



**PRUDENT**  
GROUPE CONSEIL

## La modélisation des risques industriels

**SIGRM 2007**

**Luc Piché, ing.**



**PRUDENT™**  
GROUPE CONSEIL

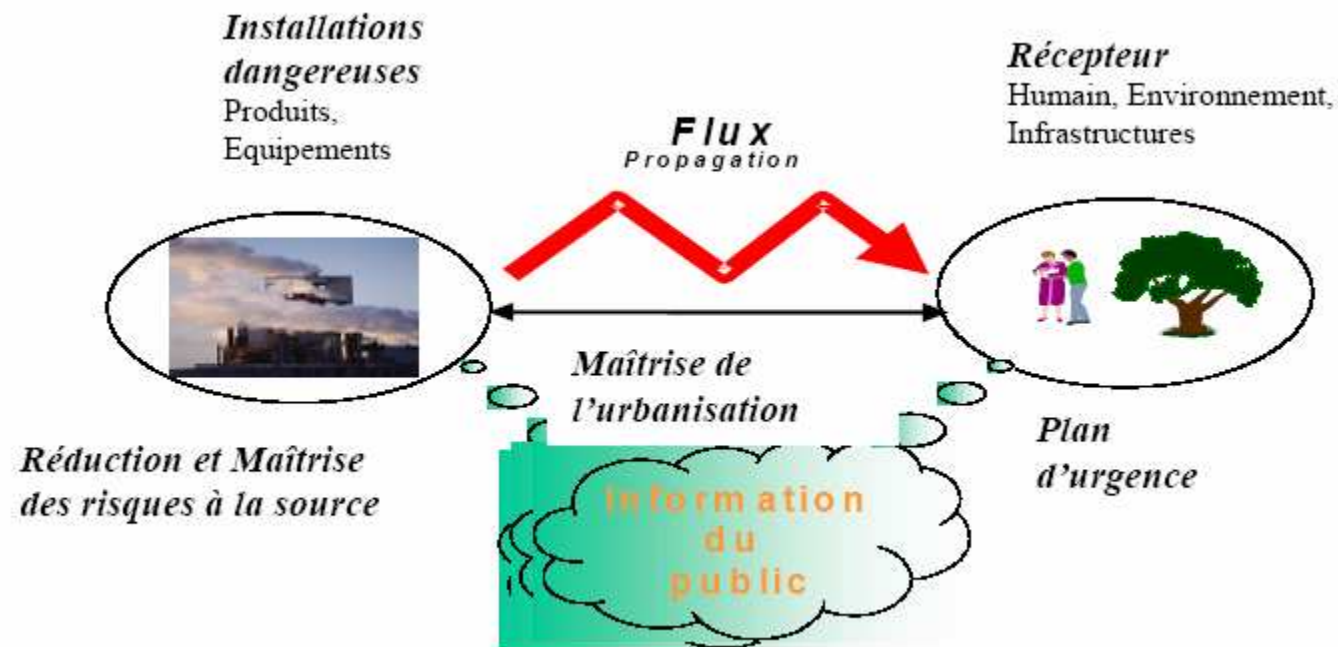
GESTION INTÉGRÉE DES RISQUES À LA SÉCURITÉ

# CONTENU

- Revue des diverses applications de la modélisation dans la gestion des risques industriels;
- Survol des modèles les plus couramment utilisés;
- Les erreurs les plus fréquentes;
- Conclusion.

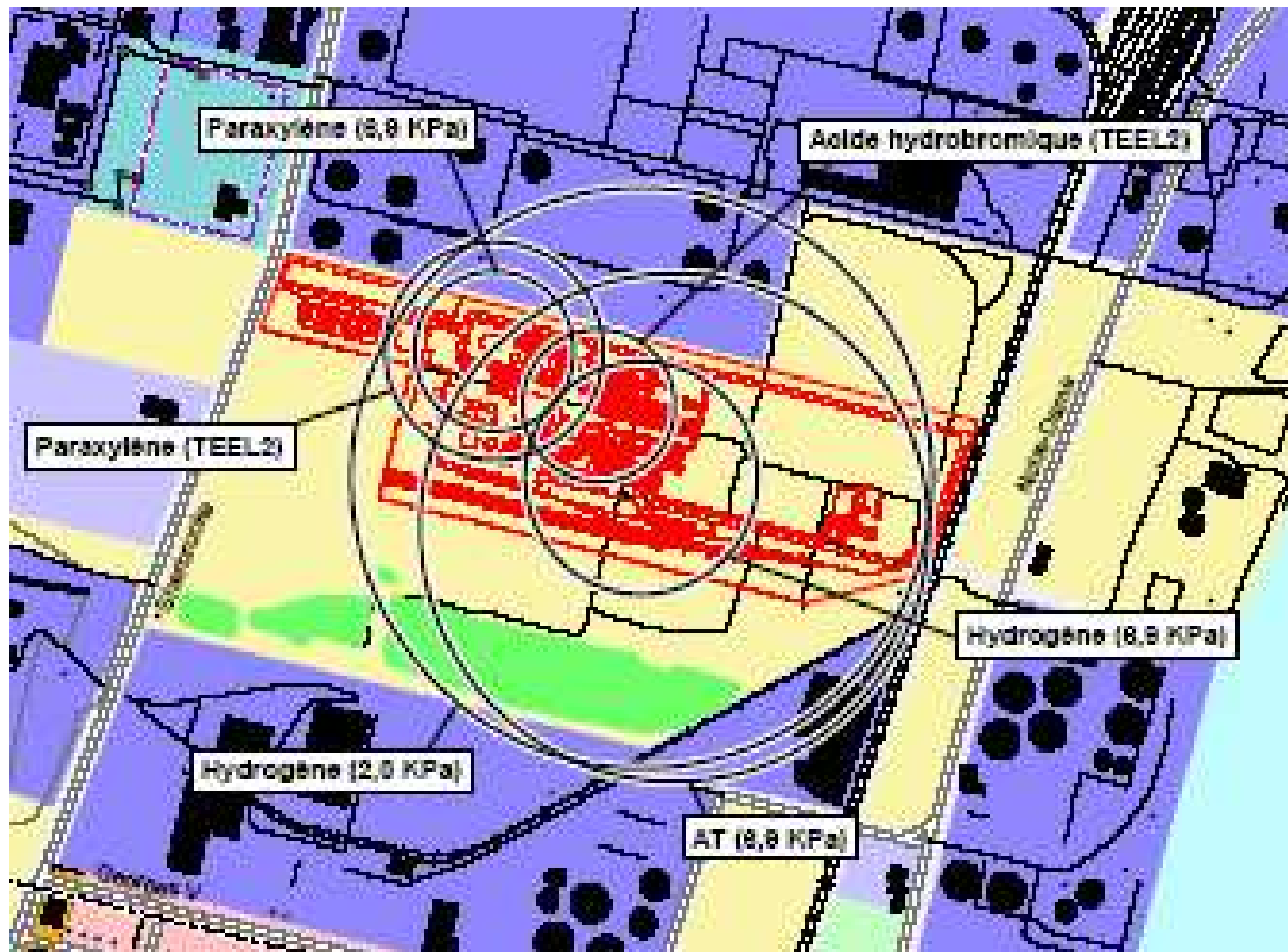


# DIVERSES APPLICATIONS DE LA MODÉLISATION



**GESTION INTÉGRÉE DES RISQUES**

# DÉFINIR DES DISTANCES DE SÉPARATIONS ENTRE LES ÉQUIPEMENTS



**GESTION INTÉGRÉE DES RISQUES**

# DÉFINIR DES DISTANCES DE SÉPARATIONS ENTRE LES ÉQUIPEMENTS



**GESTION INTÉGRÉE DES RISQUES**

# DÉFINIR DES DISTANCES DE SÉPARATIONS ENTRE LES BÂTIMENTS ET LES ÉQUIPEMENTS



*Figure 7. Conséquence de l'explosion de l'usine AZF dans l'entourage immédiat de l'atelier*

# PLANIFICATION DES MESURES D'URGENCE



**GESTION INTÉGRÉE DES RISQUES**

# PLANIFICATION DES MESURES D'URGENCE



**GESTION INTÉGRÉE DES RISQUES**

# LOCALISATION SÉCURITAIRE DES SOURCES DE REJET À L'ATMOSPHÈRE



GESTION INTÉGRÉE DES RISQUES

# LOCALISATION SÉCURITAIRE DES SOURCES DE REJET À L'ATMOSPHÈRE

OIL FIELD BATTERY TANK VENT

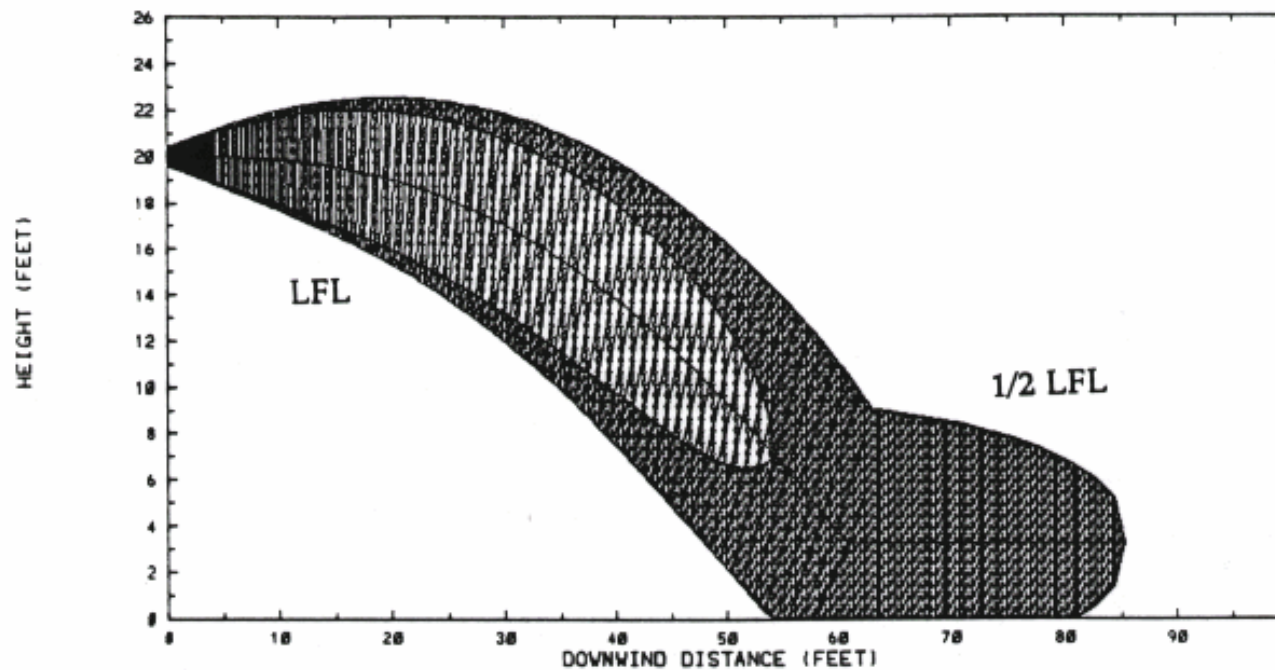
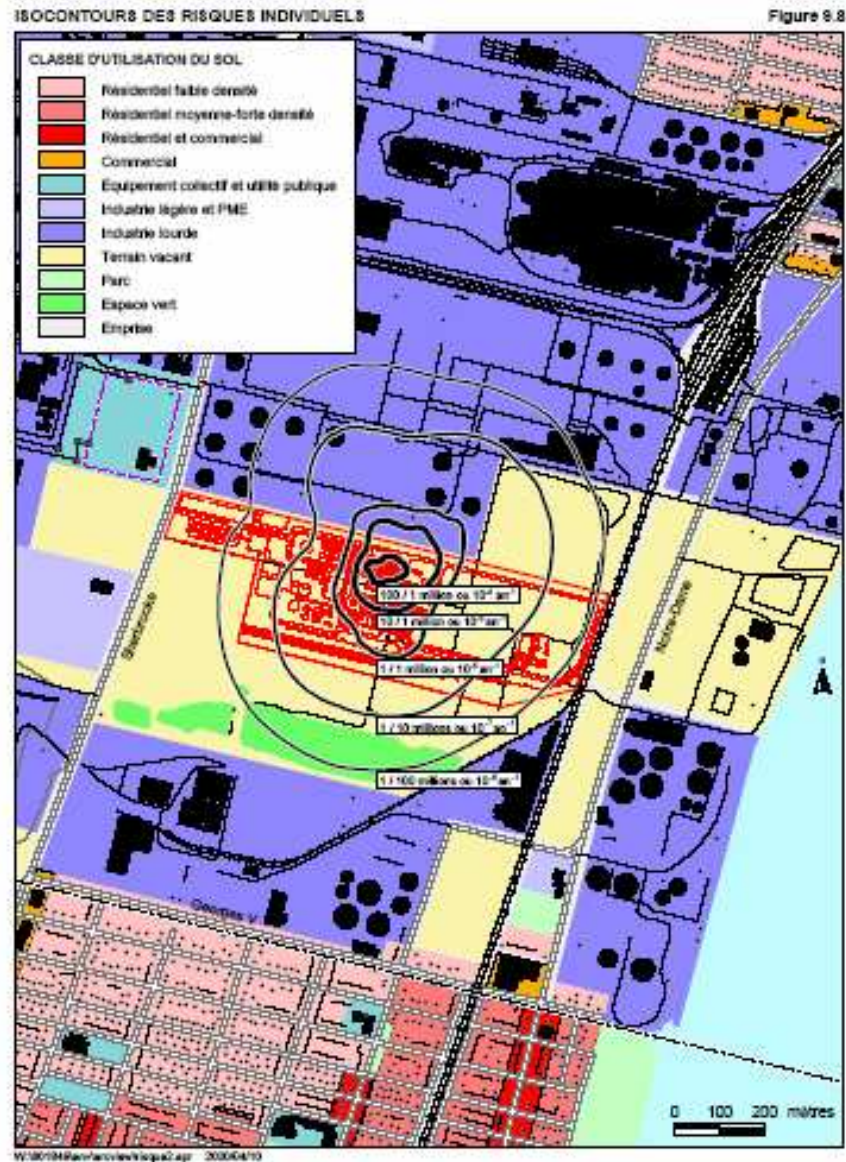


