

# Modélisation du risque incendie dans des structures multi- compartimentées

Nina Dizet

Directeurs de thèse : B. Porterie et Y. Pizzo

Thèse CIFRE ANRT/RS2N



Projet MARINER-DECM

(ANR ASTRID 12-ASRT-0002-01, 2017-2021)



LASH FIRE

Projet H2020 LASHFIRE

(Grant agreement n° 814975, 2019-2023)

# Projet MARINER DECM

(LEMTA, DGA TN, RS2N, PPRIME, IUSTI)



- Suite du projet MARINER (2012 – 2015)
  - Thèse N. Giraud
  - Validation du concept: simuler en temps réel la propagation du feu dans une structure multi-compartmentée
- Développement d'un outil d'aide à la décision :
  - Cartographie du sinistre (feu et fumées)
  - Evacuation ou mise en sécurité des personnes
  - Evaluation des zones sensibles
- Démonstrations civiles et militaire (caractère dual)

# Projet LASHFIRE

- Réduire le risque incendie à bord des navires rouliers
- Consortium: 26 partenaires de 13 états membres de l'UE dont LEMTA, RISE (Suède), RS2N
- Base technique pour les futures réglementations maritimes de construction de navire



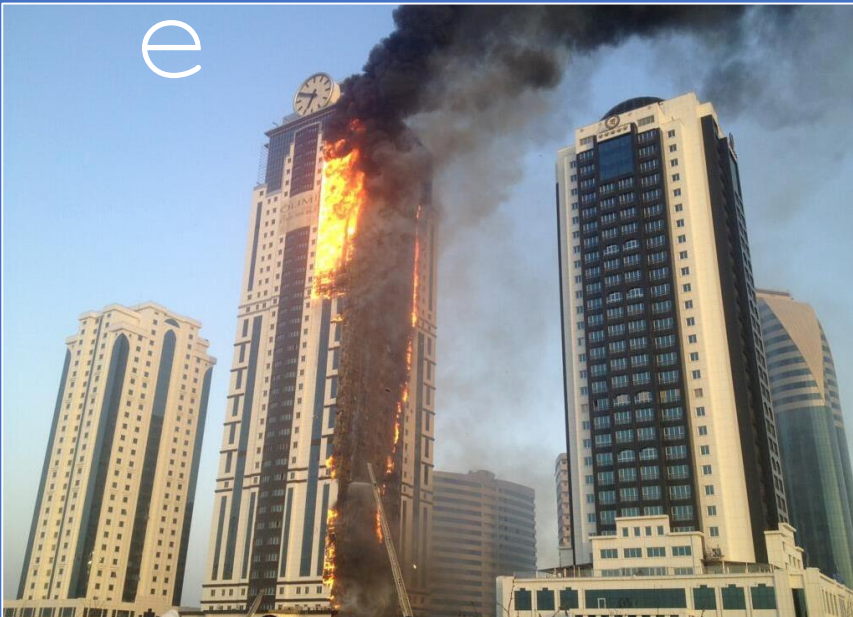
Stena Flavia



Incendie du Norman Atlantic



# Sommaire



I. Modélisation de l'incendie à l'échelle du local et de la structure

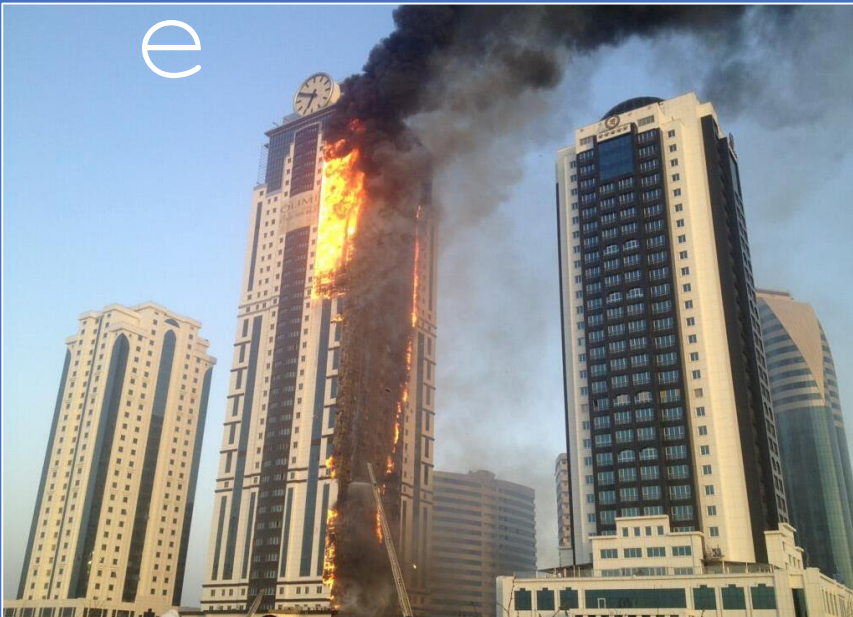
II. Application à une corvette militaire

III. Application à un navire roulier

Conclusion et perspectives



# Sommaire



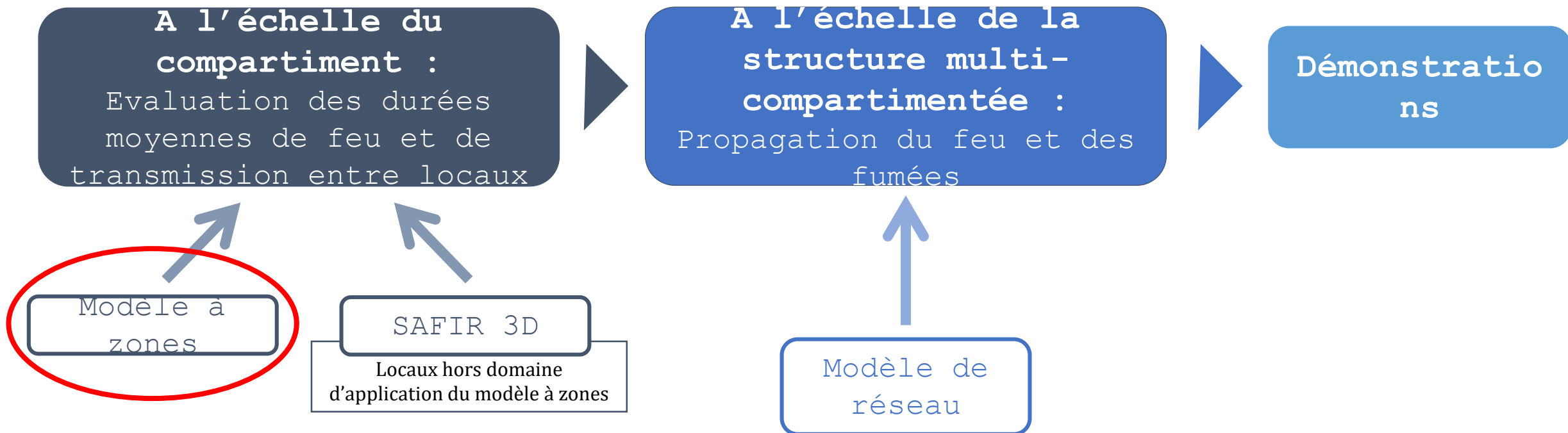
I. Modélisation de l'incendie à l'échelle du local et de la structure

II. Application à une corvette militaire

III. Application à un navire roulier

Conclusion et perspectives

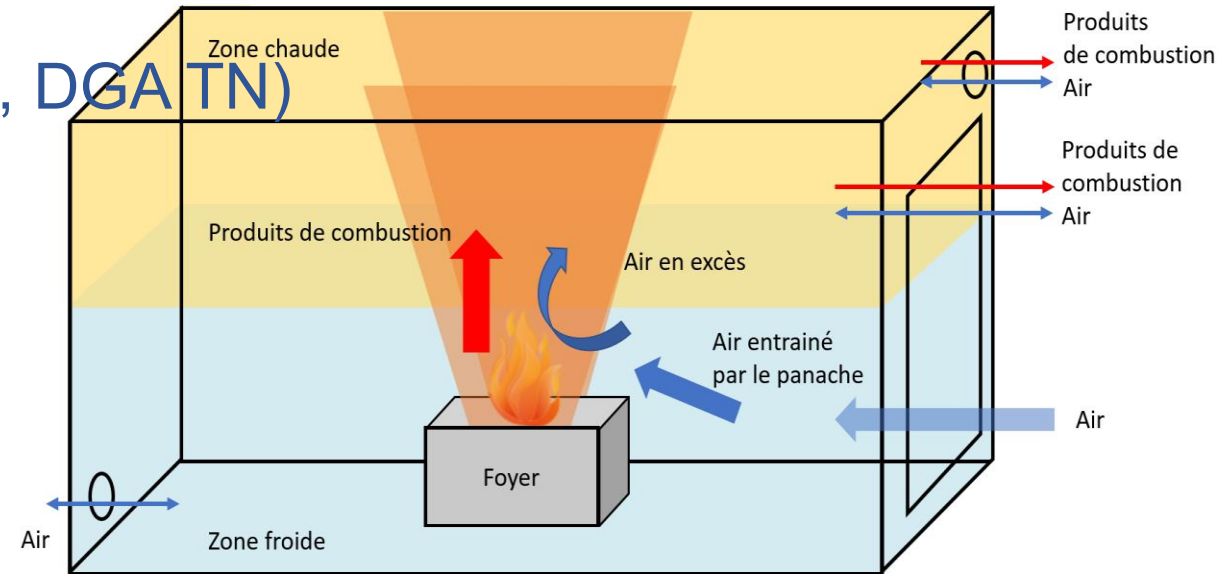
# Approche hybride multi-échelle



# Modèle à zones

(inspiré du modèle ŒIL de C. Lallemand, DGA TN)

