de gaz naturel (explosion de sphères de stockage de gaz de pétrole liquéfié) de l'usine Pemex à Mexico explosent, provoquant un incendie qui **tue 452 personnes, en blesse 4 248 et laisse 31 000 sans-abri.**
- 3 décembre 1984

4 000 personnes trouvent la mort à Bhopal, en Inde. A l'origine de la catastrophe, la fuite accidentelle d'eau dans un réservoir de stockage de l'usine de pesticides d'Union Carbide, qui avait provoqué l'émission, pendant deux heures, dans l'atmosphère d'une quinzaine de tonnes d'isocyanate de méthyle.

2. Accidents industriels de référence

- 21 septembre 2001

Une explosion à l'usine chimique AZF, à l'origine encore indéterminée, a fait **30 morts et 2 200 blessés**. Le site de l'usine, où 200 ouvriers travaillaient à l'heure de l'explosion, est presque totalement détruit. Les alentours sont soufflés. Deux grandes surfaces se sont écroulées sur leurs clients. **2500 personnes n'ont plus de logement**. 3 500 foyers sont privés d'électricité et de gaz.

Le réseau national de surveillance sismique (ReNaSS) a permis d'enregistrer la secousse jusqu'à une distance de 500 km et de mesurer une magnitude de 3,4 sur l'échelle de Richter.

Accident fondateur : risque /aménagement territoire

/lien/

vers
documentaire
SF1
37 min

2. Accidents industriels de référence

- 1^{er} novembre 1986

Incendie de 1200 tonnes de produits agrochimiques survenu dans un entrepôt sur le site de Schweizerhalle à Bâle (entreprise Sandoz). Un nuage nauséabond et毒ique, qui se révéla finalement inoffensif, se répandit au-dessus de Bâle. Plus de 1000 personnes ont été contraintes de consulter un médecin, voire d'effectuer un séjour hospitalier. Si les effets de l'incendie lui-même se sont finalement révélés sans gravité pour ces patients, les eaux d'extinction utilisées pour le combattre ont fait plus de dégâts: par leur biais, 10 à 30 tonnes de produits chimiques se sont déversés dans le Rhin, décimant littéralement sa population d'anguilles sur une distance de 450 kilomètres.

Accident fondateur pour la législation suisse

1. Historique
2. Accidents industriels de référence
- 3. Réglementations**
4. Présentation du « fil rouge »

3. Réglementation

Loi fédérale sur la protection
de l'environnement (LPE):

Art. 10 Protection contre les catastrophes



Ordonnance sur la protection contre les accidents majeurs (OPAM)



3. Réglementation

Art. 10 Protection contre les catastrophes

¹ Quiconque exploite ou entend exploiter des installations qui, en cas d'événements extraordinaire, peuvent causer de graves dommages à l'homme ou à l'environnement, doit prendre les mesures propres à assurer la protection de la population et de l'environnement.²¹ Il y a notamment lieu de choisir un emplacement adéquat, de respecter les distances de sécurité nécessaires, de prendre des mesures techniques de sécurité, d'assurer la surveillance de l'installation et l'organisation du système d'alerte.

² Les cantons assurent la coordination entre les services de protection contre les catastrophes et désignent un organe d'alerte.

³ Le détenteur de l'installation communique immédiatement à l'organe d'alerte tout événement extraordinaire.²²

⁴ Le Conseil fédéral peut interdire, par voie d'ordonnance, certains entreposages ou procédés de fabrication, s'il n'existe pas d'autres moyens propres à assurer une protection efficace de la population et de l'environnement.

3. Réglementation

Analyse OPAM

5'

Critères validés

Non soumis → Soumis

Entreprises utilisant des substances dangereuses

Nature : F, T, Xi, Xn, C,...
+ déchets spéciaux

Critère : Seuils quantitatifs \lien\

Installations ferroviaires
Installations routières et Rhin

Critère : Voies de grand transit avec transports de MD

Entreprises utilisant des micro-organismes génétiquement modifiés ou pathogènes

Nature : Virus, bactéries,
champignons, parasites

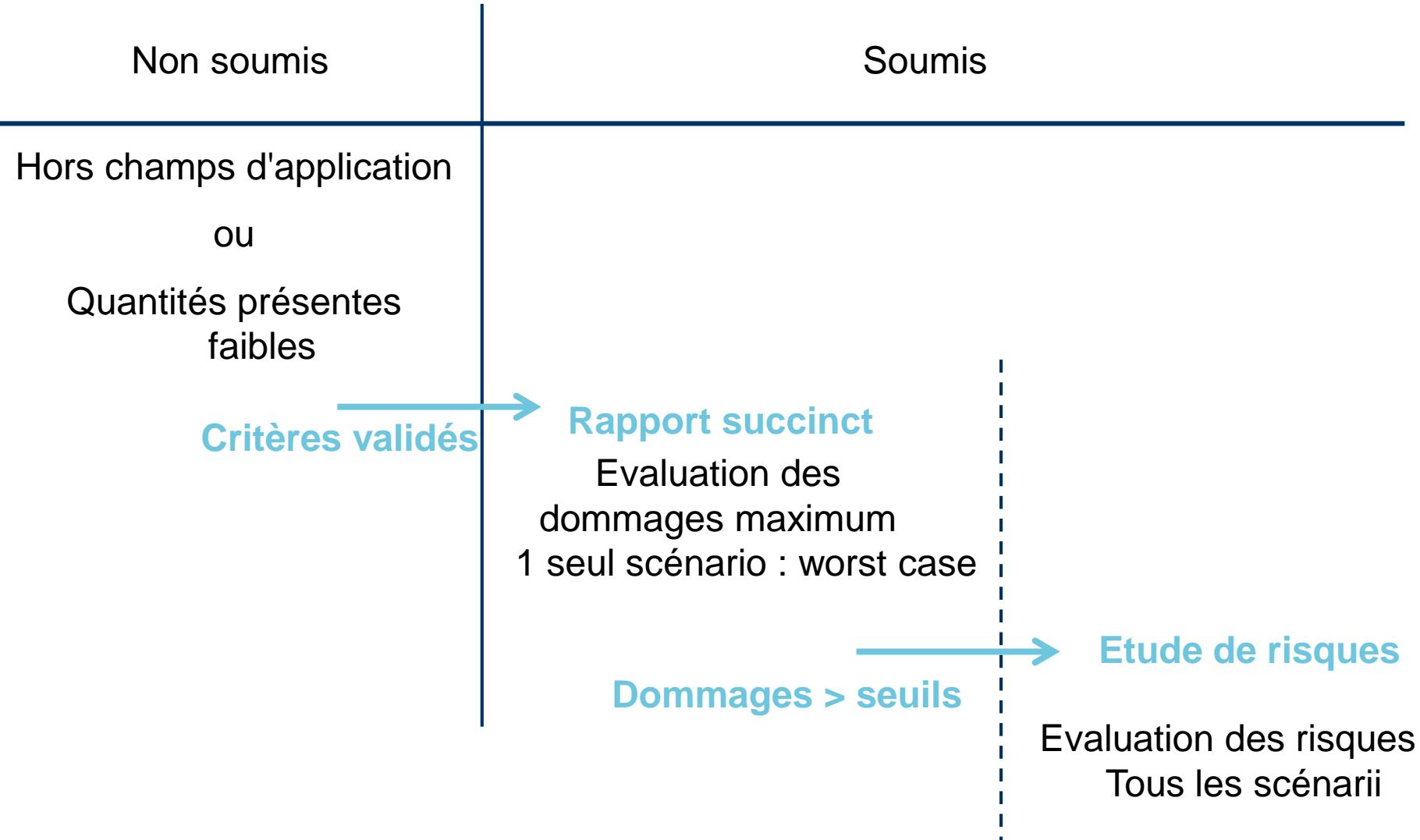
Critère : Cl. activités 3 & 4 (OUC)

Pipelines

Nature : gaz naturel et combustible liquide ou gazeux

Critère : > 5 bar

3. Réglementation



3. Réglementation

1. Identification des DANGERS

2. Détermination des DOMMAGES

3. Estimation des PROBABILITÉS

4. Evaluation des RISQUES

Critères validés

Rapport succinct

Dommages > seuils

Etude de risques

3. Réglementation (OPAM)

5'

Obligations du détenteur :

3. Réglementation (OPAM)

Obligations du détenteur :

- Notification: obtention des autorisations par procédure déterminante;
- Mise en place de mesures de sécurité préventives
- Mise en place de moyens destinés à la maîtrise des accidents;
- Elaboration d'un rapport succinct, voire d'une étude de risques;
- Elaboration d'un plan d'intervention;
- Déclaration des accidents aux autorités

3. Réglementation (OPAM)

Tâches des autorités :

- Juge l'acceptabilité du risque/danger
- Peut demander des mesures complémentaires
- Information aux tiers (consultation, cadastre);
- Organiser l'inspection;
- Coordination des interventions et de l'alerte
- Informations à fournir à la confédération.

3. Réglementation (OPAM)

Hors scope :

- les installations et moyens de transport soumis à la législation sur l'énergie nucléaire et sur la protection contre les radiations.

3. Réglementation

5'

Prérogatives et obligations :

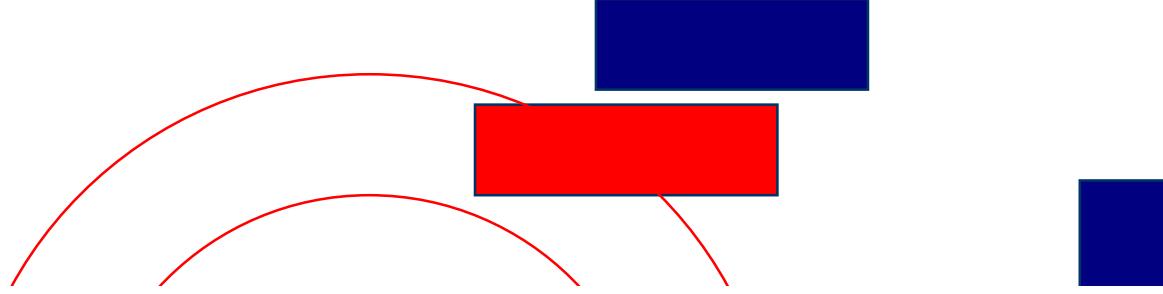
- à différents stades:
- de différentes natures:
- par différents moyens:
- à différents acteurs :

3. Réglementation

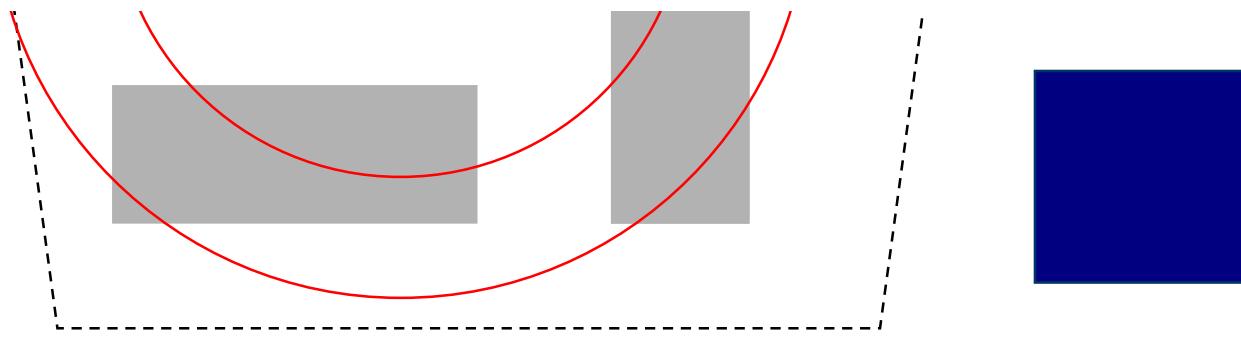
Prérogatives et obligations :

- à différents stades:
 - Autorisation
 - Construction
 - Exploitation
- de différentes natures:
 - Technique
 - Informations
 - Analyse
- par différents moyens:
 - Textes législatifs
 - Normes
 - Bonnes pratiques prof.
- à différents acteurs :
 - Exploitants
 - Autorités

OPAM et aménagement du territoire

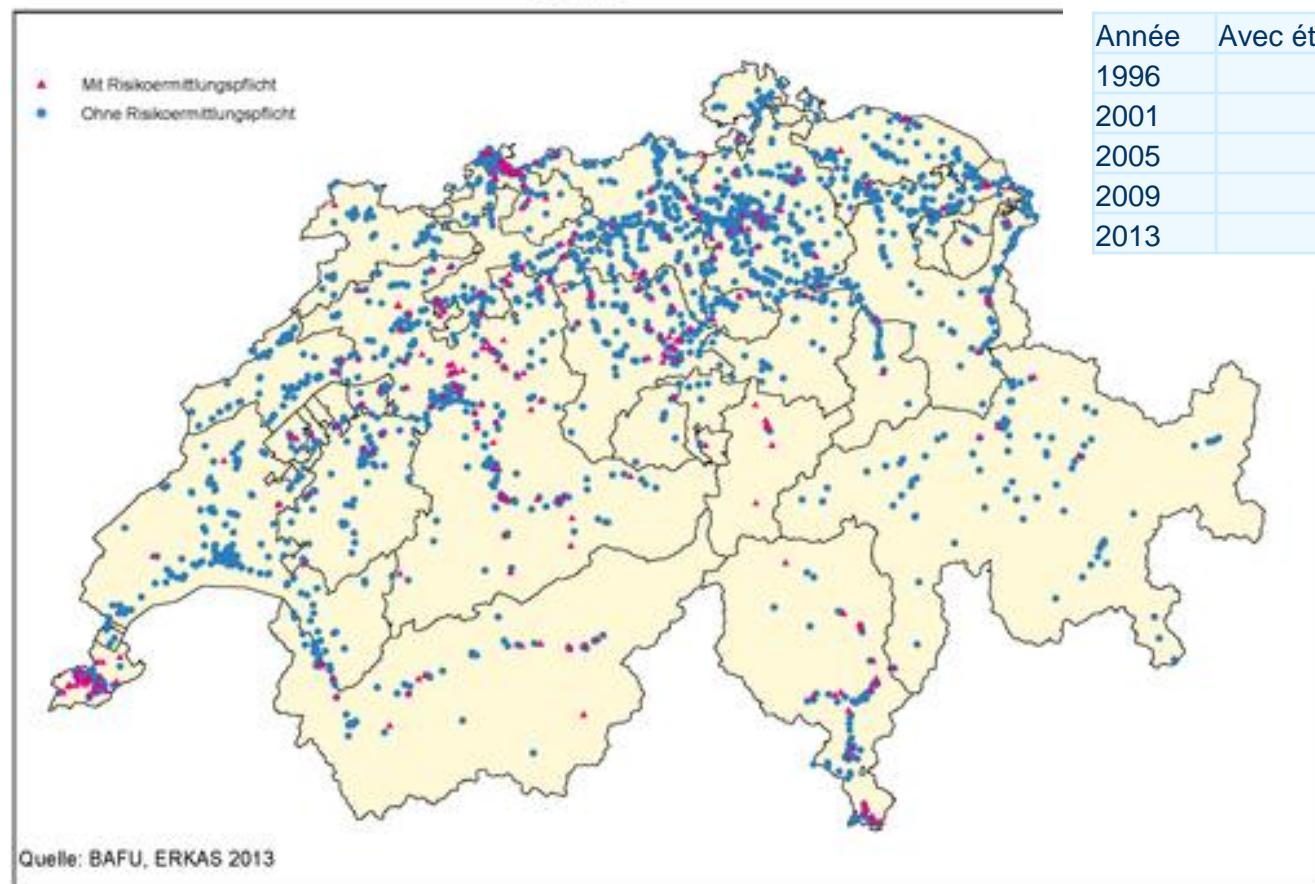


Se poser la question de l'OPAM pour
TOUS les projets



Cadastre OPAM

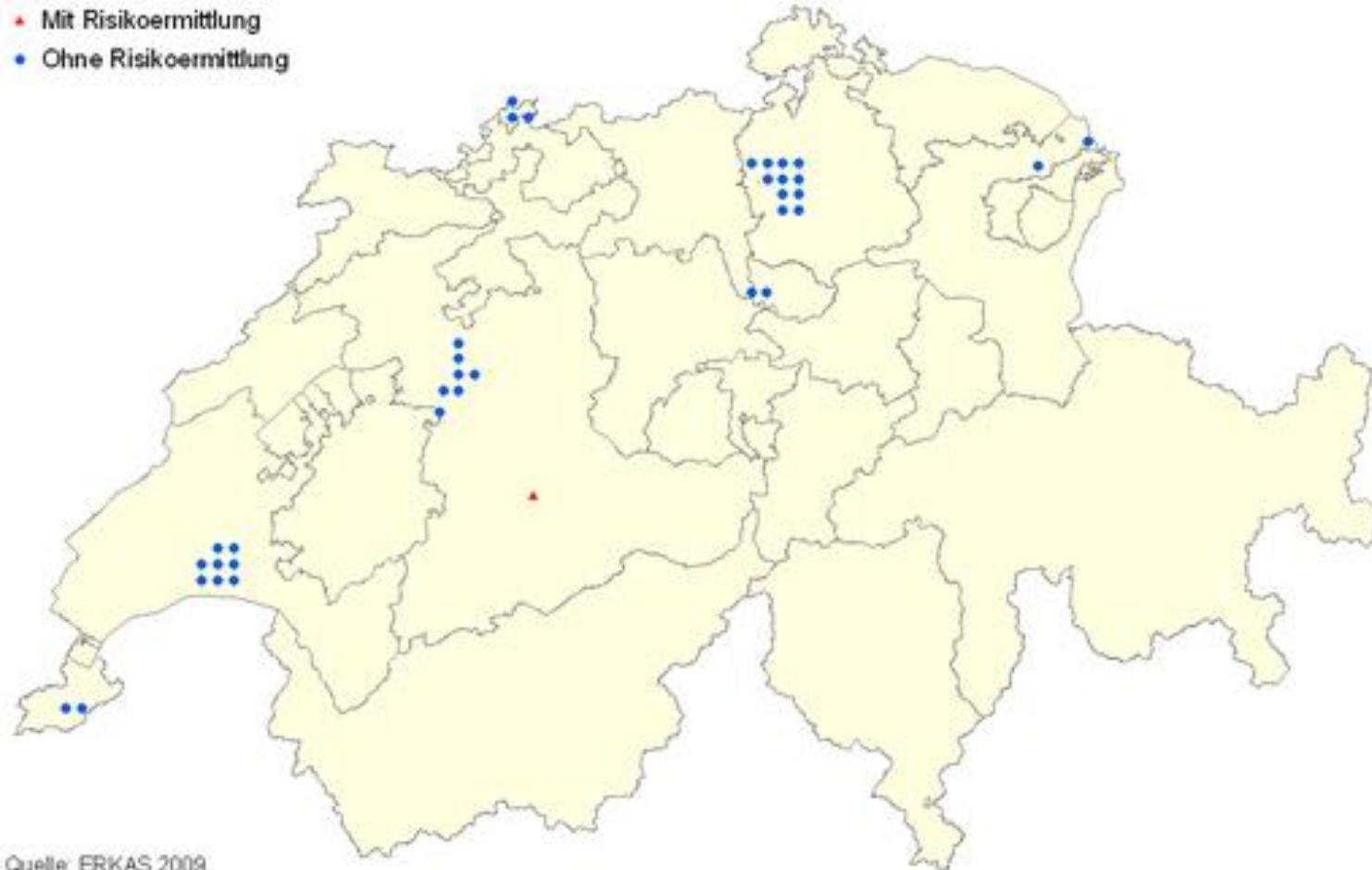
Année 2013 :
2'400 sites Opam chimiques



Année	Avec étude de risque	Sans étude de risque
1996	163	2065
2001	252	2075
2005	246	1992
2009	234	2319
2013	268	2403

Cadastre OPAM

- Mit Risikoermittlung
- Ohne Risikoermittlung

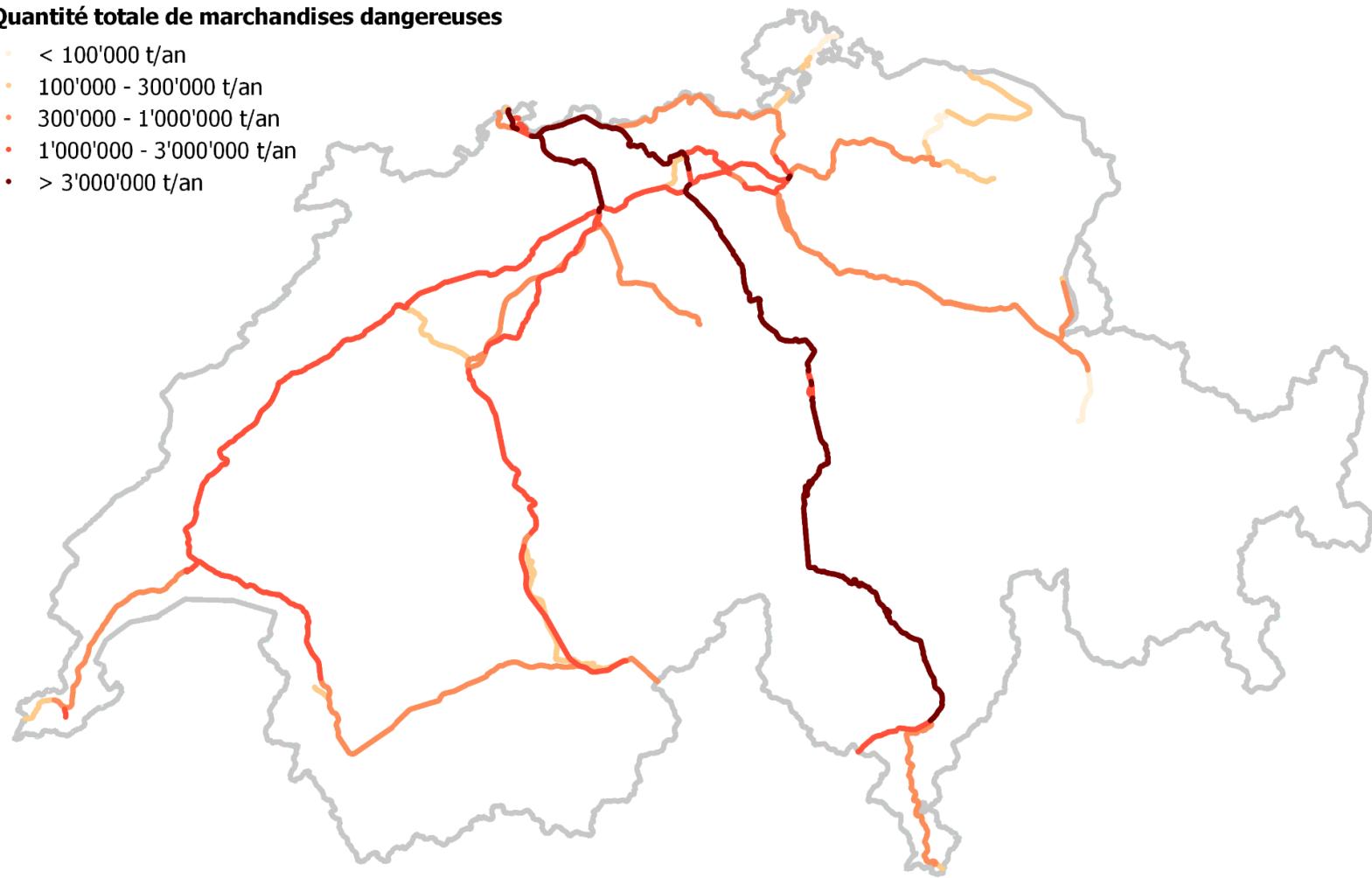


Quelle: ERKAS 2009

Cadastre OPAM

Quantité totale de marchandises dangereuses

- < 100'000 t/an
- 100'000 - 300'000 t/an
- 300'000 - 1'000'000 t/an
- 1'000'000 - 3'000'000 t/an
- > 3'000'000 t/an