Figure 5. Case 3a

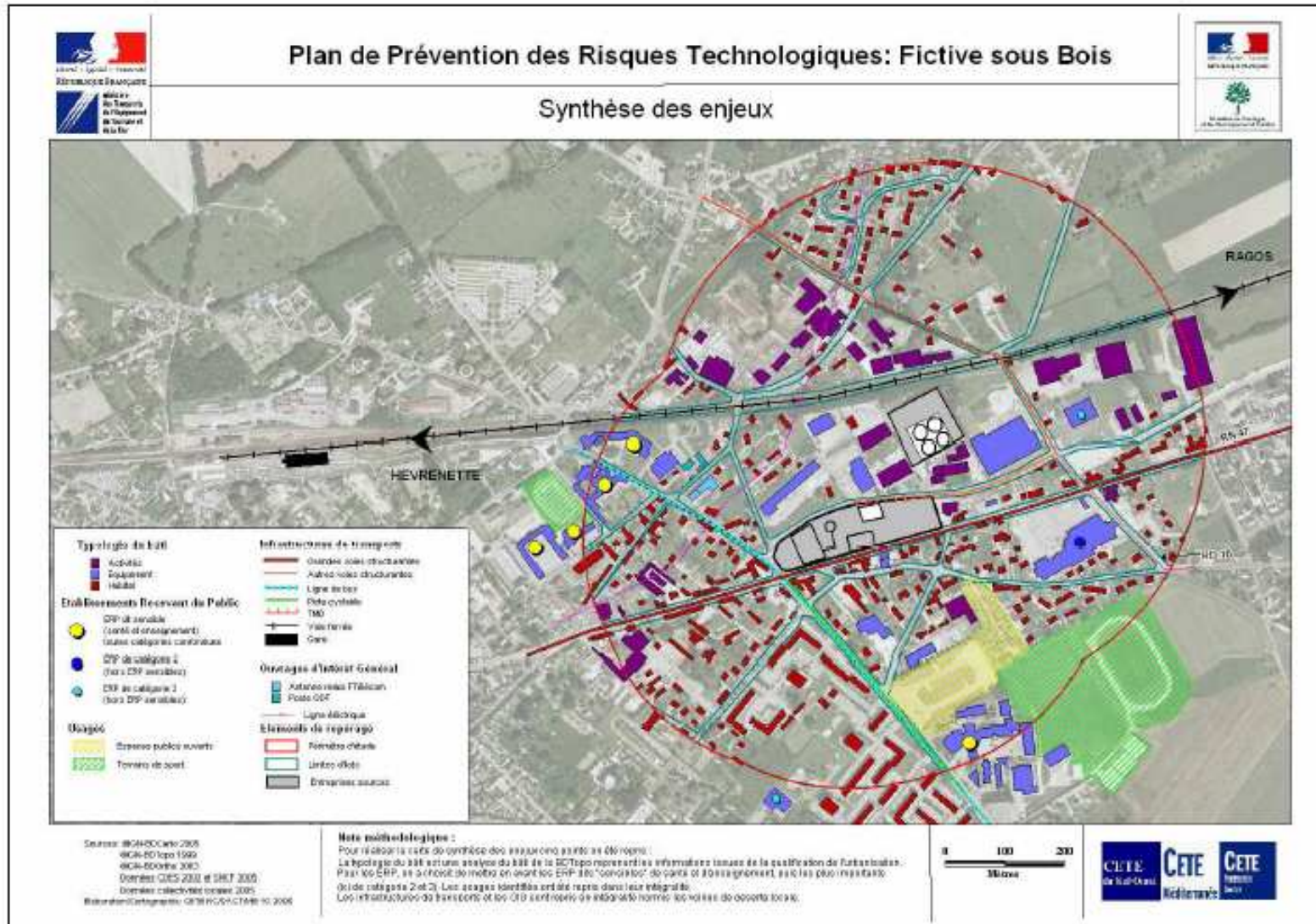
GESTION INTÉGRÉE DES RISQUES

# ANALYSE QUANTITATIVE DE RISQUES



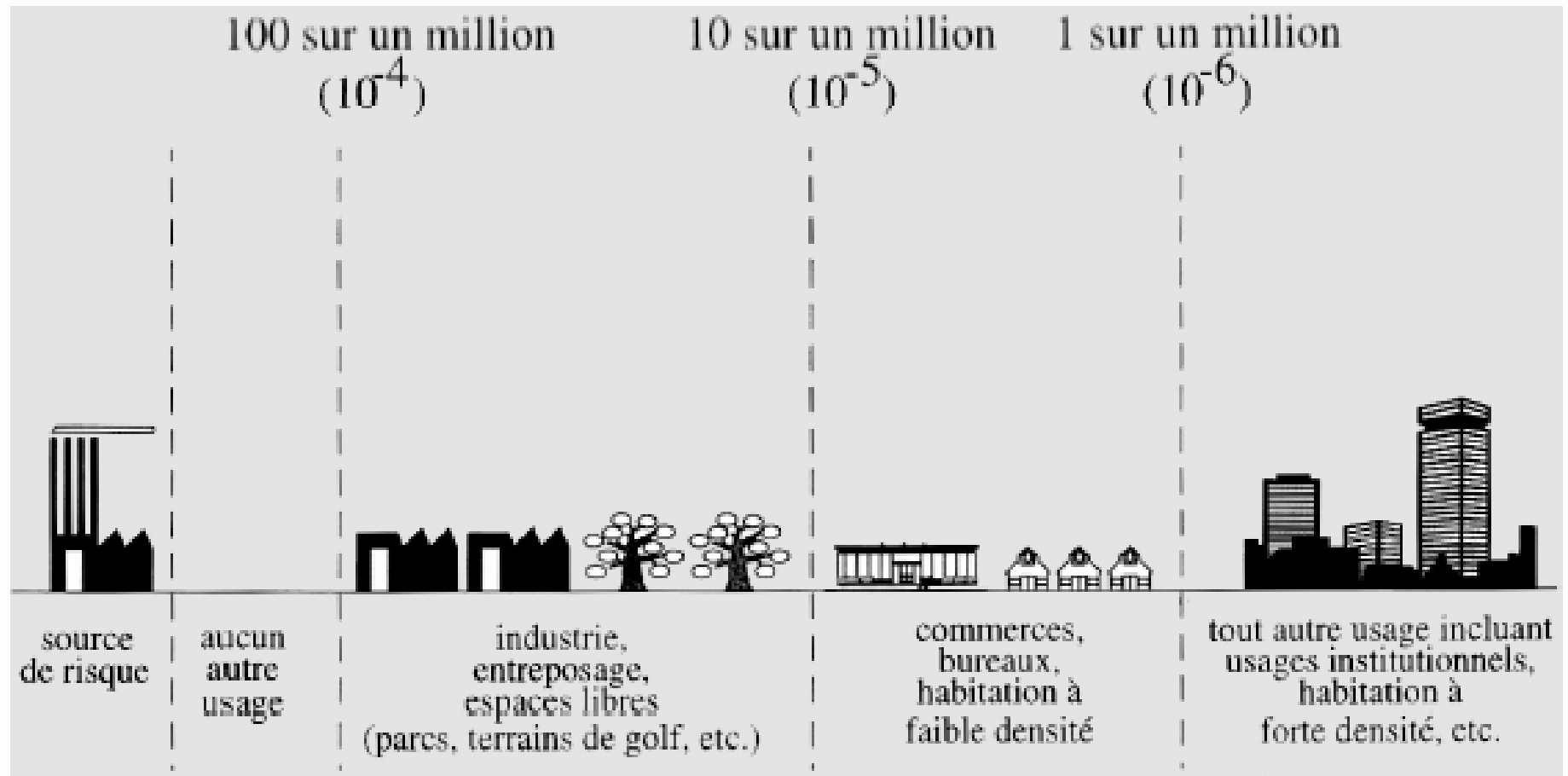
GESTION INTÉGRÉE DES RISQUES

# GESTION ET AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE



## GESTION INTÉGRÉE DES RISQUES

# GESTION ET AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE



## GESTION INTÉGRÉE DES RISQUES

# GESTION ET AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE

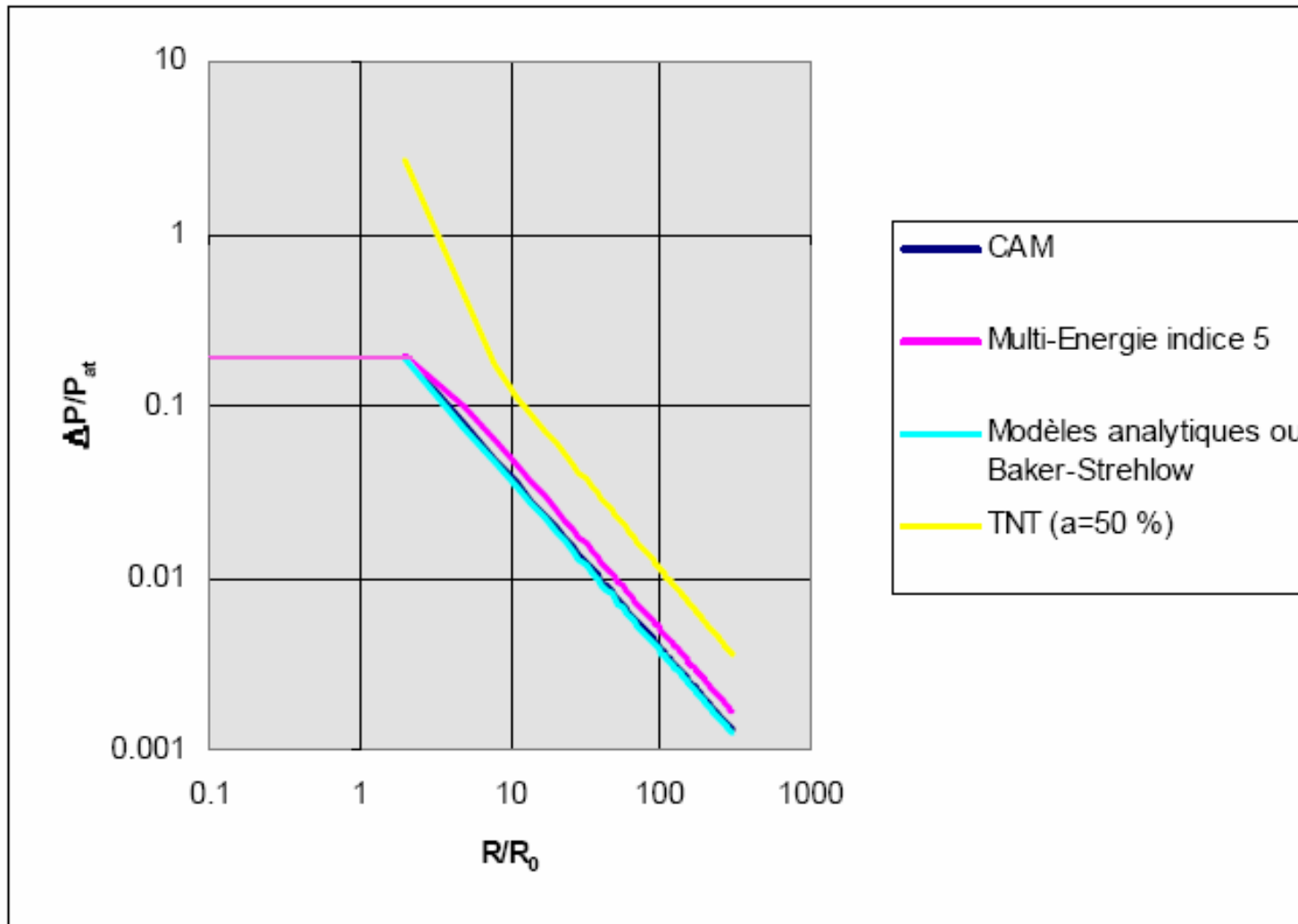


**GESTION INTÉGRÉE DES RISQUES**

# DIVERSES APPLICATIONS DE LA MODÉLISATION

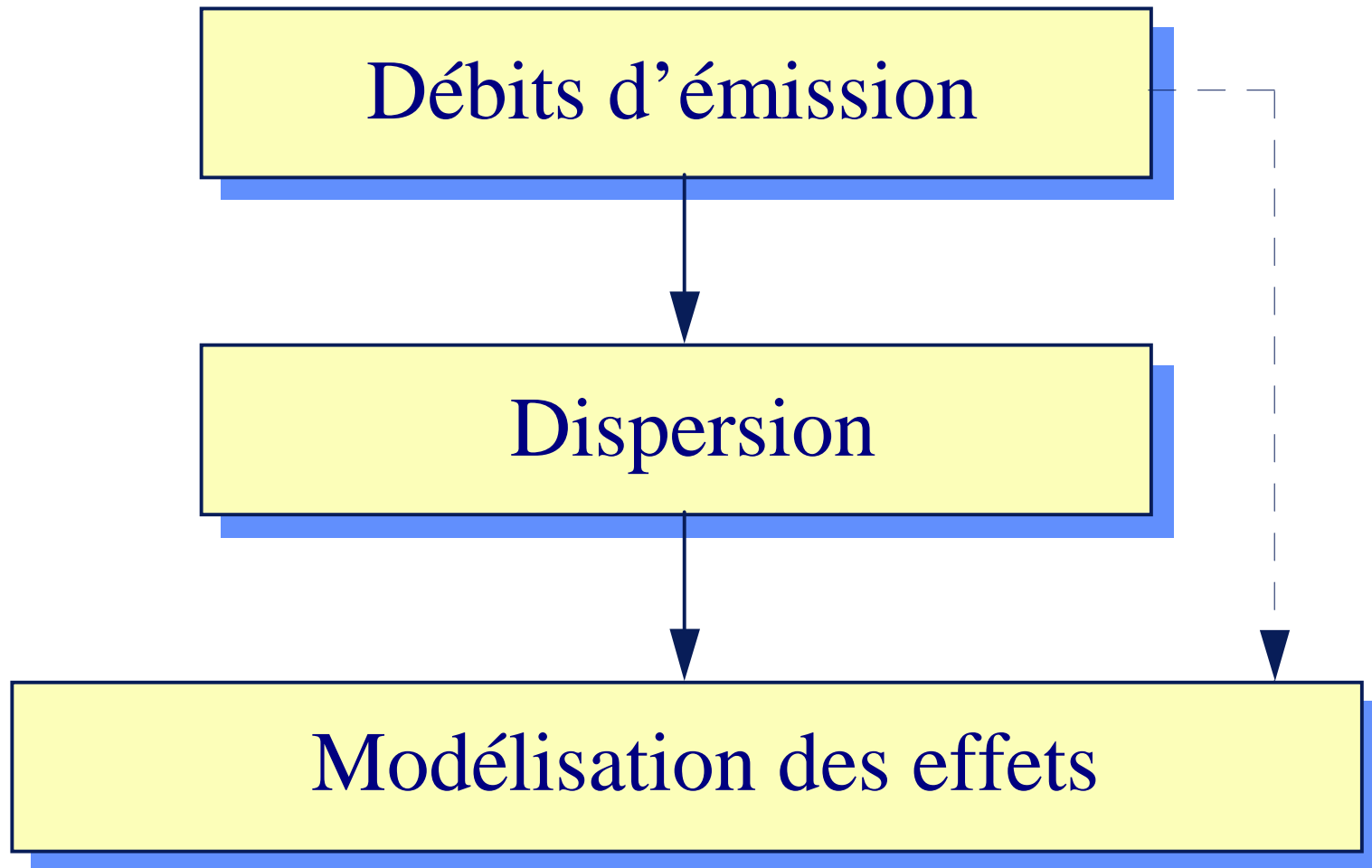
- Le type d'application va dicter le type de modèle à utiliser.
- Pour un même phénomène dangereux, par exemple l'explosion d'un nuage de gaz inflammable à l'air libre, il peut exister plusieurs modèles disponibles.

# DIVERSES APPLICATIONS DE LA MODÉLISATION



GESTION INTÉGRÉE DES RISQUES

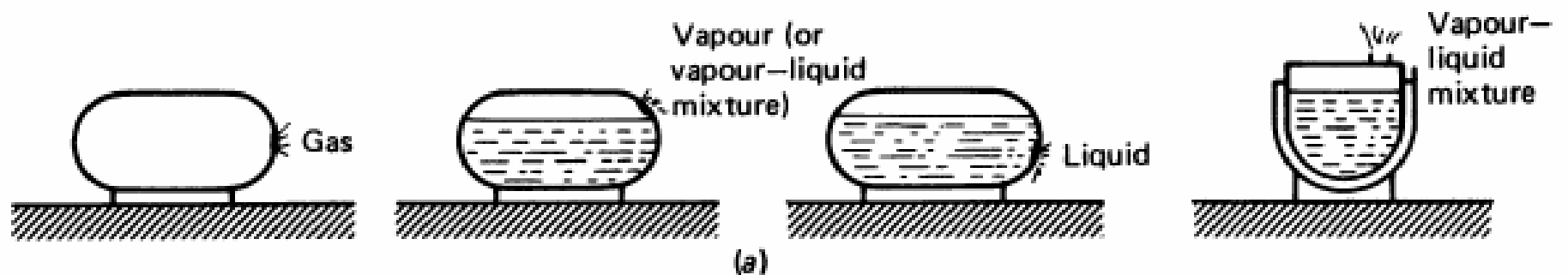
# ÉTAPES D'UNE MODÉLISATION



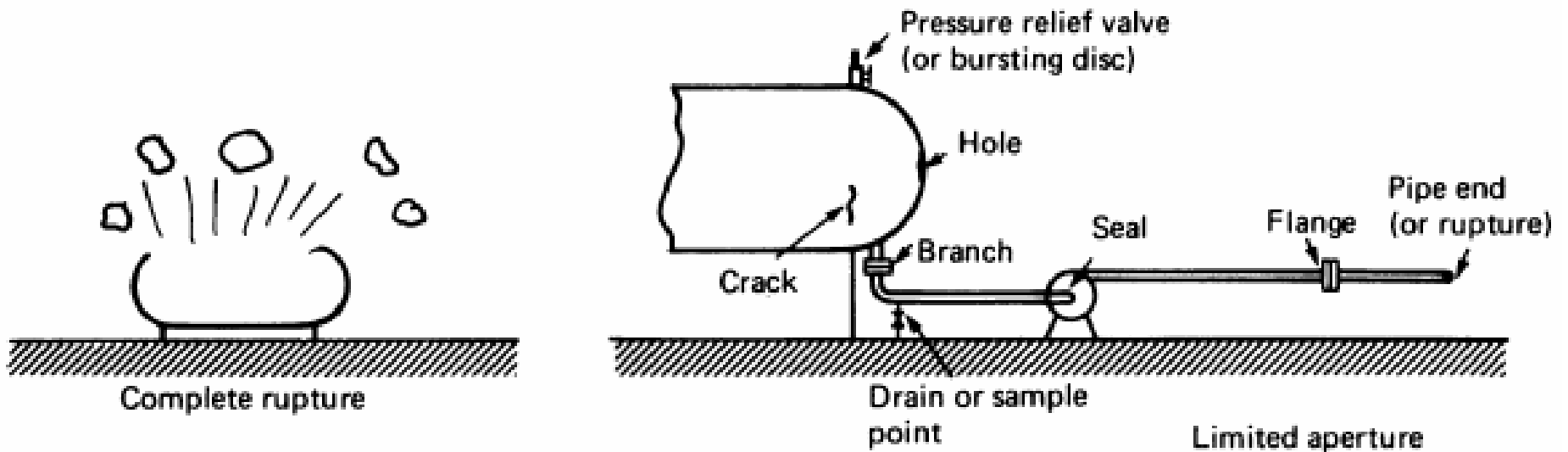
# FAMILLES DE MODÈLES LES PLUS COURAMMENT UTILISÉS

- **Modélisation du terme source**
- **Modélisation de la dispersion atmosphérique**
- **Modélisation des incendies**
- **Modélisation des explosions**
- **Modélisation des éclatements de réservoirs**

