



Modélisation de feux d'armoires électriques avec Fire Dynamics Simulator

Corentin Macqueron
AREVA Projets, Saint-Quentin-en-Yvelines
Ingénieur Thermique – Mécanique des fluides

Verneuil-en-Halatte, 9-10 mars 2017

Contexte

- ▶ Dans le cadre des projets AREVA, de nombreuses questions sont posées sur la thématique incendie
- ▶ L'un des risques incendie sur les installations AREVA est celui lié aux armoires électriques
- ▶ Il est intéressant d'être capable d'en estimer les conséquences toutefois la physique de ce type de feux est complexe
- ▶ Les logiciels de calcul comme CFAST ou FDS développés par le NIST permettent d'estimer ces conséquences mais il est nécessaire de vérifier au préalable leur bonne représentativité physique (validation)
- ▶ À notre connaissance, FDS n'a pas été qualifié sur feux d'armoires électriques (les récents travaux du NIST en 2016 [1] sur les armoires électriques ne portaient pas spécifiquement sur de la qualification)

Plan de l'exposé

- ▶ **Présentation des essais PICSEL et de l'installation DIVA de l'IRSN**
- ▶ **Présentation de l'outil de simulation Fire Dynamics Simulator (FDS)**
- ▶ **Modélisation et hypothèses**
- ▶ **Comparaison des résultats de la modélisation avec les essais**
- ▶ **Conclusion – Perspectives**
- ▶ **Références**
- ▶ **Annexes**

Essais PICSEL

- ▶ Un programme d'intérêt commun AREVA-IRSN (essais PICSEL [2][3]) a permis de mieux comprendre la phénoménologie des feux d'armoires électriques, portes ouvertes ou fermées, en milieu confiné ou non
- ▶ Les résultats des essais PICSEL réalisés à la station d'essais DIVA de l'IRSN fournissent une base de données expérimentales permettant des comparaisons avec des modélisations numériques
- ▶ La présentation d'aujourd'hui se focalisera sur la modélisation de l'essai PXR3 en milieu confiné ventilé, avec le logiciel FDS 5.5.3

IRSN
INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE



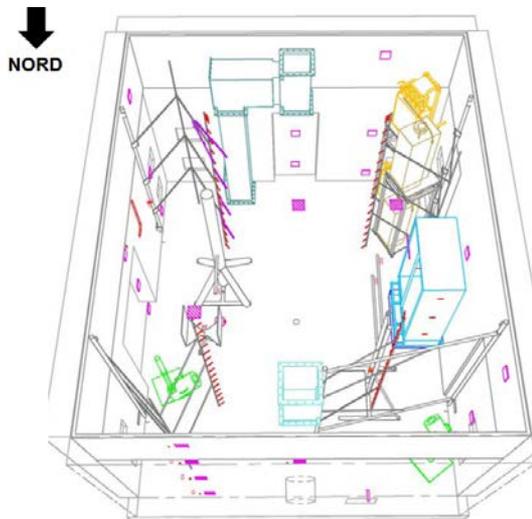
Essais sous hotte

Installation DIVA



IRSN
INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

- ▶ Local de 120 m³ (6 m x 5 m x 4 m)
- ▶ Ventilation : 2 V/h au soufflage – 2,5 V/h à l'extraction
- ▶ Parois partiellement calorifugées
- ▶ 119 thermocouples et 42 fluxmètres positionnés dans le local



Fluxmètre

Armoire électrique type PICSEL

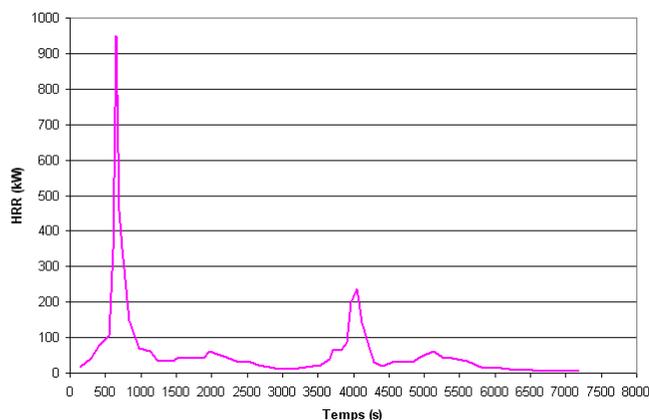
- ▶ Armoire de 1,44 m³ (2 m x 1,2 m x 0,6 m)
- ▶ Remplie d'éléments électriques divers : câbles, boîtiers, contacteurs, etc.
- ▶ Composition en volume :
 - ◆ 31,7% PE vinylacétate
 - ◆ 30,2% PVC
 - ◆ 26% PA
 - ◆ 9,1% PE
 - ◆ 3% autres
- ▶ Chaleur de combustion moyenne du combustible : 27,4 MJ/kg