Rapport succinct

1. INTRODUCTION

- 1.1 Justification du projet
- 1.2 Situation administrative du site
- 1.3 Procédure

2. DESCRIPTION DE L'ENTREPRISE (ART. 5, AL. 1, LETTRE A OPAM)

- 2.1 Présentation du détenteur
- 2.2 Présentation de l'entreprise
- 2.3 Domaine d'activités

3. DESCRIPTION DU PROJET

- 3.1 Description du site
- 3.2 Description du projet

4. DESCRIPTION DU VOISINAGE (ART. 5, AL. 1, LETTRE A OPAM)

- 4.1 Présentation du voisinage
- 4.2 Milieux naturels

Rapport succinct

5.IDENTIFICATION DES PRODUITS MIS EN ŒUVRE (ART. 5, AL. 1, LETTRE B OPAM)

5.1 Matières premières

5.2 Déchets

5.3 Récapitulatif des produits dépassant le seuil quantitatif OPAM

6.IDENTIFICATION DES DANGERS

6.1 Risques naturels

6.2 Risques d'origine externe

6.3 Risques d'origine interne

7.CONTRATS D'ASSURANCE (ART. 5, AL. 1, LETTRE D OPAM)

Rapport succinct

8. MESURES DE SÉCURITÉ (ART. 5, AL. 1, LETTRE E OPAM)

- 8.1 Principes généraux en matière de sécurité
- 8.2 Mesures prévues pour réduire le danger potentiel
- 8.3 Mesures de prévention relative à la sécurité au travail
- 8.4 Mesures destinées à prévenir les accidents majeurs
- 8.5 Mesures destinées à limiter les conséquences d'un accident majeur

9. ESTIMATION DE L'AMPLEUR DES DOMMAGES (ART. 5, AL. 1, LETTRE F OPAM)

- 9.1 Scénarios étudiés
- 9.2 Ampleur des dommages
- 9.3 Synthèse des résultats

10. CONCLUSIONS

3. Réglementation (Europe)

- Directives (Conseil)
 - à inscrire obligatoirement dans le droit du pays
 - Suisse : aucune obligation mais mouvement « permanent » de compatibilité volontaire

3. Réglementation (SEVESO)

- Directive 82-501-CEE du 24 juin 1982 : directive dite SEVESO I
 - Modifiée par d'autres directives ultérieures
 - Abrogée
- Directive 96-82-CEE du 9 décembre 1996 (directive dite SEVESO II)
 - Modifiée par d'autres directives ultérieures:
Directive 2003-105-CE
 - Abrogée

3. Réglementation (SEVESO)

- Directive 2012/18/UE du 4 juillet 2012 : directive dite SEVESO III
 - France : 1^{er} juin 2015
 - système de classification CLP
 - renforcement accès à l'information (convention d'Aarhus)

3. Réglementation

- Rôle des Normes (EN / ISO)
 - Nationales, Européennes (EN), Internationales (ISO)
 - Règles Standards (références qualité)
 - Conformes aux législations
 - Rôle dans la prévention

3. Réglementation

Réglementations internationales

- **1991 : convention ESPOO**
 - Information et consultation transfrontalier
 - Applicable à la Suisse depuis 1997
- **1998 : convention AARHUS**
 - Information et participation du public
 - Applicable à la Suisse depuis 2014

1. Historique
2. Accidents industriels de référence
3. Réglementations
- 4. Présentation du « fil rouge »**

Semaine prochaine

- Thèmes :
 - Identification des dangers

Analyse et management des risques industriels



- Cours – 1

➤ Questions ?

- 1. Identification des dangers**
- 2. Caractérisation des réactions dangereuses**
- 3. Fil rouge**

- 1. Identification des dangers**
2. Caractérisation des réactions dangereuses
3. Fil rouge

1. Identification des dangers

- **Dangers**
 - Ce qui constitue une menace pour la tranquillité ou l'existence même d'une personne, d'un bien
- **2 familles :**
 - **Industriels / technologique**
 - Périmètre large
(au-delà de l'enceinte usine)
 - **Professionnels / du travail**
 - Périmètre limité
(salariés, enceinte usine)

1. Identification des dangers

5'

Qu'est ce qui constitue une menace pour la tranquillité / l'existence d'une personne ou d'un bien ?

Quels dommages ?	Quels événements ?	Quelles cibles?

➤ à classer par sous-famille d'origine

2. Identification des dangers

- **Les dangers professionnels**

- **mécaniques** (yc manutention, transport)
- **électriques**
- **surpression** (yc acoustique)
- **rayonnement non ionisant**
- **rayonnement ionisant**
- **chimique**
- **biologique**
- **thermique**

1. Identification des dangers

• Les dangers industriels

	➤ mécaniques	Explosion (missiles)
Précursor	➤ électriques	
	➤ surpression	Explosion
Précursor	➤ rayonnement non ionisant	
	➤ rayonnement ionisant	Libération
	➤ chimique	Libération, incendie, explosion
	➤ biologique	Libération
	➤ thermique	Incendie, explosion

1. Identification des dangers

Pour les dangers industriels :

- **3 entités porteuses de dangers :**
 - Substances pures
 - Mélanges
 - Réactions chimiques (qui génèrent des substances)

-> Clé pour l'identification des dangers

- **3 phénomènes :**
 - Incendie
 - Explosion
 - Libération

-> Clé pour l'évaluation des dommages

1. Identification des dangers

5'

Quelles sont les causes à l'origine des accidents ?

5'

1. Identification des dangers

Quelles sont les causes à l'origine des accidents ?

➤ **Causes internes**

- Défaillance matériel / technique
- Défaillance humaine (erreur humaine, défaut de conception ou d'exploitation, manque de maintenance)

➤ **Causes extérieures**

- Phénomènes naturels
- Site industriel voisin
- Malveillance
- Avions, moyens de transport ext.

-> Clé pour l'élaboration des scénarios

1. Identification des dangers

Comment pouvez-vous identifier les dangers présents ?

1 - Etiquetage: législation harmonisée avec l'UE

	Ancienne législation	Nouvelle législation
UE	Directive 67/548/CEE Directive 1999/45/CE	Règlement CLP
Suisse	OChim	OChim

1. Identification des dangers

Les substances dangereuses (Classification)

Le règlement CLP définit 28 classes de danger :

- 16 classes de **danger physique**,
- 10 classes de **danger pour la santé**,
- 2 classes de **danger pour l'environnement**

Cf pdf moodle

1. Identification des dangers

4. Pictogrammes des principaux dangers (9)



1. Nom commercial du produit

TRICHLOROETHYLENE

CE: 201-167-4 CAS: 79-01-6 INDEX: 602-027-00-9

DANGER

H315 Provoque une irritation cutanée
H319 Provoque une sévère irritation des yeux
H336 Peut provoquer somnolence ou vertiges
H350 Peut provoquer le cancer-Susceptible d'induire des anomalies génétiques
H412 Nocif pour les organismes aquatiques, entraîne des effets néfastes à long terme

P202 Ne pas manipuler avant d'avoir lu et compris toutes les précautions de sécurité
P273 Eviter le rejet dans l'environnement
P308+P313 EN CAS d'exposition prouvée ou suspectée : consulter un médecin

3. Nom, adresse et numéro de téléphone

Prochim SA
xxxxxxxxxxxxxx
40YY Liège



2. Numéro d'identification

5. Mention d'avertissement (2)

6. Mentions de danger H

7. Conseils de prudence P

1. Identification des dangers

• **Substances dangereuses**



➤ ATTENTION DANGEREUX : Peut causer des irritations cutanées, des allergies, des eczémas ou une somnolence. Intoxication possible dès le premier contact avec le produit. Peut endommager la couche d'ozone.



➤ EXTRÊMEMENT INFLAMMABLE : Peut prendre feu au contact d'une flamme ou d'une étincelle, en cas de choc ou de frottements, sous l'effet de la chaleur, au contact de l'air ou de l'eau. Susceptible de s'enflammer spontanément s'il n'est pas stocké correctement.



➤ COMBURANT : Peut provoquer un incendie ou attiser un feu. Libère de l'oxygène lorsqu'il brûle, requiert donc un moyen d'extinction du feu adapté. Il est impossible d'étouffer le feu.

1. Identification des dangers

• **Substances dangereuses**



- EXPLOSIF : Peut exploser au contact d'une flamme ou d'une étincelle, en cas de choc ou de frottements, ou sous l'effet de la chaleur. Susceptible d'exploser spontanément s'il n'est pas stocké correctement
- GAZ SOUS PRESSION : Contient des gaz comprimés, liquéfiées ou dissous. Les gaz inodores ou invisibles peuvent se disperser sans que personne ne s'en aperçoive. Les récipients contenant des gaz comprimés peuvent exploser sous l'effet de la chaleur ou s'ils sont déformés.
- DANGEREUX POUR LE MILIEU AQUATIQUE : Peut nuire, en faibles quantités déjà, aux organismes aquatiques (poissons, insectes et plantes), immédiatement ou à long terme.

1. Identification des dangers

• **Substances dangereuses**



- CORROSIF : Peut provoquer de graves brûlures en cas de contact avec la peau ou les yeux. Susceptible d'endommager certains matériaux (p.ex. textiles). Nocif pour les animaux, les plantes et les matériaux organiques de toute sorte.
- DANGEREUX POUR LA SANTÉ : Peut endommager certains organes. Susceptible de porter gravement atteinte à la santé, immédiatement ou à long terme, de provoquer un cancer, d'endommager le patrimoine génétique ou d'affecter la fertilité ou le développement. Peut être mortel en cas de pénétration dans les voies respiratoires.
- TRÈS TOXIQUE : Même en petites quantités, peut provoquer de graves intoxications ou entraîner la mort.

1. Identification des dangers

Comment pouvez-vous identifier les dangers présents ?

2 - Les propriétés physico-chimiques

1. Identification des dangers

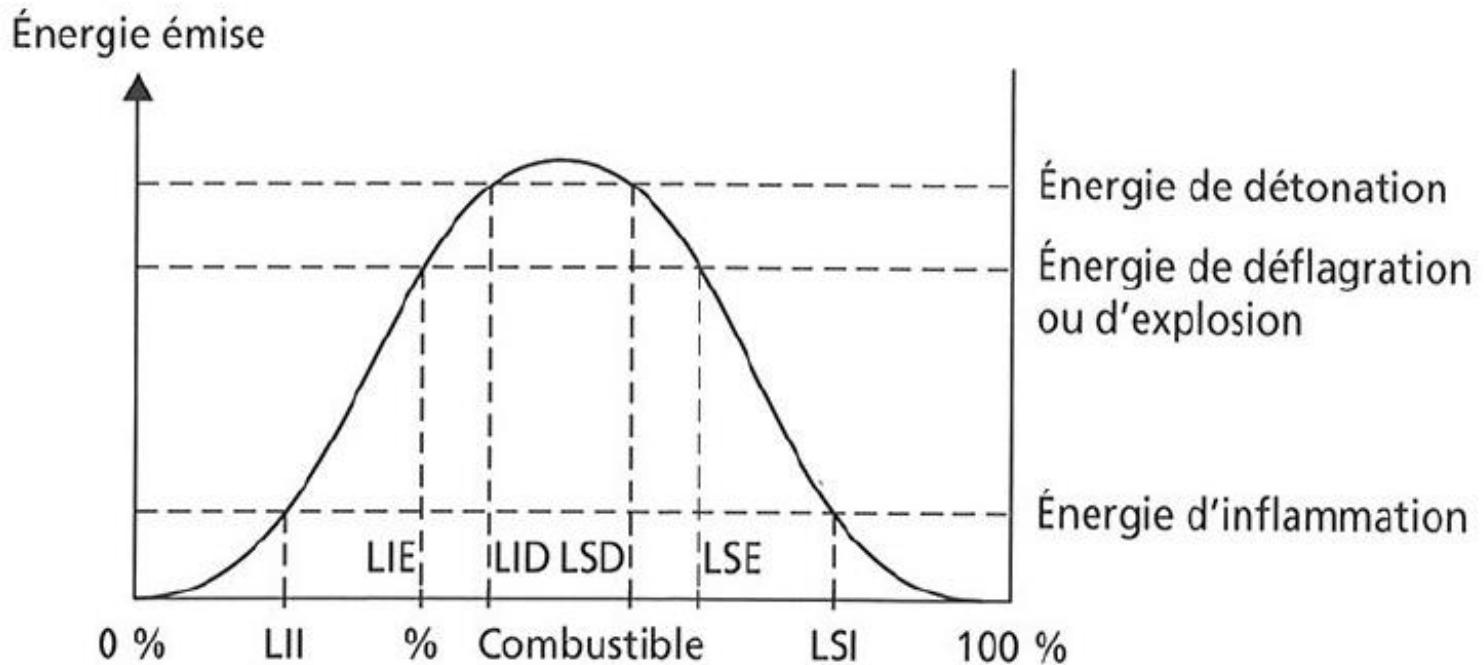
Appréciation de l'inflammabilité (liquides, solides)

- Le **point d'auto-inflammation** désigne la température minimum à laquelle une substance s'enflamme d'elle-même sans apport de flamme ou d'étincelle.

- Le **point éclair** est la température à laquelle il faut porter un solide ou un liquide contenu dans une coupelle chauffée pour que le produit s'enflamme à l'approche d'une flamme.

1. Identification des dangers

Appréciation de l'inflammabilité (gaz)



Hydrogène (4 %- 75 %) - Acétylène (2,5 %- 81 %) - Propane (2,2 %- 9,5 %)

1. Identification des dangers
2. **Caractérisation des réactions dangereuses**
3. Fil rouge

2. Caractérisation des réactions dangereuses

Réactions chimiques

Principes de base énergétiques

➤ **$E_t = E_p + E_c$**

$$E_t = E_{p_{\text{micro}}} + E_{c_{\text{micro}}} + E_{p_{\text{macro}}} + E_{c_{\text{macro}}}$$

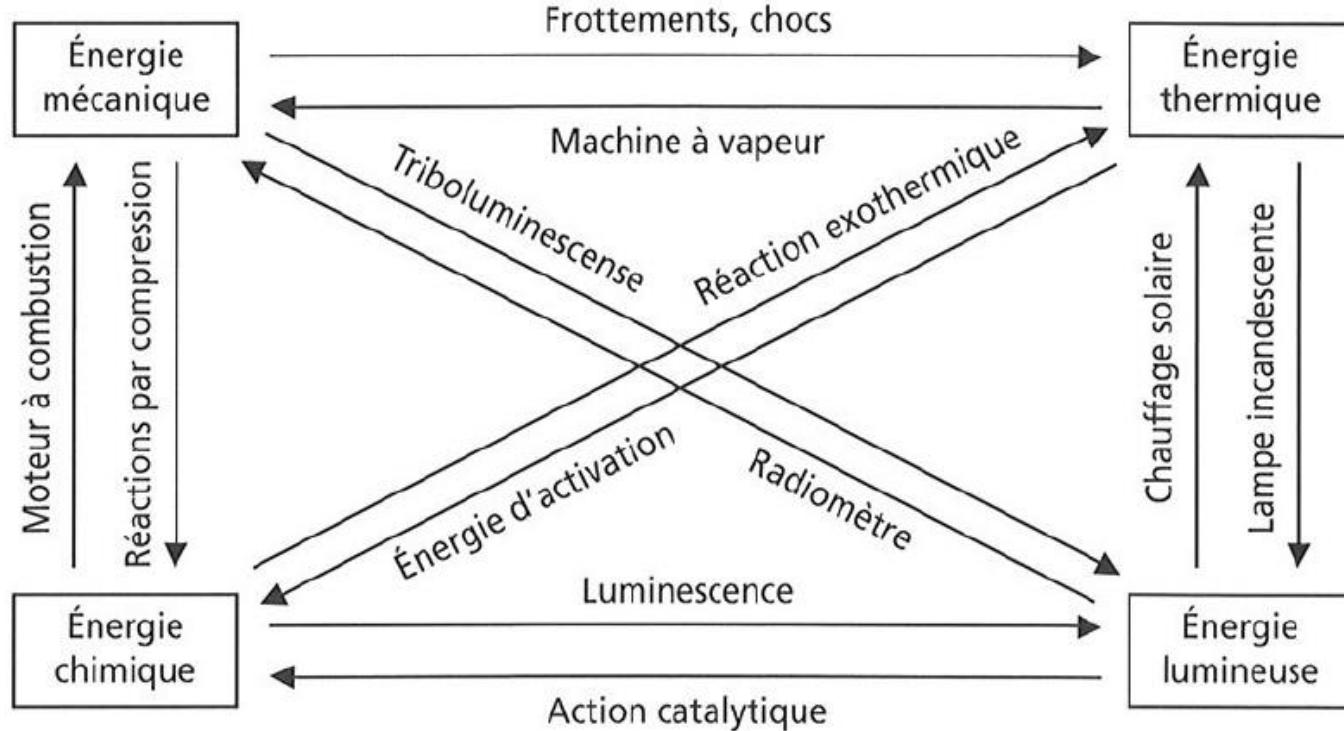
➤ **1^{er} principe de thermodynamique**

Conservation globale de l'énergie

Pas de perte mais des transferts

2. Caractérisation des réactions dangereuses

Les transferts énergétiques

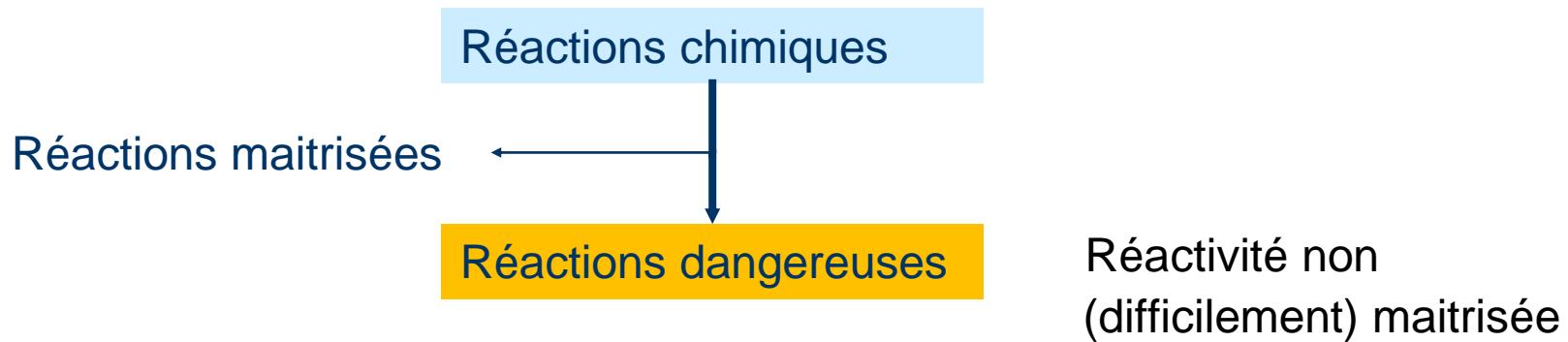


2. Caractérisation des réactions dangereuses

Réactions chimiques (caractéristiques)

- **Energie de réaction (enthalpie)**
dégagement ou absorption énergie
- **Energie d'activation** : chaleur, ..., catalyseur
- **Vitesse de réaction =f()**
température, concentration, division particules,
poids moléculaires

2. Caractérisation des réactions dangereuses



- Se traduisent par (ou/et):
- Forte production de chaleur (emballage)
 - Incendie
 - Explosion
- Générations de composés nocifs
 - Libérations
 - ex : javel + acide : $\text{HClO} + \text{H}^+ + \text{Cl}^- \rightarrow \text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O}$

2. Caractérisation des réactions dangereuses

5'

Générations de composés nocifs

2. Caractérisation des réactions dangereuses

5'

Générations de composés nocifs

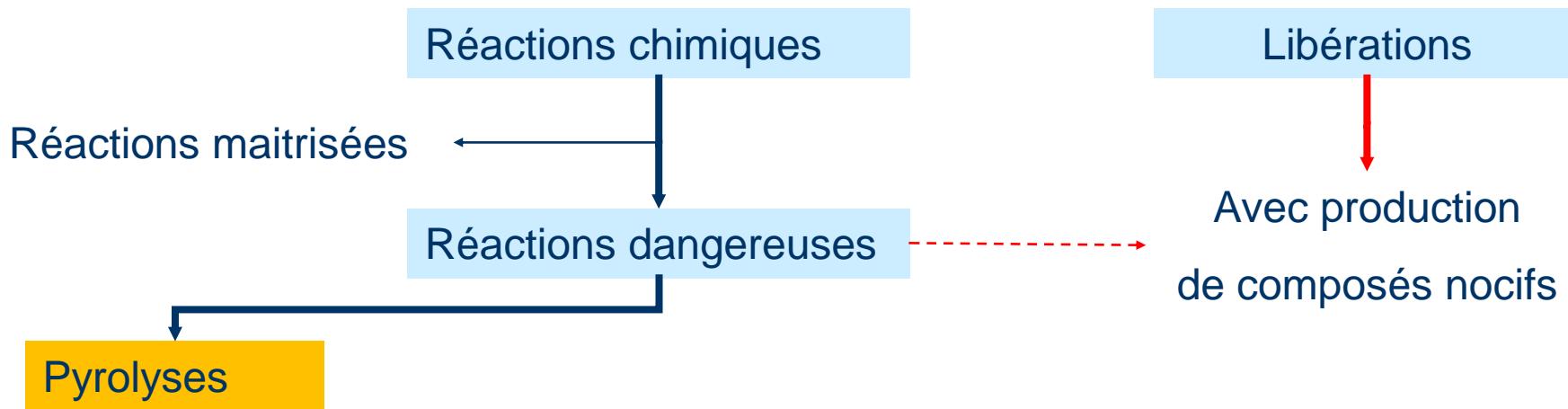
1. Synthèse

- réaction chimique non contrôlée
- dégradation (mauvaises conditions de stockage)
T°C, humidité, rayonnement
- impuretés (transvasement, réacteurs polyvalents)