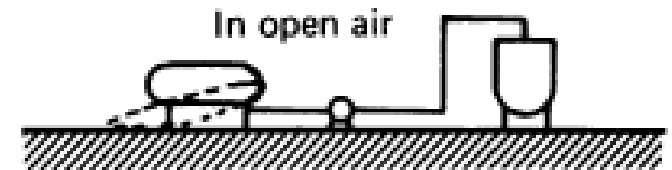
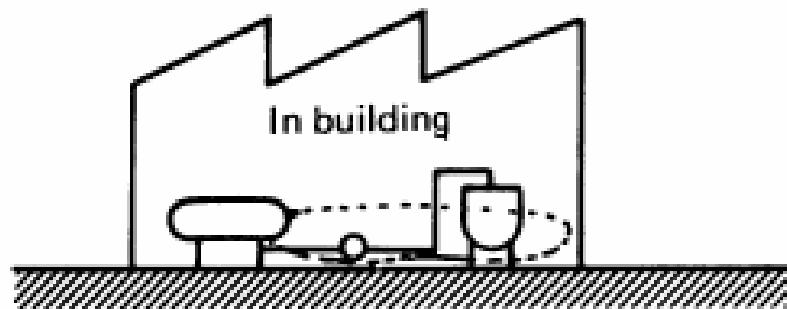
# MODÉLISATION DU TERME SOURCE



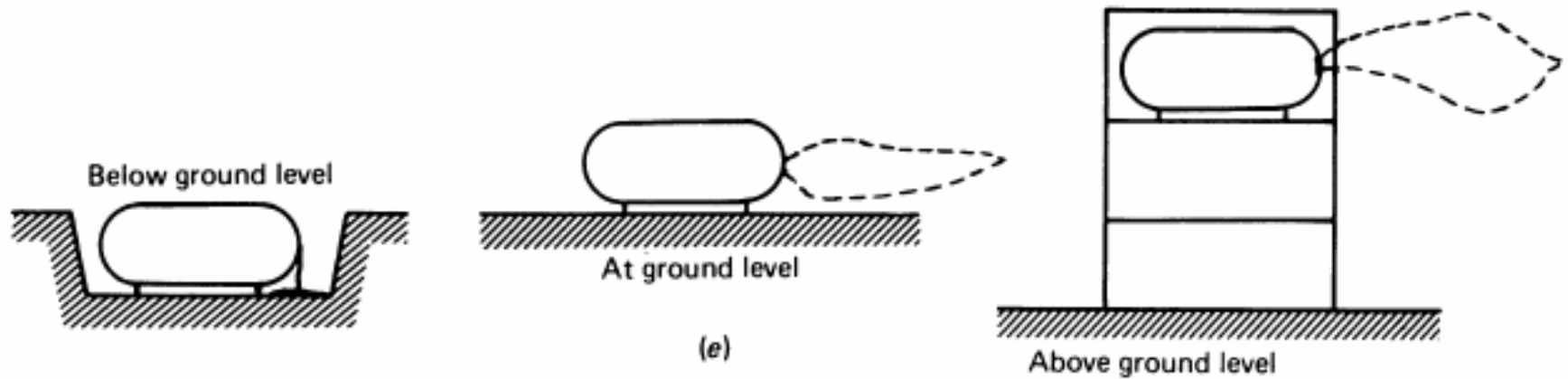
# MODÉLISATION DU TERME SOURCE



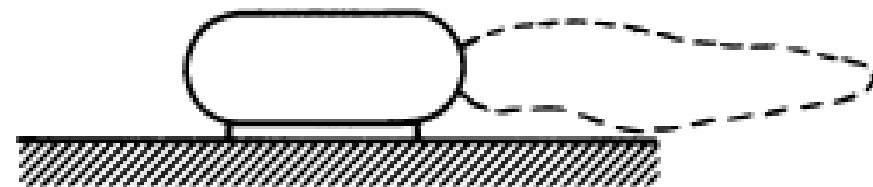
# MODÉLISATION DU TERME SOURCE



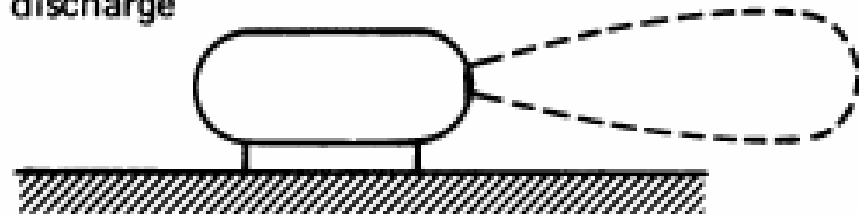
# MODÉLISATION DU TERME SOURCE



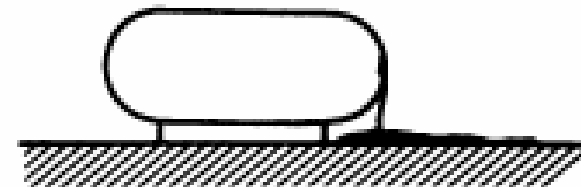
# MODÉLISATION DU TERME SOURCE



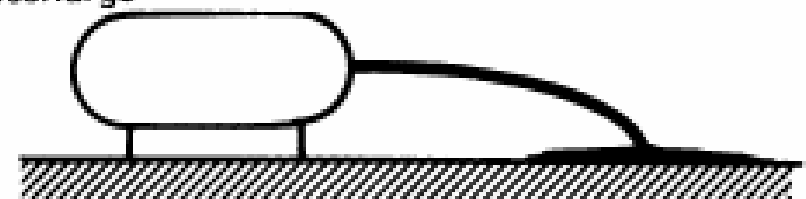
Plume from low momentum gas discharge



Turbulent momentum jet from high momentum gas discharge



Stream from low momentum liquid discharge



High 'throw' jet from high momentum liquid discharge

# MODÉLISATION DU TERME SOURCE

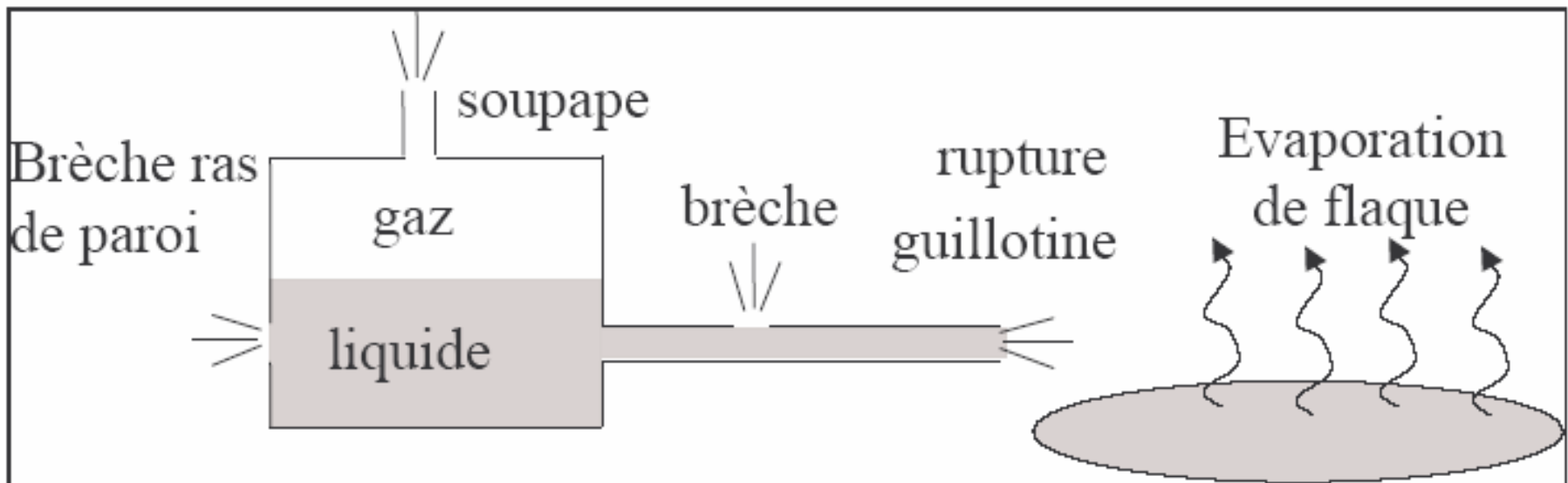
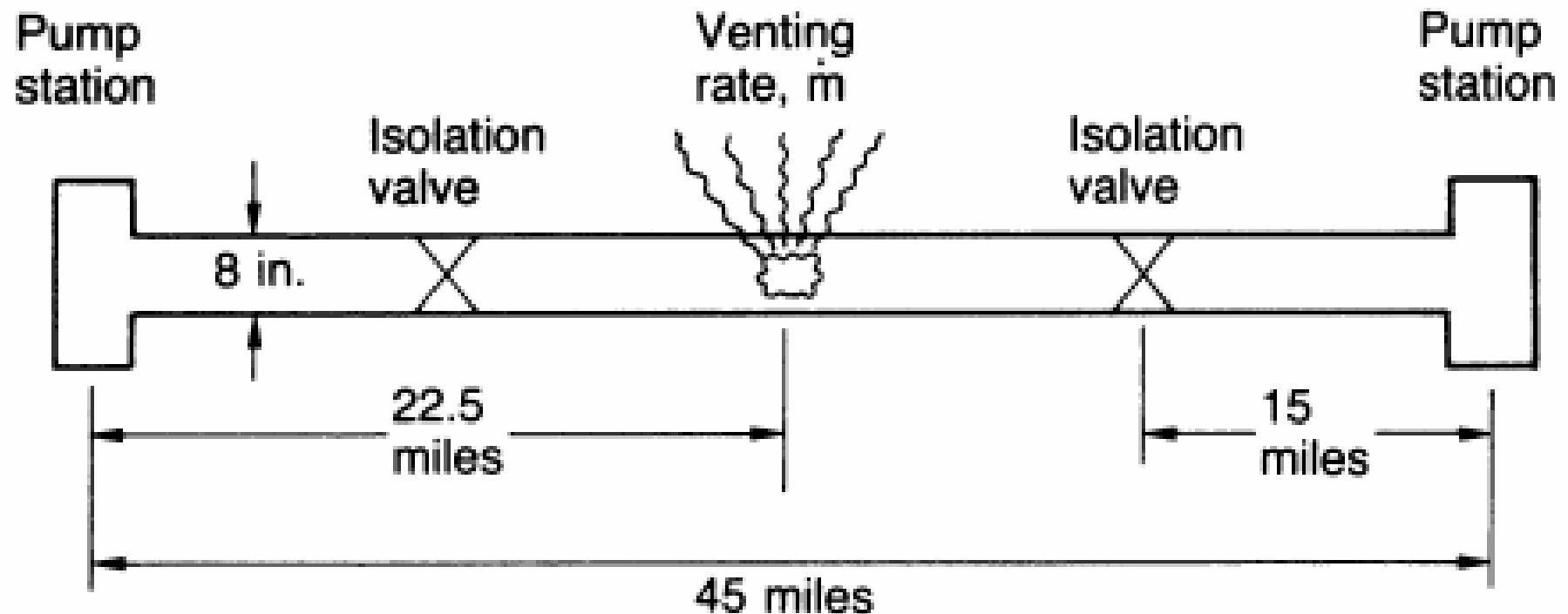


Figure 4 : Principaux modes de rejets à l'atmosphère

# MODÉLISATION DU TERME SOURCE



# REJET LIQUIDE COMPLEXE

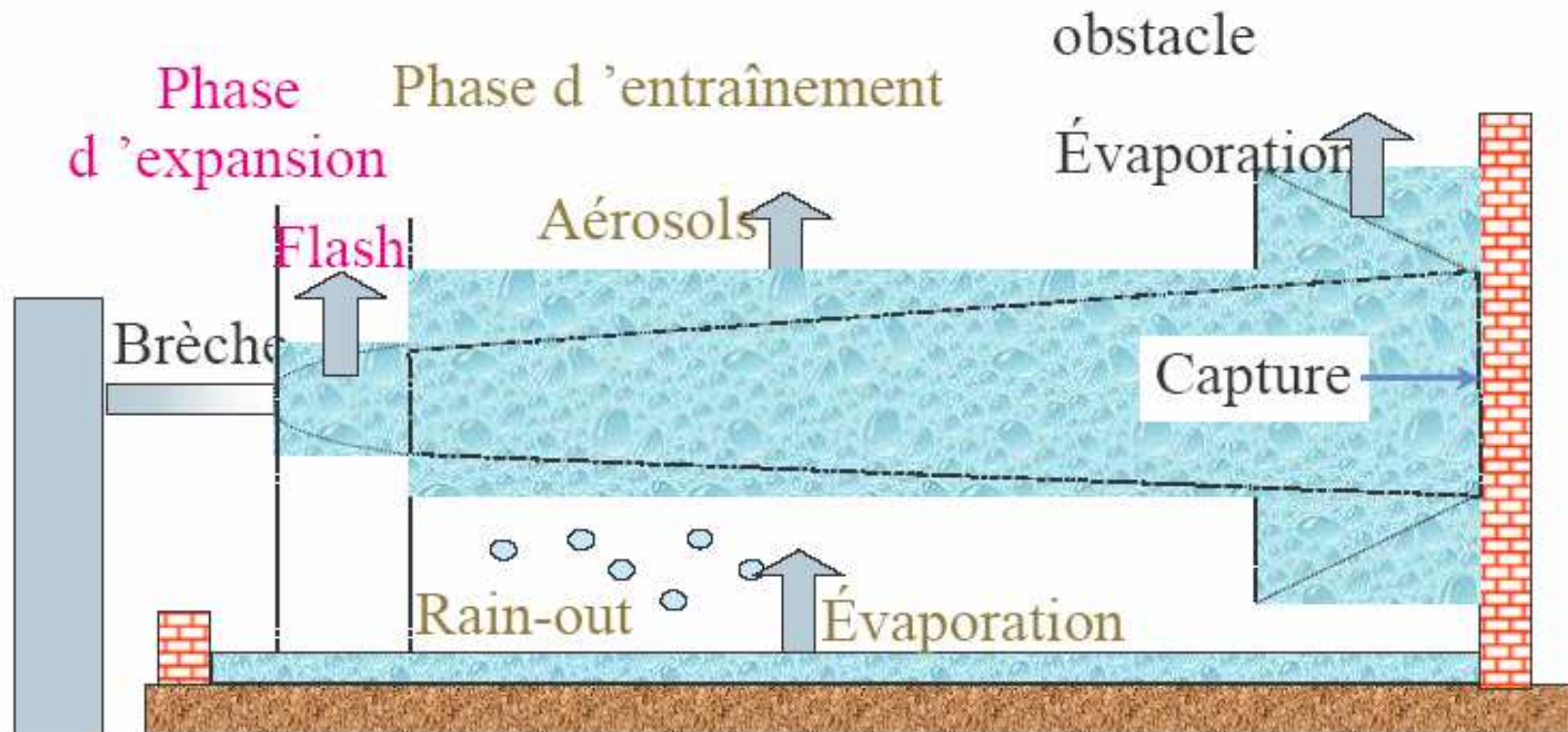
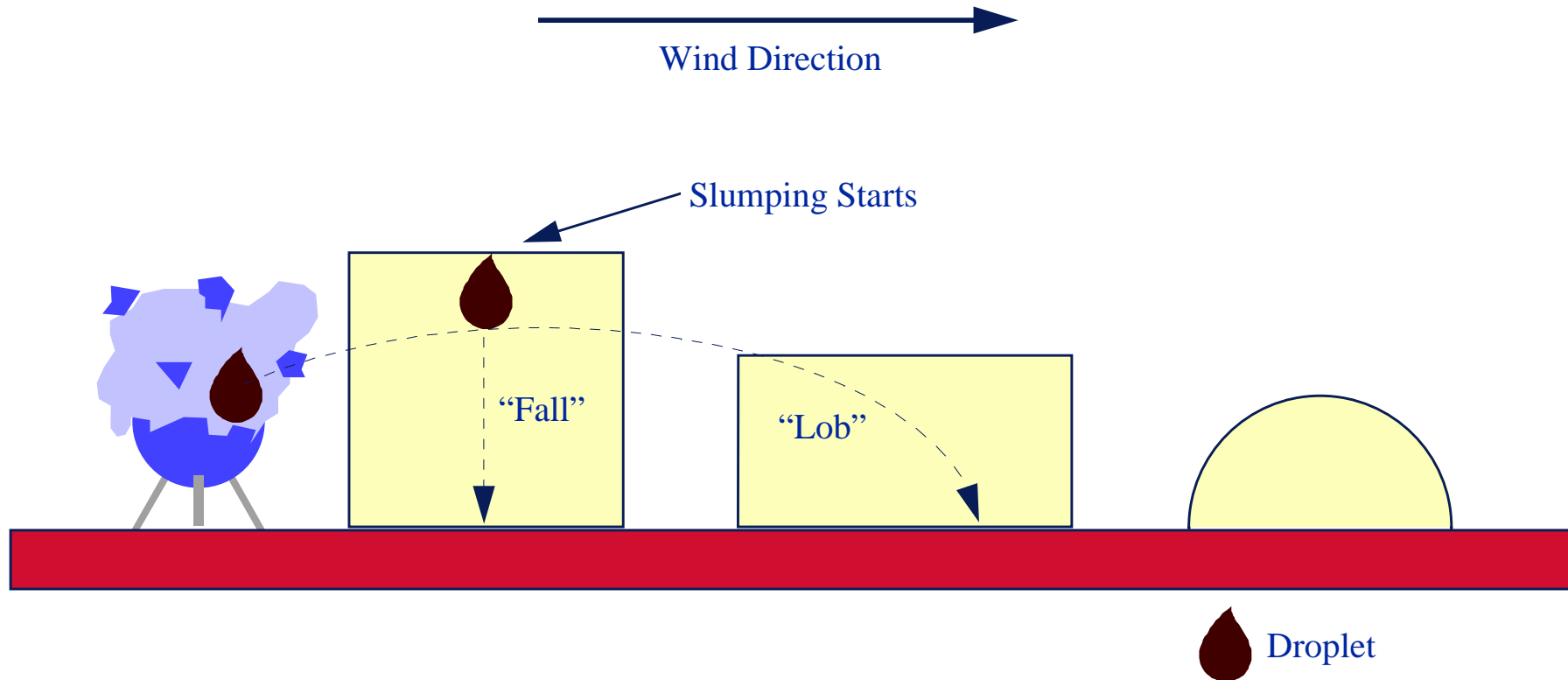


