

**Simulation de la propagation du feu
dans des structures massivement
compartimentées**

NATHALIE GIRAUD



Collaboration DGA Tn / IUSTI / LEMTA



Projet MARINER (ANR-12-ASRT-0002-01)

Contexte et enjeux



**Navires de guerre et
bâtiments navals**



Structures urbaines (IGH)

Maitrise du risque incendie et prise en compte des moyens de lutte par arrosage ou brouillard d'eau dans des ensembles comprenant un grand nombre de locaux (CdG>2000)



❖ **Propagation du feu à travers un réseau:**

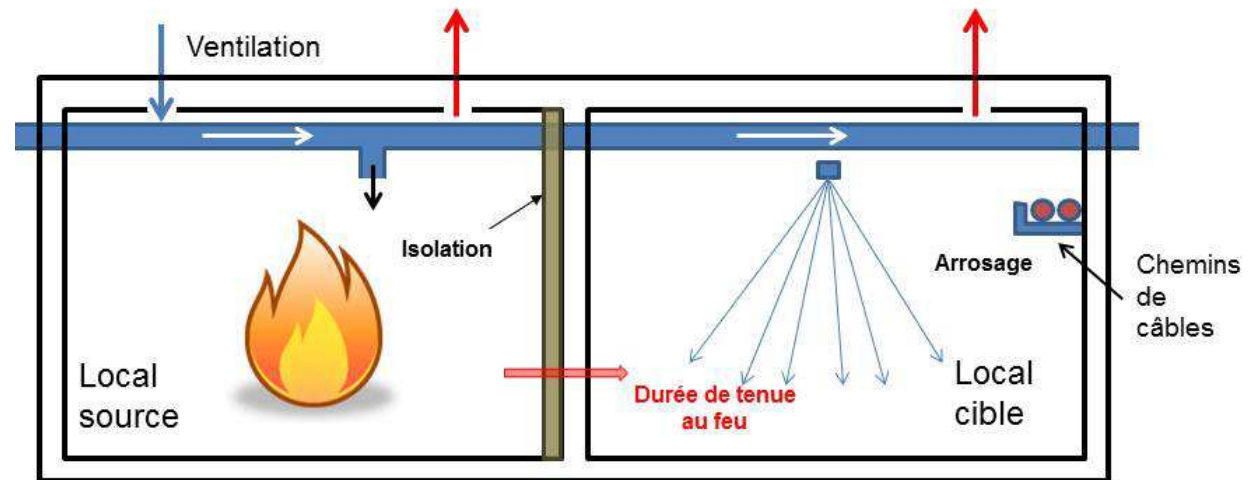
- ✓ amorphe (pas de régularité dans la distribution des positions des locaux)
- ✓ polydisperse (les locaux sont de formes et de tailles différentes)

❖ **Lutte par aspersion d'eau**

❖ **Opacité et toxicité des fumées**

❖ **Contraintes subies par les structures (solllicitations thermiques)**

Contexte et enjeux



Prise en compte des différents modes de propagation du feu d'un compartiment à l'autre (voisin ou distant) :

- par les systèmes de ventilation et les ouvertures (convection et transport des gaz)
- par les chemins de câbles
- à travers les parois (conduction) → durée de tenue au feu (norme SOLAS): temps au bout duquel la température de l'autre côté de la paroi a atteint 140°C, qui dépend de la résistance au feu de celle-ci (isolation, système d'arrosage) et du type de feu