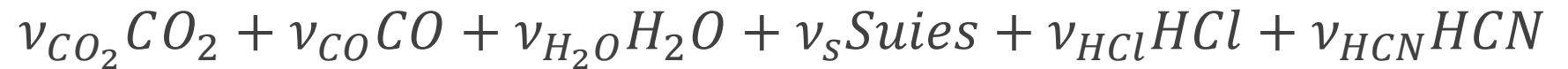
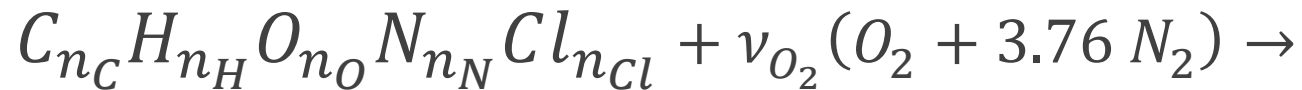
- 2 zones / panache
- Equations de bilan de masse et d'énergie
- Eq. de quantité de mouvement
  - Vitesse de déplacement de l'interface
  - Pression dans le local non uniforme → Temps CPU ↑ ( $\Delta t$  : critère CFL)
- Rayonnement du gaz et des éléments (4 ou 10) de parois
  - Contribution des suies et des espèces gazeuses ( $CO_2$  et  $H_2O$ )
- Transfert de chaleur par convection et conduction
- Débit de pyrolyse prescrit



# Modèle à zones

## Sous-modèle de combustion

- Equation à une étape



- Données combustibles :
  - Rendements de suies, CO et HCN
  - Chaleur de combustion effective  $\Delta h_{eff}$
  - Fraction rayonnée  $\chi_r$
- Modification HRR si sous oxygénation



# Modèle à zones

Combustible multi-matériaux →

Combustible équivalent

- Molécule fictive  $C_{n_C}H_{n_H}O_{n_O}N_{n_N}Cl_{n_{Cl}}$

- Calcul des nombres d'atomes :

$$n_C^{eq}(t) = \frac{n_C^1 \dot{m}_1^{pyr}(t) + n_C^2 \dot{m}_2^{pyr}(t)}{\dot{m}_1^{pyr}(t) + \dot{m}_2^{pyr}(t)}$$

- $\dot{m}_1^{pyr}$  et  $\dot{m}_2^{pyr}$  : débits de pyrolyse prescrits des combustibles 1 et 2
- $n_C^1$  et  $n_C^2$  : nombres d'atomes de carbone de la molécule des combustibles 1 et 2

# Modèle à zones

## Combustible équivalent

- Exemple : Feu d'heptane et de PMMA

### Combustible 1 : Heptane

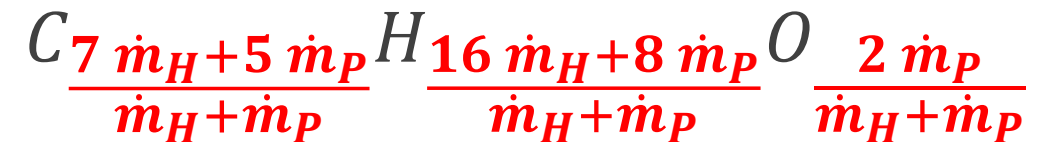
- Formule chimique :  $C_7H_{16}$
- Débit de pyrolyse :  $\dot{m}_H$

### Combustible 2 : PMMA

- Formule chimique :  $C_5H_8O_2$
- Débit de pyrolyse :  $\dot{m}_P$

### Combustible équivalent

- Formule chimique :



- Débit de pyrolyse :  $\dot{m}_H + \dot{m}_P$



Modifications : rendements  
(suies, CO, HCN),  $\Delta h_{eff}$ ,  $\chi_r$

# Validation du modèle à zones

Présentation de la plateforme DIAMAN  
représentative d'un local marin

- Deux locaux cubiques de 27 m<sup>3</sup>
- Parois en acier 1 cm
- Ventilation mécanique et/ou naturelle

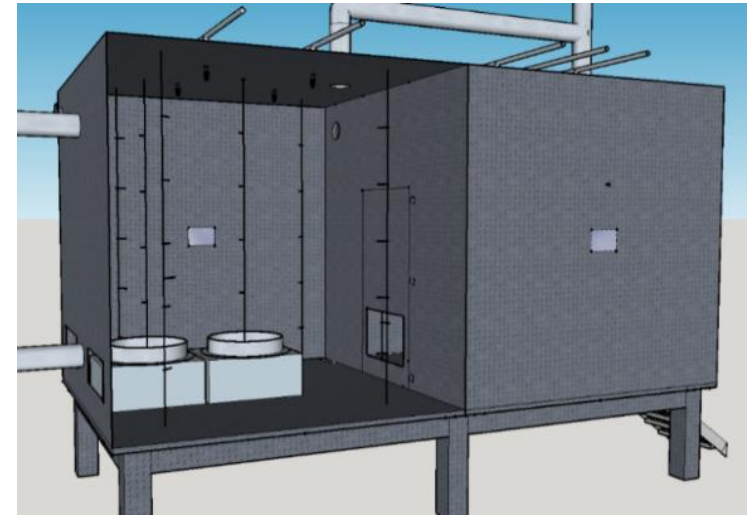


# Validation du modèle à zones

## Présentation des essais

### Feu multi-matériau : Heptane et PMMA

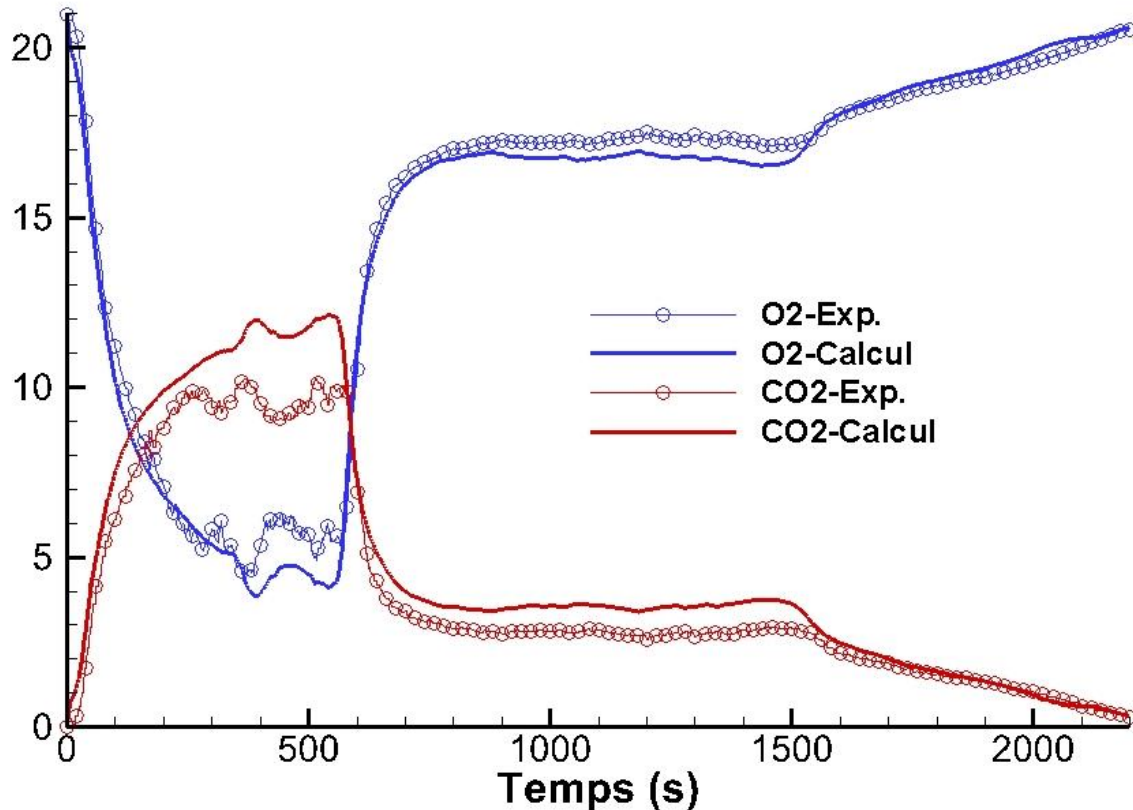
- 8 L d'heptane au centre du local
- 7 kg de PMMA décalé vers une paroi du local
- Extraction mécanique en partie haute (800 m<sup>3</sup>/h)
- Admission naturelle en partie basse