Figure 3 : Exemple de terme source pour un rejet continu de gaz liquéfié

# DISPERSION D'AÉROSOL



# ÉVAPORATION DE NAPPE

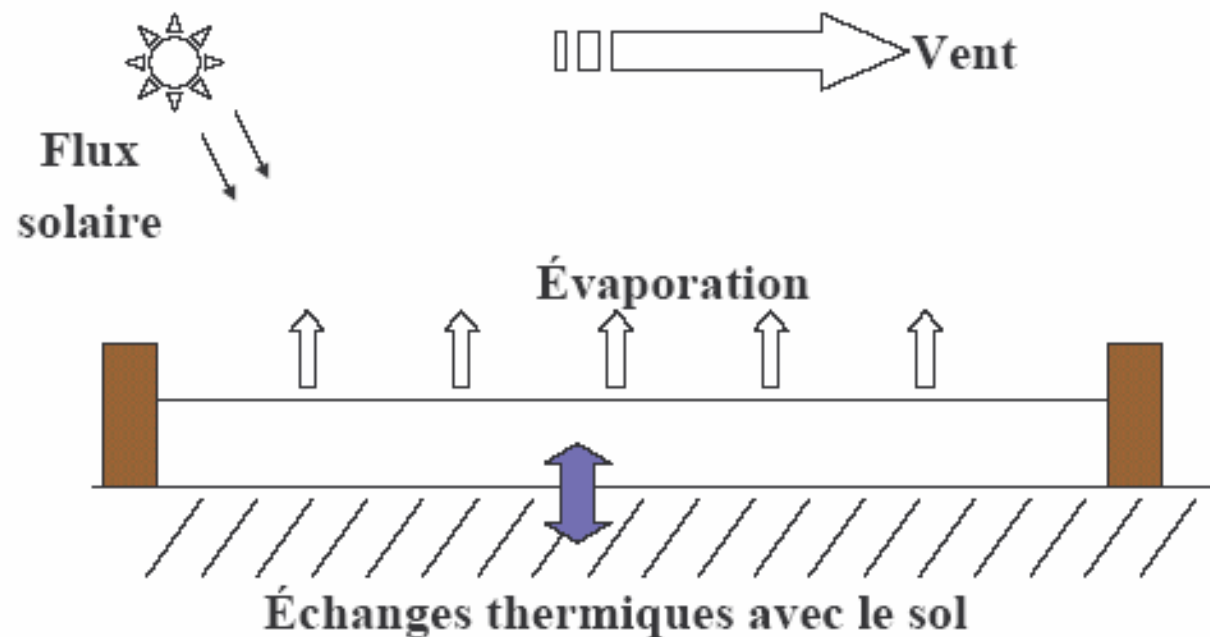
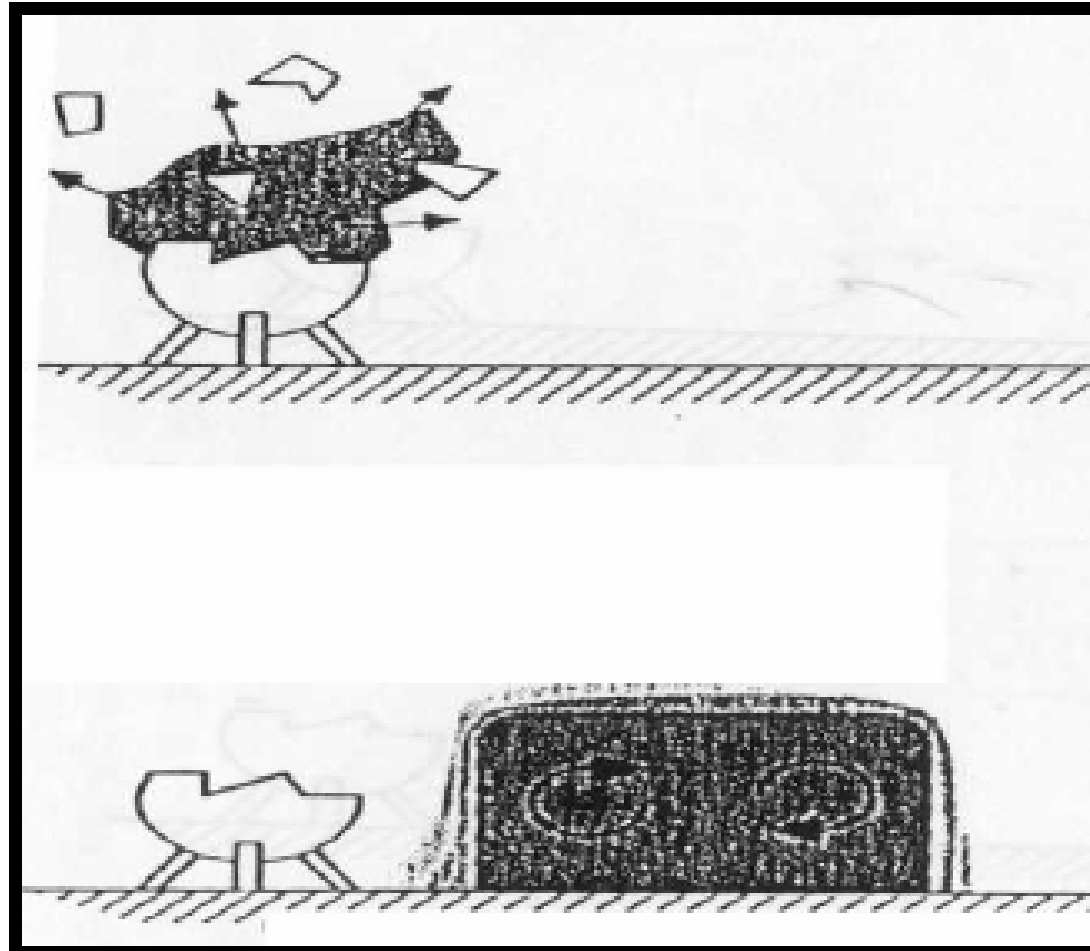


Figure 10 : flux de matière et de chaleur au cours de l'évaporation d'une flaque de liquide

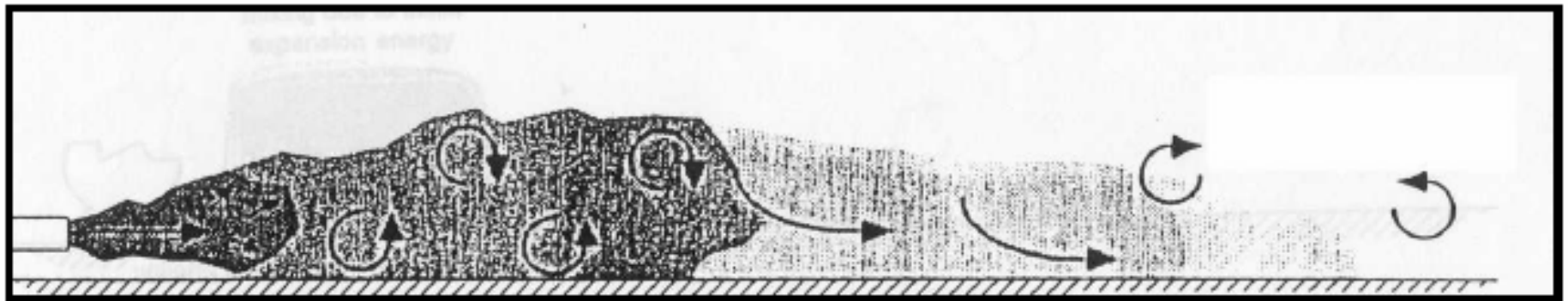
# DISPERSION ATMOSPHERIQUE



*Figure 1 : Rejet instantané d'un produit*

**GESTION INTÉGRÉE DES RISQUES**

# DISPERSION ATMOSPHERIQUE



*Figure 2 : Rejet continu d'un produit*

# DISPERSION ATMOSPHÉRIQUE

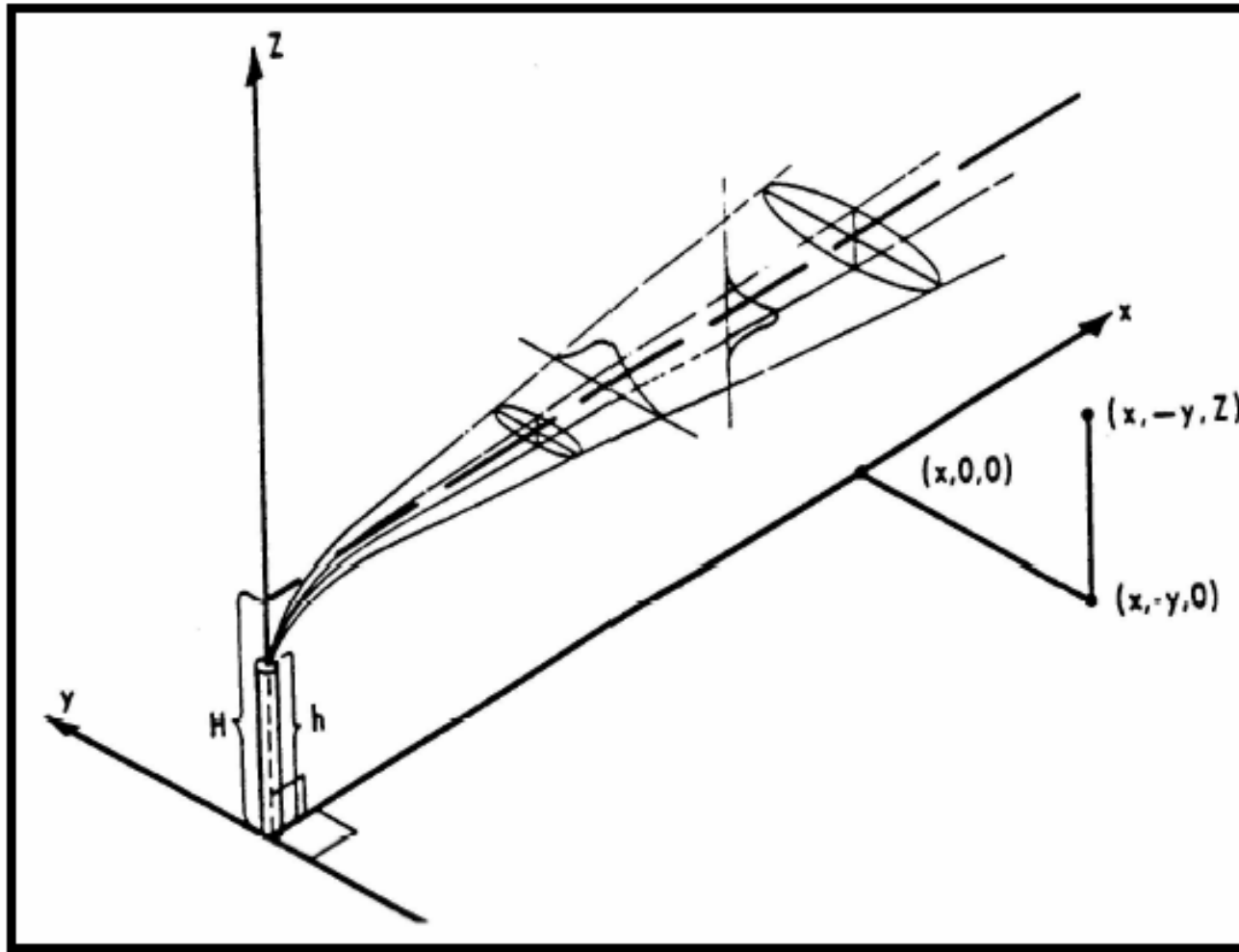
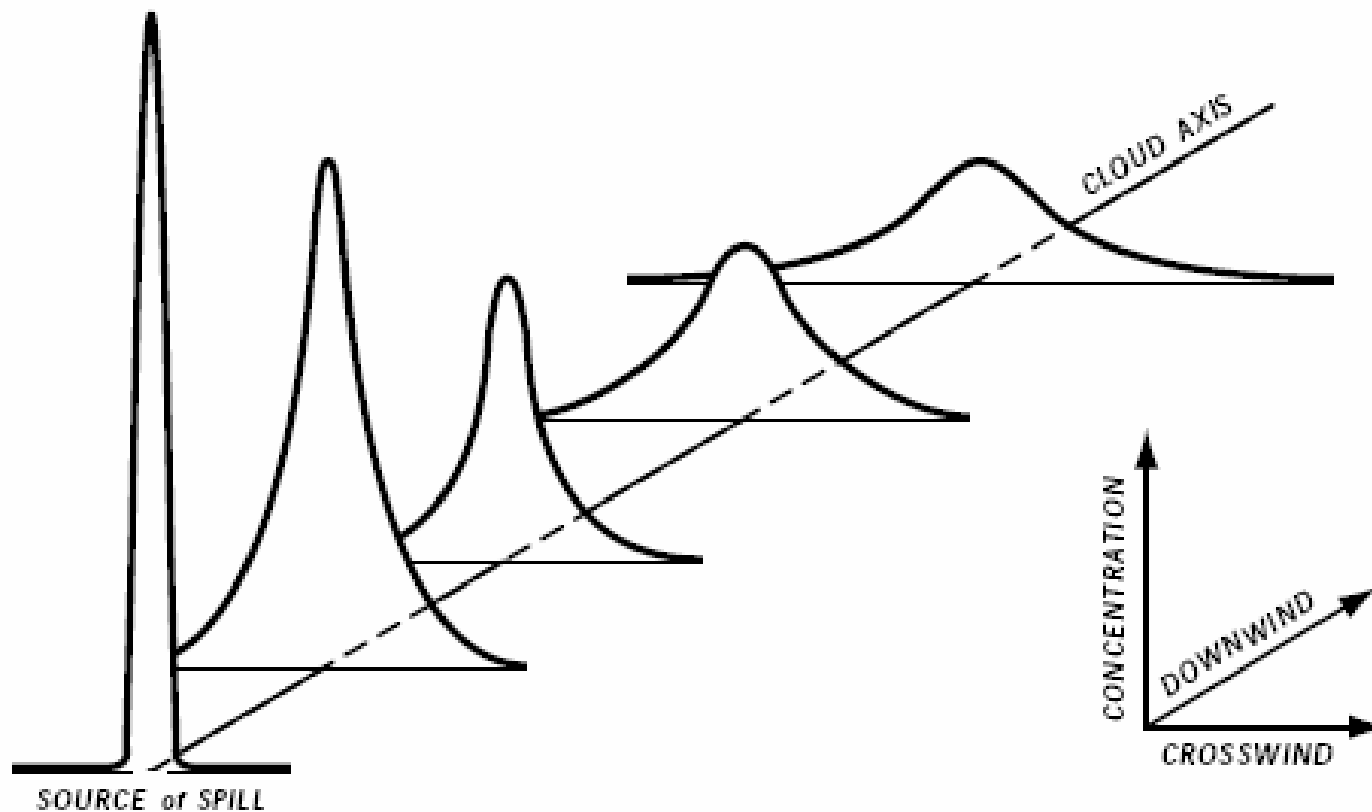


Figure 18 : Répartition gaussienne de la concentration dans un panache de gaz passif [Turner, 1970]

# DISPERSION ATMOSPHERIQUE



GESTION INTÉGRÉE DES RISQUES

# DISPERSION ATMOSPHÉRIQUE

## REJET CONTINU

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{(y - y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[ \exp\left(-\frac{(z - z_0)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \alpha \exp\left(-\frac{(z + z_0)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

# DISPERSION ATMOSPHÉRIQUE

## REJET CONTINU

Hypothèse:  $H = 0$ ,  $y = 0$  and  $z = 0$ , l'équation pour  $C_{xyz}$  devient:

$$C_{xyz} = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z u}$$

# DISPERSION ATMOSPHERIQUE

Vitesse du vent à 10 m	JOUR			NUIT	
	Rayonnement solaire incident			Nébulosité	
[m/s]	Fort	Modéré	Faible	entre 4/8 et 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