Version actuelle de LUCIFER

LUCIFER

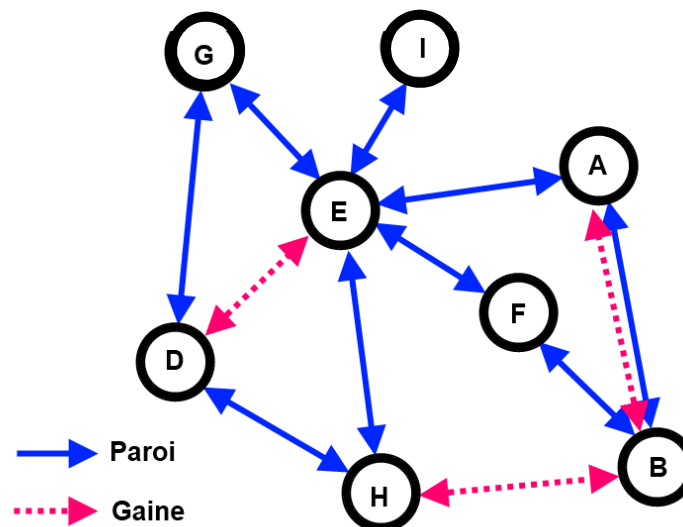
- Propagation par les parois uniquement, durée de tenue au feu au 1/4h près
- Feux iso : Pas de prise en compte du volume du local et de la charge calorifique
- Locaux touchés par l'incendie pour une durée de feu donnée (pas d'aspect dynamique)



Nouvelle version de LUCIFER⁵

- Modèle dynamique basé sur un réseau Bayésien (modèle graphique probabiliste) de propagation de feu (*Cheng et al., FSJ 2011*)

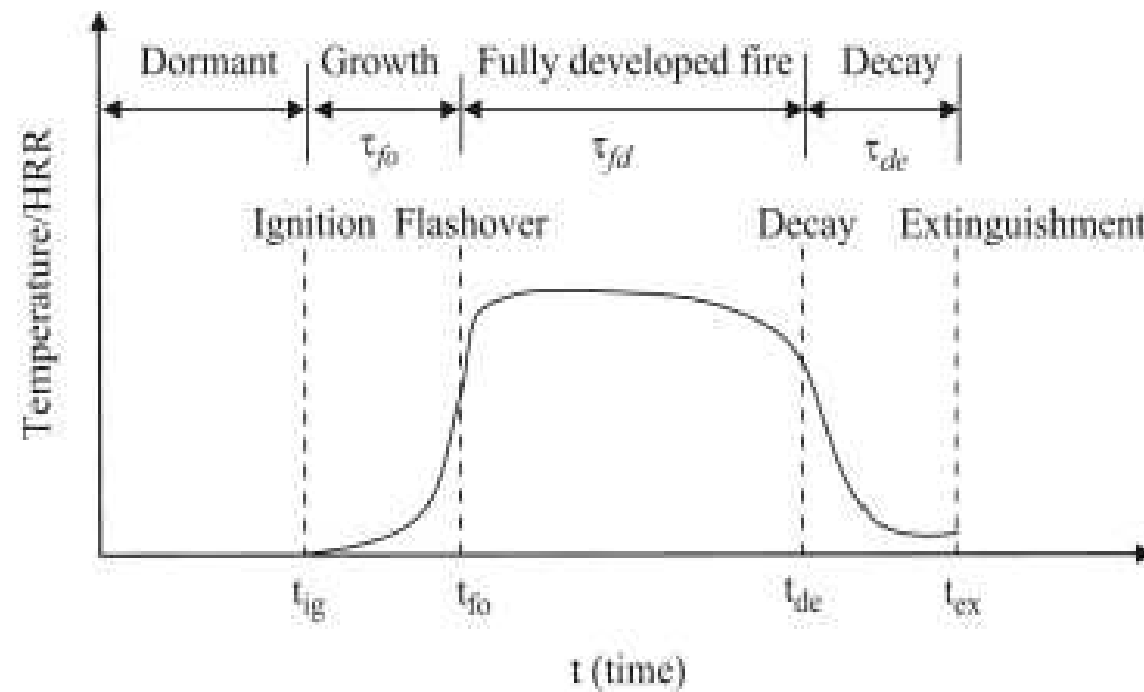
A partir des informations de connectivité des locaux, il est possible de définir une représentation sous forme de graphe des chemins existants entre les différents locaux du navire.