2. Substance présente et rupture de confinement

- Gaz et vapeurs
- Liquide (liquide, brouillard)
- Solide (poussières)

2. Caractérisation des réactions dangereuses



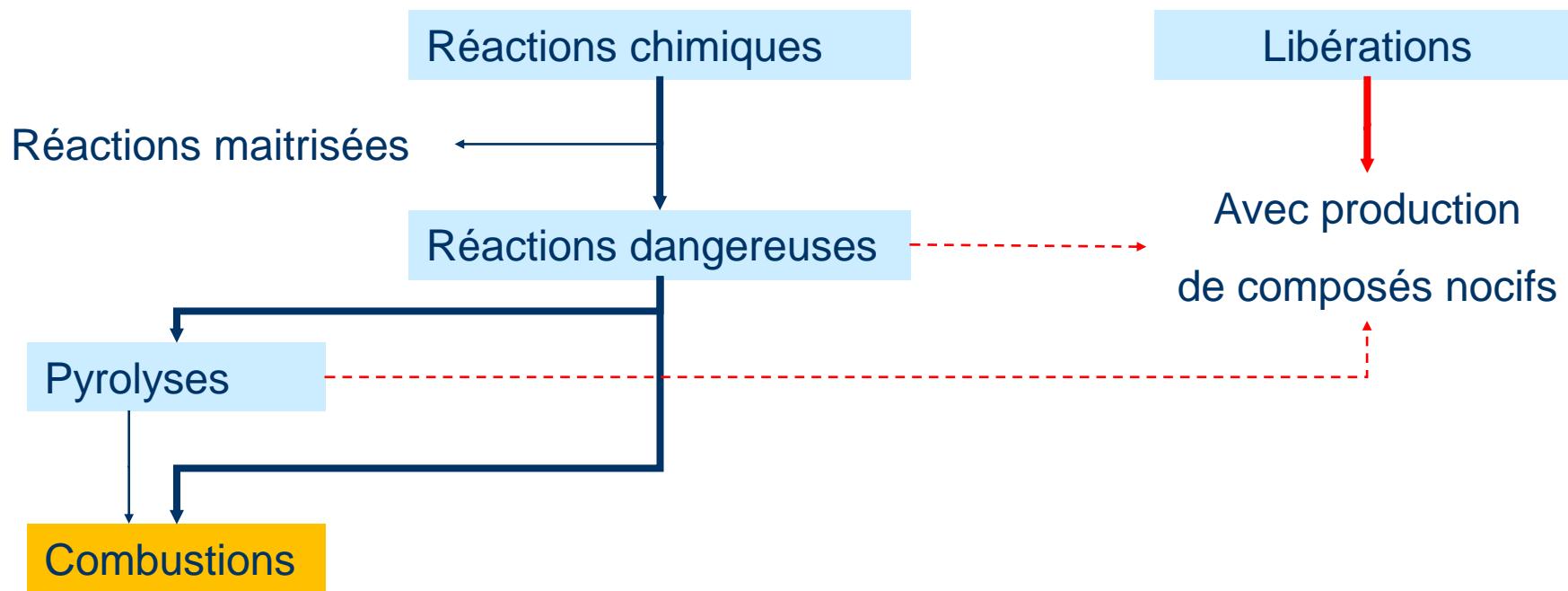
2. Caractérisation des réactions dangereuses

Réactions de pyrolyse

Stable -> décomposition f(°c)

- 100-150°C : modification propriétés mécaniques et physiques
- ~200°C : début décomposition avec changement couleur + texture
- ~300°C : poursuite décomposition avec dégagement gazeux avec inflammation possible
- ~500-700°C : organiques en décomposition complète
- ~700-900°C: minéraux en décomposition partielle

2. Caractérisation des réactions dangereuses



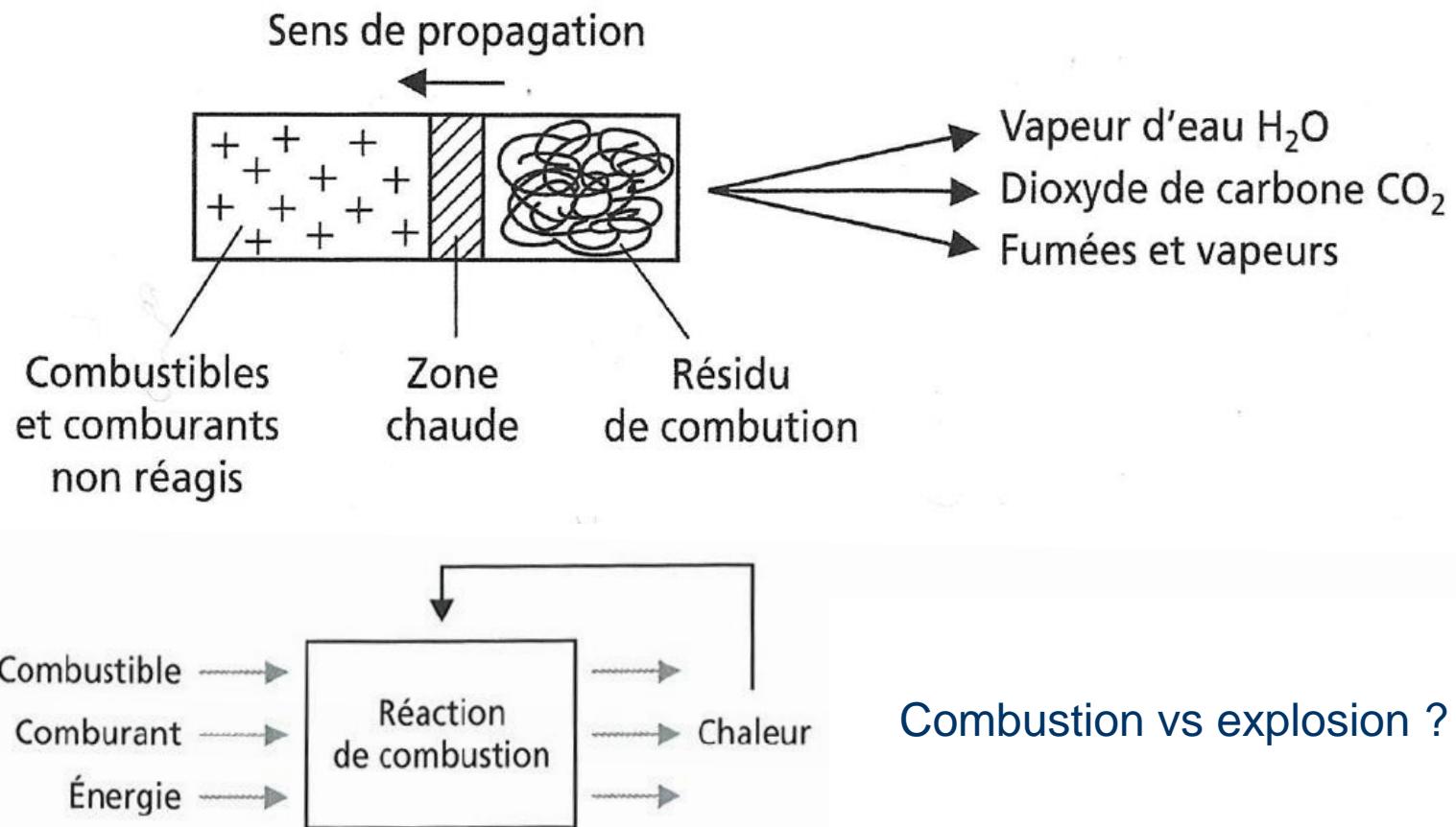
2. Caractérisation des réactions dangereuses

La réaction de combustion

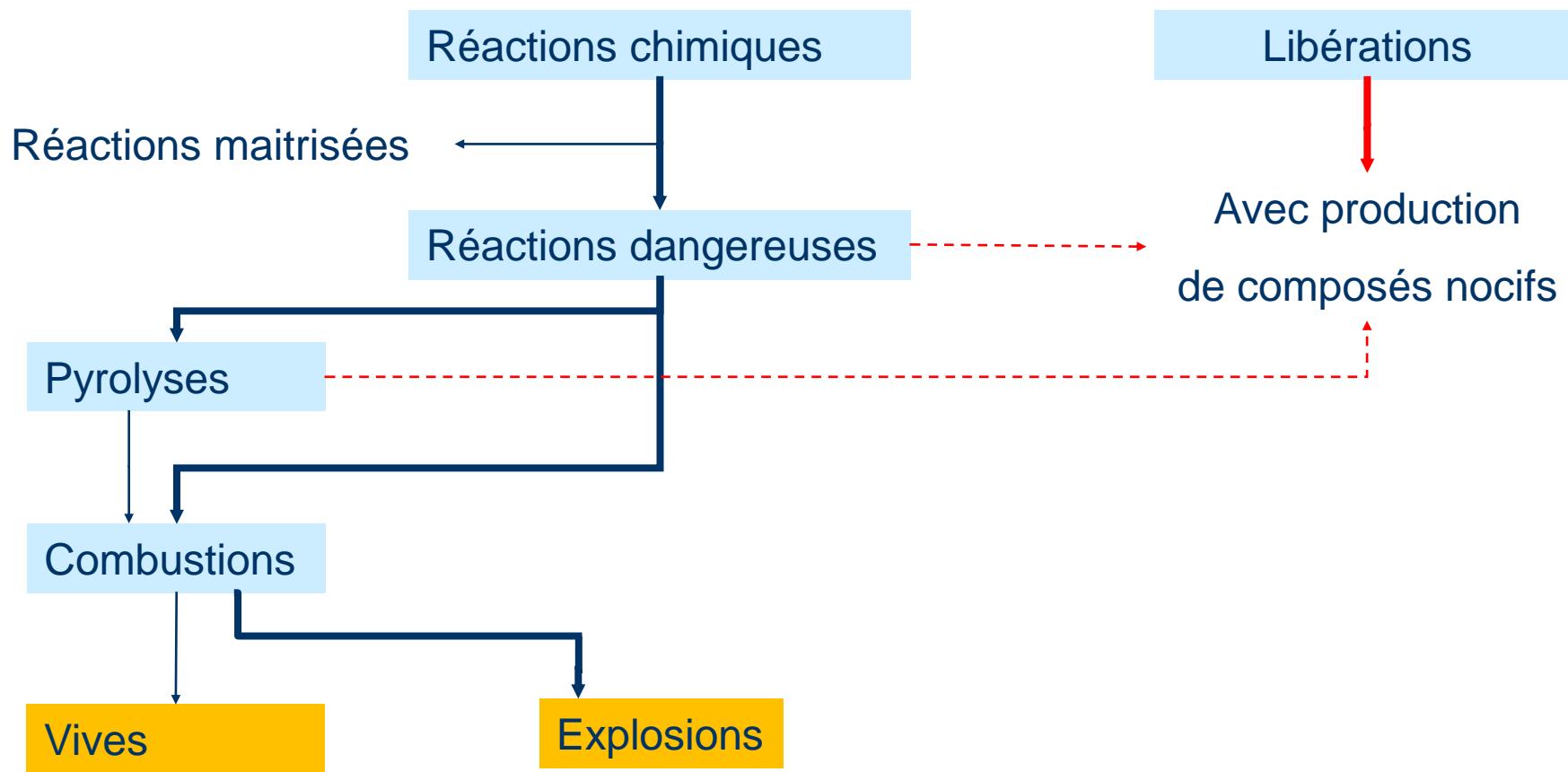
- réaction classique et maîtrisée
(chauffage, moteur)
- réaction oxydation (O_2 atmo)
 - Fixation sur molécule de base
 - Destruction molécule de base (combustion)

2. Caractérisation des réactions dangereuses

La réaction de combustion



2. Caractérisation des réactions dangereuses



2. Caractérisation des réactions dangereuses

Les réactions explosives

Nécessite un amorçage (chimique : catalyseur ou non chimique: mécanique, thermique,...)

- **Dégagement important de chaleur**
- **Vitesse de réaction élevées**
- **Formation de gaz**

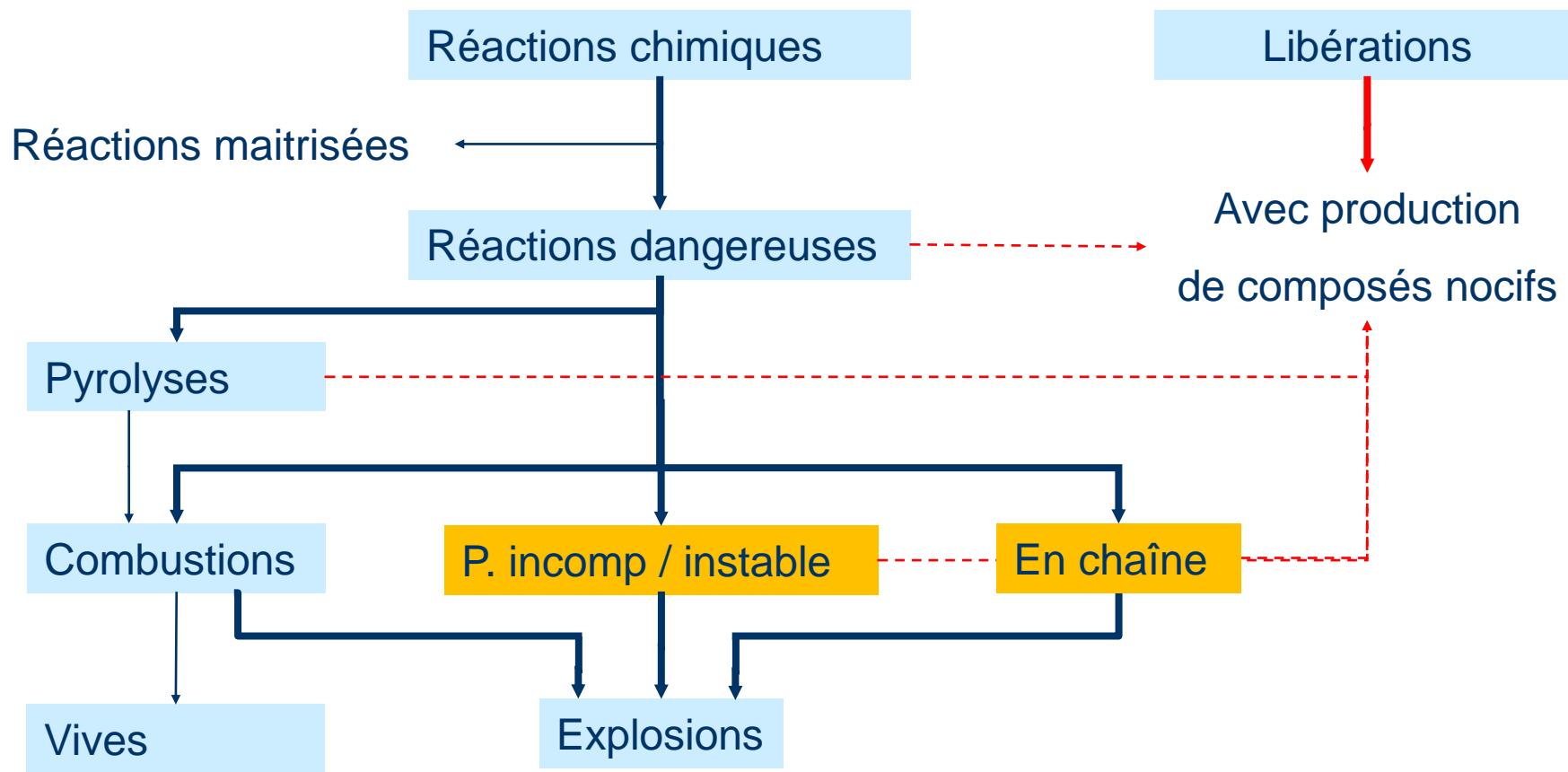
Libérations de gaz chauds sous pression
-> onde de choc

2. Caractérisation des réactions dangereuses

Incendies vs Explosions

- **réaction plus lente**
- **durée du phénomène plus longue**
- **pas d'onde de choc**
- **mise en œuvre de la matière par pyrolyse (vs éclatement de la matière)**

2. Caractérisation des réactions dangereuses



2. Caractérisation des réactions dangereuses

Réactions chimiques explosives

- **réaction de combustion**
- **réaction en chaîne (oxydo-réduction,...)**
- **décomposition produits instables**

2. Caractérisation des réactions dangereuses

Réactions en chaîne

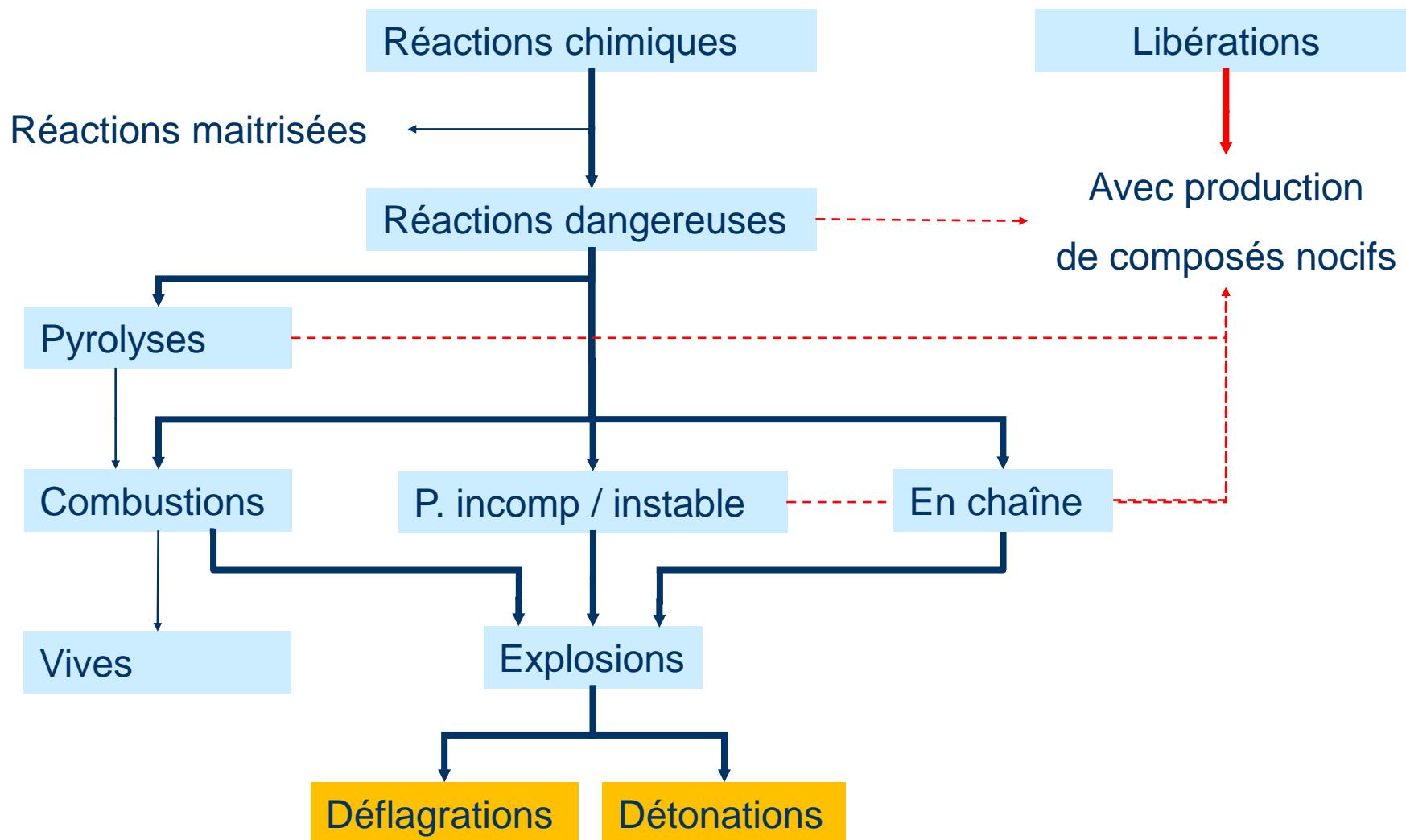
- **Un paramètre nécessaire à la réaction est produit par la réaction elle-même**
 - oxydoréductions
 - polymérisations
 - Polymérisations (+/-)
 - Polycondensations (++)
 - Polyadditions (+ mais eau)
 - réactions nucléaires

2. Caractérisation des réactions dangereuses

Explosifs

- **Molécules avec fonctions oxydantes et réductrices**
- **Décompositions molécules instables**
- **Types d'explosion :**
 - **Décomposition lente (propulsion fusée)**
 - **Déflagration**
 - **Détonation**

2. Caractérisation des réactions dangereuses



2. Caractérisation des réactions dangereuses

- **Explosions (type)**
 - **Déflagration (vitesse de réaction lente)**
 - Front de flamme 100m/s
 - Energie dégagée sur « longue durée »
 - P + faible
 - Onde de choc faible
 - Faible ampleur (pouvoir destructeur)
 - **Proche combustion (hors onde de choc)**
 - **maitrisée = propulsion des fusées**

