Analyse et management des risques industriels

Généralités

- S-1 ?

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

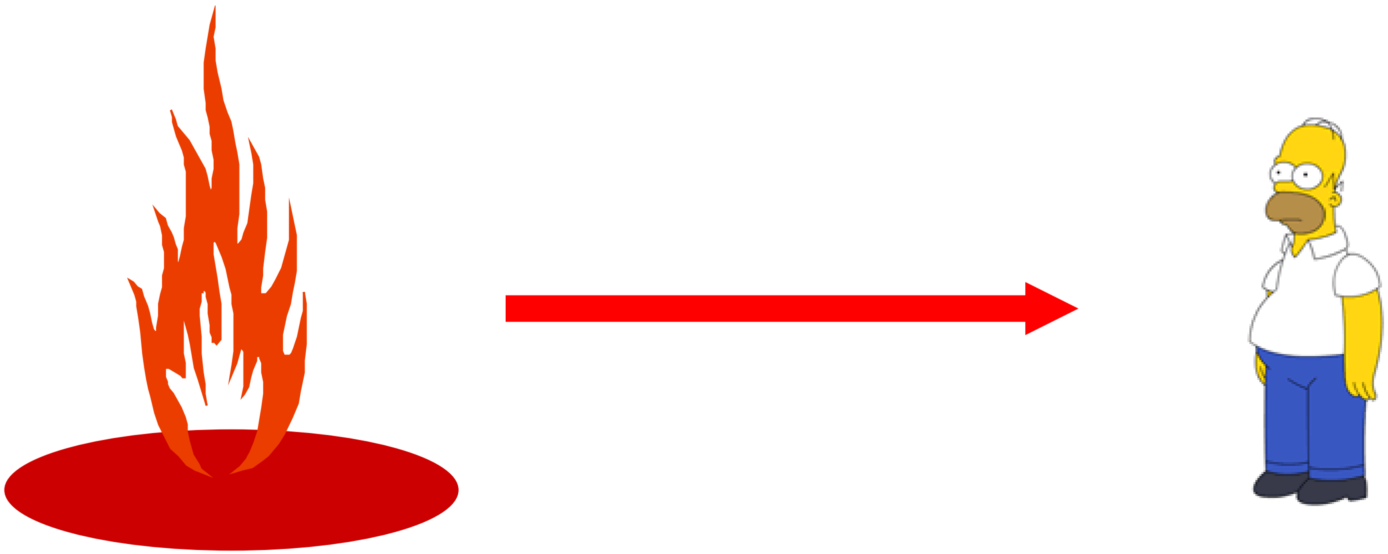
1. **Modélisation des effets - généralités**
2. **Théorie pour l'incendie**

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

3 – Taille / forme flamme

2 – Quantité libérée

8 – Taux d’humidité

9 – Taux de CO2

1 – Liquide inflammable

10 – La position de Homer

4 – Taille de la surface

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 prédiction 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 calculs 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-phasique**

5'

- **Type de feux**

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

2. Théorie pour l’incendie

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

5’

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

2. Théorie pour l'incendie

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

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

in which:

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

2. Théorie pour l'incendie

- **Surface Emissive Power (SEP)**

$$SEP_{theor} = Q'/A \qquad J/(m^2 \cdot s)$$

in which:

SEP_{theor}	=	Theoretical Surface Emissive Power, in $J/(m^2 \cdot s)$
Q'	=	Combustion energy per second, in J/s
A	=	Surface area of the flame, in m^2

2. Théorie pour l'incendie

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

in which:

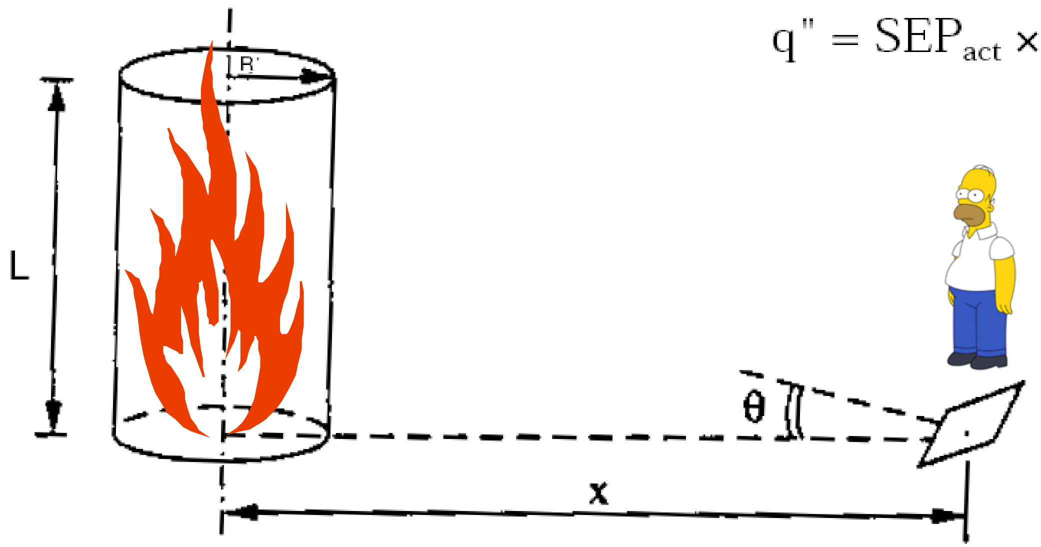
SEP_{max} = The maximum Surface Emissive Power from a flame without soot production, in $J/(m^2 \cdot s)$

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

- **Fs = f(type de flamme, type hydrocarbures)**

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

- **Modèle Surfacique**



$$q'' = SEP_{act} \times F_{view} \times \tau_a$$

- **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:
D = Pool diameter, in m
A_p = Surface area of the pool, in m^2

Modèle cylindrique 1

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

Modèle cylindrique 2

➢ **si L > 2 l**

Modèle plan

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

- **Etape 2 – Taux de combustion**

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

in which:

m''	=	Burning rate at still weather conditions, in $kg/(m^2 \cdot s)$
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 > 1m**

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**

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

in which:

c_8 = 0.001 kg/($m^2 \cdot s$)
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**

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

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**

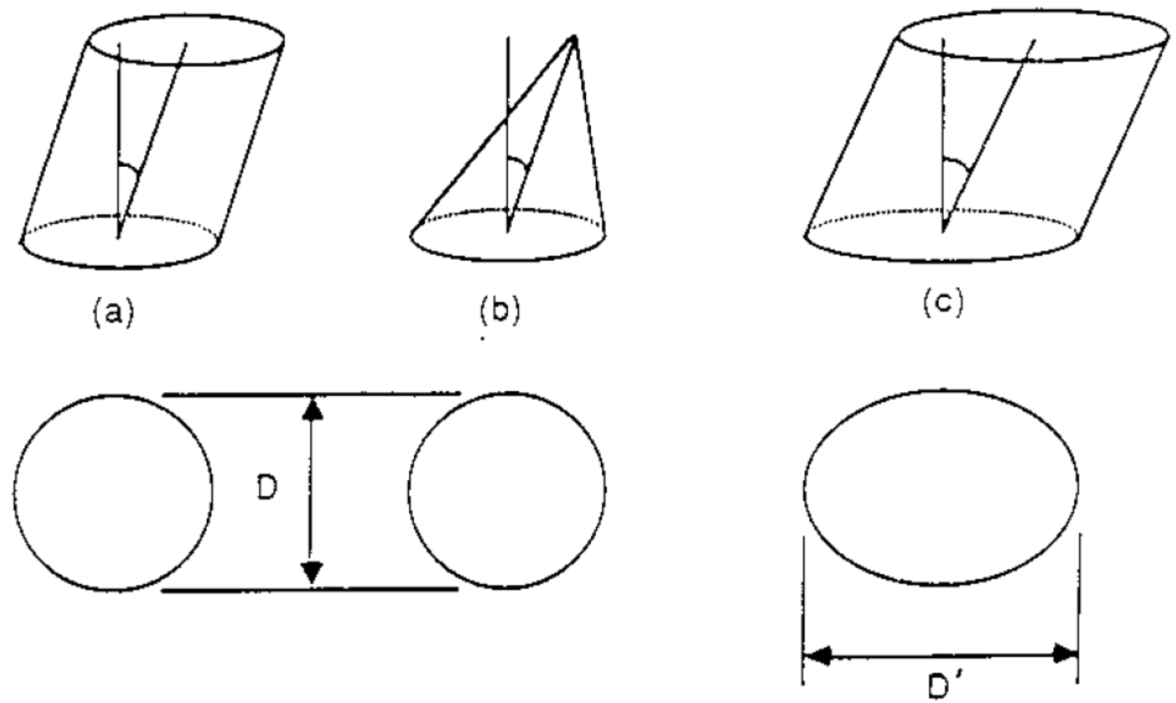
$$u_c = (g \times m'' \times D/\rho_{air})^{1/3} \qquad \text{(m/s)}$$