# Validation du modèle à zones

Feu multi-combustible d'heptane et de PMMA

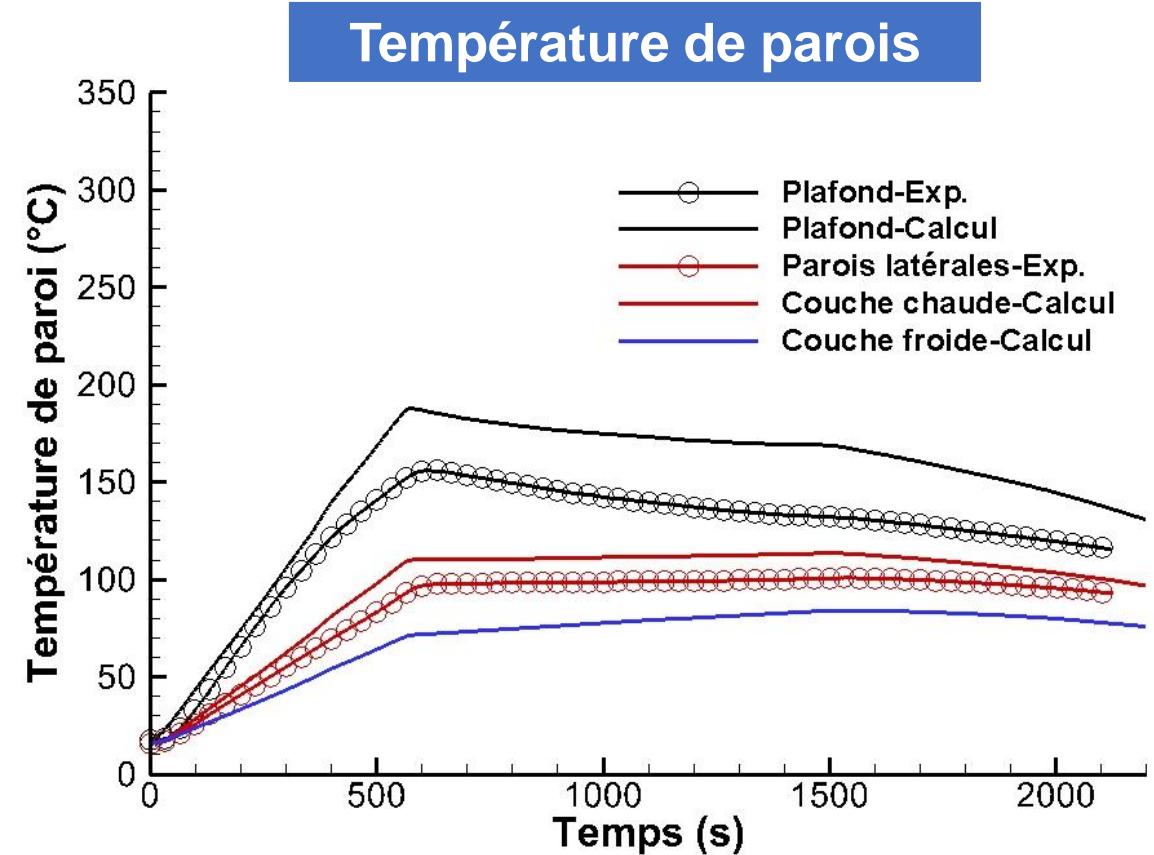
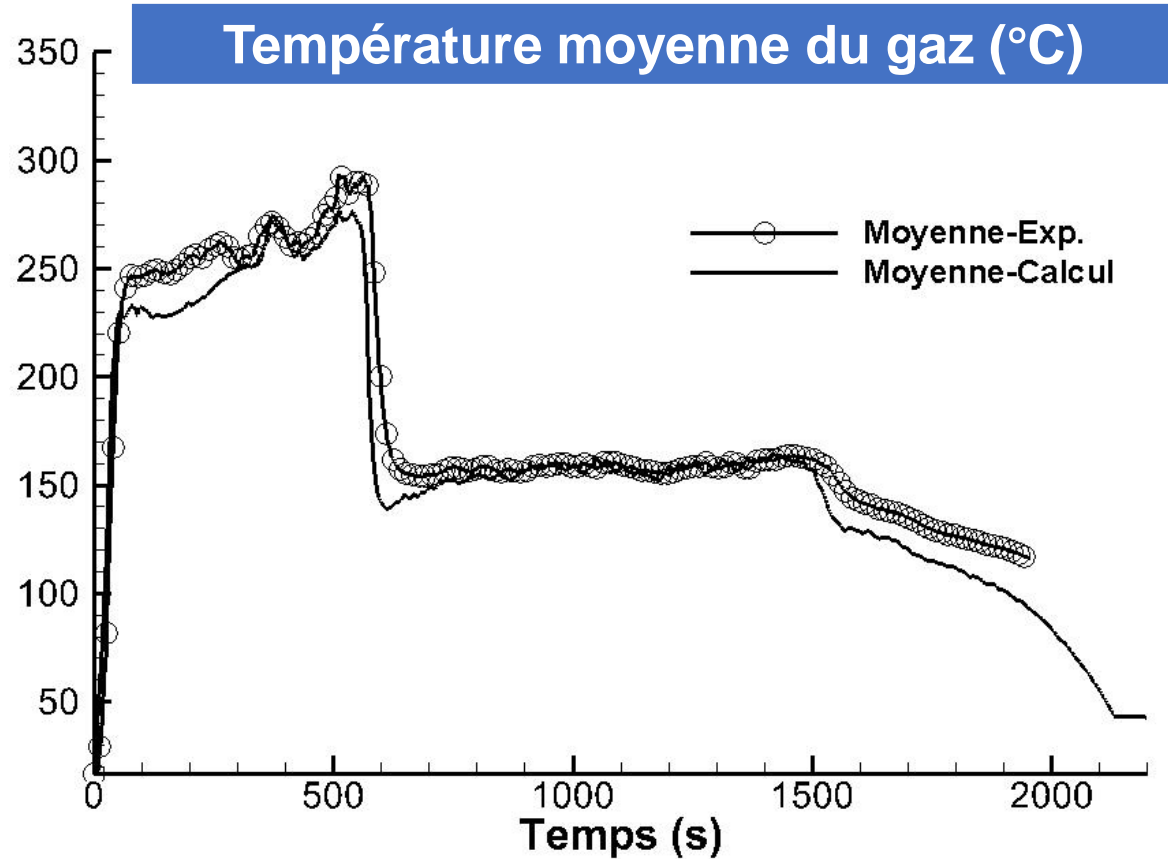
Fractions volumiques de  $O_2$  et  $CO_2$