2. Caractérisation des réactions dangereuses

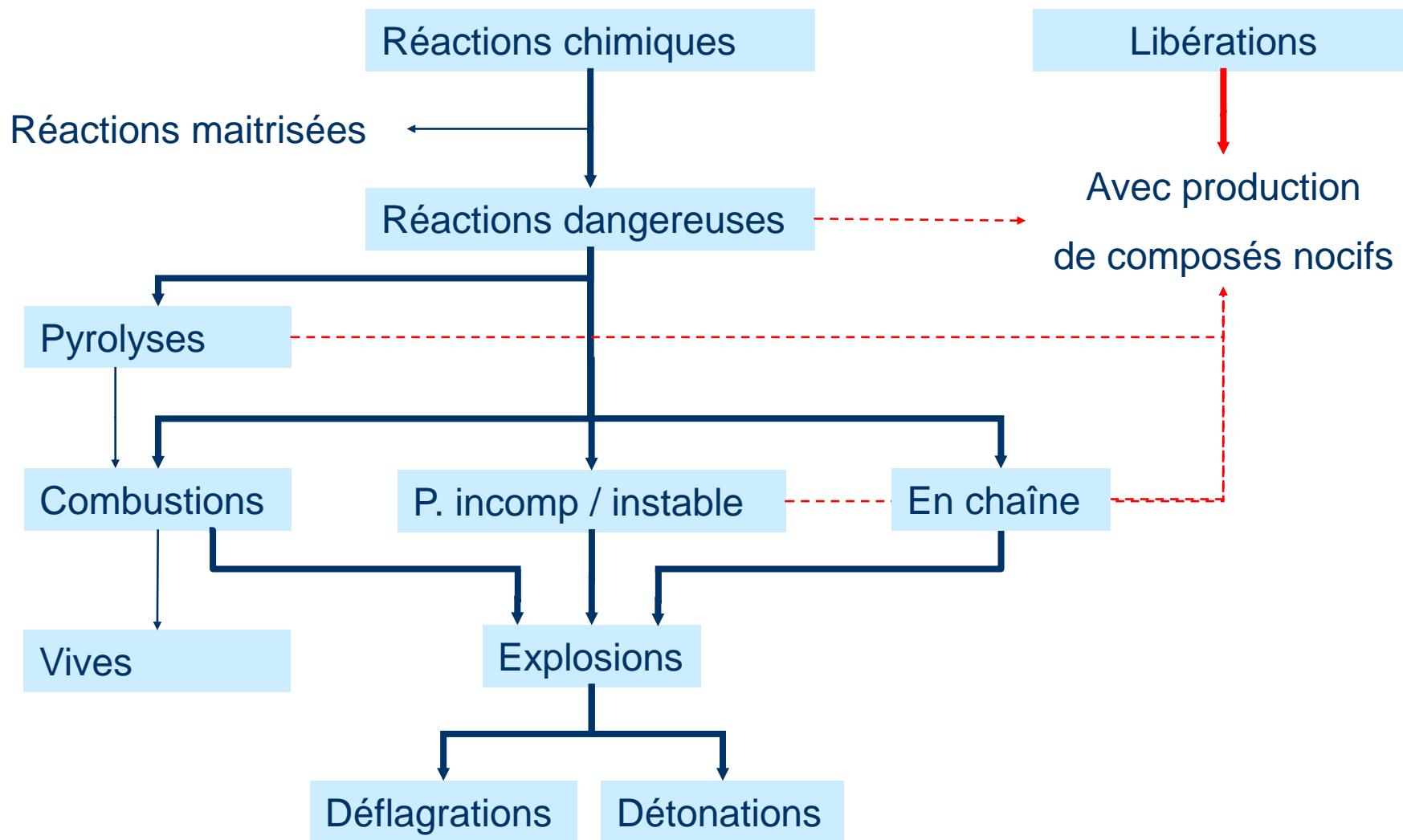
- **Explosions (type)**

- **Détonation (vitesse de réaction rapide)**

- **Front de flamme plusieurs km/s**
- **Energie dégagée sur 300 ms**
- **Onde de choc forte**
- **Forte ampleur (pouvoir destructeur)**

- **Exemple (Explosifs, AZF)**

2. Caractérisation des réactions dangereuses



Analyse et management des risques industriels



Généralités

- Cours – 1
 - Questions ?

Généralités

Dossier Sciences et Nature

Le prix de la catastrophe

Marées noires, pollutions au mercure, à la dioxine ou encore accidents nucléaires... les catastrophes jalonnent l'histoire industrielle. Avec des conséquences humaines et écologiques dramatiques; avec des enseignements aussi, payés au prix fort. Dans notre dossier, retour sur les terribles méfaits de l'industrie à Minamata, Seveso, Bhopal ou Schweizerhalle.

8 documents vidéo & audio à consulter



La marée noire

Sciences et Nature Vidéo 23 min.
15 avril 1967 Carrefour international

Le naufrage du Torrey Canyon provoque une première marée noire.



Japon sous mercure

Sciences et Nature Audio 18 min.
25 avril 1975 Henri Guillemin vous parle de...

Un livre dénonce la catastrophe écologique au mercure de Minamata.



Un nuage à Seveso

Vidéo 9 min.
21 février 1983 A bon entendeur

En juillet 1976, de la dioxine se répand sur la ville italienne de Seveso.

<http://www.rts.ch/archives/dossiers/4716050-le-prix-de-la-catastrophe.html>

- 1. Caractérisation des effets / dommages**
 - 1. Flux thermiques**
 - 2. Ondes de surpression**
 - 3. Toxicité**

1. Caractérisation des effets / dommages

1. Flux thermiques
2. Ondes de surpression
3. Toxicité

Flux radiatifs

- concerne:
 - incendies
 - explosions
- énergie thermique incendie :
 - 10 % pour l'activation et la propagation du feu (INRS)
 - 25 % par rayonnement (ARQUES)
 - 65 % par conduction-convection

Flux radiatifs

➤ pour les effets sur les structures :

- 5 kW/m^2 , seuil des destructions de vitres significatives;
- 8 kW/m^2 , seuil des effets domino et correspondant au seuil de dégâts graves sur les structures;
- 16 kW/m^2 , seuil d'exposition prolongée des structures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures, hors structures béton;
- 20 kW/m^2 , seuil de tenue du béton pendant plusieurs heures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures béton;
- 200 kW/m^2 , seuil de ruine du béton en quelques dizaines de minutes.

Flux radiatifs

➤ pour les effets sur l'homme :

- 3 kW/m^2 ou $600 [(\text{kW/m}^2)^{4/3}] \cdot \text{s}$, seuil des effets irréversibles correspondant à la zone des dangers significatifs pour la vie humaine ;
- 5 kW/m^2 ou $1000 [(\text{kW/m}^2)^{4/3}] \cdot \text{s}$, seuil des premiers effets létaux correspondant à la zone des dangers graves pour la vie humaine;
- 8 kW/m^2 ou $1800 [(\text{kW/m}^2)^{4/3}] \cdot \text{s}$, seuil des effets létaux significatifs correspondant à la zone des dangers très graves pour la vie humaine.

1. Caractérisation des effets / dommages

1. Flux thermiques
2. Ondes de surpression
3. Toxicité

Surpressions

- Concerne:
 - explosions

- pour les effets sur les structures :
 - 20 hPa ou mbar, seuil des destructions significatives de vitres¹;
 - 50 hPa ou mbar, seuil des dégâts légers sur les structures;
 - 140 hPa ou mbar, seuil des dégâts graves sur les structures;
 - 200 hPa ou mbar, seuil des effets domino;
 - 300 hPa ou mbar, seuil des dégâts très graves sur les structures.

Surpressions

- pour les effets sur l'homme :
 - 20 hPa ou mbar, seuils des effets irréversibles correspondant à la zone des effets indirects par bris de vitre sur l'homme¹ ;
 - 50 hPa ou mbar, seuils des effets irréversibles correspondant à la zone des dangers significatifs pour la vie humaine ;
 - 140 hPa ou mbar, seuil des premiers effets létaux correspondant à la zone des dangers graves pour la vie humaine;
 - 200 hPa ou mbar, seuil des effets létaux significatifs correspondant à la zone des dangers très graves pour la vie humaine.

1. Caractérisation des effets / dommages

1. Flux thermiques
2. Ondes de surpression
3. Toxicité

Toxicité

- concerne:
 - incendies
 - explosions
 - libérations
- **Substances dangereuses selon Ochim**



Toxicité

- Toxicologie : science (complexe)
 - Effets :
 - bénéfiques (médecine)
 - néfastes (réversibles, irréversibles)
 - « c'est la dose qui fait le poison »
 - Relations substances vs cibles

Toxicité

- Rencontre fonction de :

- substances (type et quantité)
- cibles (type)
- durée

Toxicité

- Rencontre fonction des substances :
 - type
 - nocivité
 - comportement
 - à seuil de dose (capacités de détoxification)
 - sans seuil de dose (reprotoxiques, mutagènes, cancérogènes)
 - provenances
 - substances présentes (libérations)
 - les substances produites (incendie, réactions)
 - les substances dégradées dans le milieu extérieur après libération

Toxicité

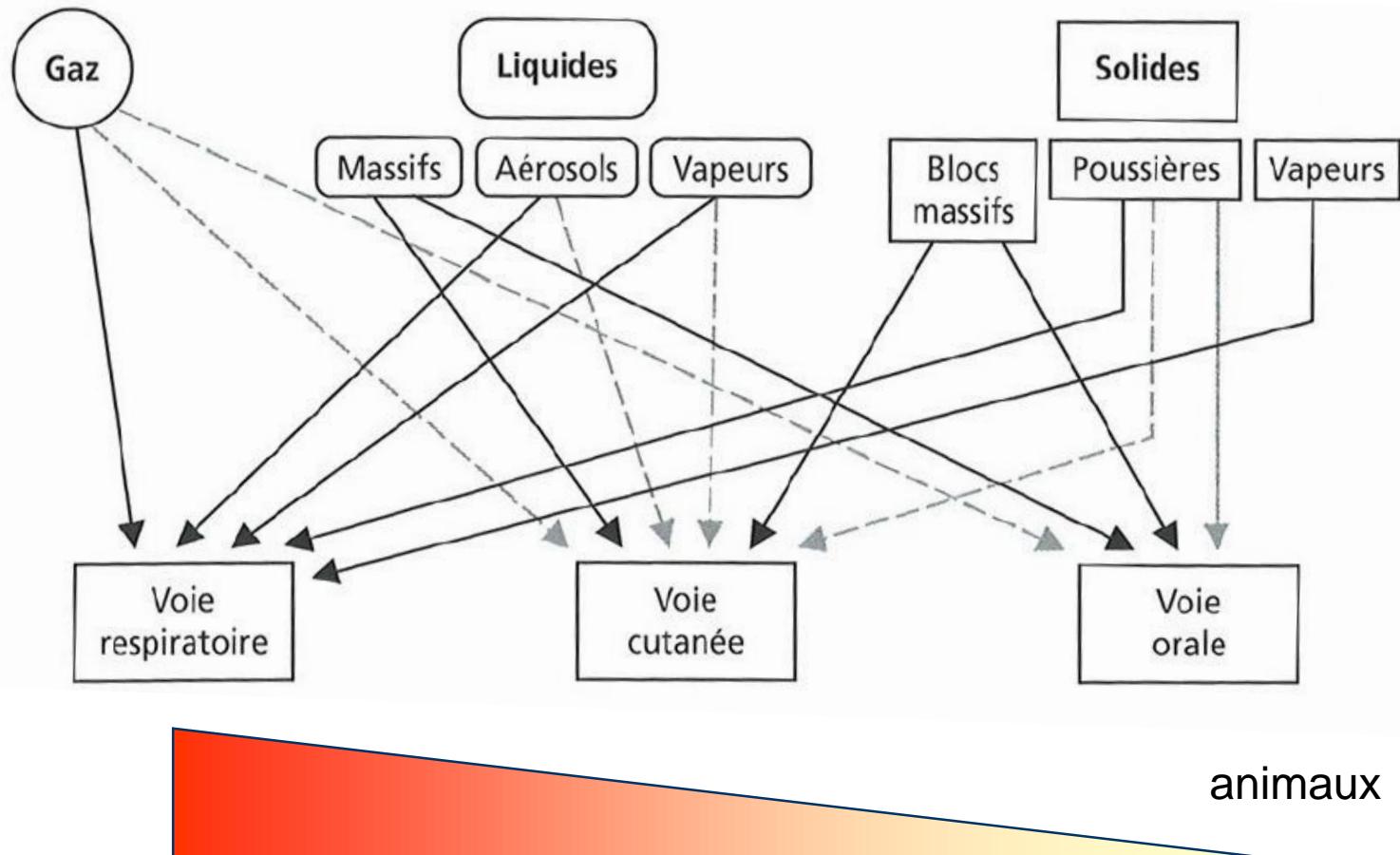
- Rencontre fonction de la cible :
 - type : être humain, faune, flore
 - type : vulnérabilité dépend de l'individu
 - facteur héréditaire
 - âge
 - sexe
 - santé

Toxicité

- Rencontre fonction de la durée :
 - Exposition
 - Apparition des effets
 - aiguë (instantané)
 - à court terme (plusieurs jours, mois)
 - à long terme (chronique plusieurs années)

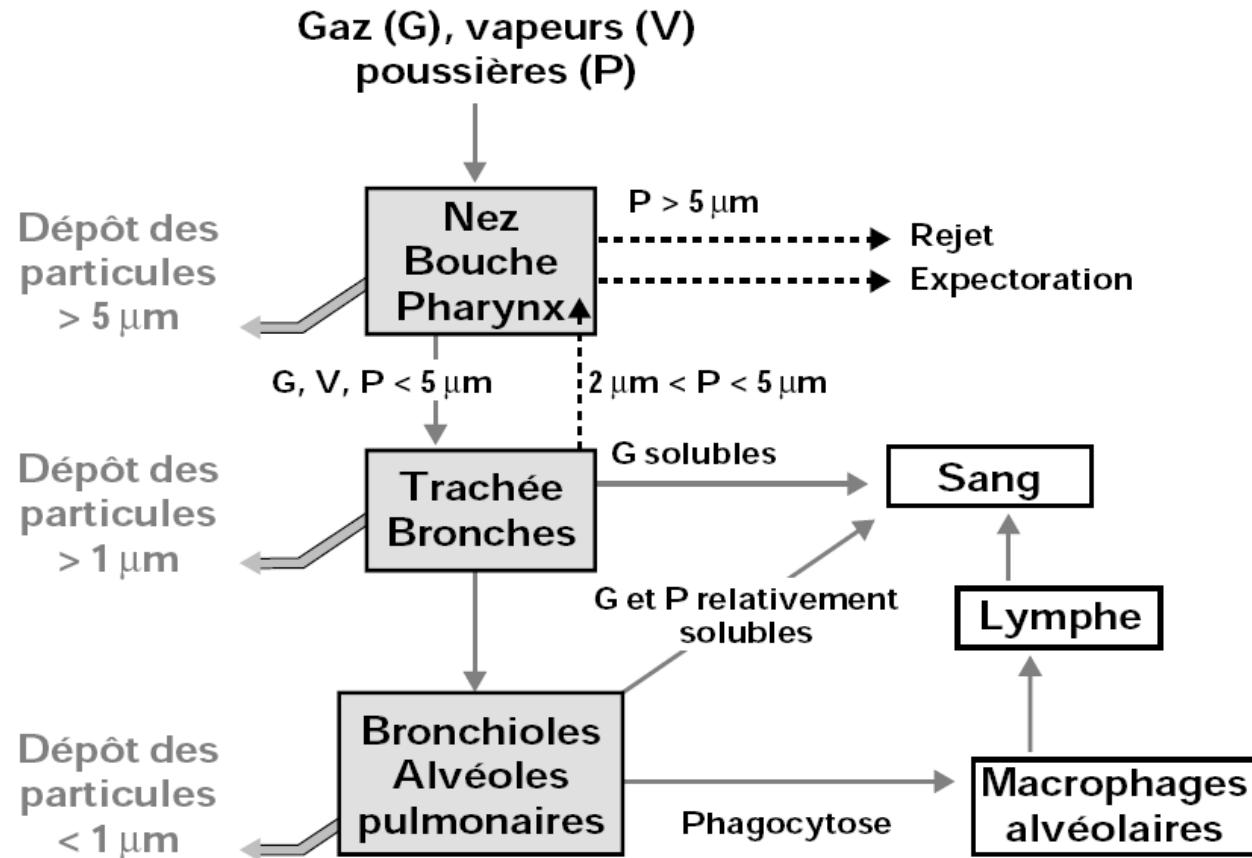
Toxicité

Les voies de pénétration



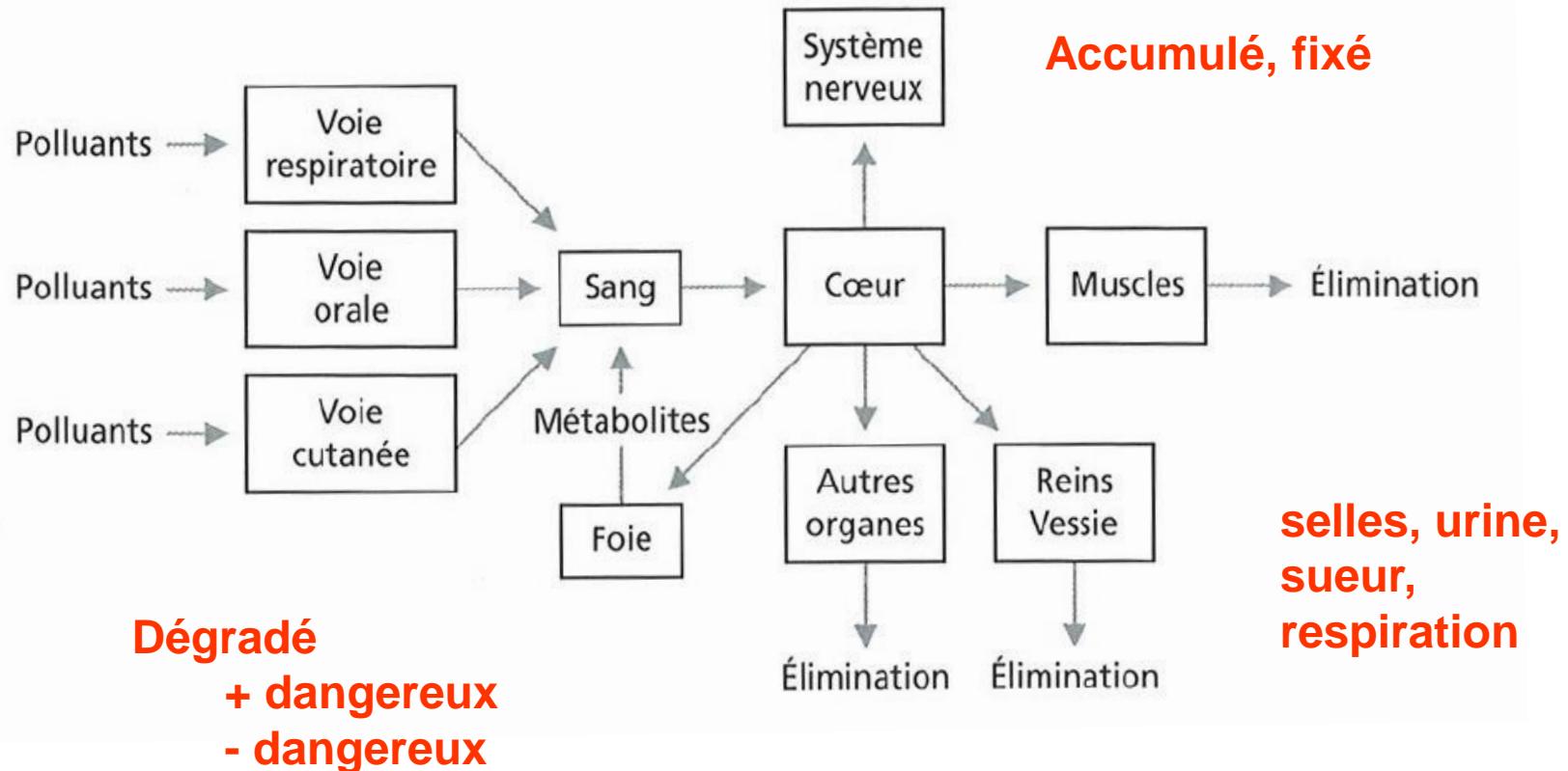
Toxicité

Détails de la pénétration pulmonaire



Toxicité

Mécanisme général de circulation



Toxicité

- Perturbations du fonctionnement
 - Fixation
 - Liposolubles : fixation sur tissus gras
 - ex : Solvant : tissu nerveux (maux de tête, état d'ébriété)
 - Fixation sans transport sang
 - Poussières (poumon) ex amiante
 - Métabolisation (oxydation foie)
 - ex : Benzène -> phénol (moelle osseuse)

Toxicité

- Réaction avec les tissus
 - Fixation eau
 - Acides, chaux, soude, chlore, ammoniac -> destruction des tissus
 - Réaction chimique (disparition molécule)
 - Isocyanates + protéines -> uréthane
 - Phosgène + eau -> HCl
 - Fixation partielle
 - HCN / CO complexe avec Fe (transport O₂ bloqué)
 - Fixation sur lipides
 - Cl₂ -> disfonctionnement mol.lipidique

Toxicité - Seuils caractéristiques

- Toxicité : construction des seuils
- les seuils dépendent de :
 - substances (type et quantité)
 - cibles (type)
 - durée
- différentes valeurs de références car :
 - développé à des fins spécifiques
 - type de population concernée
 - qualité de la documentation

Toxicité - Seuils caractéristiques

- Pas de seuils suisses
- Travail avec les seuils étrangers après validation préalable des autorités

Toxicité - Seuils caractéristiques

AEGL : Acute Exposure Guidelines Level



ERPG : Emergency Response Planning Guidelines

IDLH : Immediately Dangerous to Life or Health



Pays	Seuils utilisés
Autriche	IDLH
Belgique	ERPG-3
France	SEL (Seuil des Effets Létaux) SEI (Seuil des Effets Irréversibles)
Allemagne	ERPG-2
Italie	LC50 et IDLH
Portugal	AEGL ou ERPG recommandés