Modèle de propagation⁶

Le modèle de propagation repose sur :

- Les **temps caractéristiques des différentes phases du feu**,
- Les **probabilités cumulatives d'allumage, de flashover et d'échec des barrières** (paroi, fenêtre, porte)

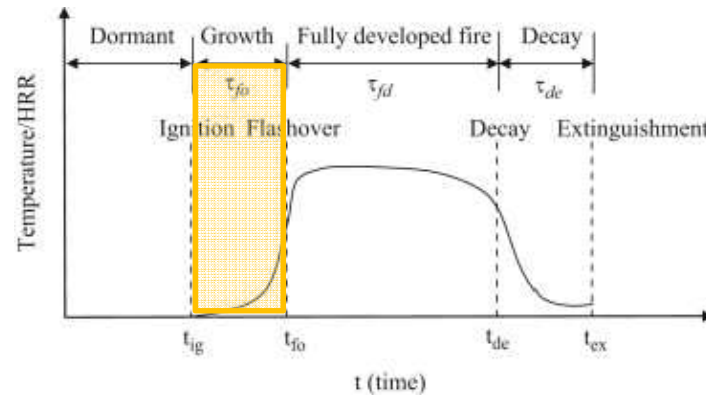


Calcul des durées des phases du feu

Phase de croissance :

Puissance du feu: $HRR = \alpha t^2$

α : taux de croissance



Durée de croissance jusqu'au flashover :

$$\tau_{fo} = \sqrt{\frac{HRR_{cr}}{\alpha}} \quad \text{avec } HRR_{cr} = 750A_o\sqrt{H_o}$$

Durée maximale de la phase de croissance :

$$\tau_{gr}^{max} = \sqrt[3]{\frac{3Q}{\alpha}} \quad \text{avec } Q = w_f A_F H_{ch}$$