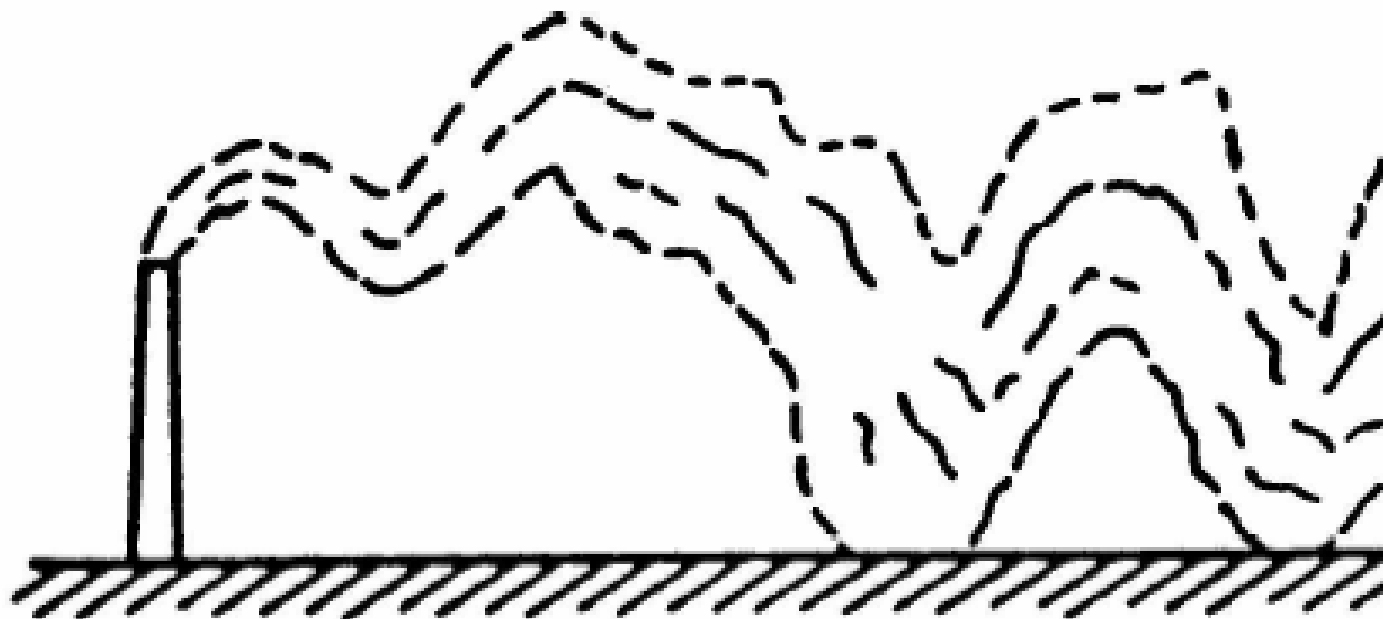
*Tableau 2 : Classes de stabilité de Pasquill*

# DISPERSION ATMOSPHÉRIQUE

Stabilité atmosphérique (Pasquill)	$\sigma_y$ (m)	$\sigma_z$ (m)
A	$0.22x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.20x$
B	$0.16x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.12x$
C	$0.11x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.08x(1 + 0.0002x)^{-1/2}$
D	$0.08x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.06x(1 + 0.0015x)^{-1/2}$
E	$0.06x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.03x(1 + 0.0003x)^{-1}$
F	$0.04x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.016x(1 + 0.0003x)^{-1}$

Tableau 8 : Coefficients relatifs à  $\sigma_y$  et  $\sigma_z$

# DISPERSION ATMOSPHERIQUE



*Figure 2 : Dispersion dans une atmosphère instable*

# DISPERSION ATMOSPHERIQUE

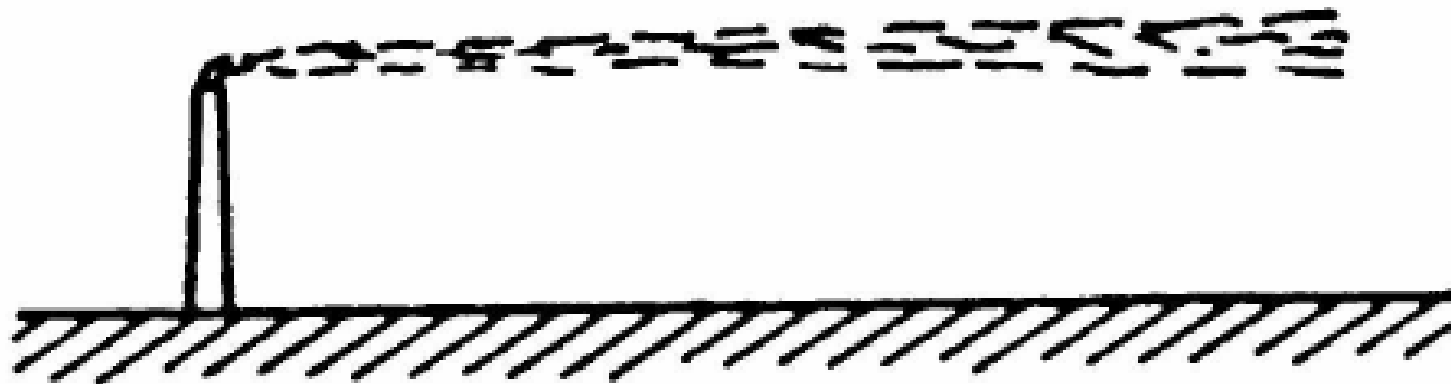


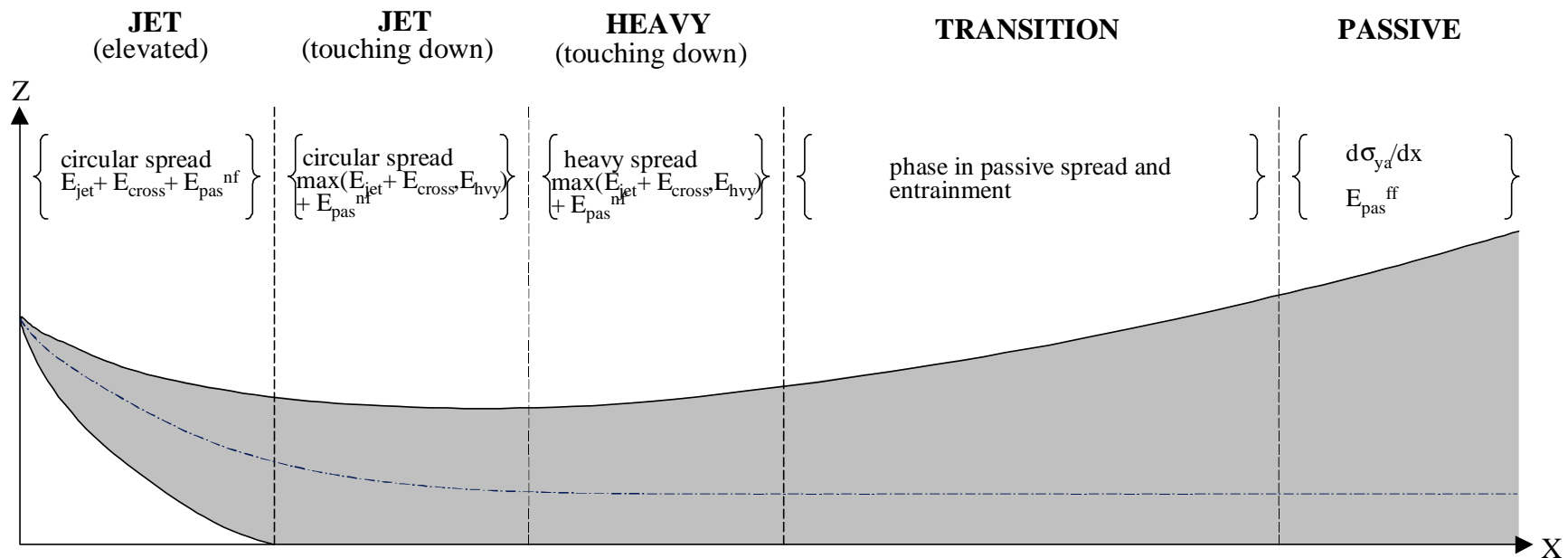
Figure 3 : Dispersion dans une atmosphère stable

# DISPERSION ATMOSPHERIQUE PHÉNOMÈNES COMPLEXES



*Figure 11 Relâchement d'ammoniac suite à une rupture de canalisation*

# DISPERSION ATMOSPHÉRIQUE PHÉNOMÈNES COMPLEXES



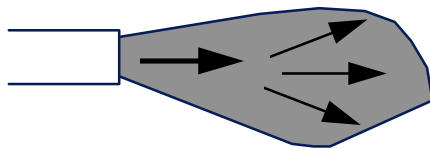
(b) jet/plume becomes passive during touching down

# DISPERSION ATMOSPHERIQUE PHÉNOMÈNES COMPLEXES

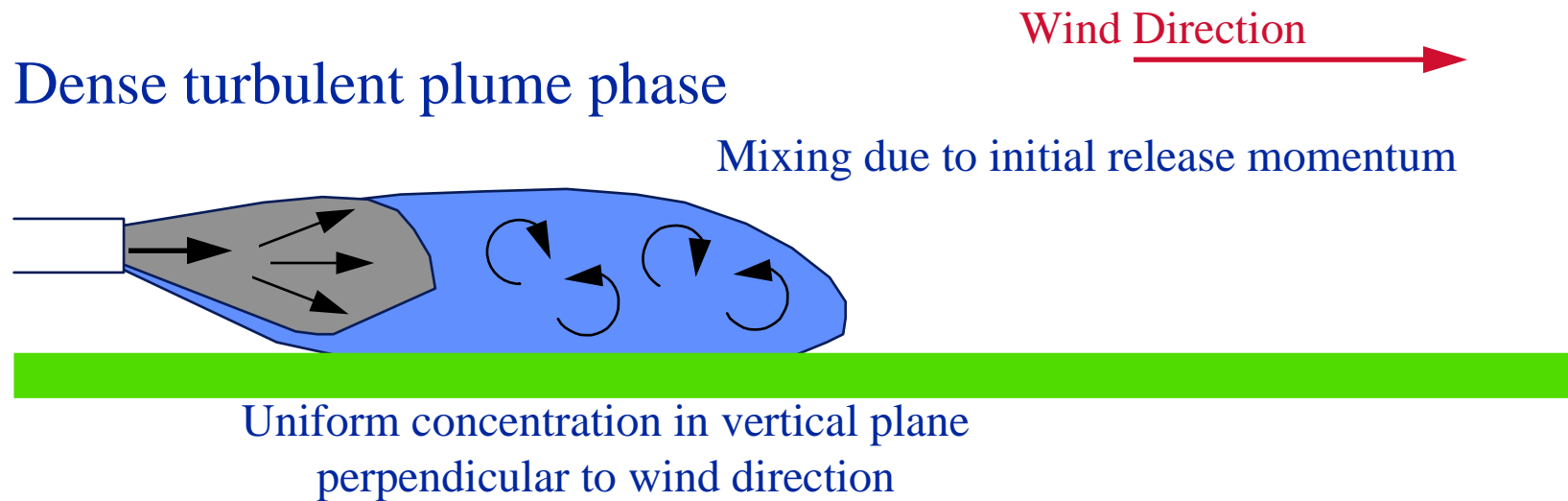
Turbulent Jet

Wind Direction 

Initial rapid expansion of vapour on release



# DISPERSION ATMOSPHÉRIQUE PHÉNOMÈNES COMPLEXES

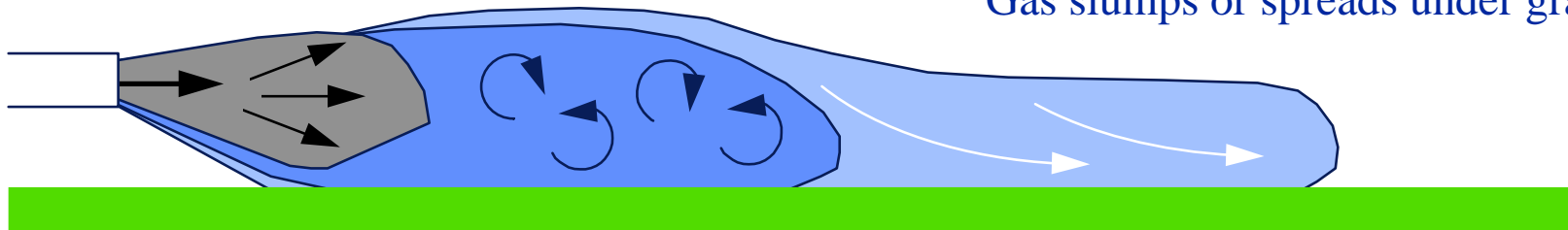


# DISPERSION ATMOSPHÉRIQUE PHÉNOMÈNES COMPLEXES

Slumping dense plume phase

Wind Direction

Gas slumps or spreads under gravity

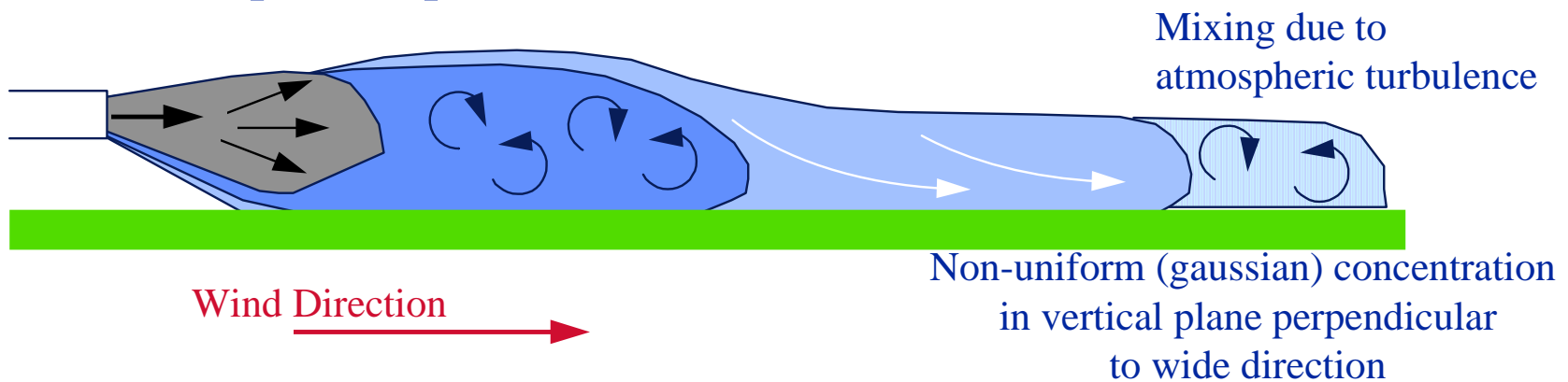


Uniform concentration in vertical plane,  
perpendicular to wind direction

GESTION INTÉGRÉE DES RISQUES

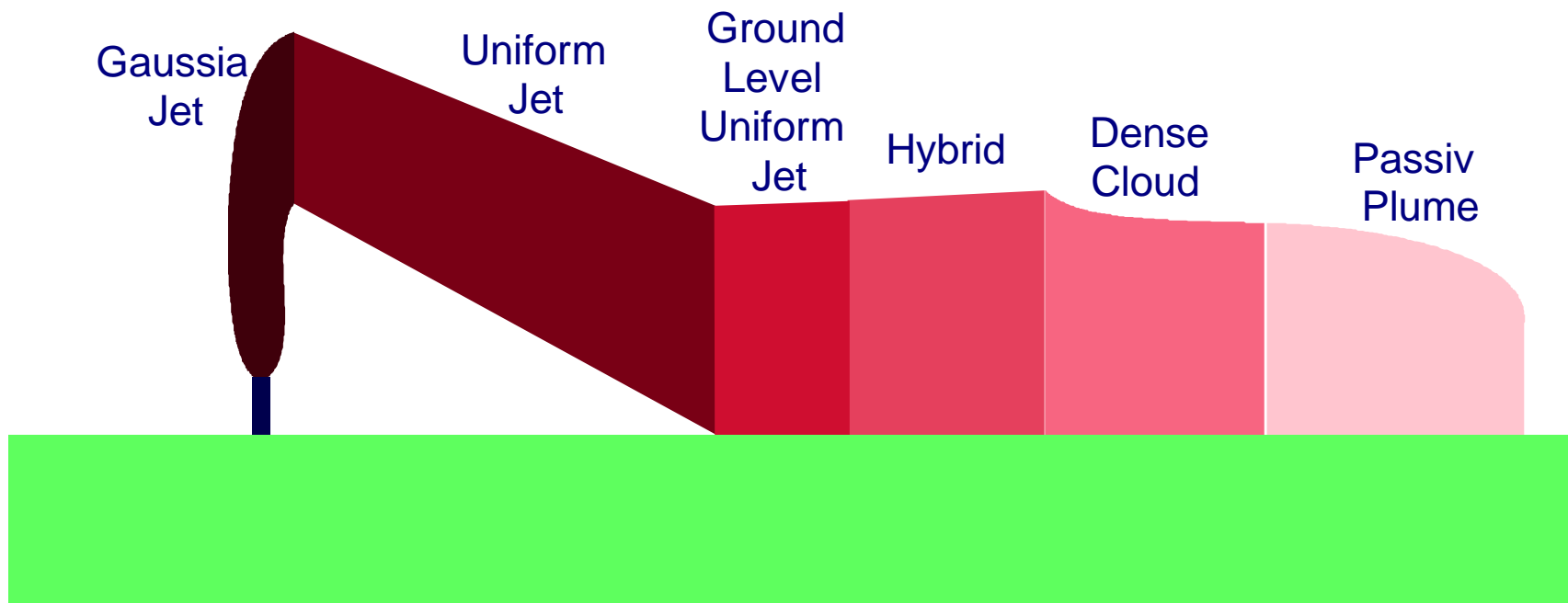
# DISPERSION ATMOSPHÉRIQUE PHÉNOMÈNES COMPLEXES

Passive dispersion phase



GESTION INTÉGRÉE DES RISQUES

# DISPERSION ATMOSPHÉRIQUE PHÉNOMÈNES COMPLEXES



GESTION INTÉGRÉE DES RISQUES

# MODÉLISATION DES INCENDIES

Phénomènes Dangereux	Site type
Les feux de nappe (liquide)	Dépôt d'hydrocarbures liquides
Les feux torches (gaz ou liquide)	Raffinerie, dépôt de Gaz de Pétrole Liquéfié
Les feux de solides (produits solides combustibles)	Entrepôt
Le Boil Over <sup>2</sup>	Dépôt d'hydrocarbures lourds
Le BLEVE <sup>3</sup>	dépôt et installations stockant des gaz liquéfiés inflammables
Une explosion de gaz	Site comportant des liquides ou gaz inflammables