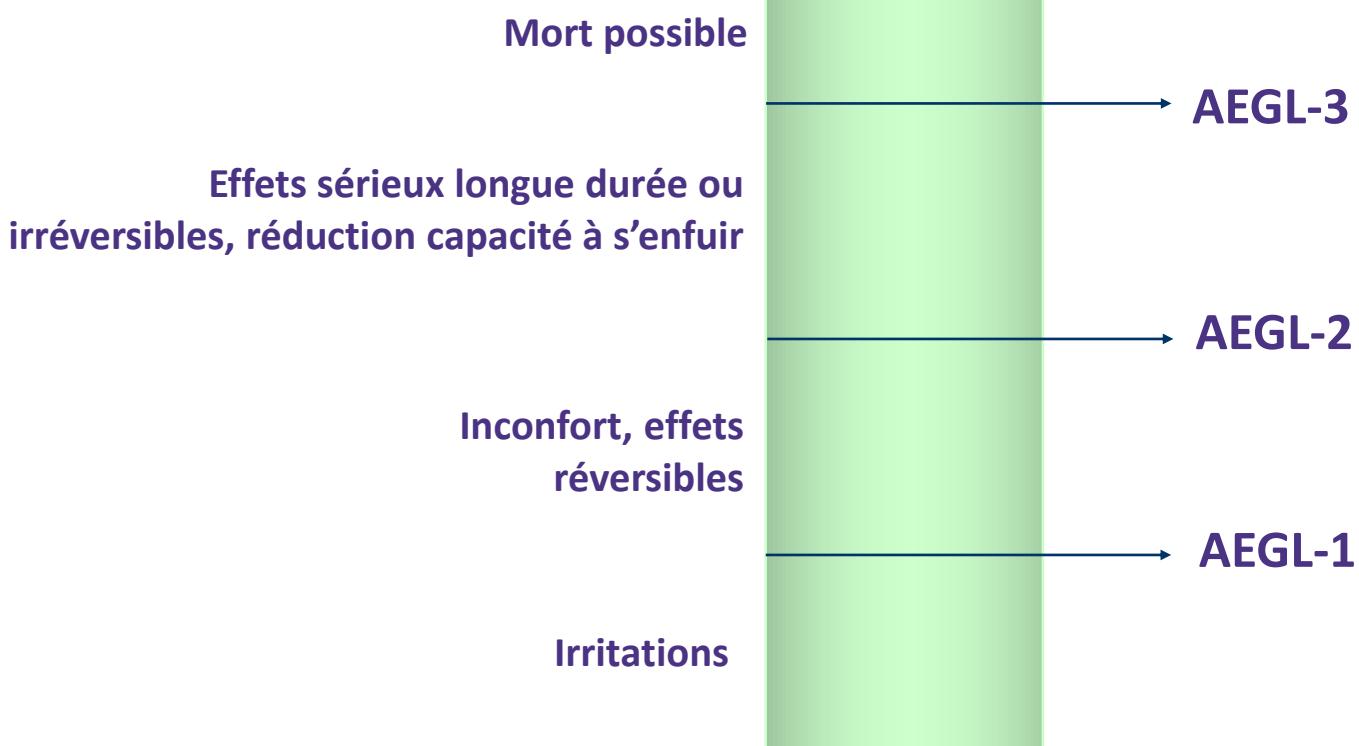
Toxicité - Seuils caractéristiques

- **AEGL (ppm or mg/m³)**
- **3 niveaux**
 - AEGL – 1
 - AEGL – 2
 - AEGL – 3
- **durées d'exposition : 10 et 30 minutes, 1 heure, 4 heures et 8 heures**
- **Env: 250-300 composés**
- **prise en compte de tout type de public, y compris les sensibles**
 - Facteur de protection important



Toxicité - Seuils caractéristiques

- **AEGL**



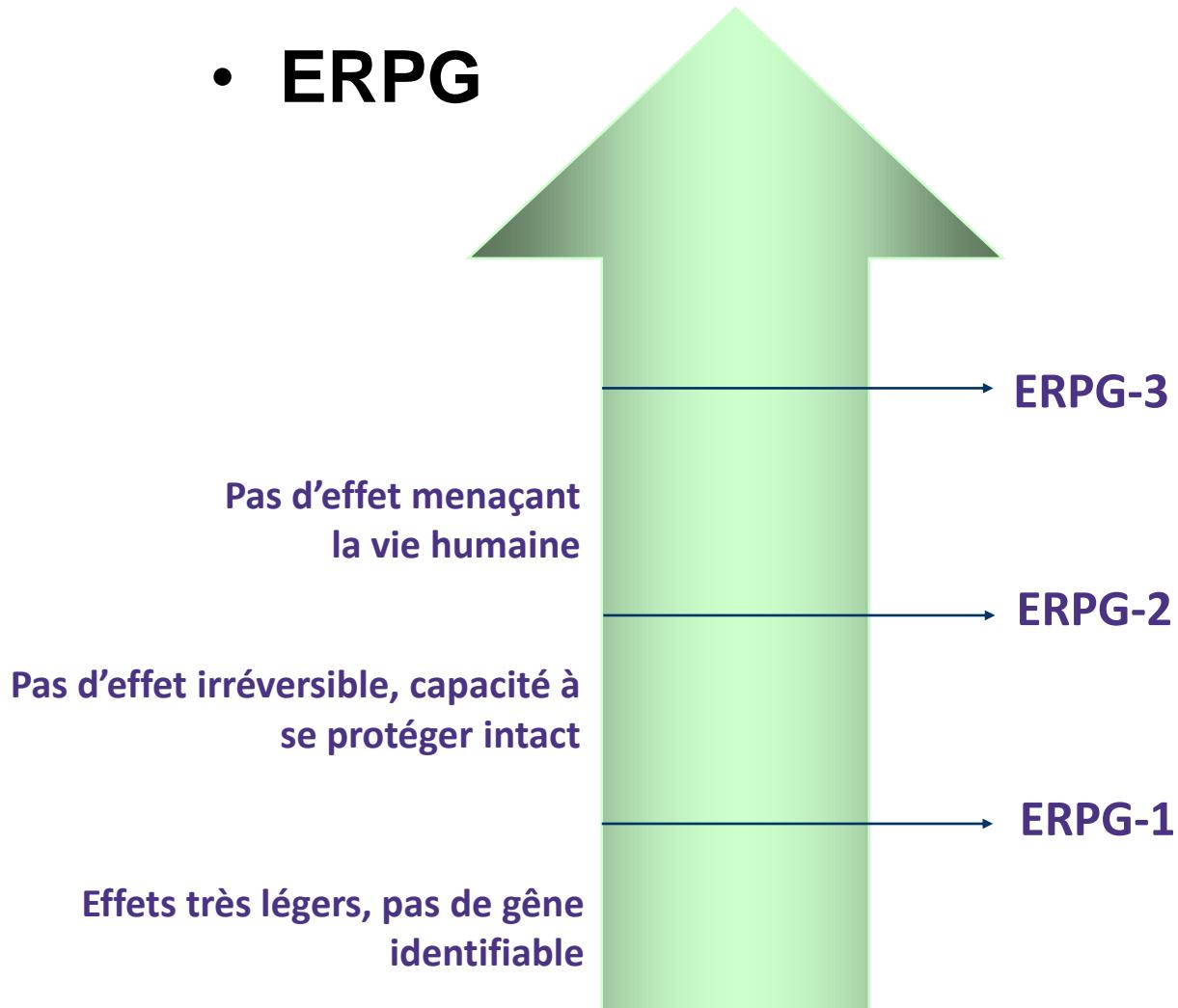
Toxicité - Seuils caractéristiques

- **ERPG (ppm or mg/m³)**
- **3 niveaux**
 - **ERPG – 1**
 - **ERPG – 2**
 - **ERPG – 3**
- **Env: 250 composés**
- **durée d'exposition : 1 seule = 1 heure**
- **prise en compte de tout type de public**
 - **définition floue**



Toxicité - Seuils caractéristiques

• ERPG



Toxicité - Seuils caractéristiques

- **IDLH (ppm or mg/m³) (valeur 1994)**
- **1 niveau**
- **Env: 400 composés**
- **Concentrations maximales à laquelle un travailleur peut se soustraire après d'exposition 30 minutes sans l'apparition d'aucun symptôme (12-72 hours after exposure) ou d'effet de neutralisation des reflexes de fuite**
- **durée d'exposition : 30 min**



Toxicité - Seuils caractéristiques

- **SELx2, SEI, SER, SP**
- **4 niveaux**
 - **SELS : Seuils de Effets Létaux Significatifs (5%)**
 - **SPEL : Seuils des premiers Effets Létaux (1%)**
 - **SEI : Seuils des Effets Irréversibles**
 - **SER : Seuils des Effets Réversibles (effets cliniques tolérables)**
 - **SP : Seuils de Perception (détectio**n sensorielle)
- **Env: 40 composés**
- **durées d'exposition : 1 min à 480 min**
- **tout type de public, hors hypersensibles**



Toxicité - Seuils caractéristiques

Autres :

- EEI – Europe – Ecetoc.org – peu de valeurs
 - TEEL - Etats-Unis – DOE - si absence ERPG
 - AETL – Europe – ACUTEX – pas de statut officiel
-
- Pays ...Angleterre, Pays-Bas
 - Cibles....Militaire (MEG), NASA (Astronaute)

Toxicité - Seuils caractéristiques

- Seuils de toxicité chronique
- 2 niveaux
 - VME : Cmax pour 8h/j
 - VLE : Cmax < 15min/j
- Destinés aux expositions professionnelles
- Périmètre opérationnel de l'intervention



Toxicité - Seuils caractéristiques

Seuil (ppm)	Chlore	Ammoniac
IDLH 30'	10	300
AEGL- 1 30' (60)	0.5 (0.5)	30 (30)
AEGL- 2 30' (60)	2.8 (2.0)	220 (160)
AEGL- 3 30' (60)	28 (20)	1600 (1100)
SEL 30' (60)	160 (110)	4767 (3400)
SEI 30' (60)	25 (19)	500 (354)
VME	-	10
VLE	0.5	20
ERPG- 1 60'	1	25
ERPG- 2 60'	3	150
ERPG- 3 60'	20	750

Analyse et management des risques industriels



Généralités

- S-1 ?

- 1. Modélisation des effets - généralités**
- 2. Théorie pour l'incendie**

- 1. Modélisation des effets - généralités**
2. Théorie pour l'incendie

1. Modélisation des effets - généralités

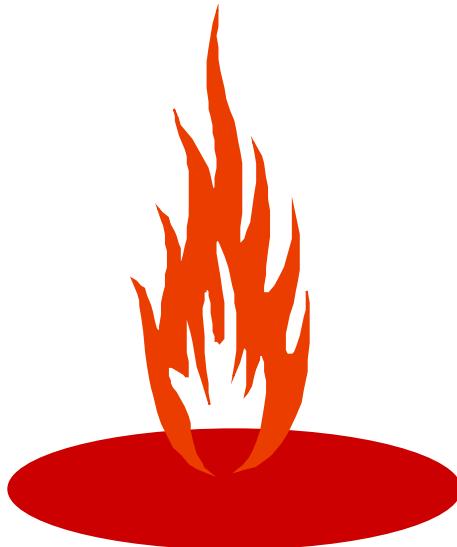


?



1. Modélisation des effets - généralités

5'



Source



Milieu de propagation



Cible

1. Modélisation des effets - généralités

5 – Chaleur générée par la réaction de combustion

7 – Taux de production de suies

6 – Fraction de la Chaleur émise sous forme de radiation

2 – Quantité libérée



1 – Liquide inflammable

3 – Taille / forme flamme



4 – Taille de la surface

8 – Taux d'humidité

9 – Taux de CO₂

10 – La position de Homer

1. Modélisation des effets - généralités

- **Paramètres usuellement non intégrés**
 - Spectre radiatif
 - T° non homogène
 -
- **Modélisation incendie**
 - Problème très complexe

1. Modélisation des effets - généralités

- **Modèles**
 - **semi-empiriques (simple)**
 - 1. **Sources ponctuelles : 1 ou multiple**
 - Pas de prédition de la forme
 - 2. **Sources surfaciques**
 - Forme de type surface solide (géométrie simple)
 - Dépend de données expérimentales
 - Simple à comprendre
 - Simple à calculer (puissance de calcul faibles)
 - Temps de calcul courts

1. Modélisation des effets - généralités

- **Modèles**

- **Fields Models (très complexes)**

- **Equation des fluides de Navier-Stockes**
- **Usuellement méca fluide sans combustion**
- **Puissance de calculs très élevée**
- **Temps de calcul très élevés**

- **Integral Models (complexes)**

- **Modèles intermédiaires**
- **Equations « Fields Models » simplifiées**

1. Modélisation des effets - généralités
2. Théorie pour l'incendie

2. Théorie pour l'incendie

- **Quantité libérée (modèles numériques)**
 - Ecoulement liquide
 - Libération gazeuse
 - Ecoulement bi-phasiqe
- **Type de feux**

5'

2. Théorie pour l'incendie

- **Quantité libérée (modèles numériques)**
 - Ecoulement liquide
 - Libération gazeuse
 - Ecoulement bi-phasiqe

- **Type de feux**
 - feux de flaque pool fires (sur sol ou eau)
 - jet de flamme (torche)
 - boule de feu
 - feux « confinés »

5'

2. Théorie pour l'incendie

- **Feu d'hydrocarbures**
 - **Equation générale**

$$q'' = \text{SEP}_{\text{act}} \times F_{\text{view}} \times \tau_a \quad \text{J/(m}^2\cdot\text{s})$$

in which:

- q'' = Heat flux at a certain distance, in $\text{J}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$
 SEP_{act} = Actual surface emissive power, in $\text{J}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$
 F_{view} = View factor
 τ_a = Atmospheric transmissivity

2. Théorie pour l'incendie

- **Surface Emissive Power (SEP)**

$$\text{SEP}_{\text{theor}} = Q'/A \quad \text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$$

in which:

$\text{SEP}_{\text{theor}}$ = Theoretical Surface Emissive Power, in $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

Q' = Combustion energy per second, in J/s

A = Surface area of the flame, in m^2

2. Théorie pour l'incendie

$$SEP_{\max} = F_s \times SEP_{\text{theor}} \quad J/(m^2 \cdot s) \quad (6.3)$$

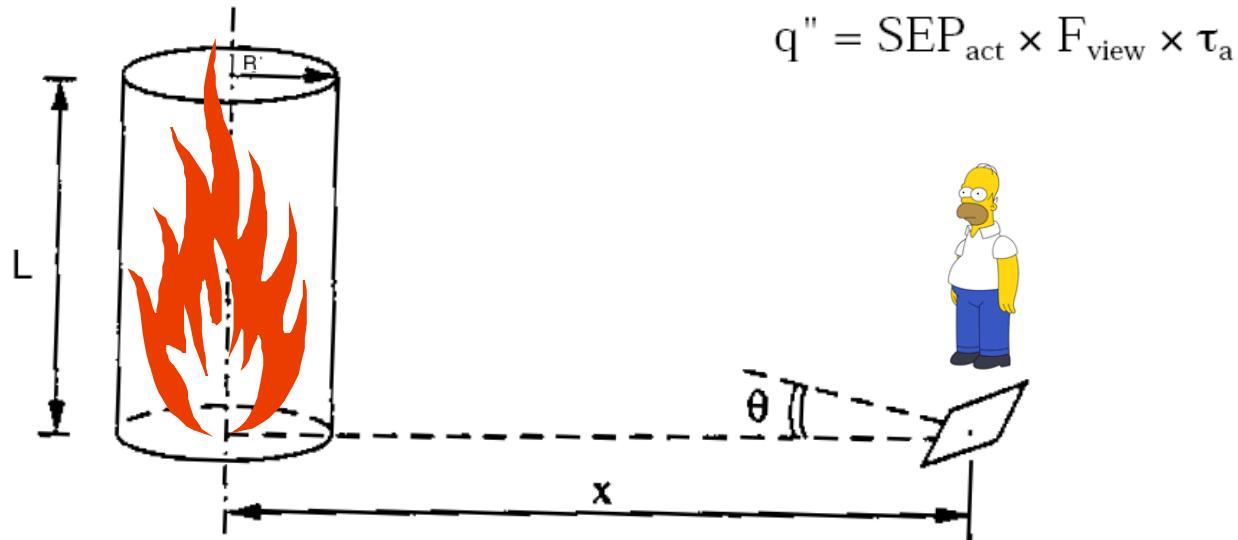
in which:

- SEP_{\max} = The maximum Surface Emissive Power from a flame without soot production, in $J/(m^2 \cdot s)$
 F_s = Fraction of the combustion energy radiated from the flame surface

- **$F_s = f(\text{type de flamme, type hydrocarbures})$**

2. Théorie pour l'incendie (s-e pool fires)

➤ Modèle Surfacique



➤ 12 étapes

2. Théorie pour l'incendie (s-e pool fires)

- **Etape 1 – Diamètre**
 - **Surface réelle irrégulière**
 - 1. Equivalent (géométrie simple)**

$$D = (4 \times A_p / \pi)^{1/2}$$

in which:

Modèle cylindrique 1

D = Pool diameter, in m

A_p = Surface area of the pool, in m²

2. V et δ $D = (4 \times V / (\pi \times \delta))^{1/2}$

Modèle cylindrique 2

➤ **si L > 2 I**

Modèle plan

2. Théorie pour l'incendie (s-e pool fires)

- Etape 2 – Taux de combustion**

$$m'' = m_\infty'' \times (1 - e^{-k \times \beta \times D}) \quad (\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$$

in which:

m'' = Burning rate at still weather conditions, in $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

m_∞'' = see m'' for $D \rightarrow \infty$ (see also table 6.5)

k = Absorption extinction coefficient of the flame, in m^{-1}

β = Mean beam length corrector

➤ $(1 - e^{-k \times \beta \times D}) > 0.95$ si $D > 1\text{m}$

2. Théorie pour l'incendie (s-e pool fires)

- Etape 2 – Taux de combustion**

Table 6.5

Flammable material	m_{∞}'' (kg/(m ² .s))	$k \times \beta$ (m ⁻¹)	k (m ⁻¹)	T_f (K)
Liq. H ₂	0.169	6.1	-	1600
LNG	0.078	1.1	0.5	1500
LPG	0.099	1.4	0.4	-
Butane	0.078	2.7	-	-
Hexane	0.074	1.9	-	-
Heptane	0.101	1.1	-	-
Benzene	0.085	2.7	4.0	1490
Xylene	0.090	1.4	-	-
Gasoline	0.055	2.1	2.0	1450
Kerosene	0.039	3.5	2.6	1480
JP-5	0.054	1.6	0.5	1250
Methanol	0.015	1)	-	1300
Ethanol	0.015	1)	0.4	1490

2. Théorie pour l'incendie (s-e pool fires)

- **Etape 2 – Taux de combustion**

➤ **Calcul alternatif**

$$m'' = c_8 \times \Delta H_c / (\Delta H_v + C_p \times (T_b - T_a)) \quad (\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})) \quad (6.67)$$

in which:

c_8 = 0.001 kg/(m²·s)

ΔH_c = The heat of combustion of the flammable material and its boiling point in J/kg

ΔH_v = The heat of vaporisation of the flammable material and its boiling point, in J/kg

C_p = The heat capacity in J/(kg·K)

T_b = The liquid boiling temperature, in K

T_a = Ambient temperature in K

2. Théorie pour l'incendie (s-e pool fires)

- **Etape 3 – Hauteur de la flamme**

$$L/D = 55 \times (m''/(p_{\text{air}} \times (g \times D)^{1/2}))^{0.67} \times (u^*)^{-0.21}$$

in which:

L = Average flame height, in m

2. Théorie pour l'incendie (s-e pool fires)

- **Etape 4 – Hauteur de la flamme**

Determine the scaled wind velocity u^*

$$u^* = u_w/u_c$$

in which:

u_w = Wind velocity at height of 10 metres, in m/s

2. Théorie pour l'incendie (s-e pool fires)

- **Etape 5 – Hauteur de la flamme**

$$u_c = (g \times m'' \times D / \rho_{air})^{1/3} \quad (\text{m/s})$$

in which:

u_c = Characteristic wind velocity, in m/s

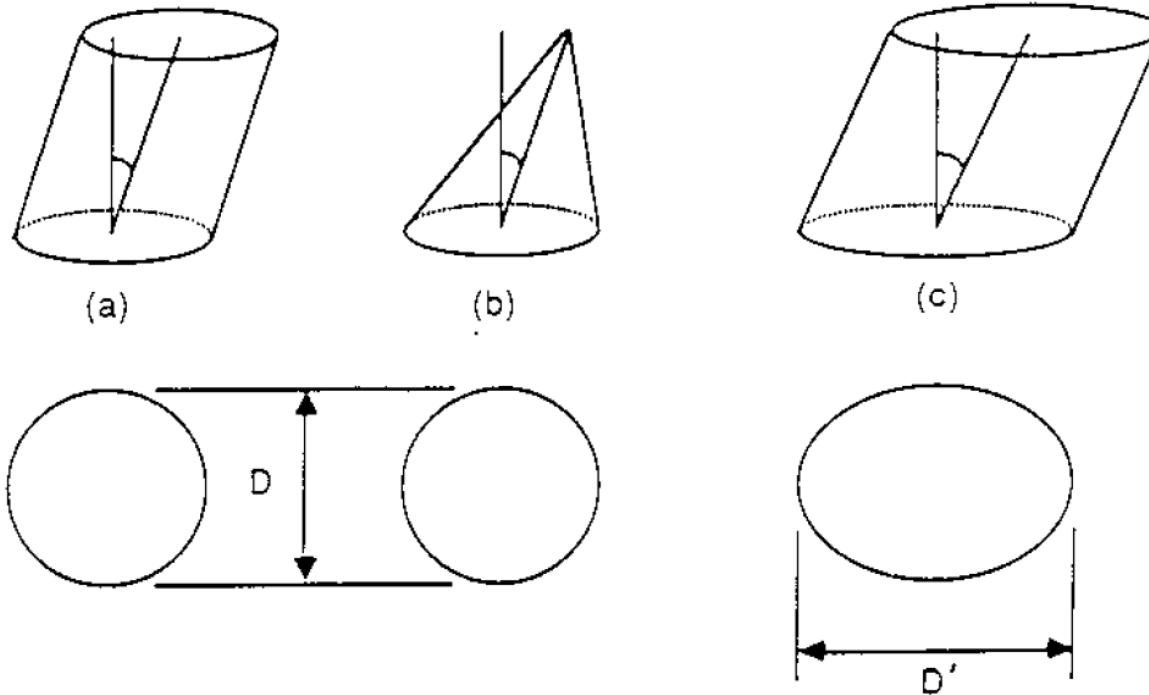
g = Gravitational acceleration 9.81 m/s^2

m'' = Burning flux in still weather conditions, in $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

D = Pool diameter, in m

2. Théorie pour l'incendie (s-e pool fires)

- **Etape 6a/6b - Inclinaison / Déformation**



2. Théorie pour l'incendie (s-e pool fires)

- **Etape 6 – Inclinaison**

$$\Theta = \arcsin(((4 \times c^2 + 1)^{1/2} - 1)/(2 \times c))$$

Avec C= $\tan\Theta/\cos\Theta = 0.666 \times (\text{Fr}_{10})^{0.333} \times (\text{Re})^{0.117}$