Validation du concept de combustible équivalent

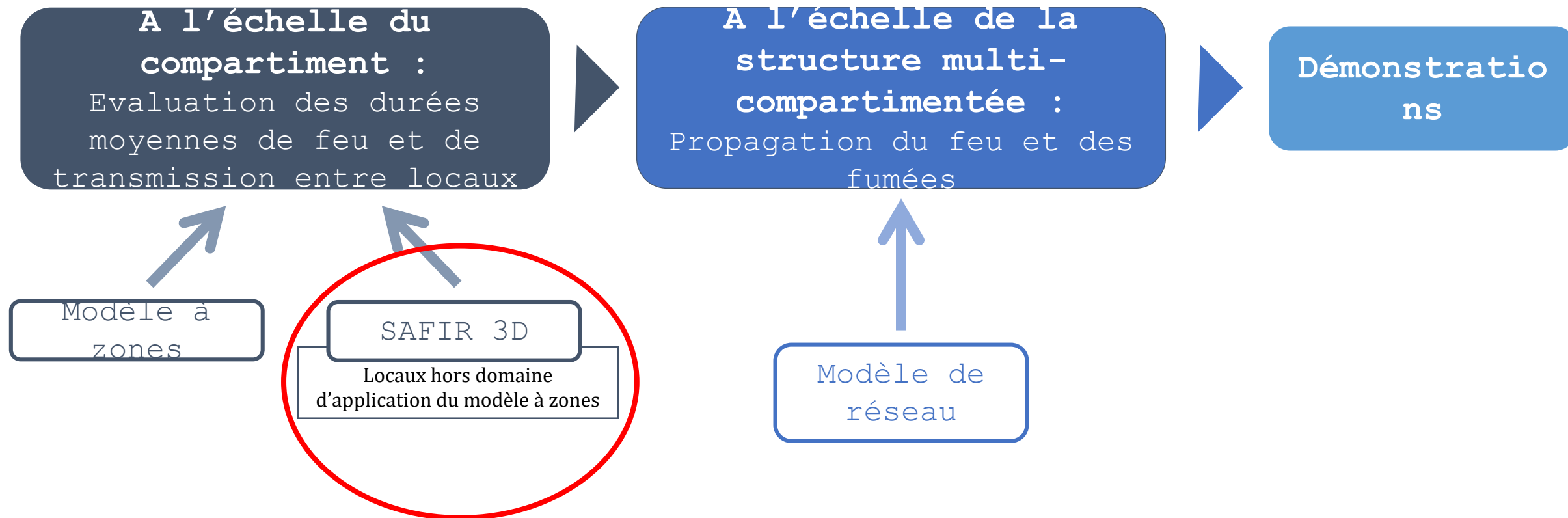
# Validation du modèle à zones

Feu multi-combustible d'heptane et de PMMA



→ Bonne correspondance entre l'expérience et le modèle

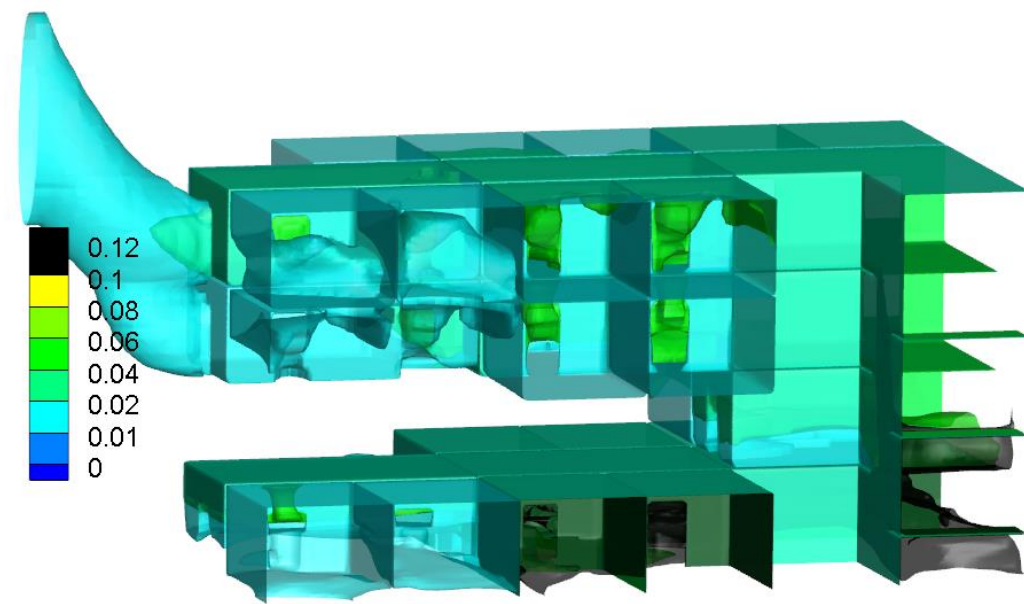
# Approche hybride multi-échelle



# Code CFD : SAFIR 3D

## Fonctionnalités principales

- Ecoulement compressible à faible nombre de Mach et de Froude
- FANS (Favre-Averaged NS)
- Combustion turbulente (Eddy Dissipation, Magnussen et Hjertager)
- Rayonnement (ETR milieu gris absorbant émettant)
- Débit prescrit ou calculé (ex : nappe d'hydrocarbure, thèse de M. Mense)
- Algorithme totalement implicite (inclus parois, obstacles, îlots internes)
- Validé sur de feux ouverts et confinés





# Code CFD : SAFIR 3D

Extensions : Propagation du feu d'un matériau combustible à un autre

- Méthode FTP (Flux-Time Product)
  - Estimation du temps nécessaire à l'inflammation d'un matériau exposé à un feu
  - Application à différents types de matériaux (bois, plastique ...)

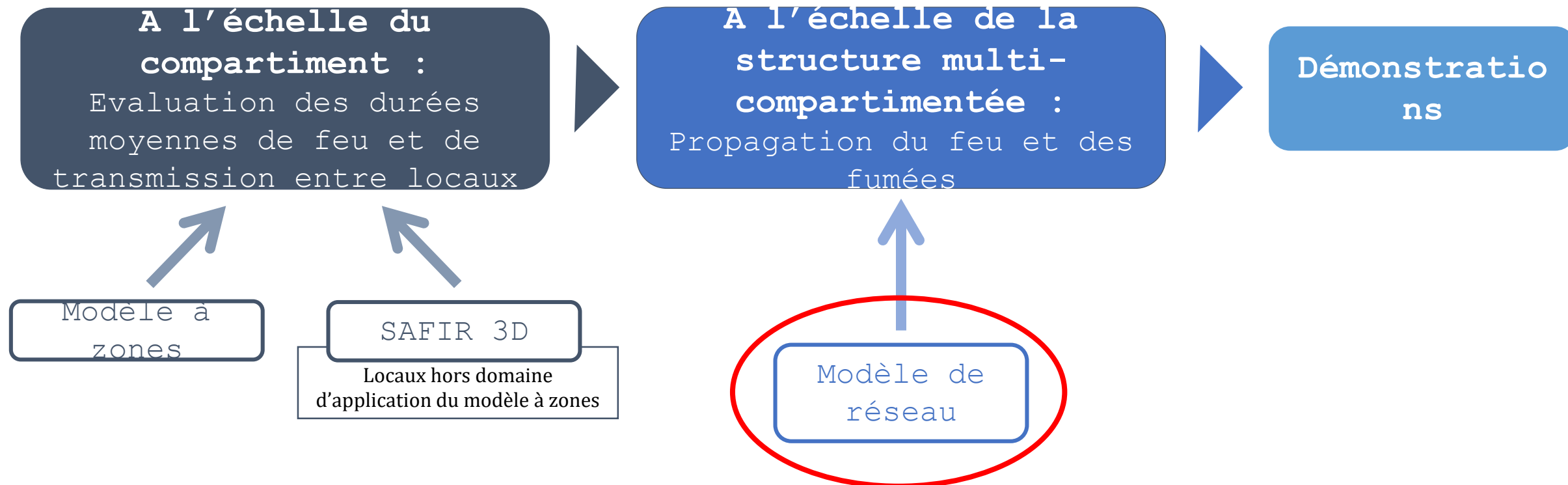
Composant	$n$	$FTP_{cr}$ (kW.s <sup>n</sup> .m <sup>-2</sup> )	$\dot{q}''_{cr}$ (kW.m <sup>-2</sup> )
Pneu en caoutchouc	1,5	9828	8,0
Pare-chocs	2,0	21862	3,1

- A chaque pas de temps  $j$  :

$$FTP_j = \sum_{i=1}^j (\dot{q}_i'' - \dot{q}_{cr}'')^n \Delta t_i \text{ pour } \dot{q}_i'' > \dot{q}_{cr}''$$

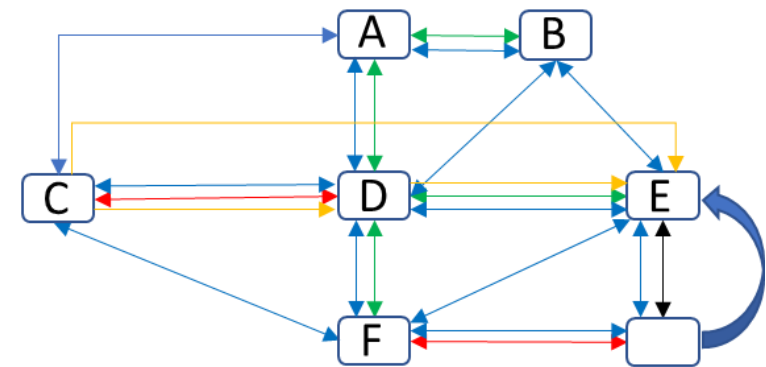
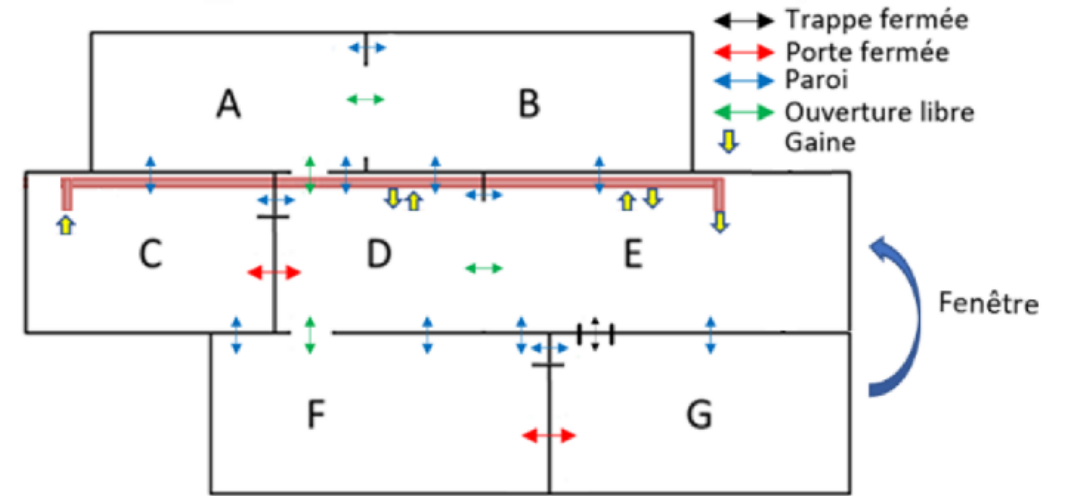
- Flux total reçu  $\dot{q}_i''$
  - Flux critique du matériau  $\dot{q}_{cr}''$  (kW/m<sup>2</sup>)
  - Loi de puissance  $n$
- Lorsque  $FTP_j > FTP_{cr} \rightarrow$  inflammation

# Approche hybride multi-échelle



# Présentation du modèle de réseau

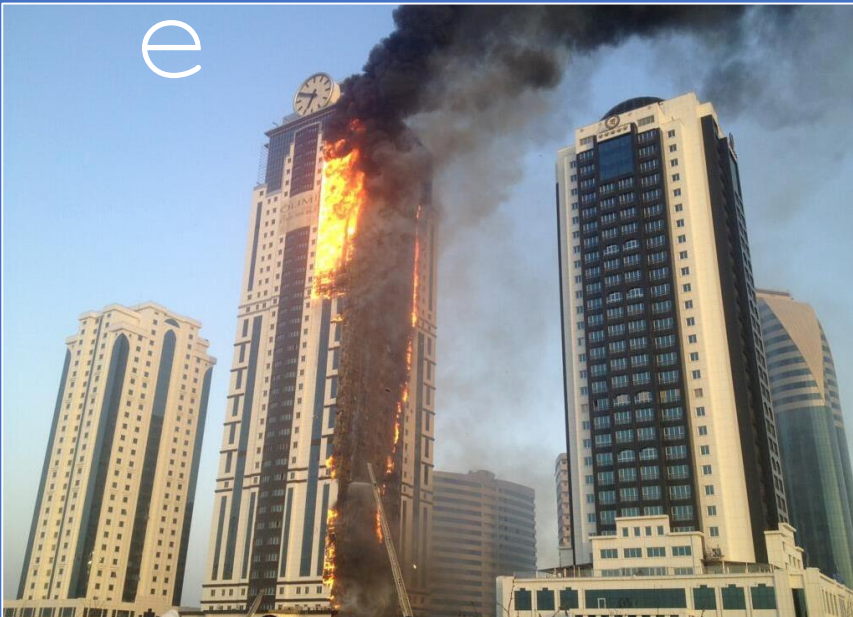
- Connexions à courte et longue distances
- Réseau de locaux:
  - Polydisperse (locaux de formes et tailles différentes)
  - Amorphe (pas de régularité géométrique)
- Représentation des connexions sous forme de graphe
- Approche statistique basée sur des densités de probabilité
- Transport des fumées par un modèle simple de remplissage