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 $kg/(m^2 \cdot s)$
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= $\tan\Theta/\cos\Theta = 0.666 \times (Fr_{10})^{0.333} \times (Re)^{0.117}$

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

- **Etape 6 – Inclinaison**

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

in which:

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

$$Re = u_w \times D/\upsilon \qquad (-)$$

in which:

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

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

- **Etape 7 - SEP**

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

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 0.152 1.22	0.162 0.165 0.177
methane	0.305 0.76 1.53 3.05 6.10	0.21 0.23 0.15-0.24 0.24-0.34 0.20-0.27
butane	0.305 0.457 0.76	0.199 0.205 0.269
gasoline	1.22 1.53 3.05	0.30-0.40 0.16-0.27 0.13-0.14
benzene	0.076 0.457 0.76 1.22	0.350 0.345 0.350 0.360

$0{,}1 < Fs < 0{,}4$

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

- **Etape 7 - SEP**

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

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/m^2

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

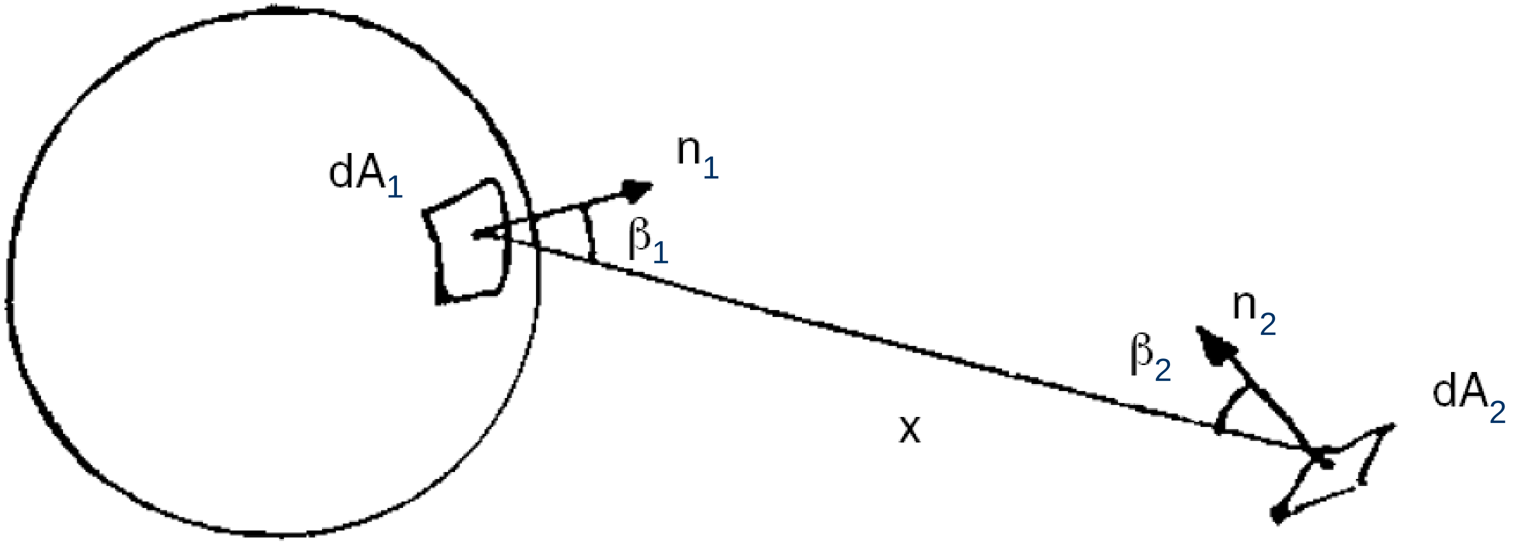
2. Théorie pour l'incendie (s-e pool fires)