Critère de flashover : $\tau_{gr}^{max} > \tau_{fo}$

A_o = surface des ouvertures de ventilation

H_o = hauteur des ouvertures de ventilation

w_f = densité de combustible dans le compartiment

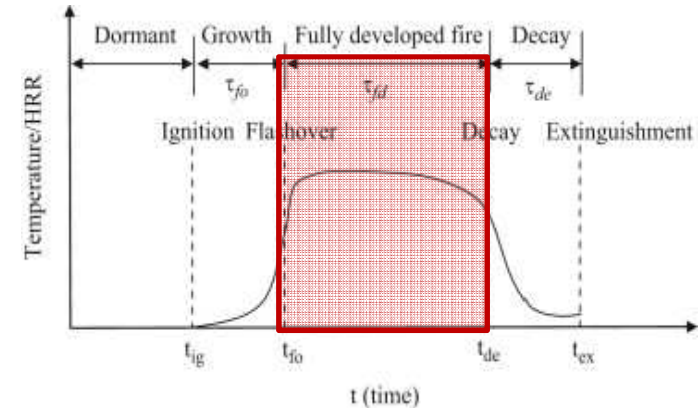
A_F = surface au sol

H_{ch} = chaleur de combustion du combustible

Q = Chaleur totale qui peut être dégagée par le combustible dans un compartiment

Calcul des durée des phases du feu

Phase de feu entièrement développé



2 régimes

Régime contrôlé par le combustible

$$\frac{A_o \sqrt{H_o}}{A_f} \geq 0.07 \text{ m}^{-1/2}$$

A_f = surface apparente du combustible

Durée de la phase du feu entièrement développé

$$\tau_{fd} = \frac{151}{\varphi}$$

φ = surface spécifique du combustible

Régime contrôlé par la ventilation

$$\frac{A_o \sqrt{H_o}}{A_f} < 0.07 \text{ m}^{-1/2}$$

$$\tau_{fd} = \frac{w_f}{\rho_{air} \sqrt{g} A_o \sqrt{H_o}}$$

Nécessite le calcul de la hauteur de flamme

A_o = surface des ouvertures de ventilation

H_o = hauteur des ouvertures de ventilation

w_f = densité de combustible dans le compartiment

Probabilité de transmission horizontale

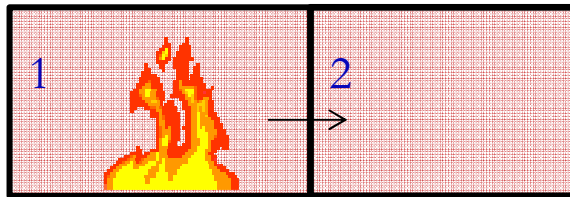
➤ Probabilité de transmission par une paroi ou une porte

Si porte ouverte → $P_{ph}(1/2) = 1$

○ Si porte fermée :

$$\text{Si } t_{fo} \leq t \leq t_{de} : P_{ph}(1/2) = \int_{t_{fo}}^t \frac{1}{\sigma_{ph}\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{[(t-t_{fo})-\mu_{ph}]^2}{2\sigma_{ph}^2}\right) dt$$

$$\text{Si } t > t_{de} : P_{ph}(1/2) = 0$$



μ_{bf} (temps moyen) et σ_{bf} (écart type) : corrélations empiriques

Probabilité de transmission verticale

➤ Probabilité de transmission par le plafond:

Si pas de plafond → $P_{pv}(1/2) = 1$

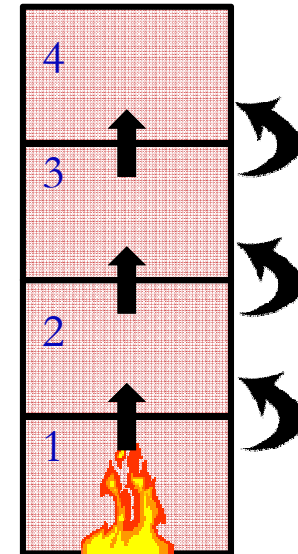
Si plafond :

$$\text{Si } 0 \leq t \leq t_{de}: \quad P_{pv}(1/2) = \int_{t_{fo}}^t \frac{1}{\sigma_{pv}\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{[(t-t_{fo})-\mu_{pv}]^2}{2\sigma_{pv}^2}\right) dt$$

$$\text{Si } t > t_{de}: \quad P_{pv}(1/2) = 0$$

➤ Probabilité de transmission par une fenêtre:

- En régime contrôlé par la ventilation et si hauteur des flammes > distance entre 2 étages, 2 cas se présentent:
 - ✓ Fenêtre ouverte: $P_f(1/2) = 1$
 - ✓ Fenêtre fermée, on calcule la probabilité de brisure, $P_f(1/2)$



➤ Probabilité de transmission par une fenêtre et le plafond:

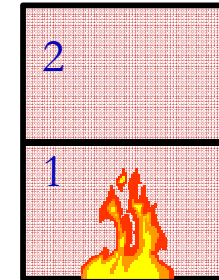
$$P_{pv}(1/2) + P_f(1/2) - P_{pv}(1/2) \times P_f(1/2)$$

μ_{bf} (temps moyen) et σ_{bf} (écart type) : corrélations empiriques

Probabilité d'allumage

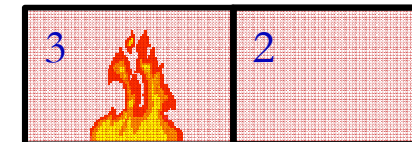
Pour direction verticale

$$P_{igv}(2) = P_{pv}(1/2) \times P_{fa}(1)$$



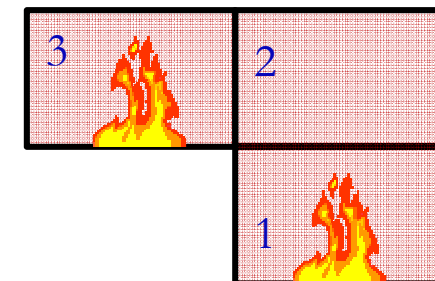
Pour direction horizontale

$$P_{igh}(t) = P_{ph}(3/2) \times P_{fa}(3)$$



On a donc :