Graphe de connectivités



# Sommaire



I. Modélisation de l'incendie à l'échelle du local et de la structure

**II. Application à une corvette militaire**

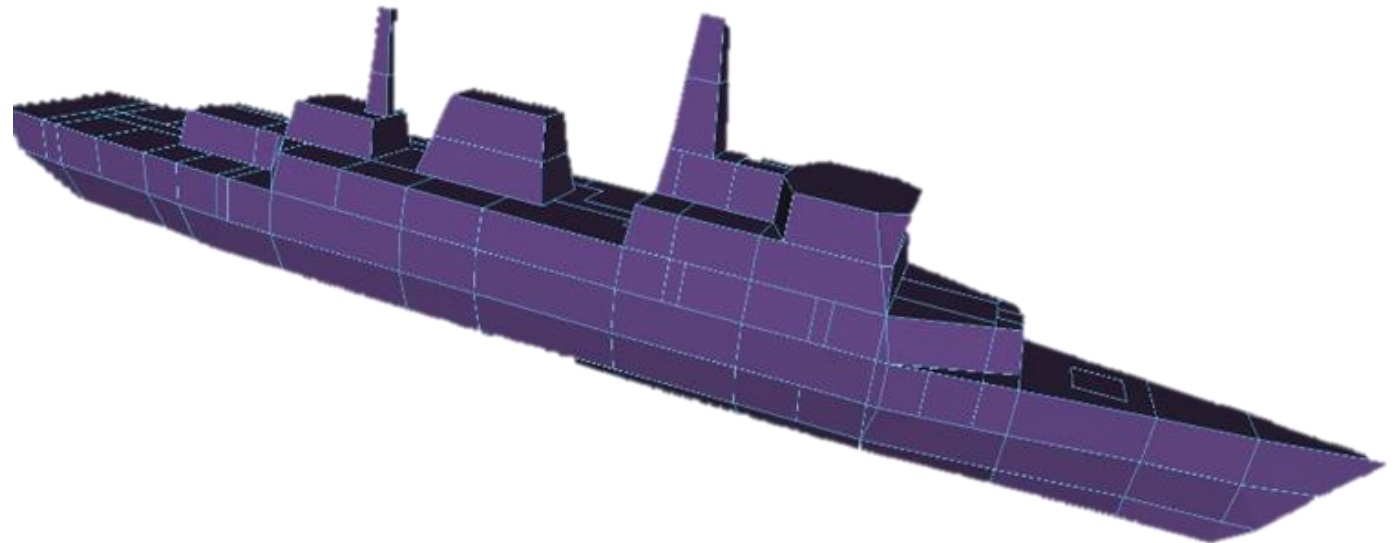
III. Application à un navire roulier

Conclusion et perspectives

# Corvette générique SURVIVE

## Agencement général

- Corvette générique SURVIVE de QinetiC
- 7 ponts
- 115 locaux dont 96 susceptibles de propager le feu
- 10 locaux types (coll. avec groupe MRT de DGA TN)



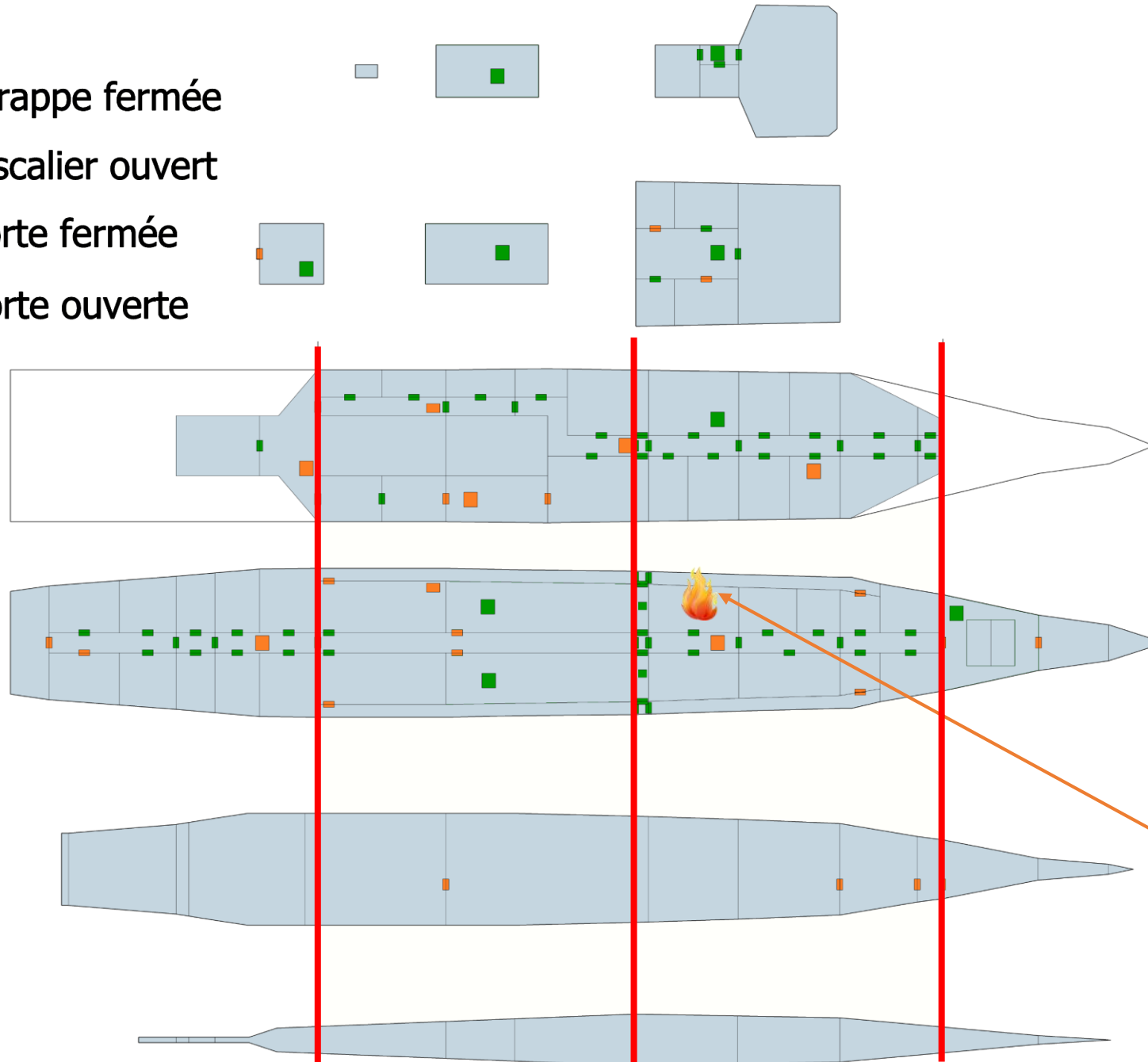
Type de local	Contenus inflammables	Combustible(s) équivalent(s)
<b>Coursive</b>	Câbles électriques	PMMA
<b>Electricité</b>	Câbles électriques	PMMA
<b>Logement</b>	Mobilier, couchage, textiles, ...	Mousse PU PMMA
<b>Munitions</b>	Matières pyrotechniques	
<b>Opérationnel</b>	Equipements électroniques et informatiques, nappes de câbles électriques	Mousse PU PMMA
<b>Propulsion</b>	Hydrocarbures	Heptane Gazole
<b>Réservoir</b>	Hydrocarbures et huiles	Gazole
<b>Restauration</b>	Chaises, banquettes, meubles en bois ...	Mousse PU PMMA Bois
<b>Stockage hydrocarbure</b>	Hydrocarbures	Heptane
<b>Stockage mixte</b>	Stockage hors hydrocarbures	Heptane PMMA

Trappe fermée

Escalier ouvert

Porte fermée

Porte ouverte



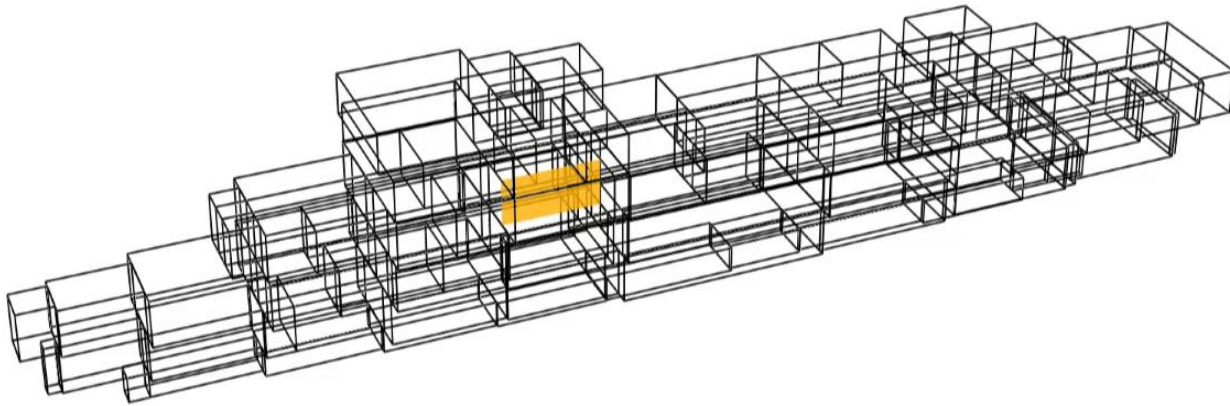
## Situation d'étanchéité SE 5:

- Cloisonnement en zones de sécurité
- Assurer le confinement de l'incendie
- Limiter sa propagation

Déclenchement du feu  
dans le local E112

# Départ de feu dans le local E112

## Chronologie du feu



Temps (s)

10.0



Résultats sur 100 tirages

 Inflammation  Flashover  Décroissance

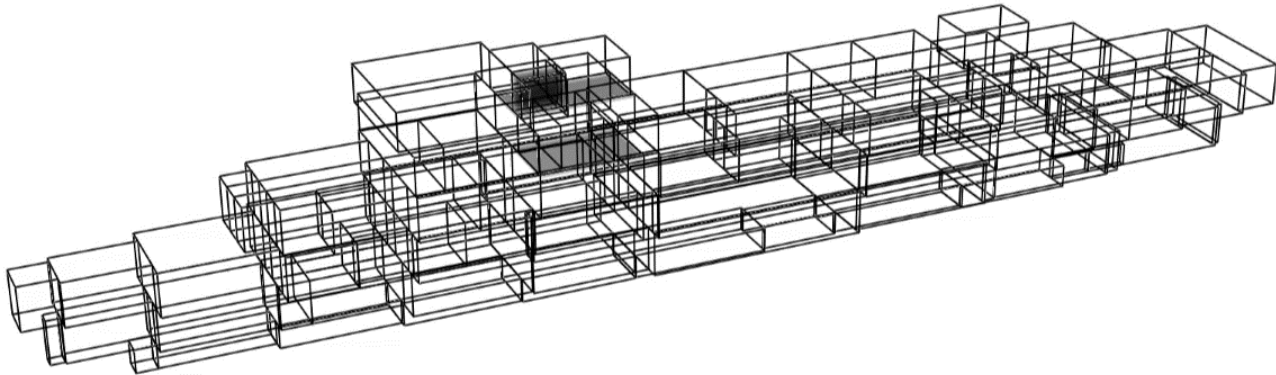
- 16 locaux touchés par le feu après 147' de propagation
- 6/16 où le feu est en phase pleinement développée
- 3 sur 6 ponts

Temps CPU total : 7 secondes



# Départ de feu dans le local E112

## Chronologie des fumées



- 76 locaux remplis de fumées jusqu'à 1,80 m du plancher après 27' de feu
- 5 sur 6 ponts enfumés

Temps (s)

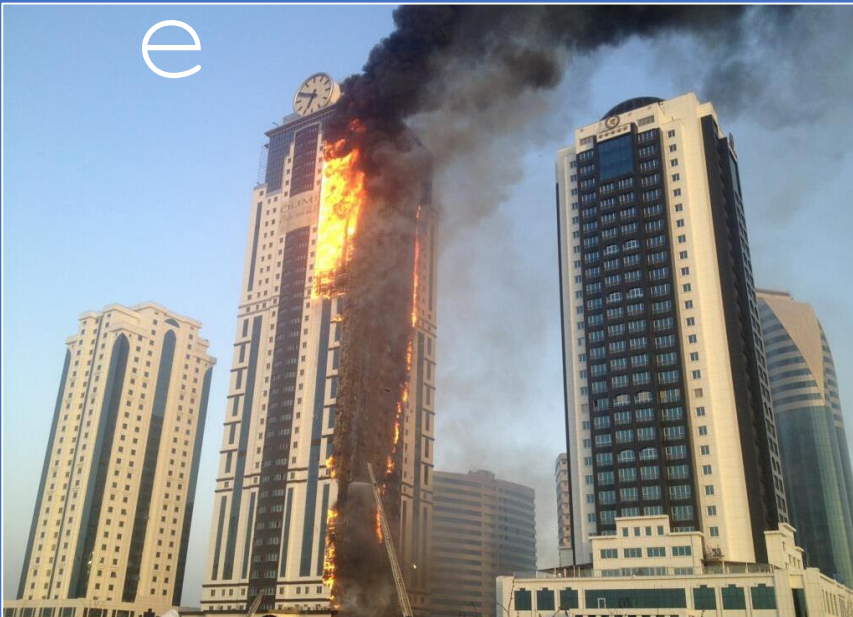
10.0



Temps CPU total : 7 secondes



# Sommaire



I. Modélisation de l'incendie  
à l'échelle du local et de  
la structure

II. Application à une corvette  
militaire

**III. Application à un navire  
roulier**

Conclusion et perspectives

# Application à un navire roulier

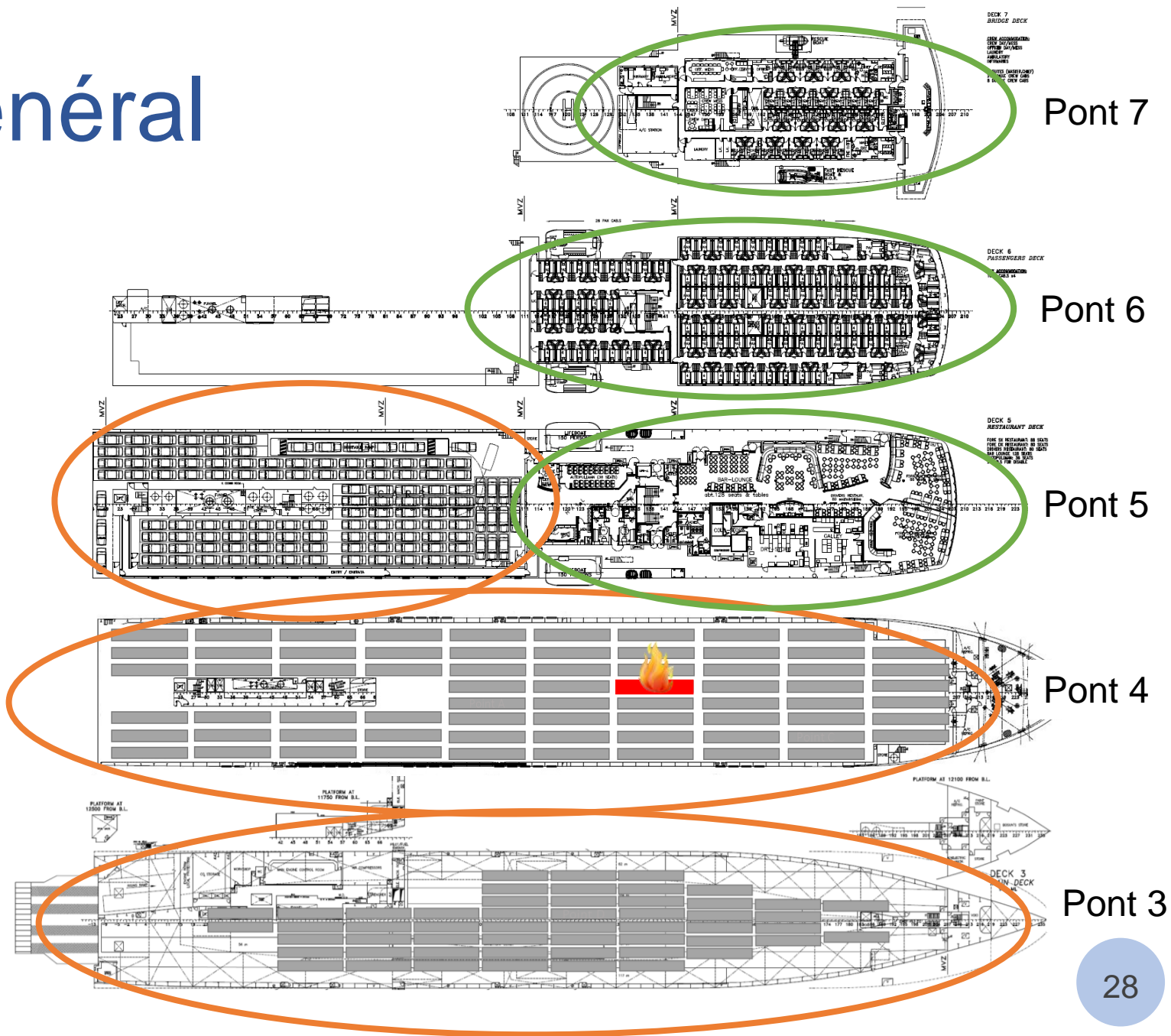
## Agencement général

- Navire roulier : Stena Flavia
- Transport de marchandises, de véhicules et de personnes
- 8 ponts



# Agencement général

- 8 ponts
  - 2 ponts vides (1 et 8) (non représenté)
  - Stockages de véhicules
  - Espaces vies