2. Théorie pour l'incendie (s-e pool fires)

- **Etape 6 – Inclinaison**

$$Fr_{10} = u_w^2 / (g \times D) \quad (-)$$

in which:

Fr_{10} = Froude number for wind velocity at a height of 10 metres

$$Re = u_w \times D / v \quad (-)$$

in which:

v = Kinematic viscosity of air, in m^2/s

2. Théorie pour l'incendie (s-e pool fires)

- **Etape 7 - SEP**

$$SEP_{\max} = F_s \times m'' \times \Delta H_c / (1 + 4 \times L/D) \quad (J/(m^2 \cdot s))$$

in which:

SEP_{\max} = Maximum Surface Emissive Power, in $J/(m^2 \cdot s)$

F_s = Fraction of the generated heat radiated from the flame surface

m'' = Burning rate, in $kg/(m^2 \cdot s)$

ΔH_c = Heat of combustion, in J/kg

L = Average height of flame, in m

D = Pool diameter, in m

2. Théorie pour l'incendie (s-e pool fires)

- **Etape 7 – SEP**

Substance	Pool diameter (m)	Radiation fraction F_s (-)
methanol	0.076	0.162
	0.152	0.165
	1.22	0.177
methane	0.305	0.21
	0.76	0.23
	1.53	0.15-0.24
	3.05	0.24-0.34
	6.10	0.20-0.27
butane	0.305	0.199
	0.457	0.205
	0.76	0.269
gasoline	1.22	0.30-0.40
	1.53	0.16-0.27
	3.05	0.13-0.14
benzene	0.076	0.350
	0.457	0.345
	0.76	0.350
	1.22	0.360

$$0,1 < F_s < 0,4$$

2. Théorie pour l'incendie (s-e pool fires)

- **Etape 7 - SEP**

$$SEP_{act} = SEP_{max} \times (1 - \varsigma) + SEP_{soot} \times \varsigma \quad (J/(m^2 \cdot s))$$

in which:

SEP_{act} = Actual surface emissive power, in $J/(m^2 \cdot s)$

SEP_{soot} = The surface emissive power of soot, which is about $20 \cdot 10^3 J/(m^2 \cdot s)$

2. Théorie pour l'incendie (s-e pool fires)

- **Etape 8 – Taux absorption H₂O**

$$p_w = RH \times p_w^o$$

in which:

RH = Relative humidity, fraction between 0 and 1

p_w^o = Saturated vapour pressure of water in air, in N/m²

Calculate $p_w \times x$

From Figure 6.2 α_w in relation to $p_w \times x$ can be found

Par défaut, Tf = 1'200K

2. Théorie pour l'incendie (s-e pool fires)

- **Etape 9 – Taux absorption CO₂**

Calculate $p_c \times x$

From Figure 6.3 α_c in relation to $p_c \times x$ can be found

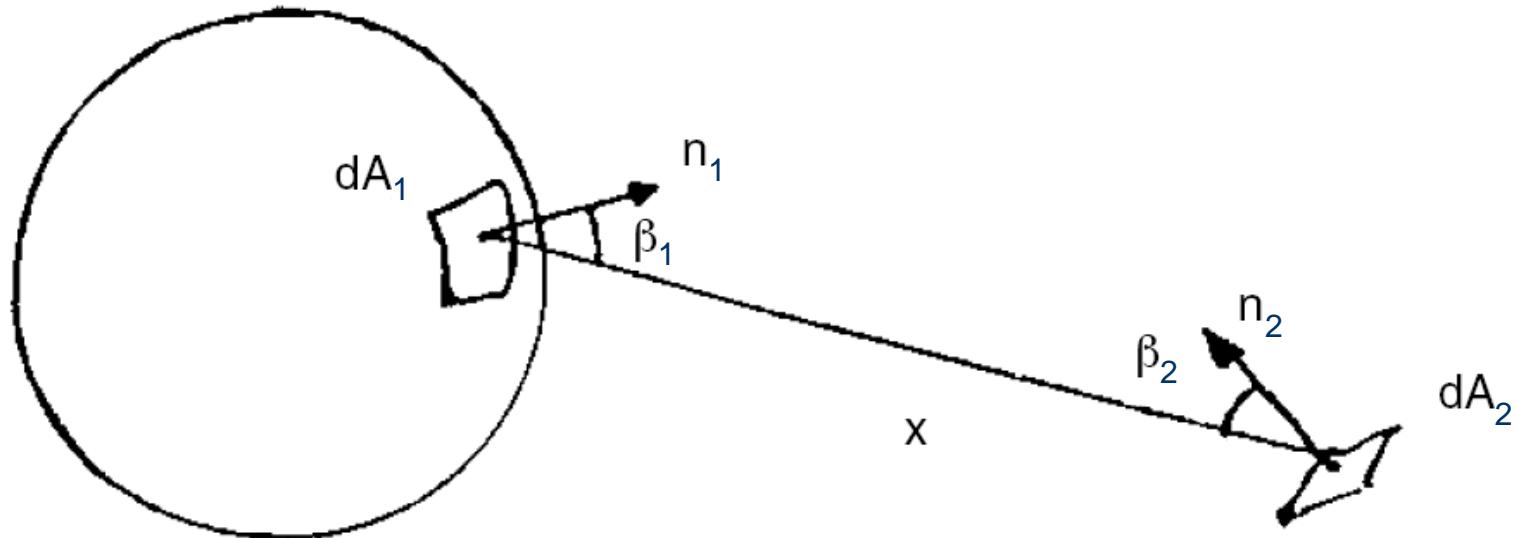
2. Théorie pour l'incendie (s-e pool fires)

- **Etape 10 - Transmissivité**

$$\tau_a = 1 - \alpha_w - \alpha_c$$

2. Théorie pour l'incendie (s-e pool fires)

- **Etape 11 – Facteur de forme**



2. Théorie pour l'incendie (s-e pool fires)

- **Etape 11 – Facteur de forme**

$$d^2\Phi_{12} = L_1 \cdot dS_1 \cdot \cos \theta_1 \cdot d\Omega_1$$

Avec

$$d\Omega_1 = \frac{dS_2 \cdot \cos \theta_2}{d^2}$$

$$d^2\Phi_{12} = L_1 \cdot \frac{dS_2 \cdot \cos \theta_2 \cdot dS_1 \cdot \cos \theta_1}{d^2}$$

2. Théorie pour l'incendie (s-e pool fires)

- **Etape 11 – Facteur de forme**

$$d^2\Phi_{12} = \frac{L_1^0 dS_1 \cos\theta_1 dS_2 \cos\theta_2}{d^2}$$

$$d^2\Phi_{12} = \frac{M_1^0 dS_1 \cos\theta_1 dS_2 \cos\theta_2}{\pi d^2}$$

$$\Phi_{12} = M_1^0 \int_{S1} \int_{S2} \frac{dS_1 \cos\theta_1 dS_2 \cos\theta_2}{\pi d^2}$$

2. Théorie pour l'incendie (s-e pool fires)

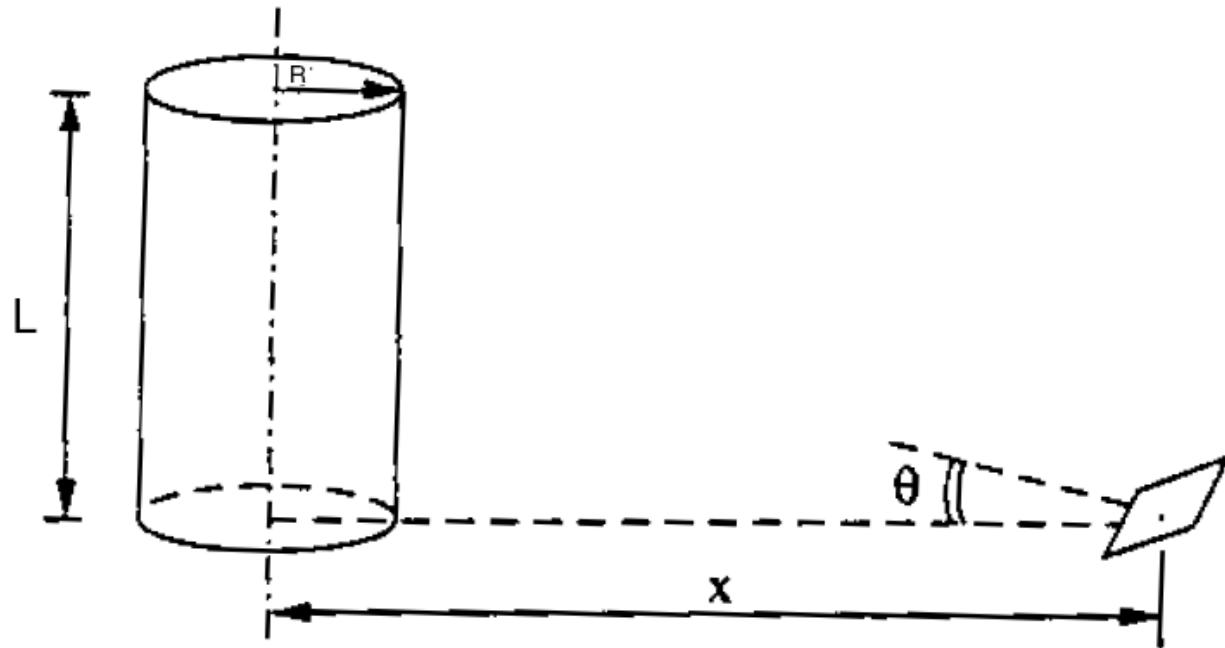
- **Etape 11 – Facteur de forme**

$$F_{12} = \frac{\Phi_{12}}{\Phi_1} = \frac{\Phi_{12}}{M_1^0 \cdot S_1}$$

$$F_{12} = \frac{1}{\pi S_1} \int_{S1} \int_{S2} \frac{dS_1 \cos\theta_1 dS_2 \cos\theta_2}{d^2}$$

2. Théorie pour l'incendie (s-e pool fires)

- **Etape 11 – Facteur de forme**



2. Théorie pour l'incendie (s-e pool fires)

- **Etape 11 – Facteur de forme**

$$h_r = L/R$$

$$x_r = X/R$$

$$A = (x_r + 1)^2 + h_r^2$$

$$B = (x_r - 1)^2 + h_r^2$$

2. Théorie pour l'incendie (s-e pool fires)

- Etape 11 – Facteur de forme**

then, for a horizontal plane at ground level ($\theta = \pi/2$):

$$F_h = \frac{1}{\pi} \left\{ \tan^{-1} \sqrt{\frac{x_r + 1}{x_r - 1}} - \left(\frac{x_r^2 - 1 + h_r^2}{\sqrt{AB}} \right) \tan^{-1} \sqrt{\frac{(x_r - 1)A}{(x_r + 1)B}} \right\} \quad (6)$$

and for a vertical plane at ground- level ($\theta = 0$):

$$F_v = \frac{1}{\pi} \left\{ \frac{1}{x_r} \tan^{-1} \left(\frac{h_r}{\sqrt{x_r^2 - 1}} \right) + \left(\frac{h_r(A - 2x_r)}{x_r \sqrt{AB}} \right) \tan^{-1} \sqrt{\frac{(x_r - 1)A}{(x_r + 1)B}} - \frac{h_r}{x_r} \tan^{-1} \sqrt{\frac{x_r - 1}{x_r + 1}} \right\}$$

2. Théorie pour l'incendie (s-e pool fires)

- **Etape 12 – Flux reçu à une distance x**

$$q'' = SEP_{act} \times F_{view} \times \tau_a \quad (J/(m^2 \cdot s))$$

2. Théorie pour l'incendie (s-e pool fires)

- **Modèle point**

$$q'' = F_s \times m_h' \times \Delta H_c / (4 \times \pi \times X^2) = F_s \times m_h' \times \frac{\Delta H_c}{4 \times \pi \times X^2} \quad (\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$$

in which:

q'' = Heat flux, in $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

F_s = Fraction of the combustion heat radiated from the flame surface

m_h' = Burning rate, in kg/s

ΔH_c = Net heat of combustion at the boiling point of the flammable material
 J/kg

X = The distance from the source to the receiver, in m

➤ **Peu précis**

2. Théorie pour l'incendie (s-e pool fires)

- **Modèles semi-empiriques aussi pour**
 - **Feu de flaue non circonscrite**
 - 1^{er} temps augmentation de la surface donc augmentation du taux de combustion
 - puis stabilisation car taux de combustion égal au débit de fuite
 - **Feu de torche**
 - **Boule de feu**

2. Théorie pour l'incendie (s-e fire ball)

- Rappel du phénomène



BLEVE - exemple 3 large.flv



BLEVE - exemple 2 large.flv

2. Théorie pour l'incendie (s-e fire ball)

- **Etape 1 – Quantité impliquée**

$$m = V_{\text{rel}} \times \rho_{\text{mat}} = f \times V \times \rho_{\text{mat}} \quad (\text{kg}) \quad (6.89)$$

- m = Mass of the flammable material, in kg
f = Fraction of the volume of the pressure tank, filled with the flammable liquefied pressurised gas
V = Volume of the tank, in m³
 V_{rel} = Amount of e.g. LPG which will be released in case of a complete tank failure
 ρ_{mat} = Density of the flammable material in the pressure tank, in kg/m³

2. Théorie pour l'incendie (s-e fire ball)

- **Etape 2 – Rayon de la boule**

$$r_{fb} = c_9 \times m^{0.325} \quad (\text{m})$$

In which:

c_9 = 3.24 m/kg^{0.325}

r_{fb} = Radius of the fireball, in m

m = Mass of the flammable material, in kg

2. Théorie pour l'incendie (s-e fire ball)

- **Etape 3 – Durée de la boule**

$$t = c_{10} \times m^{0.26} \quad (\text{s})$$

in which:

$$c_{10} = 0.852 \text{ s/kg}^{0.26}$$

t = Duration of the fireball, in s

m = Mass of the flammable material, in kg

2. Théorie pour l'incendie (s-e fire ball)

- **Etape 4 – Hauteur de la boule**

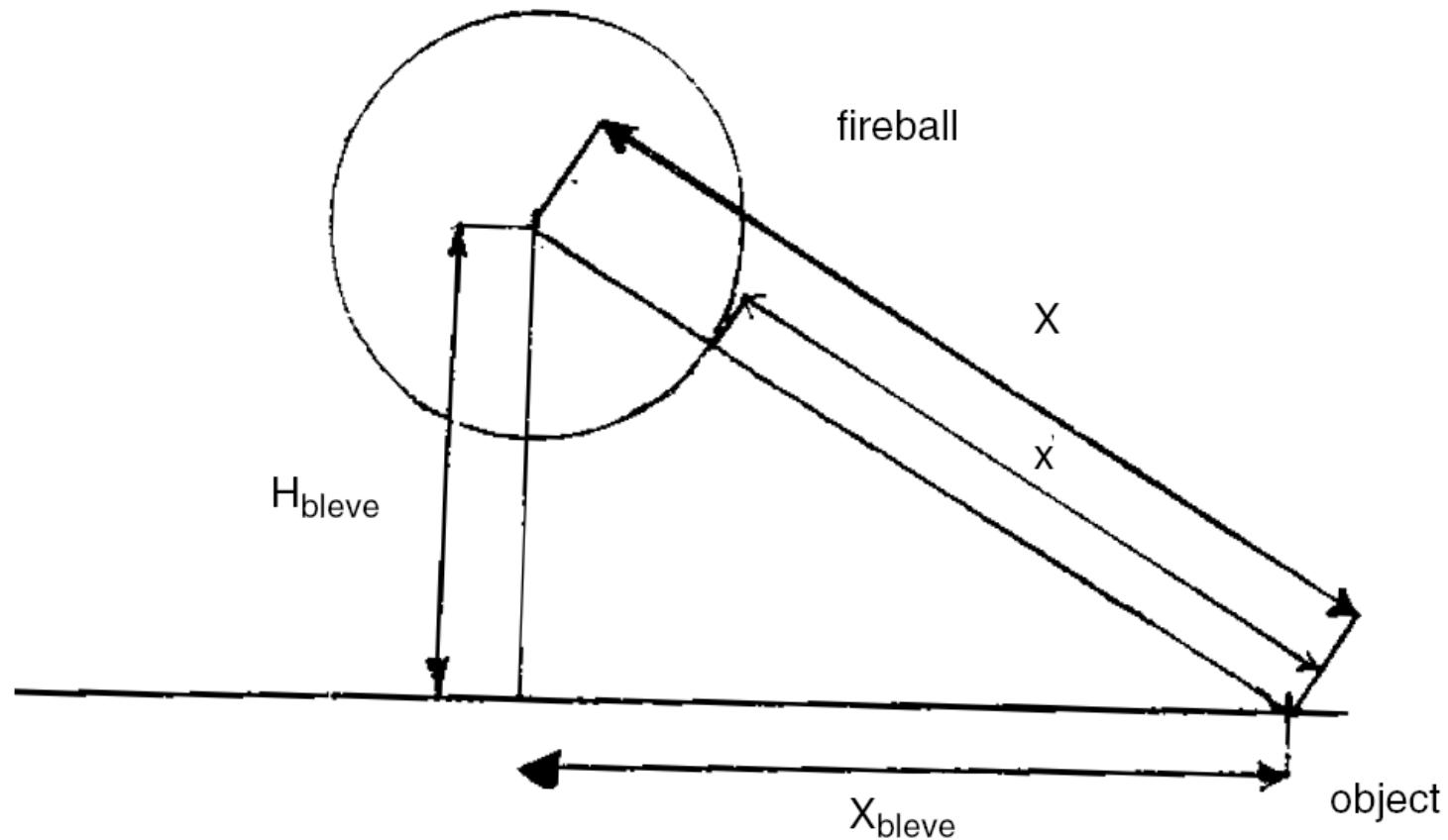
$$H_{bleve} = 2 \times r_{fb} \quad (m) \quad (6.22)$$

in which:

H_{bleve} = Height from the centre of the fire ball to the ground under the fire ball, in m

2. Théorie pour l'incendie (s-e fire ball)

- Etape 5 – Distance Boule/récepteur**



2. Théorie pour l'incendie (s-e fire ball)

- **Etape 5 – Distance Boule/récepteur**

$$X = (x_{bleve}^2 + H_{bleve}^2)^{1/2} \quad (\text{m}) \quad (6.92)$$

In which:

x_{bleve} = Distance measured over the ground from the projected centre of the fire ball on the ground under the fire ball, and the object, in m

H_{bleve} = Height from the centre of the fire ball to the ground under the fire ball, in m

X = Distance from the centre of the fire ball to the radiated object, in m

$$x = X - r_{fb} \quad (\text{m})$$

in which:

x = Distance from the surface area of the flame to the object, in m

2. Théorie pour l'incendie (s-e fire ball)

- **Etape 6 – Facteur de forme**

$$F_{\text{view}} = (r_{\text{fb}}/X)^2 \quad (-)$$

in which:

F_{view} = Geometric view factor, dimensionless

r_{fb} = Radius of the fire ball, in m

X = Distance from the centre of the fire ball to the radiated object, in m

2. Théorie pour l'incendie (s-e fire ball)

- **Etape 7 – Fraction irradiée**

$$F_s = c_6 \times (P_{sv})^{0.32} \quad (-)$$

in which:

$$c_6 = 0.00325 \text{ (N/m}^2\text{)}^{0.32}$$

P_{sv} = Vapour pressure of flammable material inside the vessel, in N/m²

2. Théorie pour l'incendie (s-e fire ball)

- **Etape 8 – Chaleur de Combustion**

$$\Delta H = \Delta H_c - \Delta H_v - C_p \times \Delta T \quad (\text{J/kg}) \quad (6.94)$$

in which:

ΔH = Nett available heat, in J/kg

ΔH_c = Combustion heat of the flammable material at its boiling point, in J/kg

ΔH_v = Vaporisation heat of the flammable material at its boiling point, in J/kg

C_p = Specific heat capacity at constant pressure, J/(kg·K)

ΔT = Temperature difference between flame and ambient temperature, in K

Assume $\Delta T = 1700$ K

2. Théorie pour l'incendie (s-e fire ball)

- **Etape 9 – SEP**

$$SEP_{act} = \Delta H \times m \times F_s / (4 \times \pi \times r_{fb}^2 \times t) \quad (J/(m^2 \cdot s)) \quad (6.95)$$

in which:

SEP_{act} = Actual Surface Emissive Power, SEP, in $J/(m^2 \cdot s)$, which is the average radiation emittance (emissive power) of the flame surface.

SEP_{max} = Maximum Surface Emissive Power, in $J/(m^2 \cdot s)$.

If it is assumed that there is no soot formation, then $SEP_{act} = SEP_{max}$

2. Théorie pour l'incendie (s-e fire ball)

- **Etape 10 – Absorption H₂O**

$$\alpha_w$$

- **Etape 11 – Absorption CO₂**

$$\alpha_c$$

2. Théorie pour l'incendie (s-e fire ball)

- **Etape 12 – Transmissivité**

$$\tau_a = 1 - \alpha_w - \alpha_c$$

2. Théorie pour l'incendie (s-e fire ball)

- **Etape 13 – Rayonnement au point P**

$$q'' = SEP_{act} \times F_{view} \times \tau_a \quad (J/(m^2 \cdot s))$$

in which:

q'' = Heat flux at a certain distance, in $J/(m^2 \cdot s)$

τ_a = Atmospheric transmissivity

Analyse et management des risques industriels



Généralités

- S-1: ?