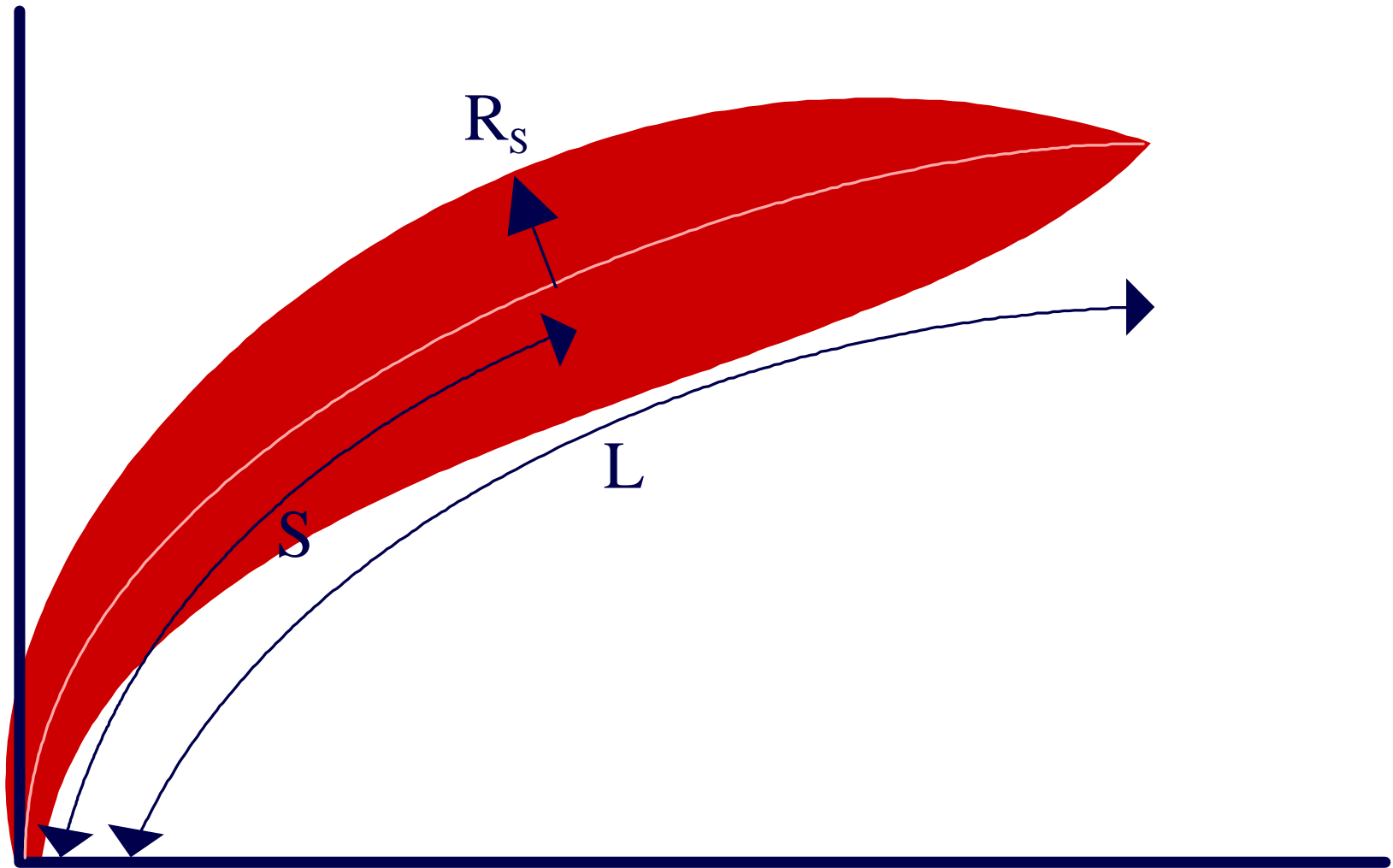
*Liste de phénomènes conduisant à des effets thermiques*

# FEU DE TORCHE



Figure 10. *Feu torche dans un dépôt de gaz pétrole liquéfié*

# FEU DE TORCHE



GESTION INTÉGRÉE DES RISQUES

# BLEVE – BOULE DE FEU



GESTION INTÉGRÉE DES RISQUES

# BLEVE – BOULE DE FEU

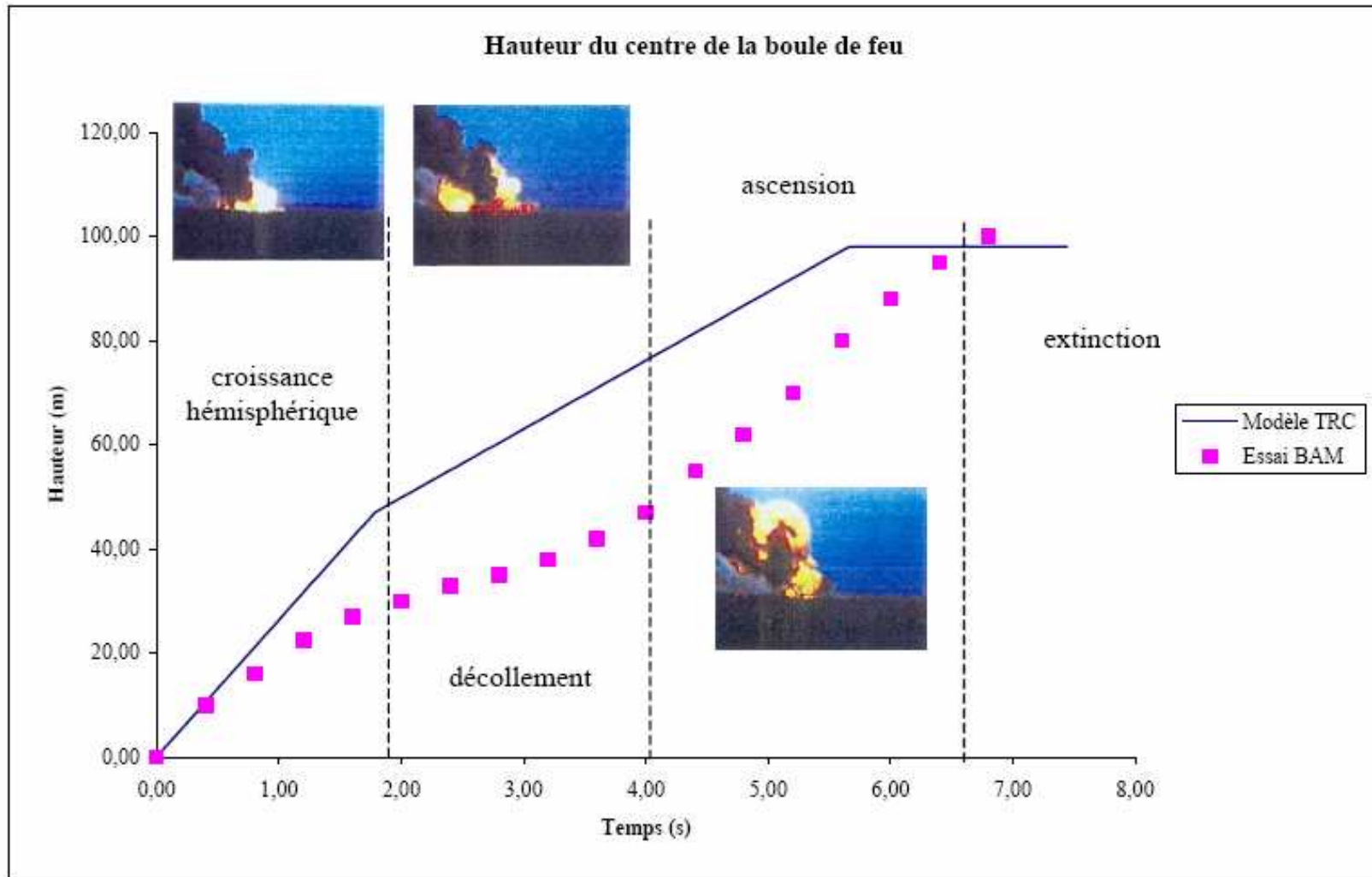


Figure 28 : Evolution de la hauteur du centre de la boule de feu au cours de l'essai du B.A.M.

# BLEVE – BOULE DE FEU

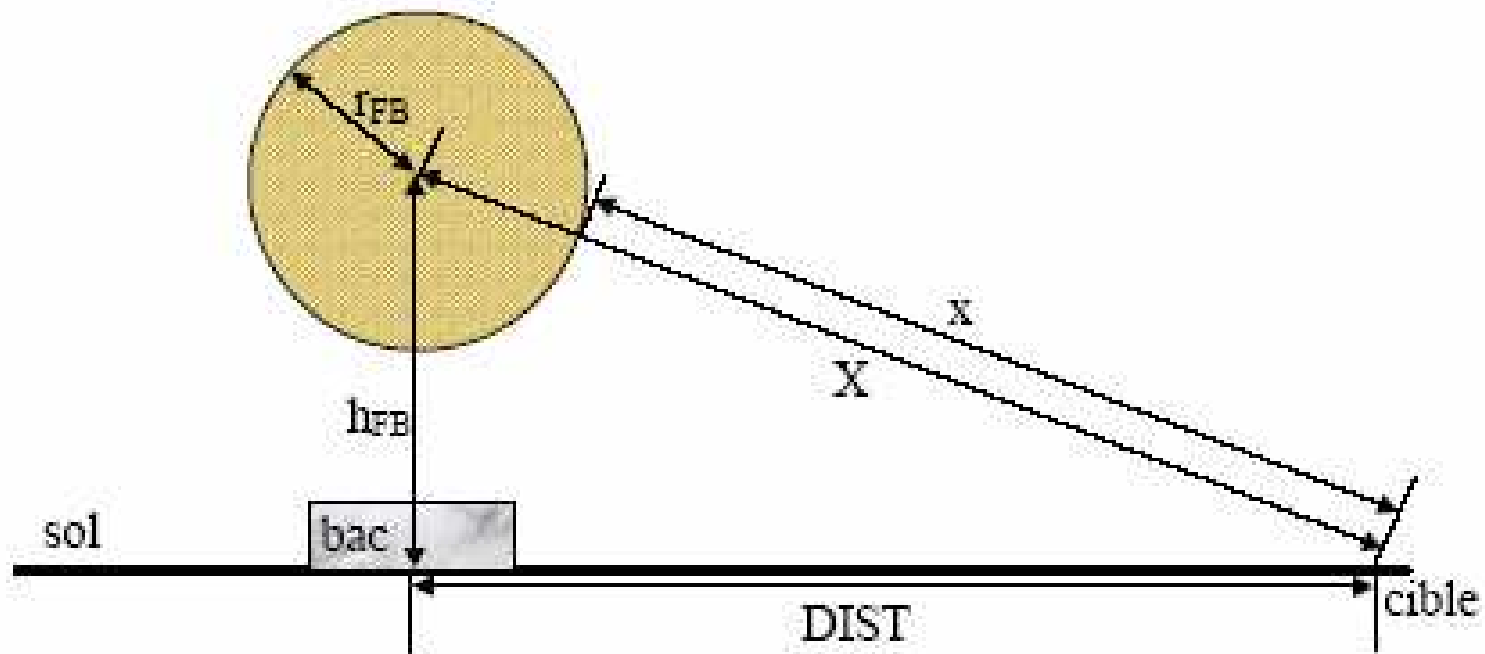


Figure 5 : Notations relatives à la boule de feu

# BOIL-OVER

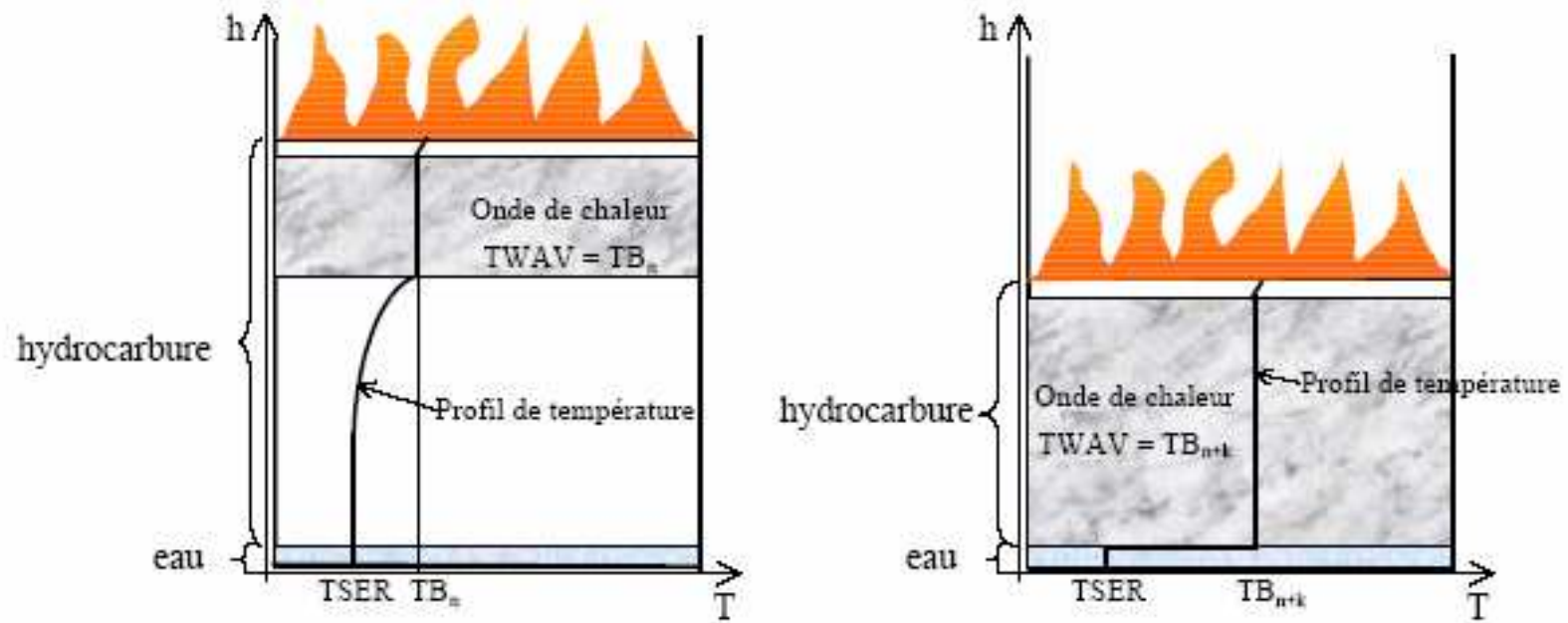


Figure 3-a (temps  $t$ )

Figure 3-b (temps  $t_{BO}$ )

Figure 3 : Schéma de propagation de l'onde de chaleur

# INCENDIE D'ENTREPÔT



**GESTION INTÉGRÉE DES RISQUES**

# INCENDIE D'ENTREPÔT

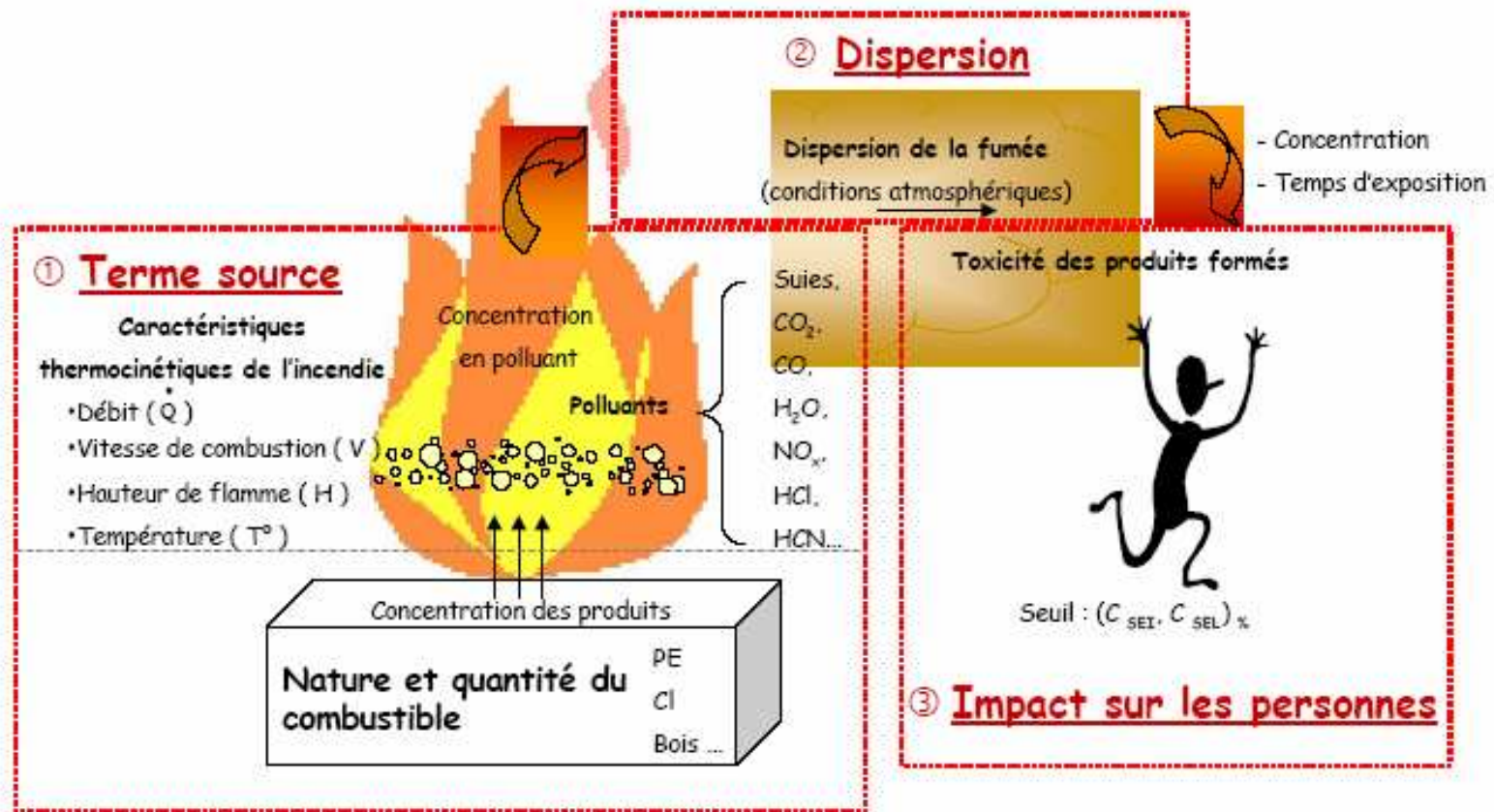


Figure 1 : Représentation schématique de l'émission de polluants engendrés par un incendie de stockage de combustibles