$$P_{ig}(2) = P_{igv}(2) + P_{igh}(2) - P_{igv}(2) \times P_{igh}(2)$$



Nombre aléatoire R : si $R < P_{ig}(2) \rightarrow$ allumage

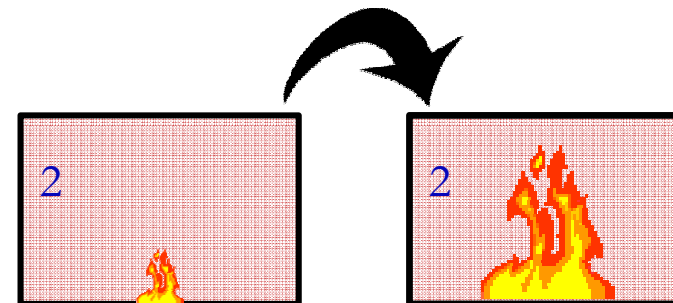
Probabilité de feu pleinement développé

Après allumage, la probabilité de feu pleinement développé est:

$$P_{fd}(Z) = \int_{t_{ig}}^t \frac{1}{\sigma_{fo}\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{|(t-t_{ig})-\mu_{fo}|^2}{2\sigma_{fo}^2}\right) dt$$

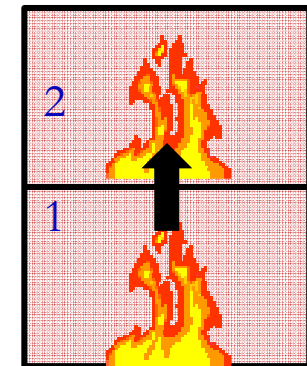
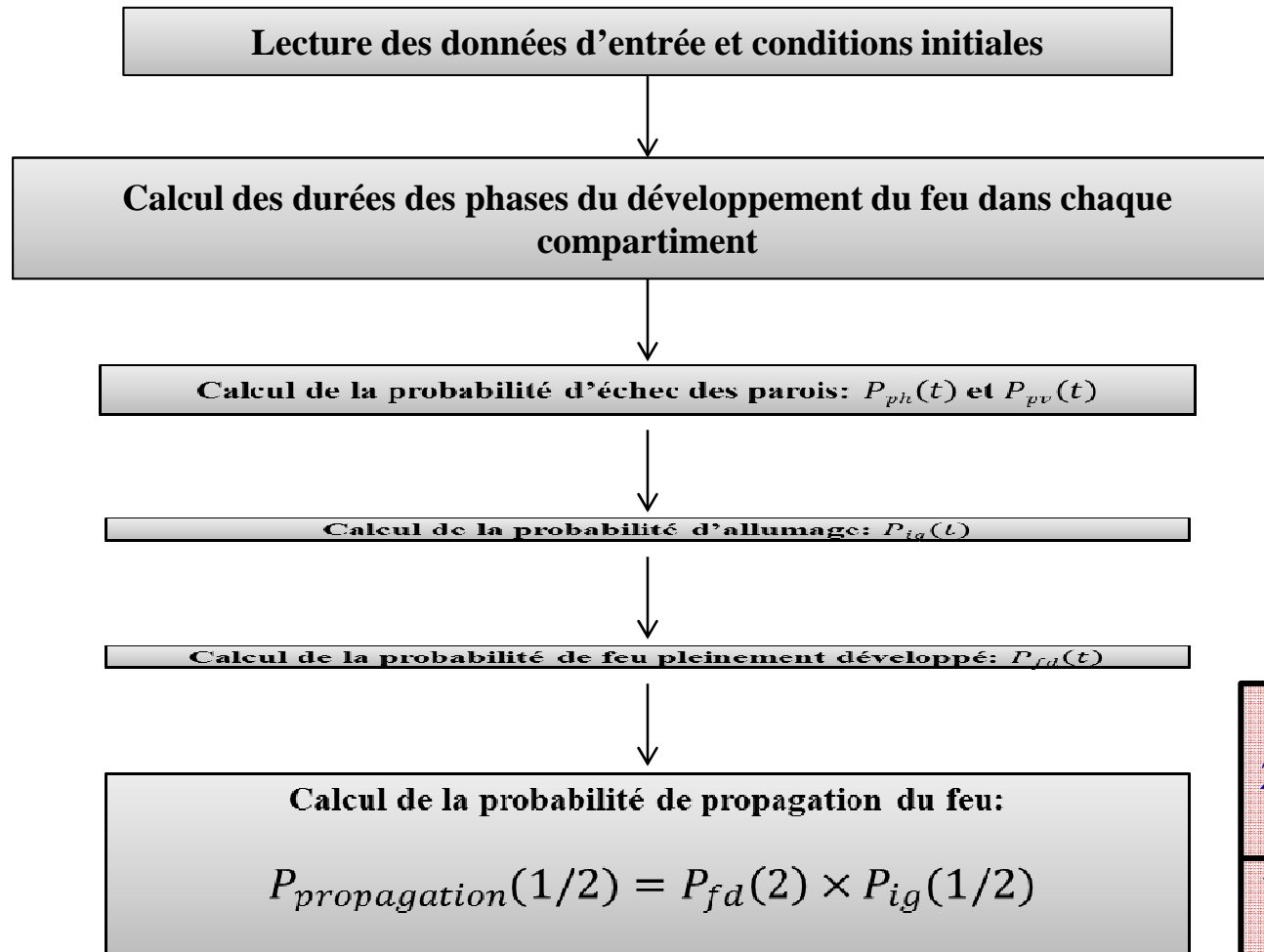
Si $t > t_{de}$ $P_{fd}(Z)=0$