- 1. Théorie pour les explosions (VCE)**
- 2. Théorie de la dispersion atmosphérique**

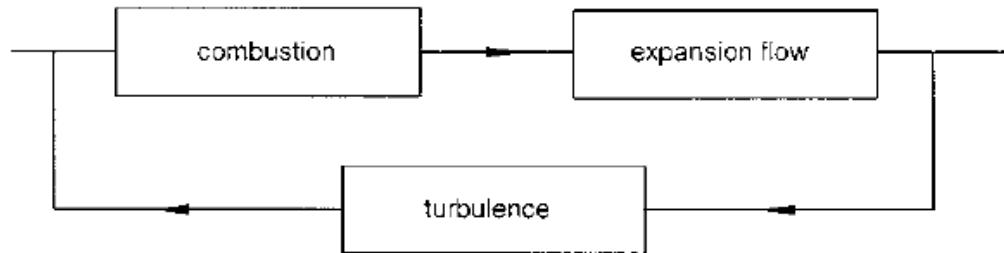
- 1. Théorie pour les explosions (VCE)**
2. Théorie de la dispersion atmosphérique

2. Théorie pour les explosions

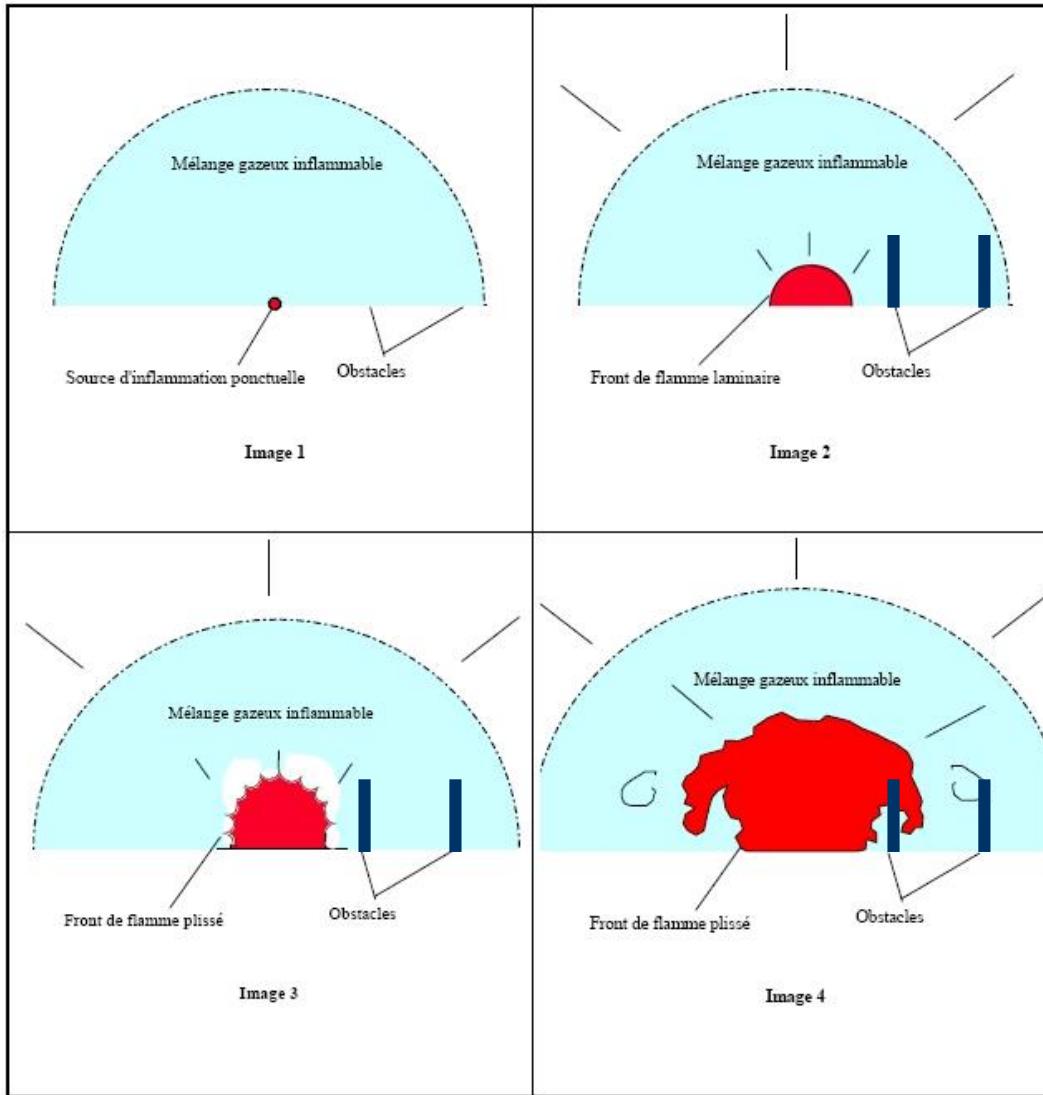
- **Conditions de base à un VCE**
 - 1. Composé inflammable
 - 2. Formation d'un nuage avant allumage
 - Si NON : feu de torche -> flux radiatif
 - 3. Conditions d'inflammation réunies
 - 4. Conditions de propagation de flammes réunies (turbulence)
 - Si NON : flash fire (combustion) -> flux radiatif

2. Théorie pour les explosions

- **Entrainement positif**



2. Théorie pour les explosions



2. Théorie pour les explosions

- **Conditions de propagation de flammes réunies (turbulence)**
 - **Pas de turbulence (flash fire)**
 - **Turbulences faibles : déflagration**
 - Source : rejet, obstacles
 - **Turbulences fortes : détonation**

2. Théorie pour les explosions

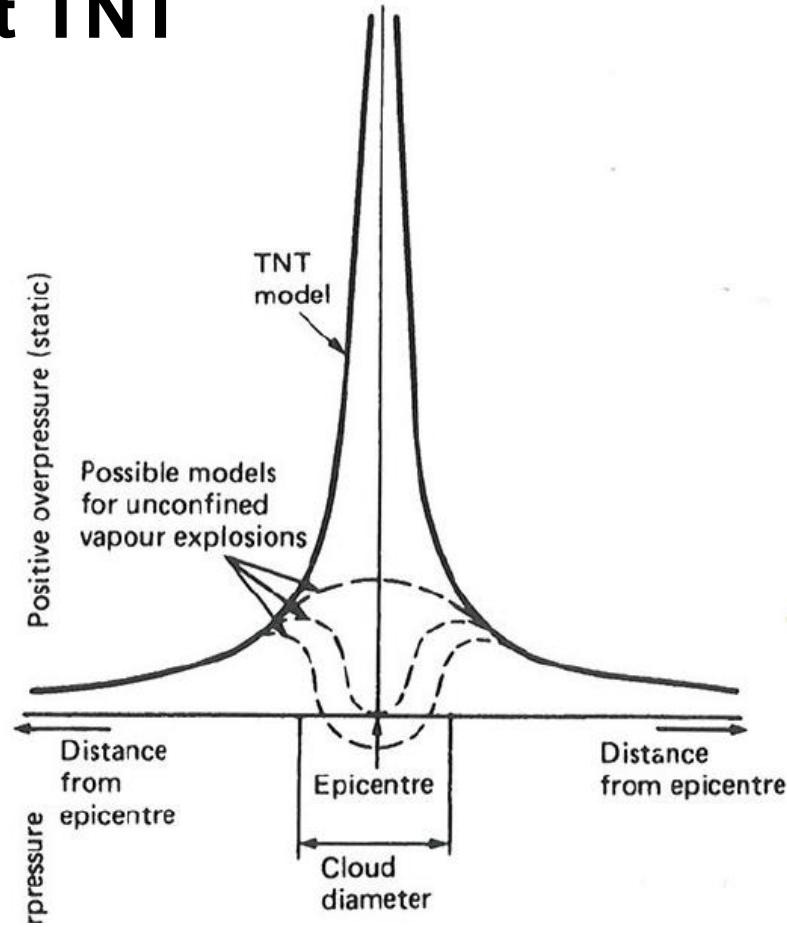
- **Modèles**
 - **Simples (semi-empiriques)**
 - **« Integral »**

2. Théorie pour les explosions

- **Equivalent TNT**
 - **Relation Masse équiv TNT et Energie nuage**
 - **Lien statistique (accidents observés)**
 - **Effets proches surestimés**
 - **Uniquement surpression : pas de durée et de forme de l'onde**
 - **Très simple à utiliser**

2. Théorie pour les explosions

- **Equivalent TNT**

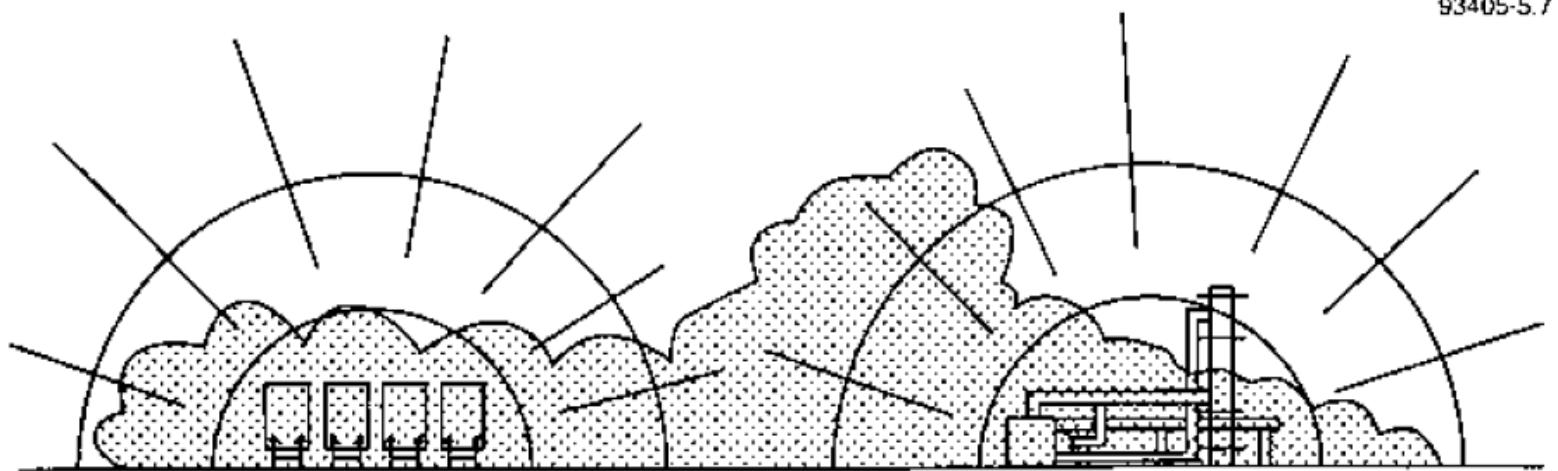


2. Théorie pour les explosions

- **Modèle Multi-Energies**
 - **Définition de sous-unités (partiellement obstruées ou confinées)**
 - **Traitement de sous-unités indépendamment**
 - **Surpression, durée, forme**

2. Théorie pour les explosions

- **Modèle Multi-Energies**



2. Théorie pour les explosions

- **Equivalent TNT**

On définit l'équivalent TNT d'un produit comme la masse de TNT (trinitrotoluène) dont l'explosion provoquerait le même champ lointain de surpression que l'explosion d'un kilogramme de ce produit.

2. Théorie pour les explosions

- **Equivalent TNT**

$$Q_{\text{TNT}} = \alpha_e \times \frac{Q_f \times E_{mf}}{E_{m\text{TNT}}} = \alpha_m \times Q_f \quad (\text{kg})$$

in which:

α_e	= TNT equivalency based on energy	[-]
α_m	= TNT equivalency based on mass	[-]
E_{mf}	= Combustion energy of fuel per unit mass	[J·kg ⁻¹]
$E_{m\text{TNT}}$	= TNT blast energy per unit mass	[J·kg ⁻¹]
Q_f	= Mass of fuel involved	[kg]
Q_{TNT}	= Equivalent mass of TNT	[kg]

2. Théorie pour les explosions

- **Equivalent TNT**

$$Q_{\text{TNT}} = \alpha_e \times \frac{Q_f \times E_{mf}}{E_{m\text{TNT}}}$$

- Valeur max (alpha=1, hydrocarbure 46 900 kJ/kg, TNT : 4 690 kJ/kg)
 - soit 10 kg de TNT pour 1 kg d'hydrocarbures.
- théorique et maximaliste (pas de prise en compte de la production de flux thermiques)

2. Théorie pour les explosions

- **Equivalent TNT**

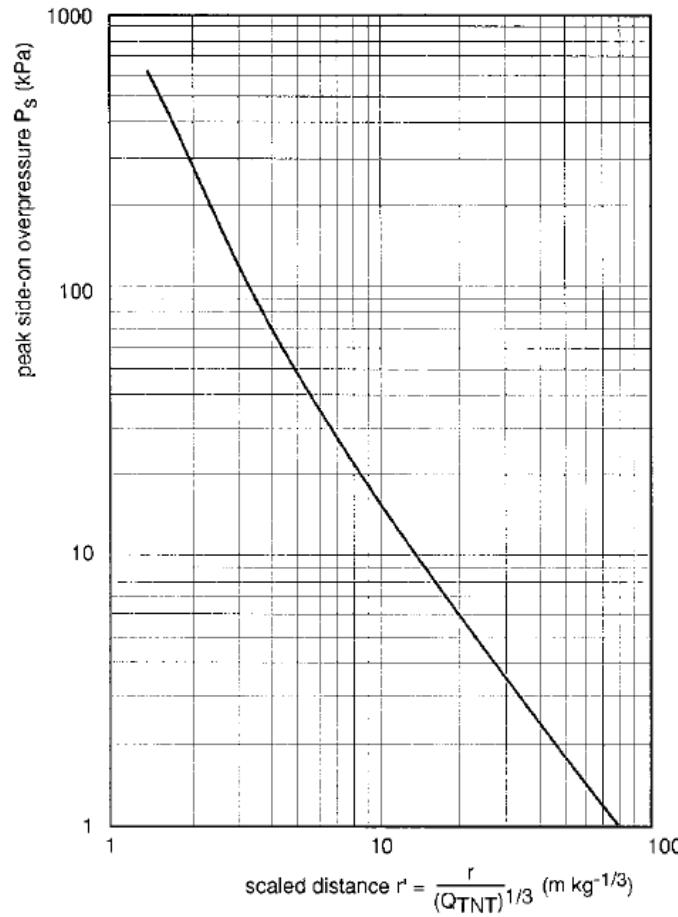
- « alpha - énergie »

- Statistiquement (Lanoy) = 10 %
 - Brasie & Simpson 2 à 5 %

Valeur pratique :
1 kg de TNT pour 1 kg d'hydrocarbures

2. Théorie pour les explosions

- **Equivalent TNT**



2. Théorie pour les explosions

- **Equivalent TNT**

$$L = C \cdot P^{0,33}$$

où

- L est le rayon concerné en mètres
- C la constante relative au type de dégâts étudié
- P la masse de TNT équivalente à la quantité d'hydrocarbure stockée en kilogrammes

2. Théorie pour les explosions

- Equivalent TNT**

C	DEGATS AUX PERSONNES	DEGATS AUX CONSTRUCTIONS
5	Lésions mortelles dans plus de 50% des cas par : <ul style="list-style-type: none"> - onde de choc - éclats - effondrement des constructions 	Dégâts très importants gros œuvre approchant la destruction totale
8	Lésions graves pouvant être mortelles par : <ul style="list-style-type: none"> - éclats ou débris - projection par onde de choc des personnes sur des surfaces dures possibilité de lésion aux tympans par onde de choc 	Dégâts graves (gros œuvre) dont le coût de réparation est $\geq 30\%$ du coût du neuf
15	Lésions par : <ul style="list-style-type: none"> - éclats ou débris - projection par onde de choc des personnes sur des surfaces anguleuses. Possibilité de surdité temporaire par onde de choc	Dégâts moyens (toiture, intérieur) dont le coût de réparation est 10% du coût du neuf
22	Possibilités de lésions par : <ul style="list-style-type: none"> - éclats ou débris - bris de verre 	Dégâts légers (portes, fenêtres...)
44	Très faibles possibilités de lésions légères par : <ul style="list-style-type: none"> - éclats ou débris - bris de verre 	Dégâts très légers (rupture de vitres de grandes dimensions)

1. Théorie pour les explosions (VCE)
2. **Théorie de la dispersion atmosphérique**

3. Théorie de la dispersion atmosphérique

5'

- **Conditions de dispersion atmosphérique :**
 - **les conditions de rejet**
 - **nature du produit,**
 - **mode d'émission continu ou instantané, réactivité du composé,**
 - **présence de particules solides,**
 - **vitesse initiale**
 - **les conditions météorologiques (champ de vent, de température, turbulences atmosphériques...)**
 - **l'environnement (nature du sol, présence d'obstacles, topographie...).**

3. Théorie de la dispersion atmosphérique

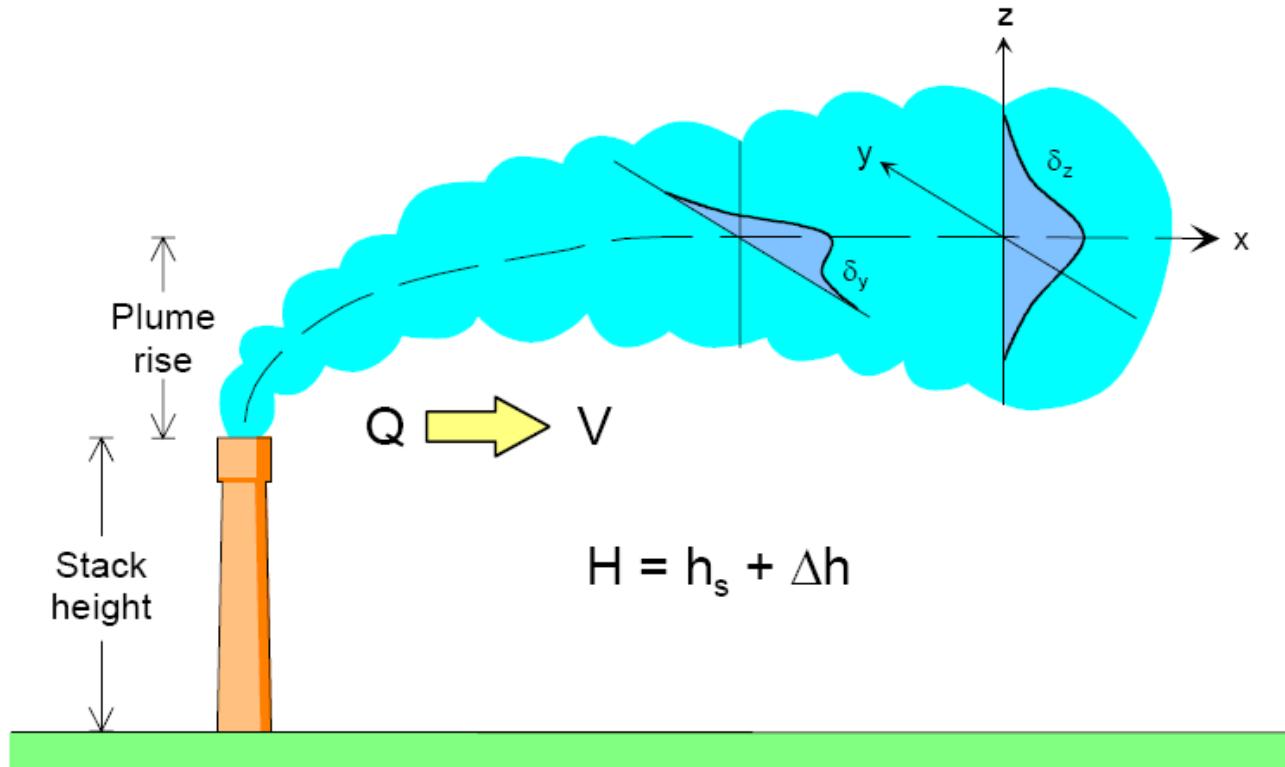
- **Modèles gaussien**

$$C(x,y,z;H) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right\}$$

- **Modèles « intégral »**

- **EFFECTS (TNO)**
- **PHAST (DNV)**

3. Théorie de la dispersion atmosphérique



$$C(x,y,0;H) = \frac{Q}{\Pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

3. Théorie de la dispersion atmosphérique

- **Modèle gaussien**
- **Hypothèses de base**
 - émissions continues, ce qui permet de négliger la diffusion dans l'axe du panache ;
 - conservation de la masse par réflexion complète du panache par le sol ;
 - vitesse et direction de vent constantes dans tout le domaine.

3. Théorie de la dispersion atmosphérique

- **Modèle gaussien**
- **Turbulence atmosphérique**

Classes de Pasquill

Vitesse du vent à 10 m [m/s]	JOUR			NUIT	
	Rayonnement solaire incident		Nébulosité	4/8 – 7/8	<3/8
< 2	A	A-B	B	F	F
2 - 3	A-B	B	C	E	F
3 – 5	B	B-C	C	D	E
5 - 6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

A : très instable
 B : instable
 C : peu instable
 D : neutre
 E : stable
 F : très stable

3. Théorie de la dispersion atmosphérique

- **Modèle gaussien**
- Classes de Pasquill

$$\sigma = a \cdot x^b + c$$

Stabilité atmosphérique (Pasquill)	a	b	c
A	0,215	0,858	0
B	0,155	0,889	
C	0,105	0,903	
D	0,068	0,908	
E	0,05	0,914	
F	0,034	0,908	

Tableau 4 : Coefficients relatifs à σ_y

Stabilité atmosphérique (Pasquill)	a	b	c
A	0,467	1,89	0,01
B	0,103	1,11	0
C	0,066	0,915	0
D	0,0315	0,822	0
E si $x < 1$ km	0,0232	0,745	0
E si $x > 1$ km	0,148	0,15	-0,126
F si $x < 1$ km	0,0144	0,727	0
F si $x > 1$ km	0,0312	0,306	-0,017

Tableau 5 : Coefficients relatifs à σ_z

3. Théorie de la dispersion atmosphérique

- **Modèle gaussien**
- **Avantages**
 - Faibles puissances de calcul ;
- **Inconvénients**
 - Valable pour des vitesses initiales quasi nulles
 - Fortes hypothèses simplificatrices (obstacles : relief ou bâtiment) ;
 - Validité : 100 m à 10 km
 - Uniquement pour gaz neutre densité proche air
donc peu efficace pour les gaz chauds ou froids et les particules

3. Théorie de la dispersion atmosphérique

- **Modèle gaussien**
- **Adaptation possibles pour :**
 - Surélévation du panache
 - Prise en compte partiellement le relief, les bâtiments, l'occupation du sol (rugosité)
 - Réflexion sur couches limites
 - Obstacles proches
 - Dépôts

Analyse et management des risques industriels



Généralités

- S-1: ?