# MODÉLISATION DES EXPLOSIONS

Phénomènes Dangereux	Type d'effet Surpression	Site type
Eclatement de Bac	Libération d'énergie pneumatique	Dépôt d'hydrocarbures liquides
VCE <sup>4</sup>	Combustion de gaz, de vapeurs	Raffinerie, dépôt de Gaz de Pétrole Liquéfié
Le BLEVE	Combustion de gaz	Dépôt et installations stockant des gaz liquéfiés inflammables
Explosion de nitrate d'ammonium	Décomposition de substances explosives	Usine de fabrication d'engrais

*Exemple de phénomènes dangereux associés à l'effet surpression*

# DISPERSION D'UN GAZ INFLAMMABLE

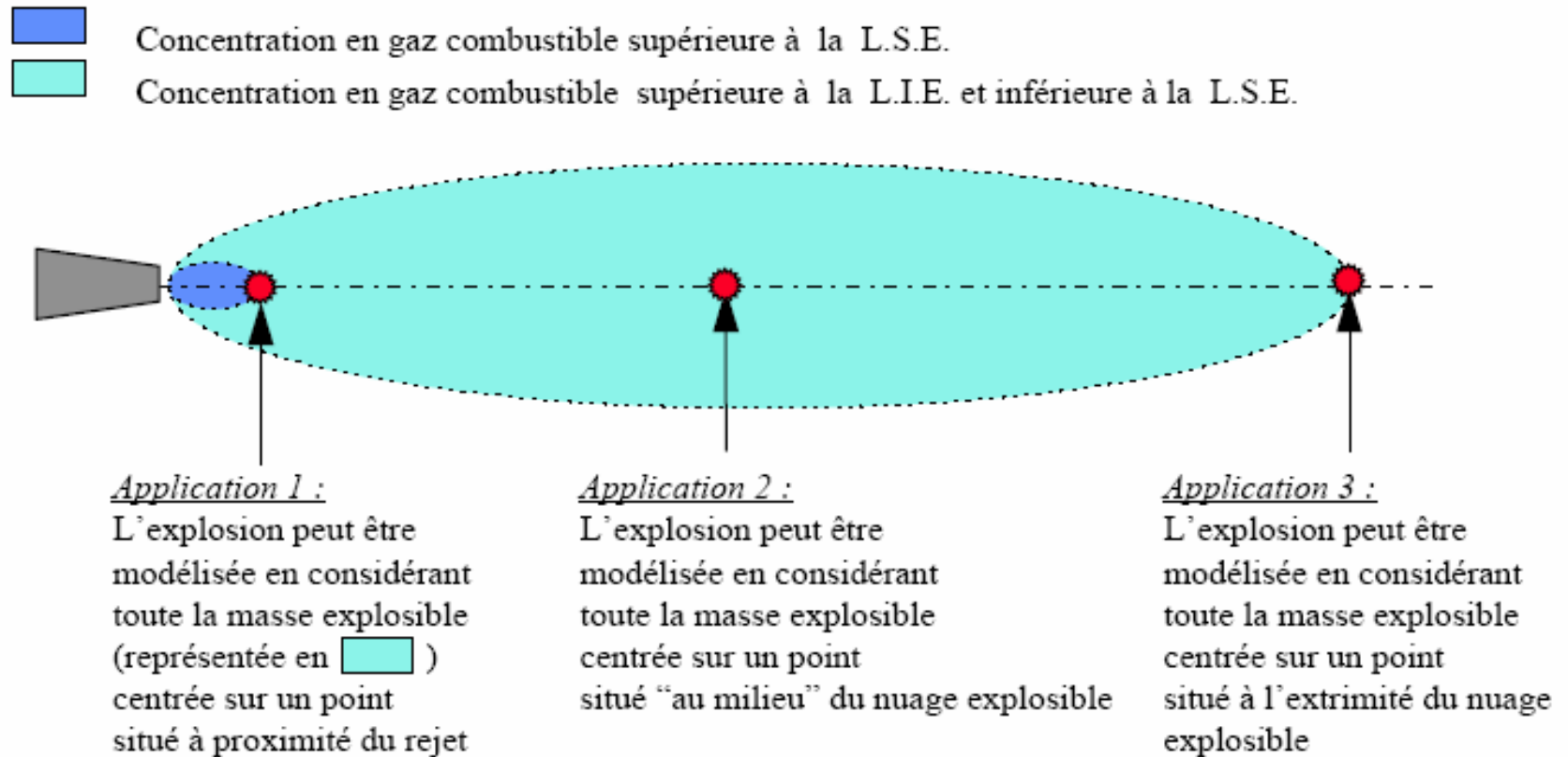
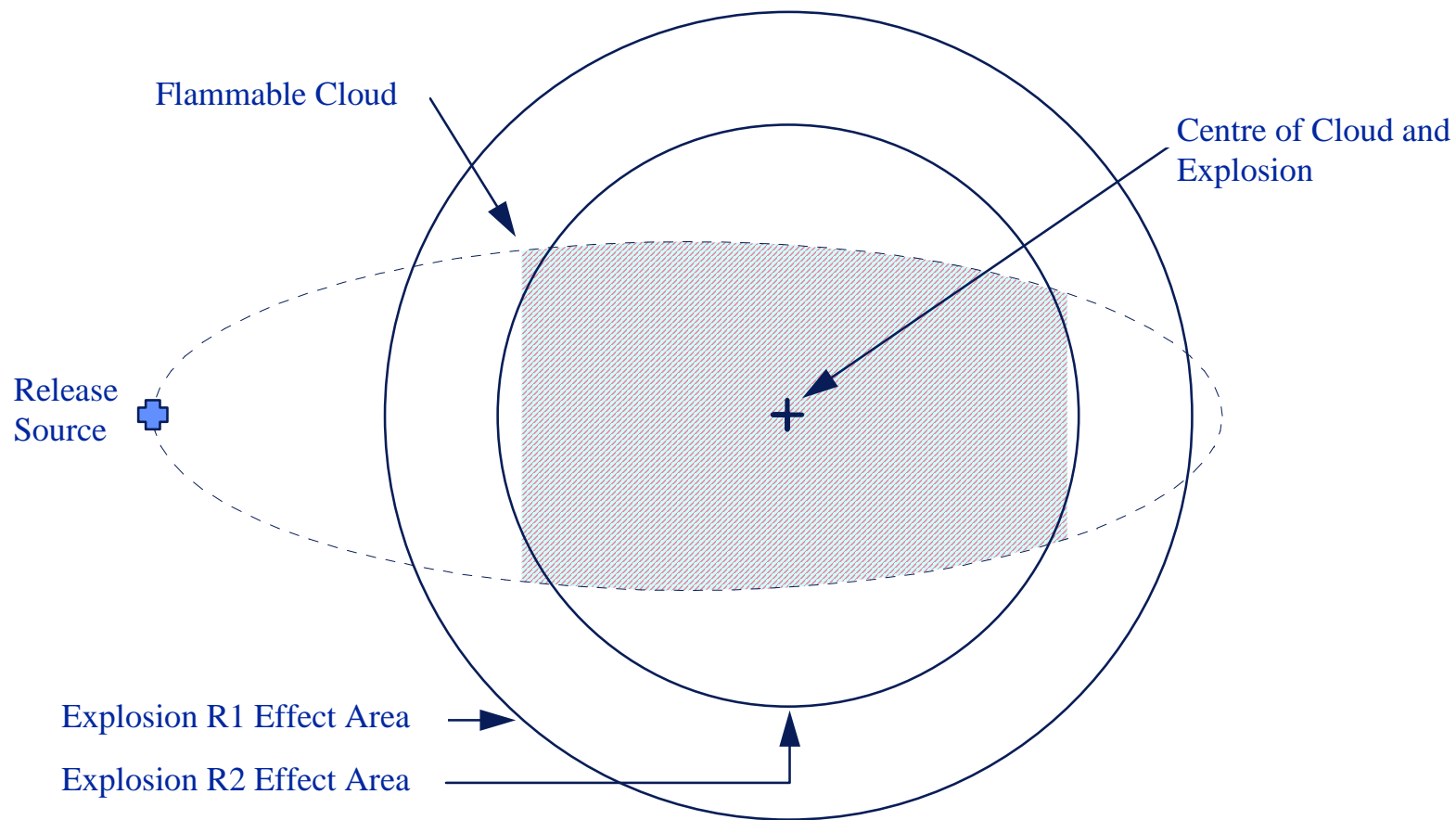


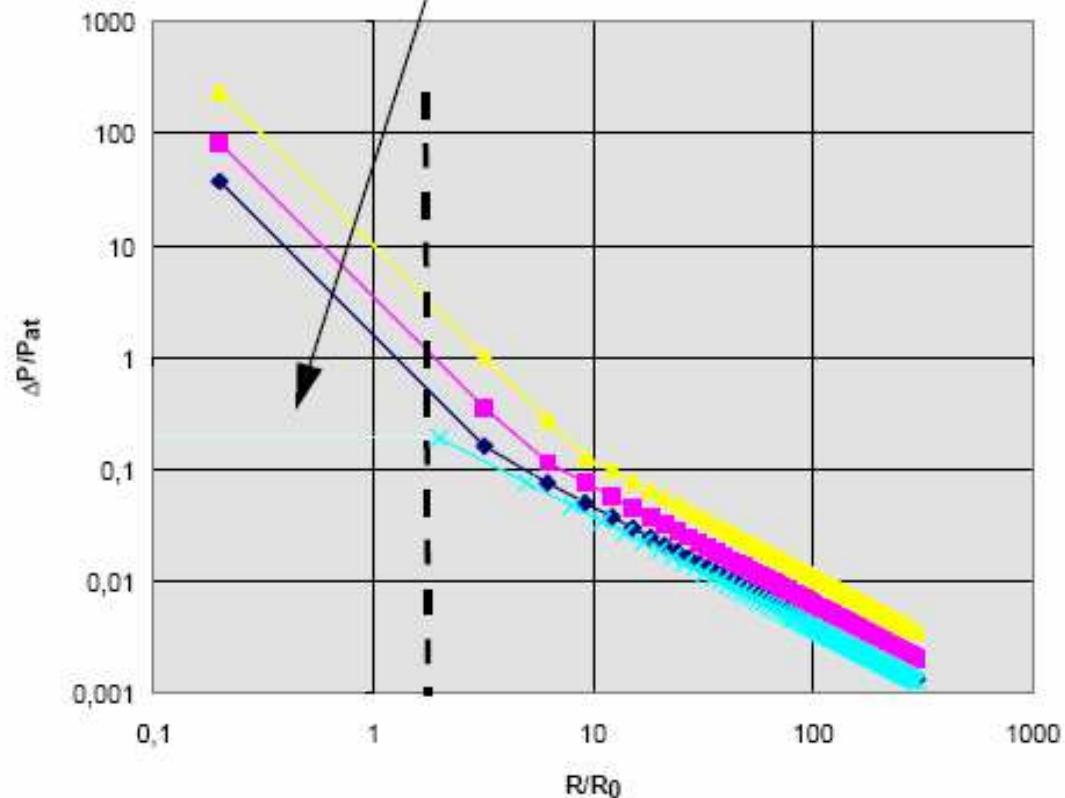
Figure 37 : Cas des inflammations de nuage de forme allongée

# EXPLOSION D'UN NUAGE DE GAZ INFLAMMABLE



# EXPLOSION D'UN NUAGE DE GAZ INFLAMMABLE ÉQUIVALENCE TNT

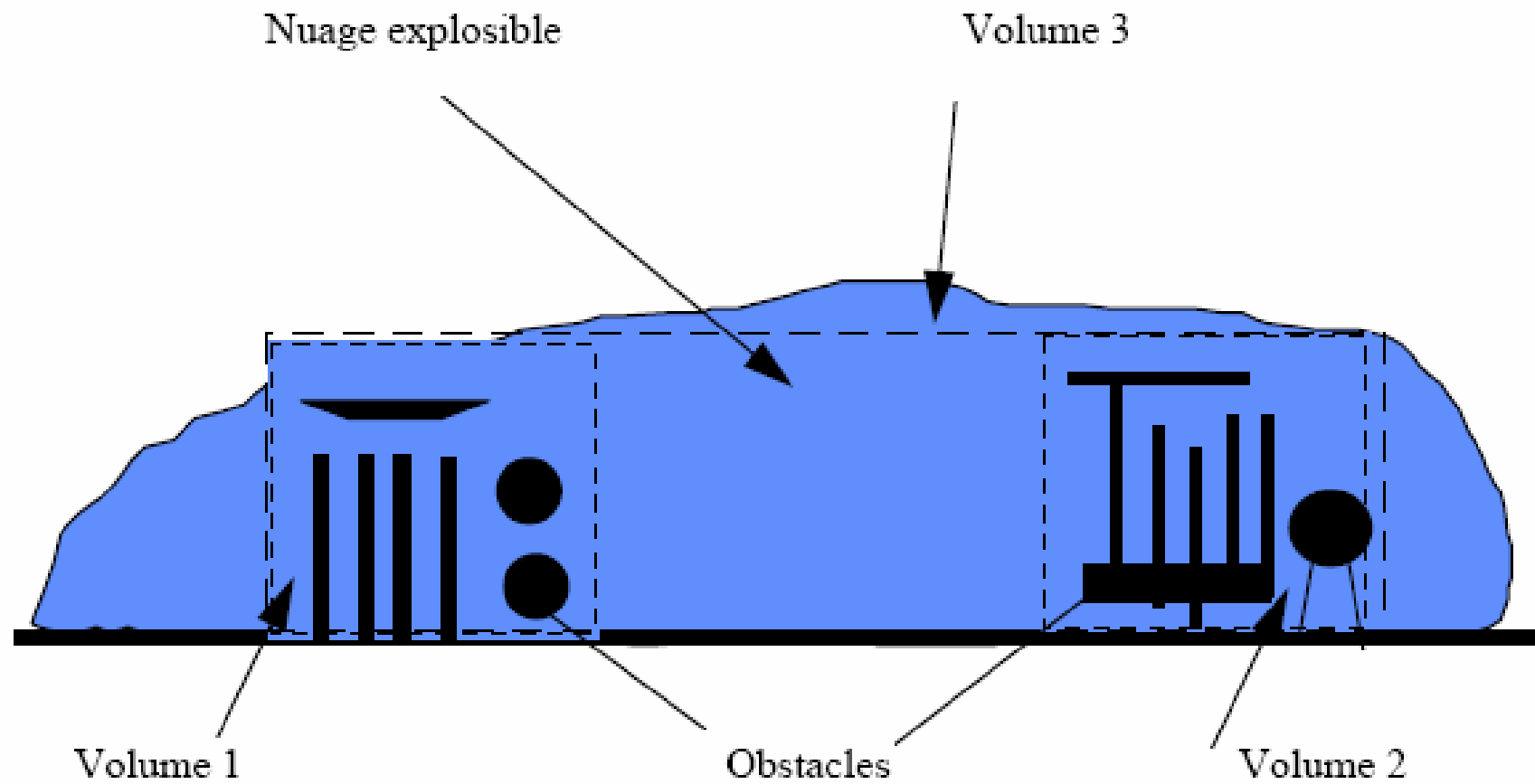
Dans cette partie de l'espace les courbes  
obtenues par équivalence TNT ne s'appliquent  
pas



$R$  est la distance comptée depuis le point d'inflammation  
 $R_0$  est le rayon du nuage explosible initial