Nombre aléatoire R, Si $R < P_{fd}(Z)$ alors flashover



μ_{fo} (temps moyen) et σ_{fo} (écart type) : corrélations empiriques

Organigramme du modèle dynamique Bayesian network

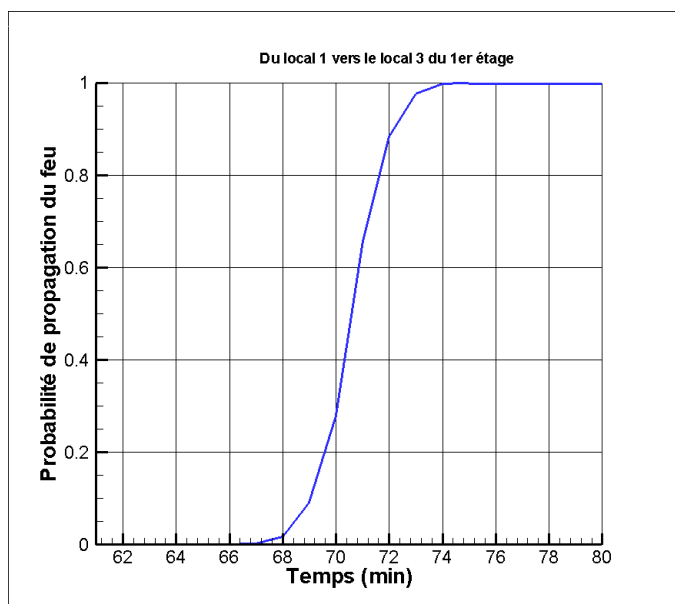
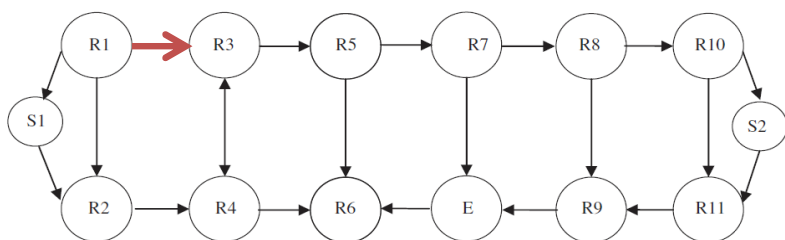