- **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**

$$d^2\Phi_{12} = L_{1.}\, dS_{1.}\, \cos\theta_1 \,.d\Omega_1$$

Avec $$d\Omega_1 = \frac{dS_2 \,.\, \cos\theta_2}{d^2}$$

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

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)

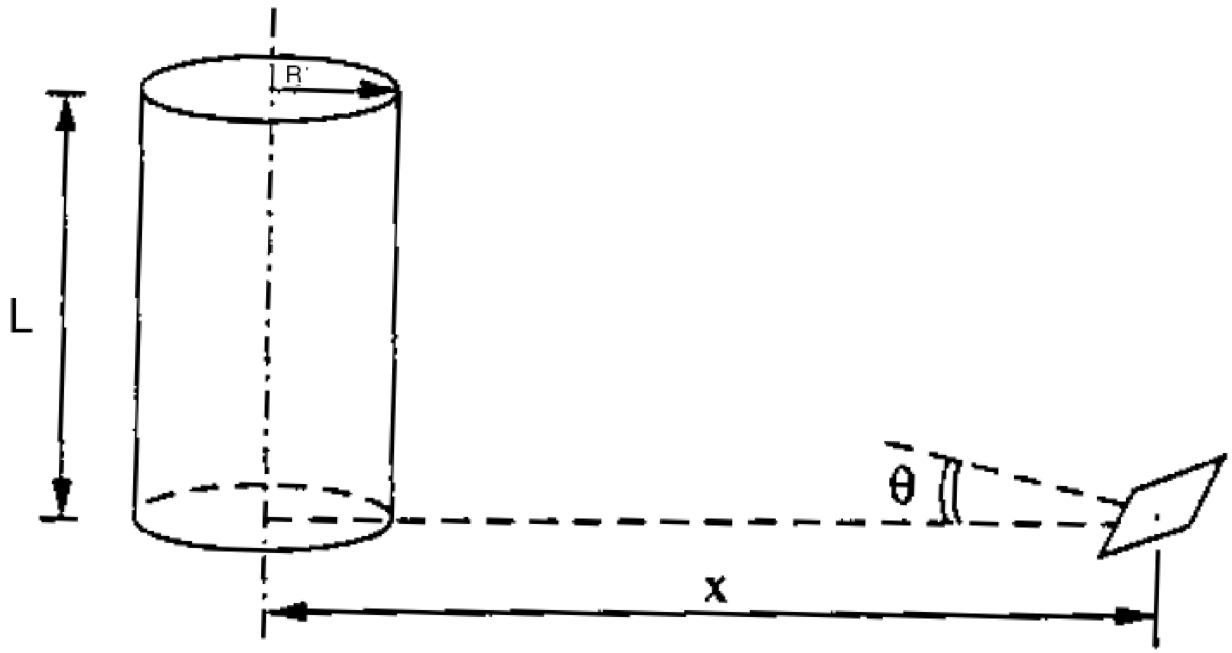
- **Etape 11 – Facteur de forme**

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

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

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**

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

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

- **Modèle point**

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

in which:

q'' = Heat flux, in $J/(m^2 \cdot s)$
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 flaque non circonscrite**
    - **1er 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**

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

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 m^3
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/m^3

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

- **Etape 2 – Rayon de la boule**

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

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**

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

in which:

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

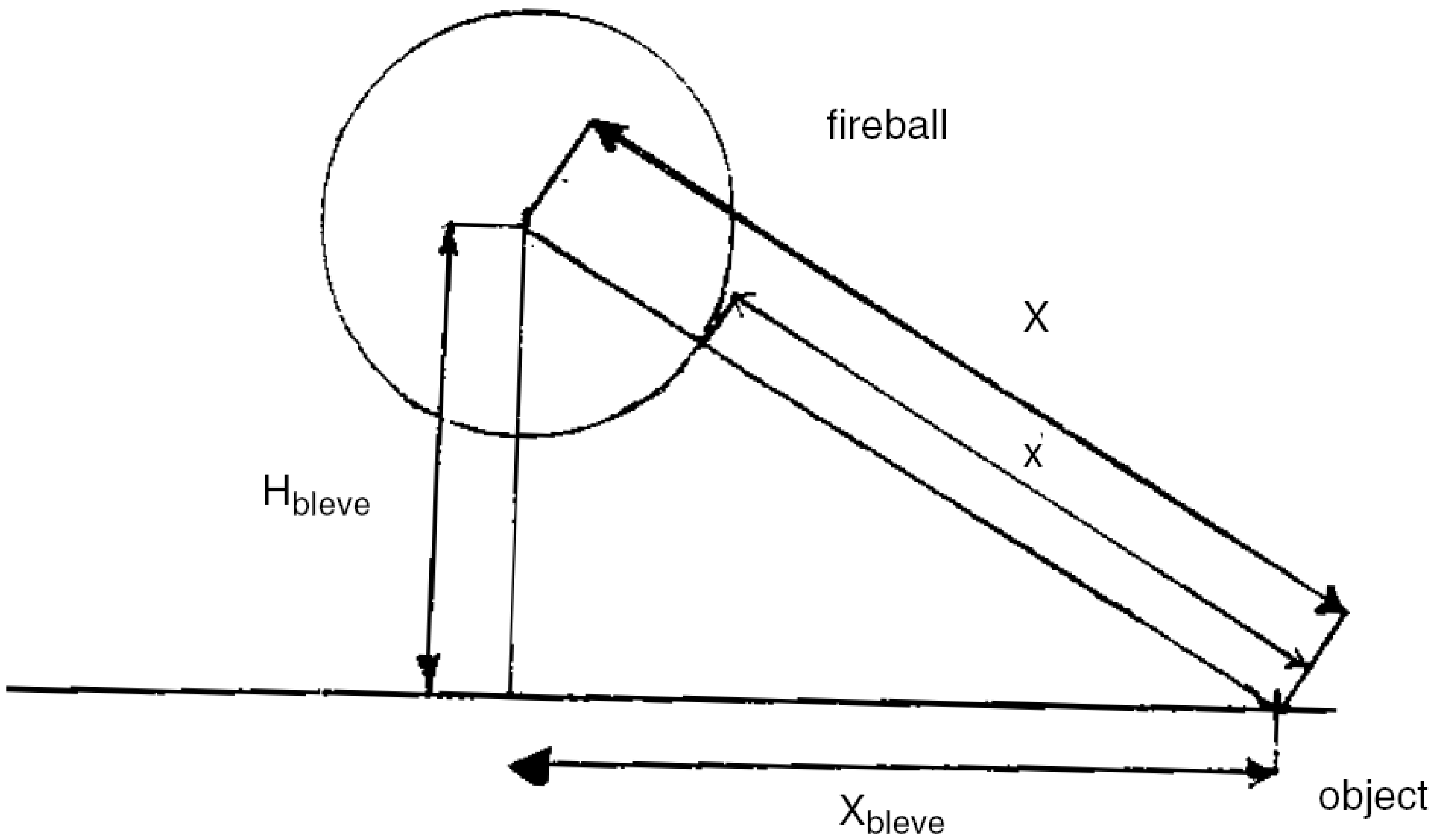
$$H_{bleve} = 2 \times r_{fb} \qquad \text{(m)} \qquad (6.22)$$

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**

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

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

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

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**

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

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**

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

in which:

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

P_{sv} = Vapour pressure of flammable material inside the vessel, in N/m^2

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

- **Etape 8 – Chaleur de Combustion**

$$\Delta H = \Delta H_c - \Delta H_v - C_p \times \Delta T \qquad (J/kg) \qquad (6.94)$$

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**

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

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**

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

in which:

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

τ_a = Atmospheric transmissivity