1. Evaluation des probabilités

1. Evaluation des probabilités

- **Evaluation des risques**

Dommages vs Probabilités

1. Evaluation des probabilités

- Probabilité d'un accident

$$P_{\text{accident}} = P_{\text{événement}} \times P_{\text{présence}}$$

1. Evaluation des probabilités

Probabilité d'événement:

$$P_{\text{événement}} = f(\text{Scénario Top Event})$$

- 1. Détermination du scénario d'un Top Event**
- 2. Décomposition en événements élémentaires**
- 3. Détermination des probabilités élémentaires
(Base de données)**
- 4. Calcul de la probabilité du scénario**

1. Evaluation des probabilités

Probabilité d'événement :

$$P_{\text{événement}} = f(\text{Scénario Top Event})$$

- 1. Arbre des causes -> Top Events**
- 2. Top Events -> arbres des conséquences**

1. Evaluation des probabilités

Probabilité de présence des cibles :

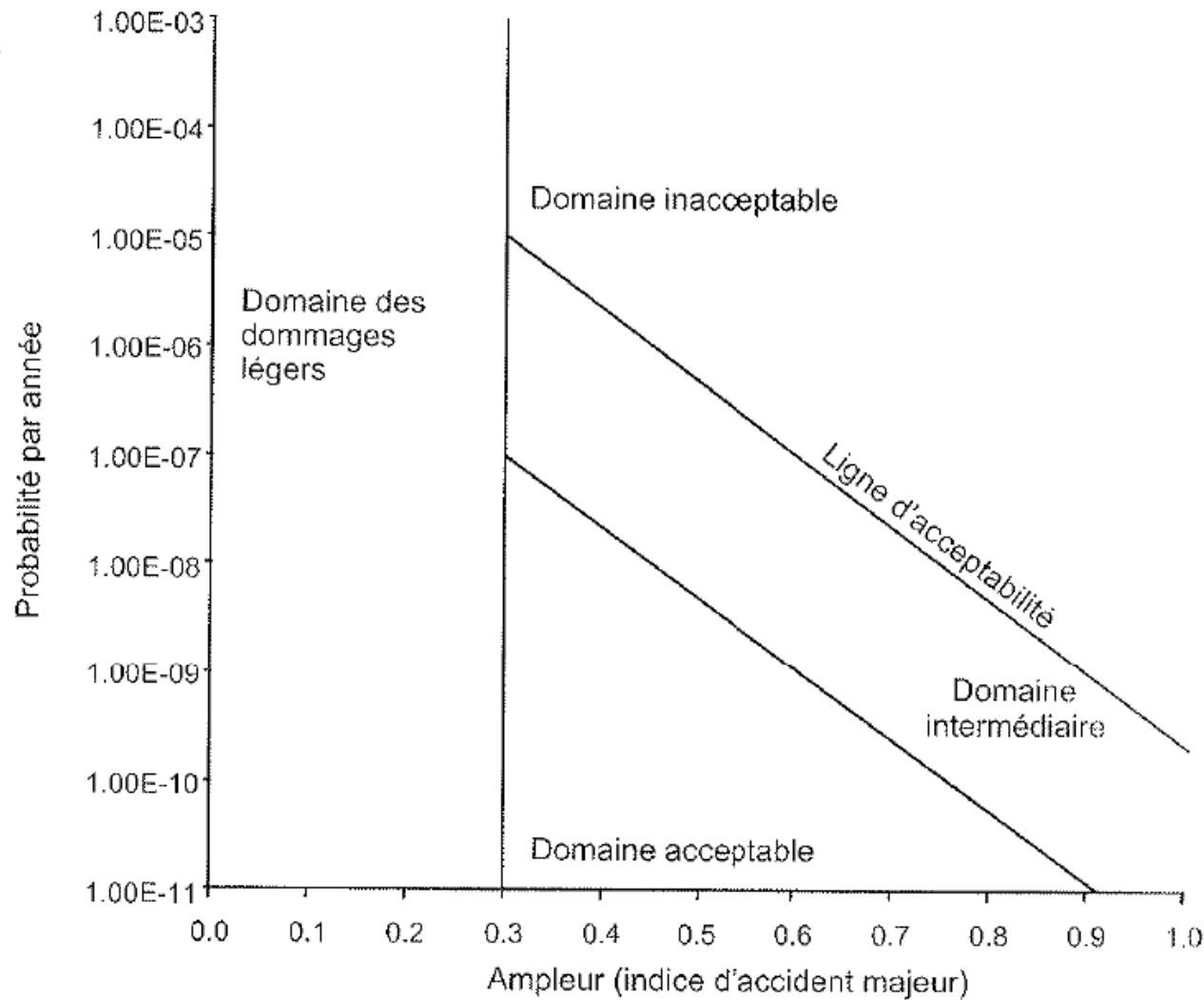
$$P_{\text{présence}} = f(\text{Scénario d'occupation})$$

- **Selon mode d'occupation du terrain
(présence des cibles)**

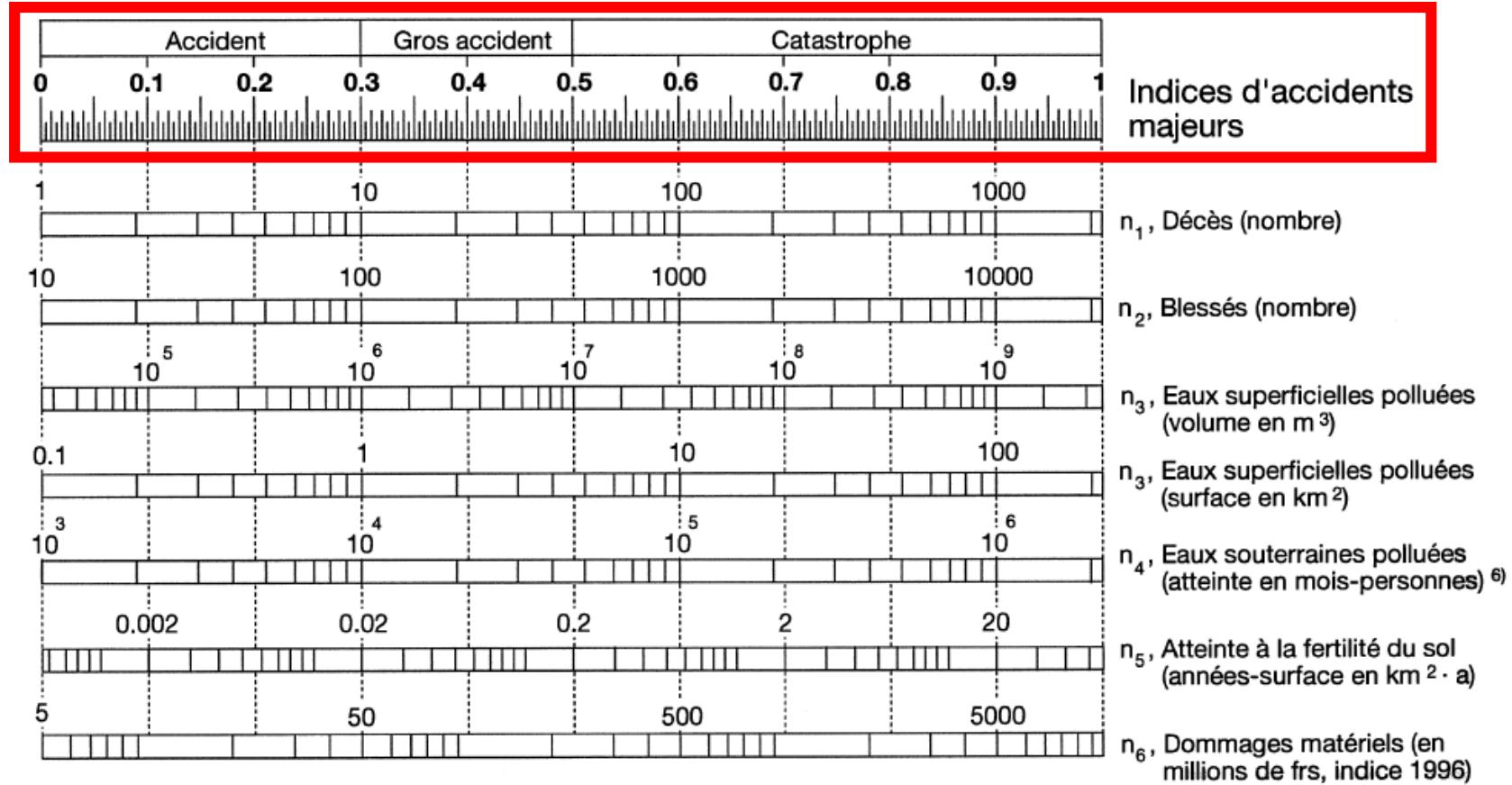
1. Evaluation des probabilités

- **Acceptabilité du risque**
 - **Notion « politique », « sociale »**
 - **ni formule ni valeur universelle (temps et géographie)**

1. Evaluation des probabilités



1. Evaluation des probabilités

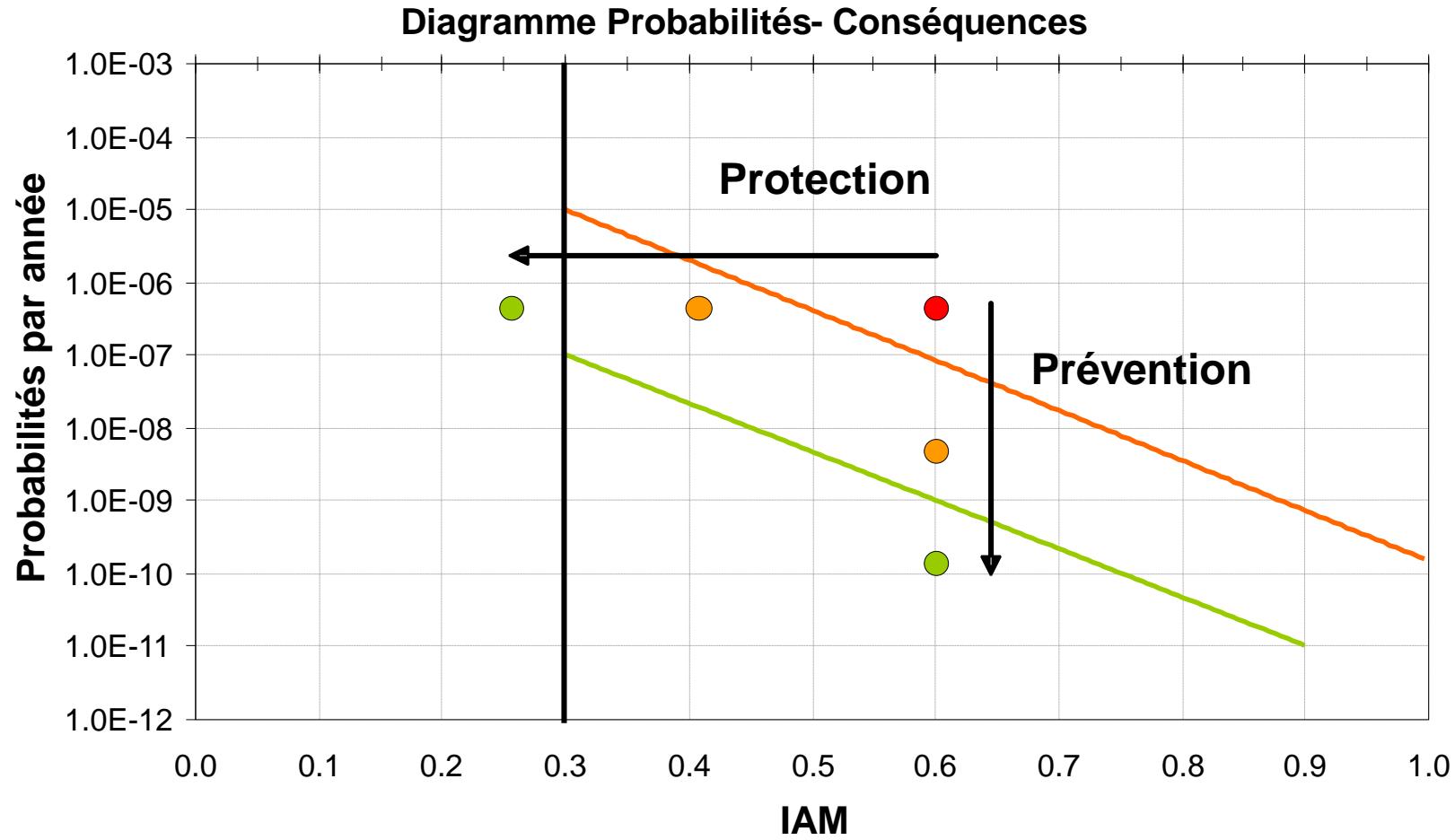


Source: Critères d'appréciation I pour l'ordonnance sur les accidents majeurs OPAM, OFEV, 1996

1. Evaluation des probabilités

- **Abscisse : Indice d'accident majeur (IAM)**
- **Ordonnée : $P_{\text{accident}} = P_{\text{événement}} \times P_{\text{présence}}$**
- **3 domaines + 1**
 - Inacceptable -> mesures de sécurité supplémentaires
 - Intermédiaire -> pesée des intérêts par l'autorité
 - Acceptable -> arrêt procédure
 - Accidents de faible ampleur ($\text{IAM} < 0.3$)

1. Evaluation des probabilités



1. Evaluation des probabilités

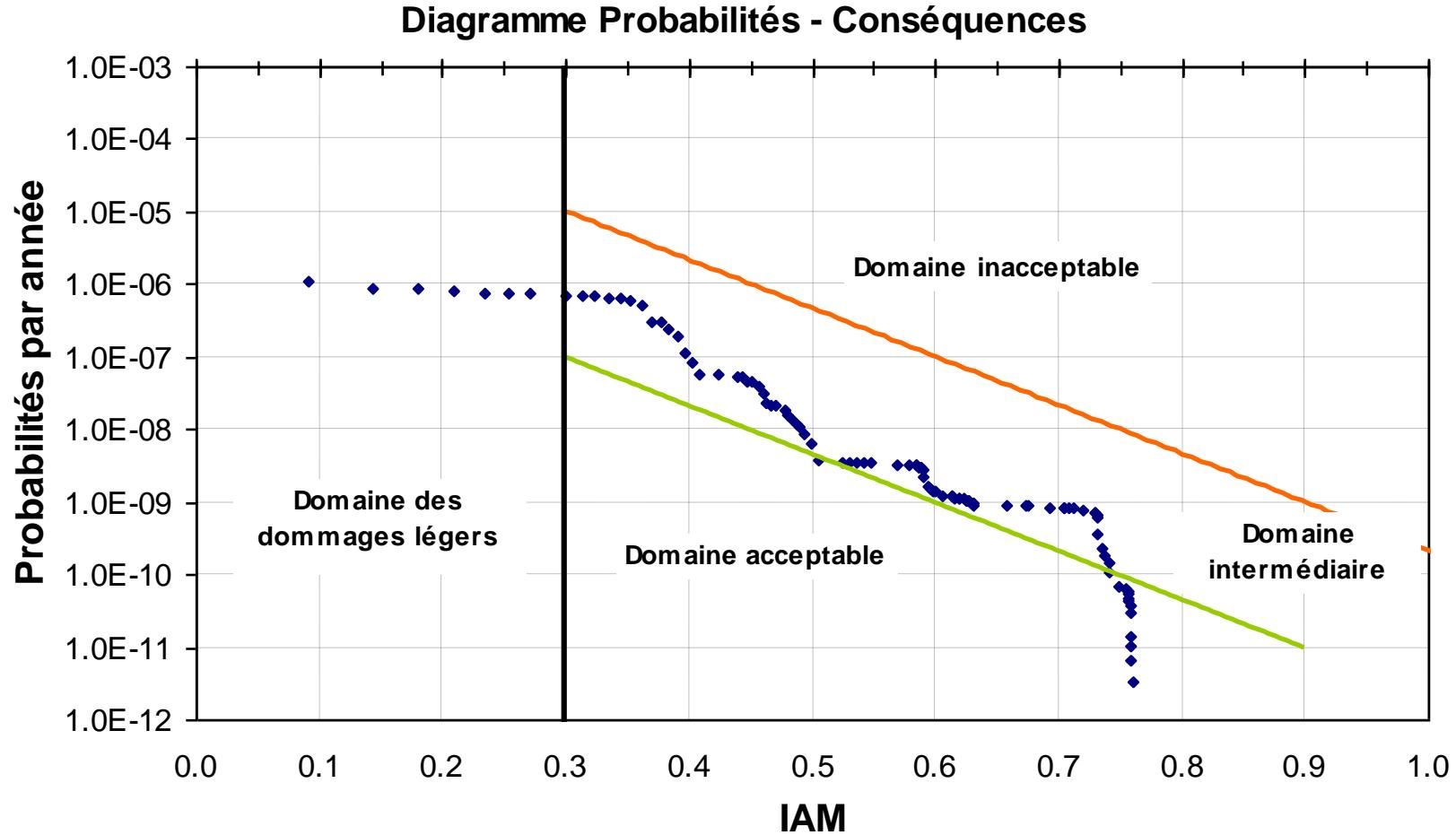
- **Prévention**

- Limiter les probabilités d'occurrences
 - **On agit sur les causes potentielles et donc sur la probabilité d'occurrence**

- **Protection**

- Limiter les dommages
 - **On agit sur les conséquences possibles et donc sur la gravité de l'évènement**

1. Evaluation des probabilités



1. Evaluation des probabilités

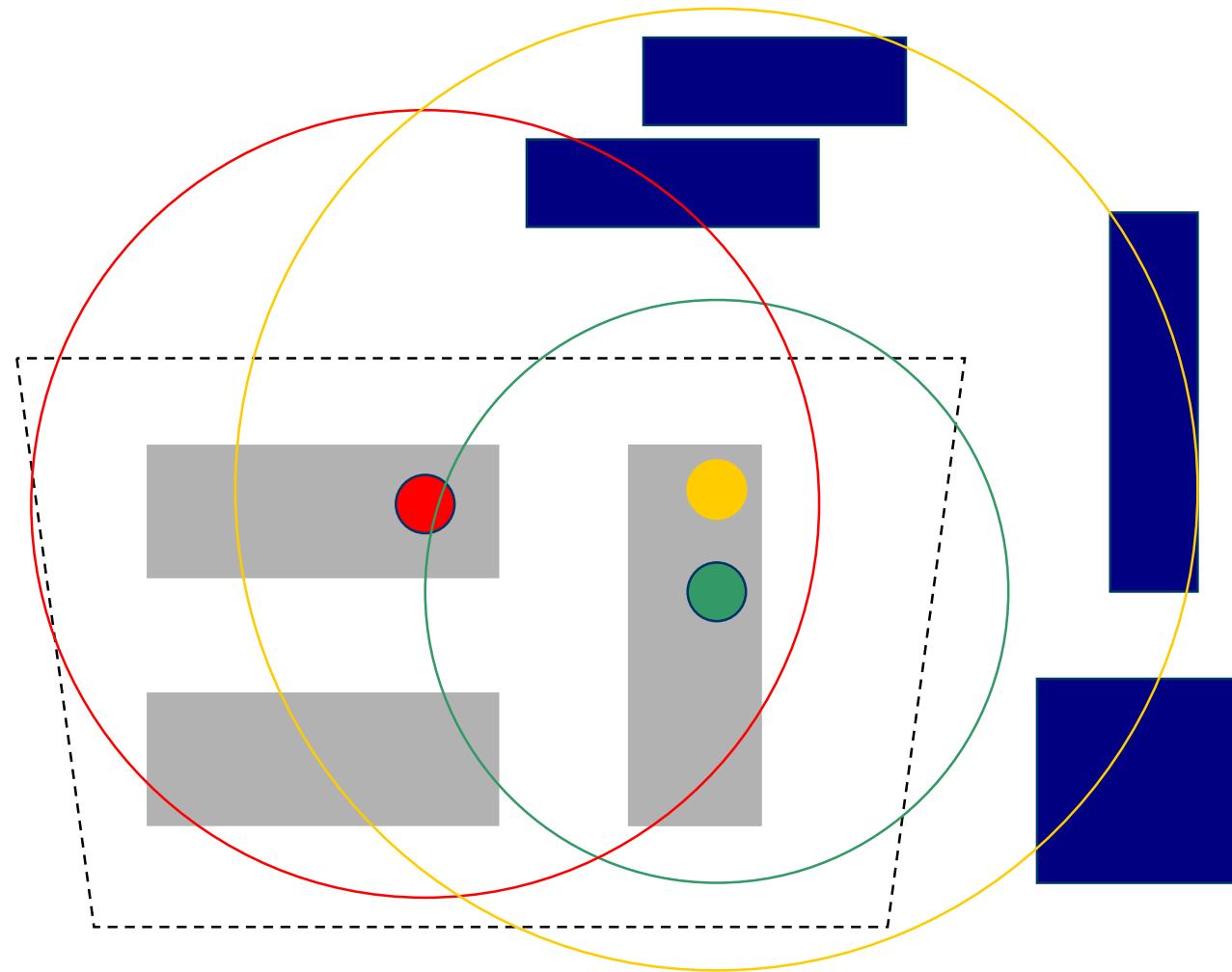
- **Attention : courbe cumulative**

Un point de la courbe cumulative indique avec quelle probabilité des dommages d'ampleur équivalente ou plus grande que ce point risquent de se produire, par année et par entreprise.

1. Evaluation des probabilités

- **Prise en considération de plusieurs scénarios**
 - Scénarios d'accident
 - Accident A (nature et effets propres)
 - Accident B
 - Accident C
 - Scénarios d'occupation
 - Jour
 - Nuit

1. Evaluation des probabilités



1. Evaluation des probabilités

Accident	Occupation	morts	P_{accident}
A	jour	5	1.5×10^{-10}
A	nuit	11	3×10^{-10}
B	nuit	15	2×10^{-12}
B	jour	8	1×10^{-12}
C	jour	0	2.1×10^{-9}
C	nuit	0	4.2×10^{-9}

1. Evaluation des probabilités

Accident	Occupation	morts	P_{accident}
B	nuit	15	2×10^{-12}
A	nuit	11	3×10^{-10}
B	jour	8	1×10^{-12}
A	jour	5	1.5×10^{-10}
C	jour	0	2.1×10^{-9}
C	nuit	0	4.2×10^{-9}

2. Evaluation des probabilités

	IAM	morts	P_{accident}
		15	2×10^{-12}
		11	3×10^{-10}
		8	1×10^{-12}
		5	1.5×10^{-10}
		0	2.1×10^{-9}
		0	4.2×10^{-9}

1. Evaluation des probabilités

	IAM	morts	P_{accident}
	0.35	15	2×10^{-12}
	0.31	11	3×10^{-10}
	0.27	8	1×10^{-12}
	0.1	5	1.5×10^{-10}
	-	0	2.1×10^{-9}
	-	0	4.2×10^{-9}

1. Evaluation des probabilités

P_{cumul}	IAM	morts	$P_{accident}$
2.00E-12	0.35	15	2E-12
3.02E-10	0.31	11	3E-10
3.03E-10	0.27	8	1E-12
4.53E-10	0.1	5	1.5E-10
2.55E-09	-	0	2.1E-9
6.75E-09	-	0	4.2E-9

1. Evaluation des probabilités