Paramètres du code lucifer

| |
|---|
| Pour chaque compartiment |
| Dimension |
| Masse volumique du combustible |
| Chaleur de combustion du combustible |
| Coefficient de croissance du feu |
| |
| Pour chaque paroi |
| Dimension |
| Propriétés thermique des paroi ρ, k, C_p |
| Résistance au feu (moyenne , ecart type) |
| |

Exemple de calcul de propagation

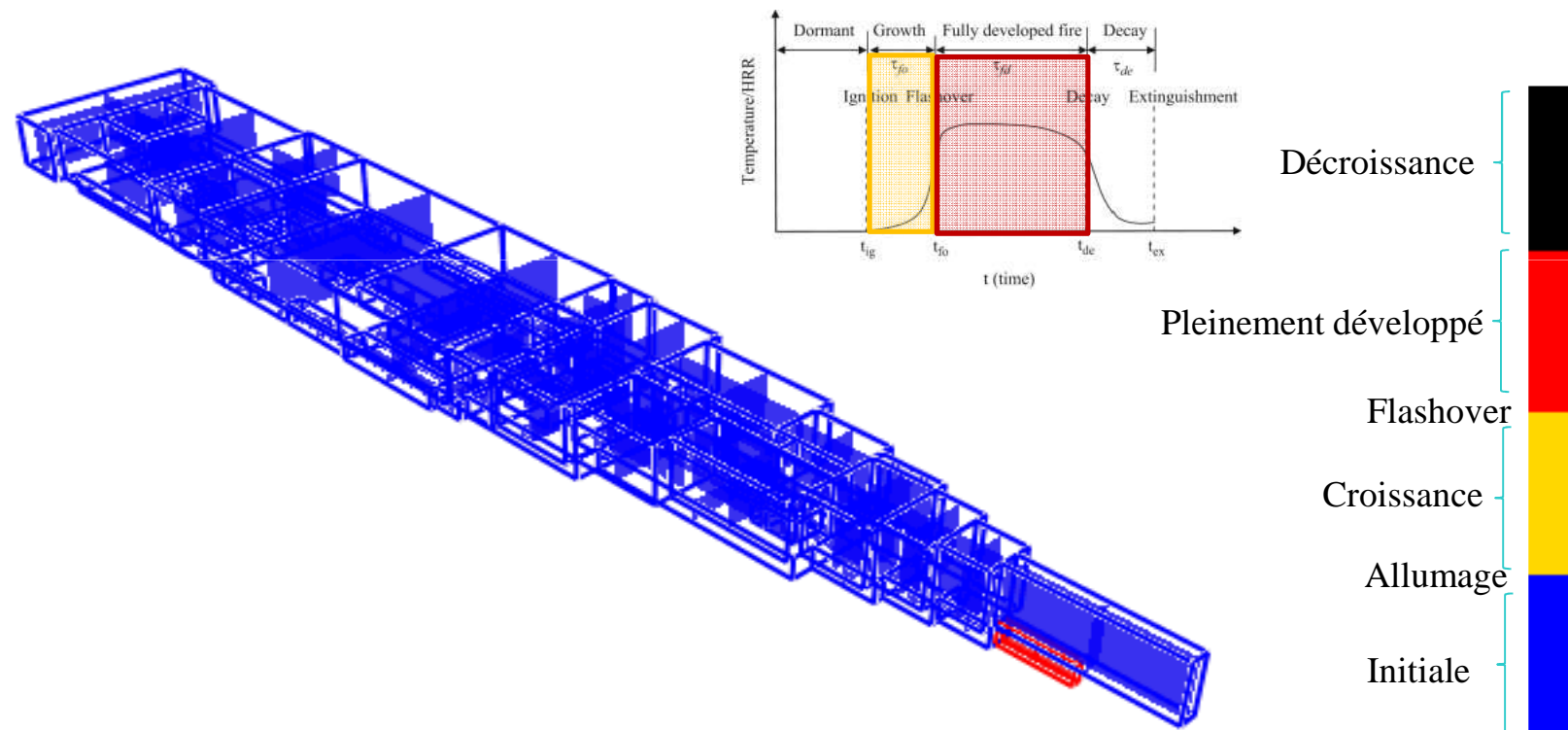
- Paramètres d'entrée (Cheng et al, FSJ, 2011)
- Batiment constitué de 2 étages et de 28 locaux de taille et de forme identiques