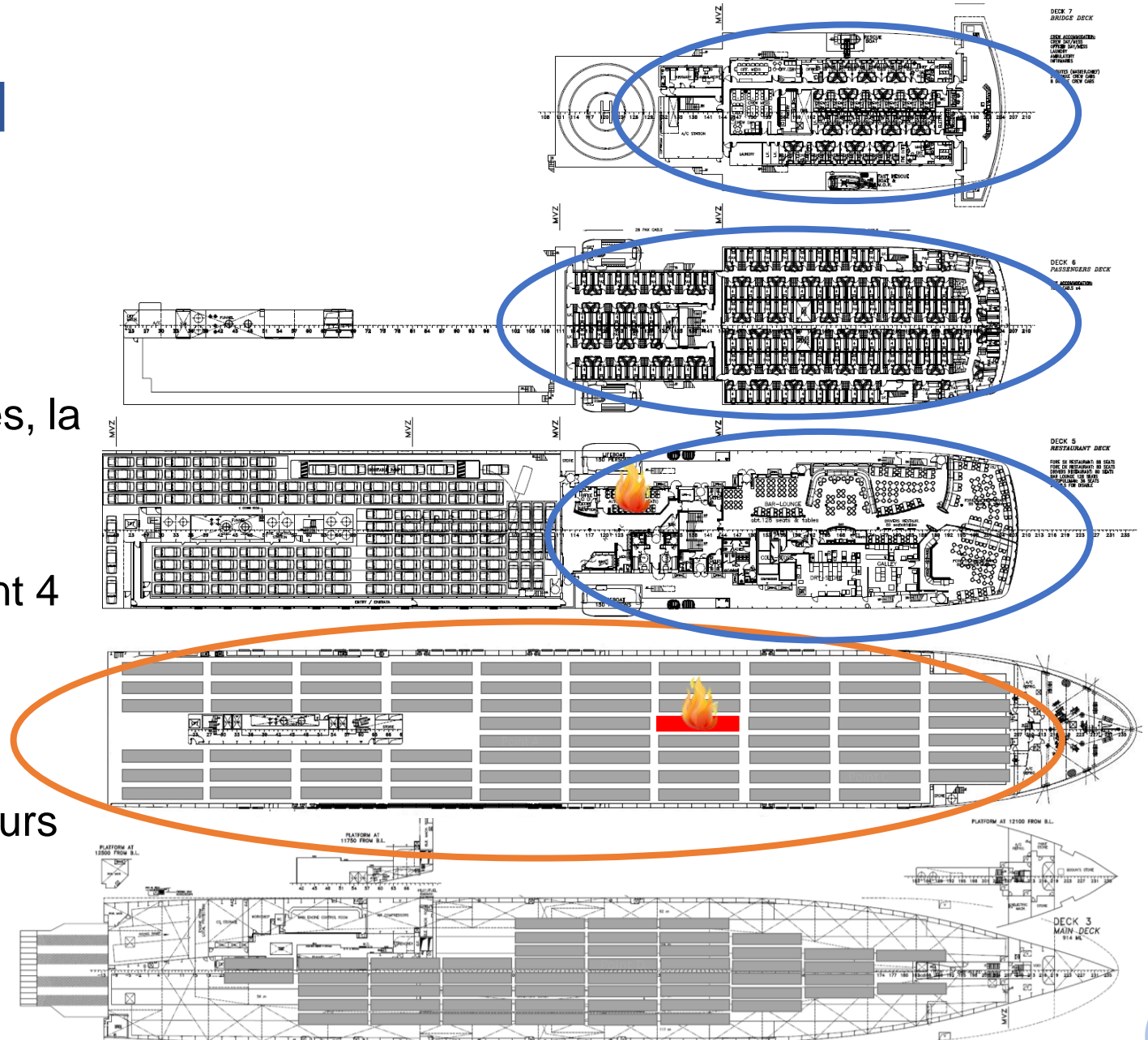


# Scénario de feu

- Départ de feu au pont 4
- Transmission du feu au pont 5 (défaut d'isolation)
- Conséquences sur les personnes, la cargaisons et le navire

Transmission du feu dans le pont 4  
Simulation avec SAFIR 3D

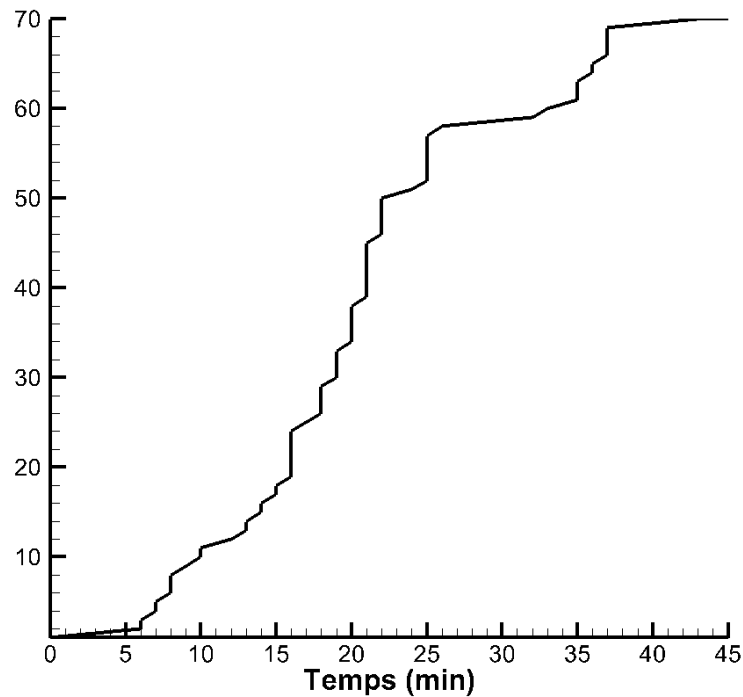
Transmission aux ponts supérieurs  
Simulation avec le modèle de réseau



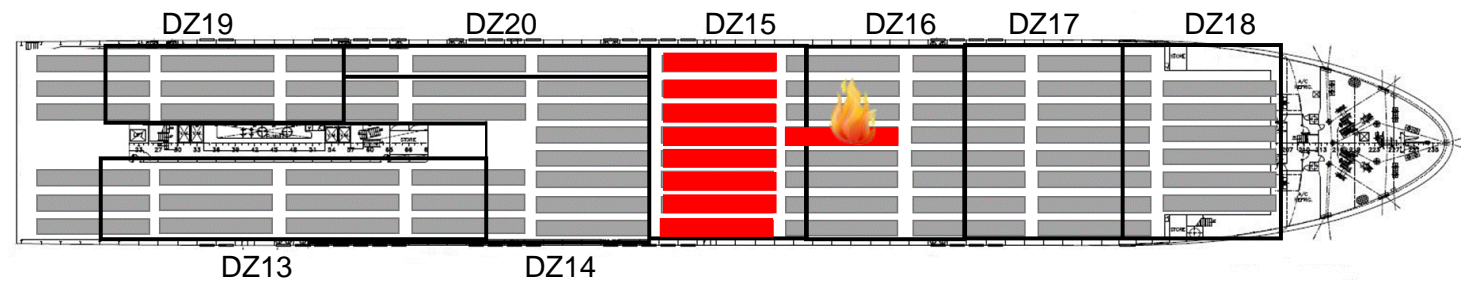
# Scénario de feu

## Résultats de simulation avec SAFIR 3D

### Nombre de camions enflammés



43' pour enflammer l'intégralité des 70 camions du pont 4

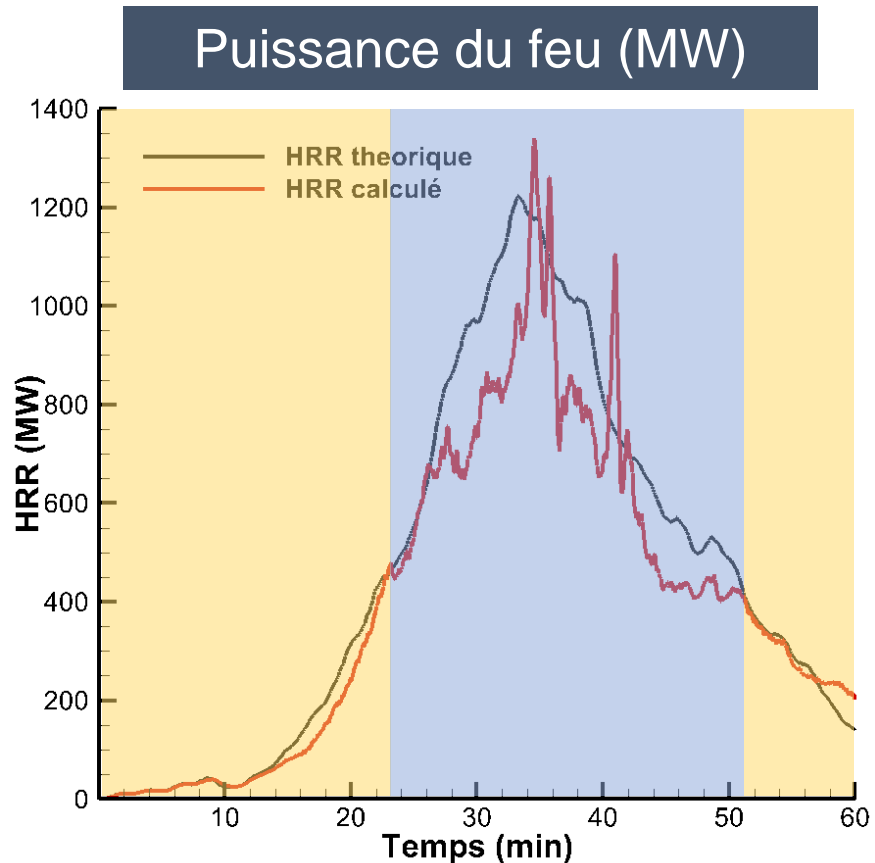


- 16' après le départ du feu, DZ15 complètement enflammé  
→ incendie « hors de contrôle »