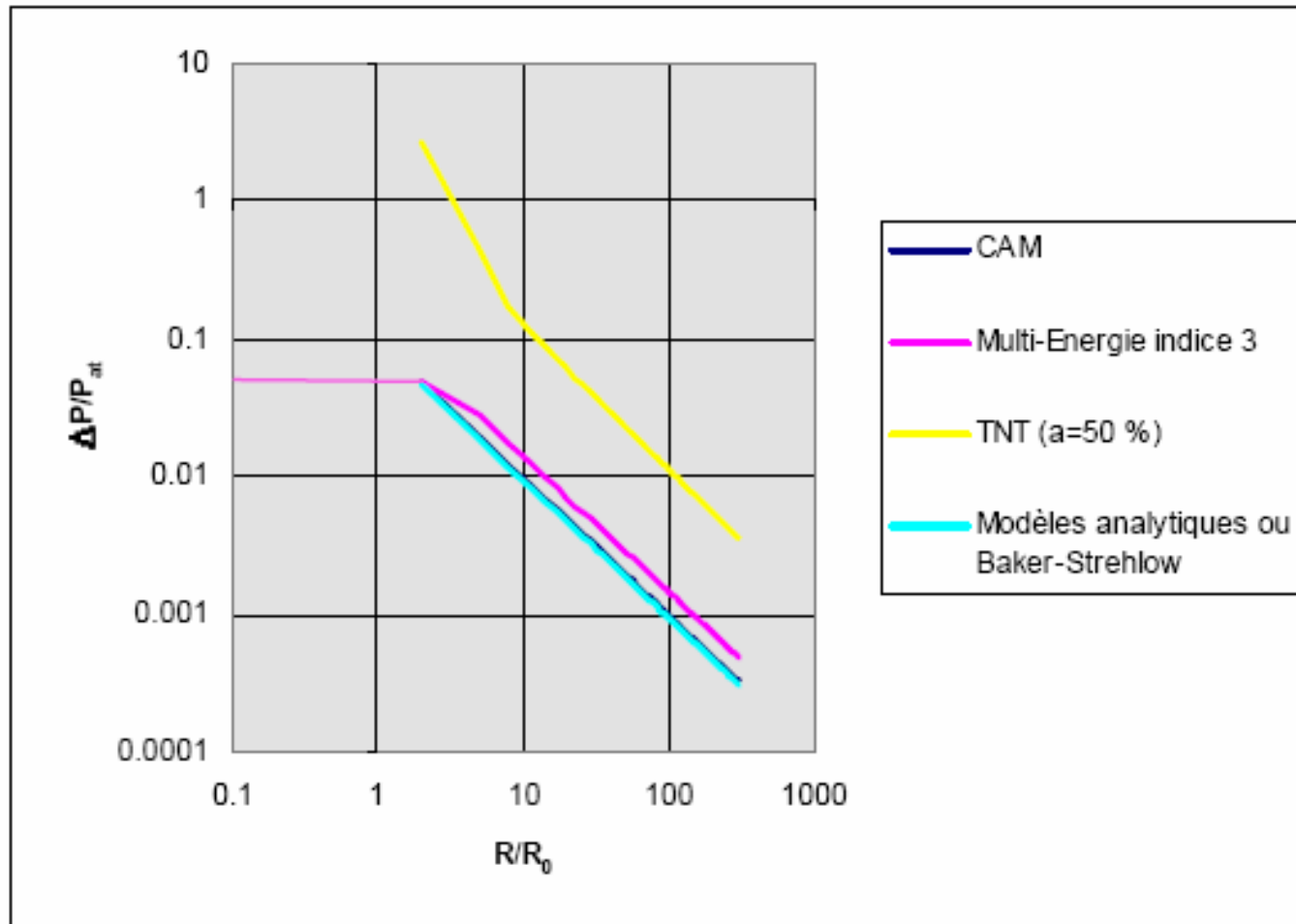
**GESTION INTÉGRÉE DES RISQUES**

# EXPLOSION D'UN NUAGE DE GAZ INFLAMMABLE MODÈLES PLUS SOPHISTIQUÉS



**GESTION INTÉGRÉE DES RISQUES**

# EXPLOSION D'UN NUAGE DE GAZ INFLAMMABLE MODÈLES PLUS SOPHISTIQUÉS



# MODÉLISATION DES ÉCLATEMENTS DE RÉSERVOIRS



*Figure 12. Bac d'hydrocarbure à la suite d'une explosion interne*

# CONSTATATIONS

- **La modélisation des accidents industriels requiert de nombreuses compétences:**
  - Thermodynamique
  - Chimie physique
  - Toxicologie
  - Météorologie
  - Informatique
  - Des procédés chimiques, pétrochimiques et de raffinage
- **Et surtout de l'expérience**

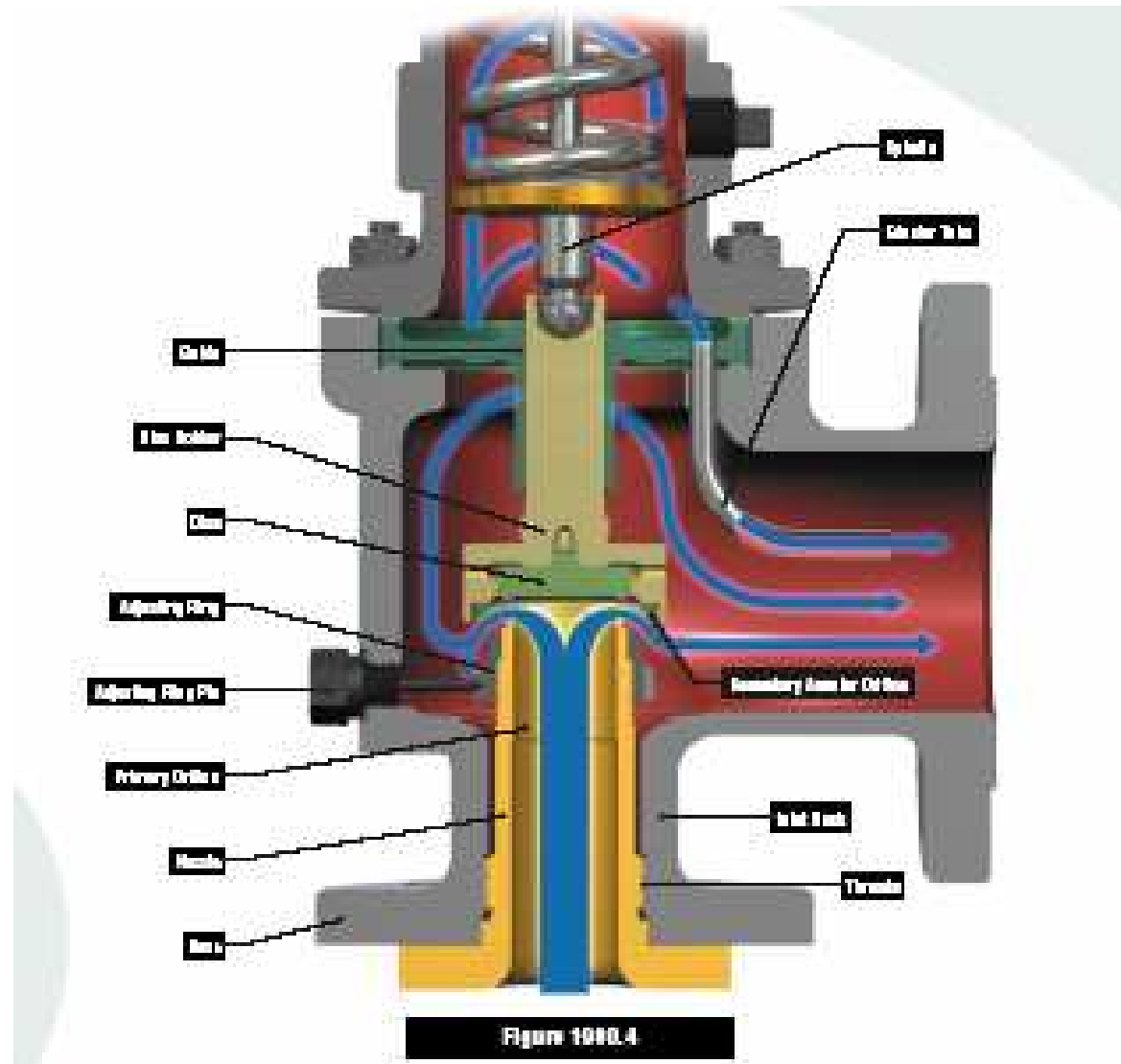
# LES ERREURS LES PLUS FRÉQUENTES

- **Mauvaises connaissances:**
  - Des limites des modèles;
  - De l'importance des conditions météorologiques;
  - Des équipements et des procédés.

# CHERCHEZ L'ERREUR

- Modélisation d'un rejet d'ammoniac gazeux à 30°C et 10 bar(g) lors de l'ouverture d'une soupape de sûreté de 100 mm X 150 mm, à 3 mètres de hauteur
- Diamètre de l'orifice: 100 mm
- Débit : 25 kg/s
- Zone d'impact de 3.5 km

# CHERCHEZ L'ERREUR



GESTION INTÉGRÉE DES RISQUES

# CHERCHEZ L'ERREUR

Diamètre d'orifice selon API (en pouce carrée)

D: 0.110      K: 1.838      R: 16.00

E: 0.196      **L: 2.853**      T: 26.00

F: 0.307      M: 3.60      V: 50.26

G: 0.503      N: 4.34      W: 78.996

H: 0.788      P: 6.38

J: 1.287      Q: 11.05

**2.853** pouces carrés => 48.3 mm de diamètre

# CHERCHEZ L'ERREUR

Diamètre de l'orifice: 48.3 mm vs 100 mm

Débit : 5.83 kg/s vs 25 kg/s

Zone d'impact : 0.8 km vs 3.5 km

# CONSTATATIONS

- **Modélisation des impacts au niveau du sol suite à la dispersion d'un rejet d'hydrocarbure gazeux via une soupape de sûreté situé à 20 mètres de hauteur.**
- **Résultats:**
  - Stabilité F, vent de 1.5 m/s : aucun impact au sol
  - Stabilité D, vent de 3 m/s : aucun impact au sol
  - Stabilité D, vent de 5 m/s : aucun impact au sol

# CHERCHEZ L'ERREUR

OIL FIELD BATTERY TANK VENT (VERTICAL)

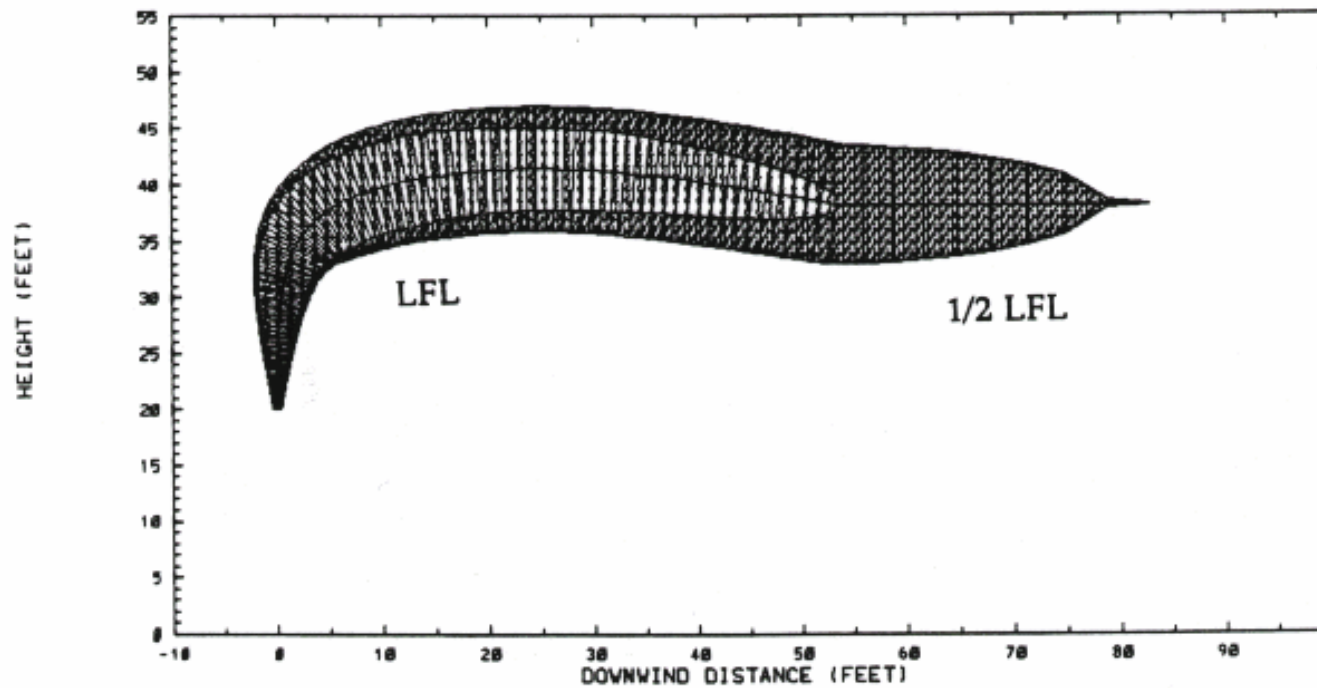


Figure 6. Case 3b

GESTION INTÉGRÉE DES RISQUES

# CHERCHEZ L'ERREUR

- Rejet à l'horizontal
- Stabilité D, vent de 10 m/s :

Atmosphère explosive sur 28 mètres de distance

# CHERCHEZ L'ERREUR

## OIL FIELD BATTERY TANK VENT

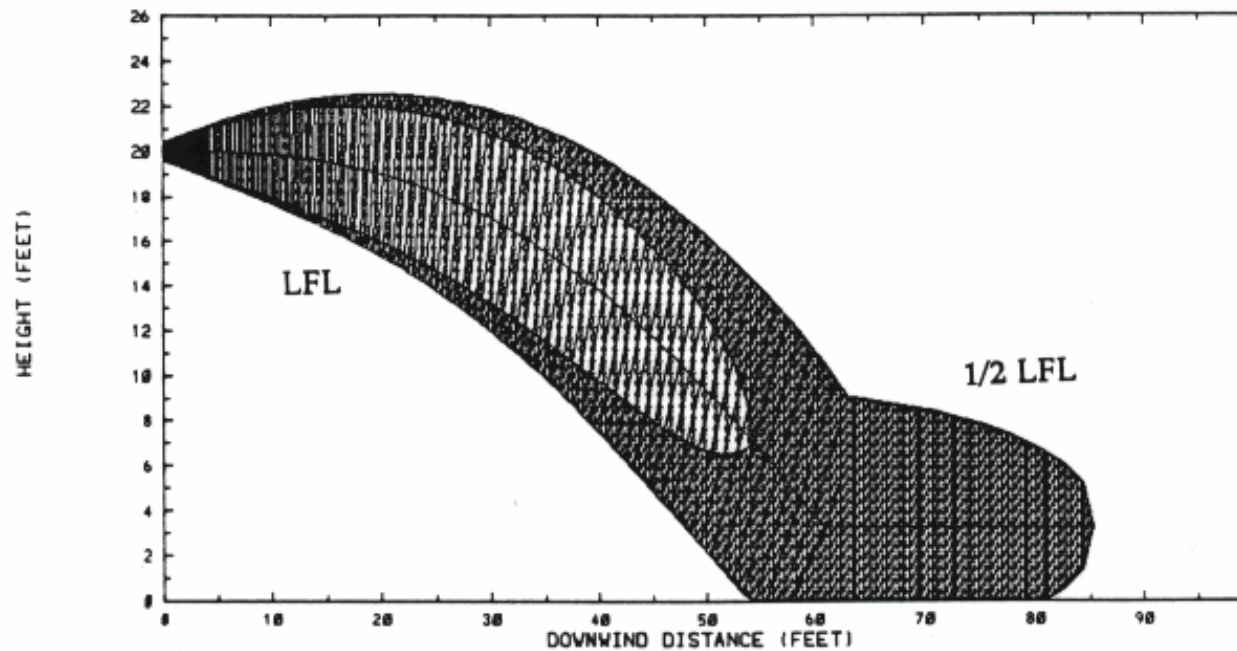


Figure 5. Case 3a

# CHERCHEZ L'ERREUR

- **Modélisation de l'explosion à l'air libre, d'un nuage de gaz naturel suite à une fuite sur le pipeline Trans-Sibérien.**

# CHERCHEZ L'ERREUR

- Il est reconnu qu'une fuite de méthane à l'air libre ne peut résulter en une explosion qu'en présence d'un niveau important de confinement. Ce scénario est normalement non-crédible.

# CHERCHEZ L'ERREUR



**GESTION INTÉGRÉE DES RISQUES**

# CONCLUSION

- Plusieurs des phénomènes étudiés peuvent être simplement modélisés à l'aide d'une calculette ou d'un chiffrier EXCEL.
- Il existe des logiciels spécialisés permettant d'effectuer toutes ces modélisations pour plusieurs combinaisons de conditions météorologiques à la fois et/ou pour traiter les phénomènes plus complexes (ex: mélanges multi-composants, gaz lourds, aérosols).

# CONCLUSION

- Mais l'utilisation d'un logiciel ne remplace pas l'expertise;
- Compréhension des phénomènes à modéliser;
- Sélection des scénarios à considérer;
- Choix du modèle approprié à la situation.

**Le logiciel n'est qu'un outil de travail !**

# CONCLUSION

- Peu importe l'ingénieur qui effectue les modélisations et son niveau de compétence, il est primordial que quelqu'un connaissant très bien entre autre votre procédé et les conditions d'opération soit impliqué dans l'étude;
- La qualité des résultats est directement liées à la qualité des données d'entrée.

# CONCLUSION



PRUDENT<sup>MD</sup>  
GROUPE CONSEIL

UNE ÉQUIPE COMPÉTENTE  
UN PARTENAIRE DE CONFIANCE

GESTION INTÉGRÉE DES RISQUES