| Résultats | | | | | |
|-----------|-------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| Etage | Compartment | Cheng 2011 | | Lucifer | |
| | | tig (min) | tfo (min) | tig (min) | tfo (min) |
| 1 | R1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | R2 | 26 | 34 | 22 | 30,73 |
| 1 | R3 | 70 | 78 | 61,15 | 70,8 |
| 1 | R4 | 100 | 107 | 72,87 | 80,45 |
| 1 | R5 | 135 | 142 | 122,9 | 131,532 |
| 1 | R6 | 167 | 176 | 131,2 | 139,7 |
| 1 | R7 | 208 | 217 | 188,3 | 196,9 |
| 1 | R8 | 278 | 285 | 253,5 | 262,2 |
| 1 | R9 | 312 | 320 | 284,1 | 292,7 |
| 1 | R10 | 341 | 350 | 318,6 | 327,2 |
| 1 | R11 | 376 | 385 | 331 | 339,7 |
| 1 | E | 231 | NF | 194,2 | NF |
| 1 | S1 | 69 | NF | 36,5 | NF |
| 1 | S2 | 416 | NF | 346,3 | NF |
| 2 | R1 | 3 | 12 | 9,5 | 18,1 |
| 2 | R2 | 36 | 44 | 32,4 | 40,9 |
| 2 | R3 | 82 | 92 | 66,9 | 75,5 |
| 2 | R4 | 111 | 120 | 77,2 | 85,8 |
| 2 | R5 | 146 | 155 | 130,1 | 138,7 |
| 2 | R6 | 179 | 188 | 137,6 | 146,2 |
| 2 | R7 | 219 | 227 | 193,6 | 202,1 |
| 2 | R8 | 289 | 297 | 257,4 | 266 |
| 2 | R9 | 318 | 328 | 287,5 | 296,516 |
| 2 | R10 | 353 | 362 | 321,9 | 330,5 |
| 2 | R11 | 384 | 393 | 333,4 | 342 |
| 2 | E | 248 | NF | 201 | NF |
| 2 | S1 | 88 | NF | 48,4 | NF |
| 2 | S2 | 431 | NF | 349,6 | NF |

Exemple de calcul de propagation

- Paramètres des parois déterminés expérimentalement et numériquement (REPARE)
- Acier
- Navire constitué de 2 étages et de 55 locaux de taille et de formes différentes



Time: 2.0



Améliorer la détermination des paramètres des pdfs (valeur moyenne, écart type) de façon à prendre en compte :

- Les effets de la charge calorifique et du volume du local,
- La lutte par aspersion d'eau
 - En volume,
 - Ruissellement de paroi.

→ Expérimentalement :

- Caisson de feu (IUSTI/DGA, été 2014)
- Bancs d'essais du LEMTA et de l'IUSTI

→ Numériquement :

- SAFIR (DGA/IUSTI)
- CEIL, REPARE (DGA)
- BERGAMOTE (LEMTA)