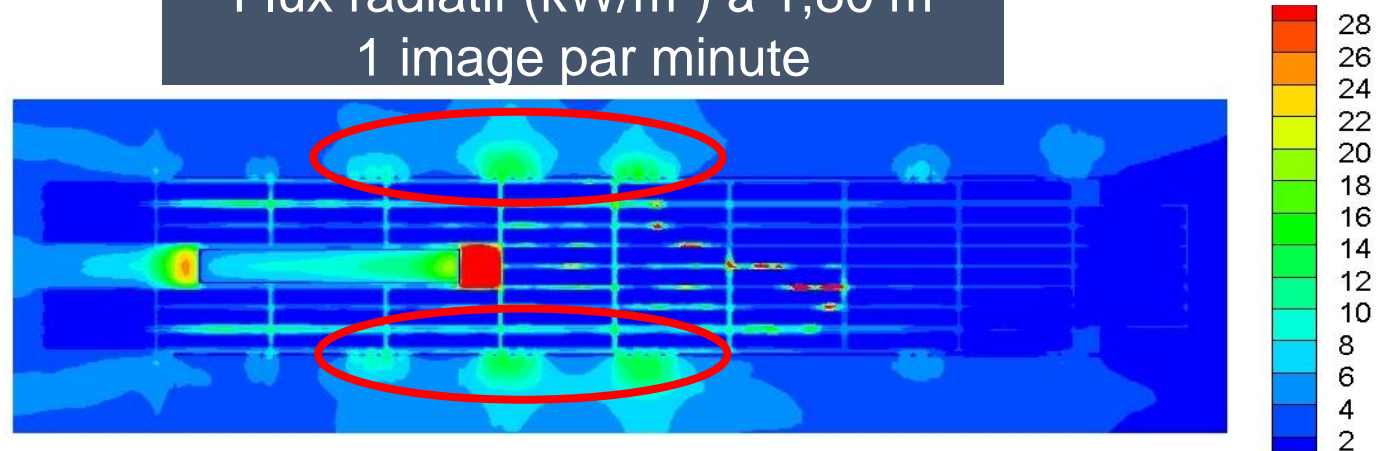
# Scénario de feu

## Résultats de simulation avec SAFIR 3D

- Influence de la sous-oxygénation sur le HRR



**Flux radiatif (kW/m<sup>2</sup>) à 1,80 m  
1 image par minute**



Apparition de flammes extérieures  
20' après le départ du feu

# Scénario de feu

## Résultats de simulation avec SAFIR 3D

- Résumé de la simulation :
  - Incendie « hors de contrôle » après 16' de feu
  - Apparition de flammes extérieures après 20' de feu

- Retour d'incendie (rapport BV)



Incendie du Norman Atlantic

Chronologie du feu	Retour d'incendie dans le Norman Atlantic
Flammes sortant des ouvertures	$t_0 + 15'$
Incendie « hors de contrôle »	$t_0 + 23'$

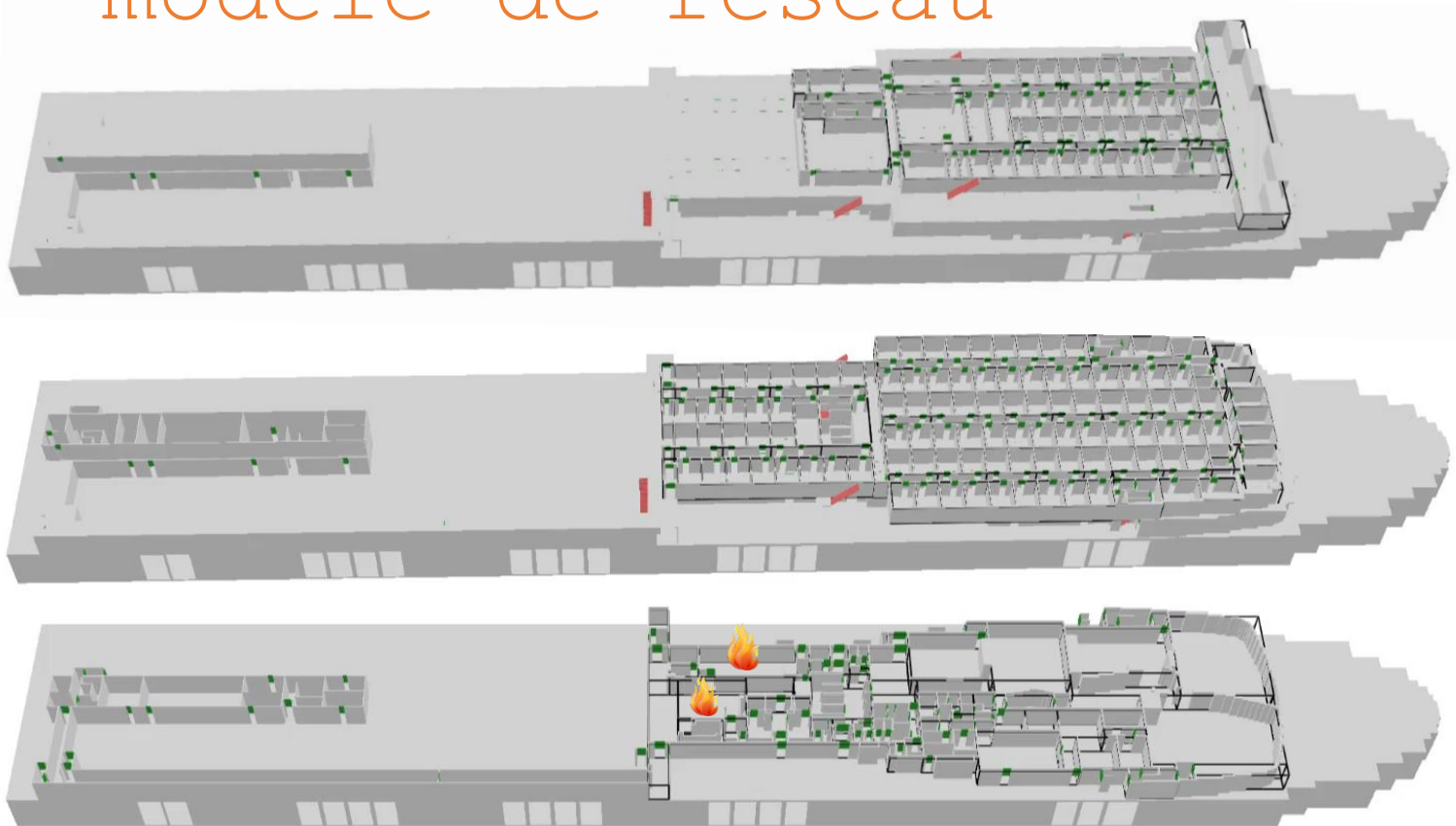


**Validation « qualitative »  
de la simulation**



# Scénario de feu

Résultats de simulation avec le modèle de réseau



- Seulement 2 locaux touchés par le feu (5')
- En 28', remplissage de l'intégralité des trois ponts

Temps CPU : 1 secondes

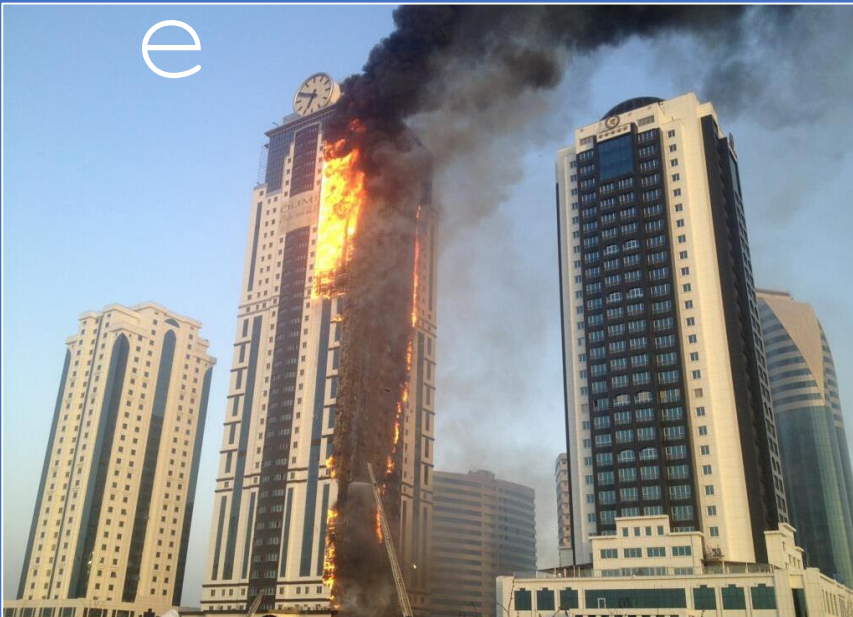
Time: 10.0



Résultats sur 100 tirages



# Sommaire



I. Modélisation de l'incendie à l'échelle du local et de la structure

II. Application à une corvette militaire

III. Application à un navire roulier

**Conclusion et perspectives**

# Conclusion et perspectives

- Développement d'un outil
- Evaluation en temps réel du risque incendie dans des structures multi-compartimentées
- Approche hybride multi-échelle à couplage faible
  - Echelle du local (modèle à zones ou SAFIR 3D)
  - Echelle de la structure (modèle de réseau)

## Pour la suite :

- Couplage au modèle d'évacuation du LEMTA (LASHFIRE)
- Assimilation de données (détection et lutte)
- Automatisation de la saisie des données structurelles



Merci de votre  
attention