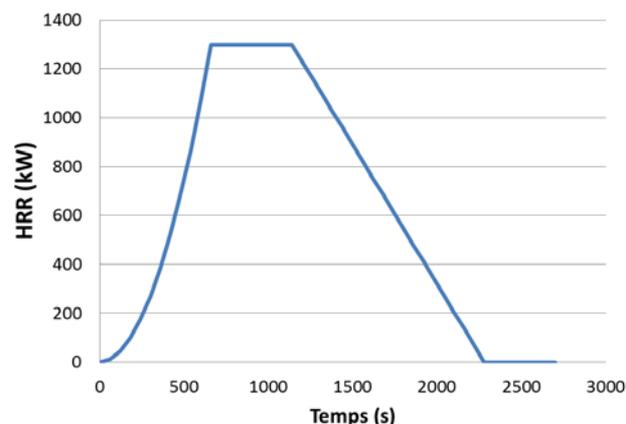
Armoire électrique (vide ici)

Puissance du feu

- ▶ La puissance du feu est mesurée au cours de l'essai par un bilan thermique (~950 kW max). Ce profil est utilisé comme donnée d'entrée pour la modélisation pour reproduire le plus fidèlement possible les mesures expérimentales
- ▶ Pour les études en aveugle (donnée sur la puissance de feu indisponible), AREVA propose de s'appuyer sur le profil NUREG [4] pour un feu d'armoire électrique (phase de croissance quadratique jusqu'à une valeur max de 1 à 1,3 MW, plateau puis décroissance). À ce titre, une simulation est réalisée avec ce profil pour montrer le caractère conservatif de cette approche



Puissance mesurée



Puissance proposée par le NUREG
(avec Pmax = 1,3 MW)

Imbrûlés

- ▶ Les imbrûlés (suies et monoxyde de carbone) ont été partiellement mesurés lors des essais
- ▶ Les modélisations sont réalisées avec les mesures expérimentales lorsqu'elles sont disponibles, ou avec des données de la littérature lorsqu'elles ne sont pas disponibles (ou pour les calculs en aveugle)

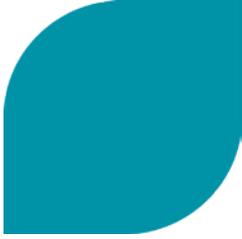
	Suies	CO
PXA 01c	0,18%	0,4%
PXA 3.1	1,49%	13,1%
PXR 2	0,17%	1%
PXR 3	Indisponible	12,8%
PXR 3 bis	Indisponible	11,3%

Mesures données à titre indicatif (conditions pas totalement représentatives)

	Suies	CO
PMMA	2,2%	1%
PE	6%	2,4%
PVC	17,2%	~5-50%

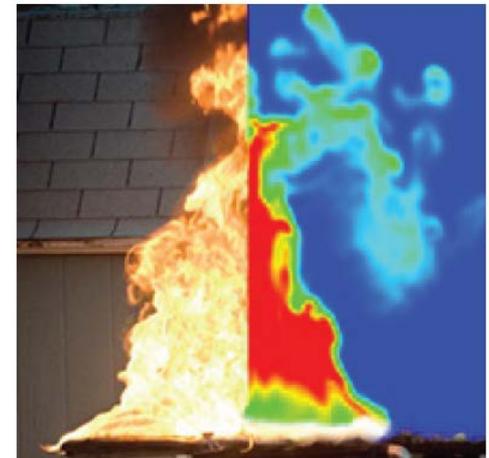
Littérature [5][6][7]

Logiciel Fire Dynamics Simulator (FDS)



- ▶ **FDS : Fire Dynamics Simulator**
- ▶ **Logiciel open source développé par le NIST**
- ▶ **Mécanique des fluides 2D axi et 3D, entièrement dédié à la physique du feu**
- ▶ **Turbulence LES-Smagorinsky**
- ▶ **Limité aux écoulements à faible nombre de Mach**
- ▶ **Modèle de fraction de mélange à combustion instantanée irréversible**
- ▶ **Rayonnement des surfaces et des gaz (notamment des suies)**
- ▶ **Transfert thermique 1D dans les parois**

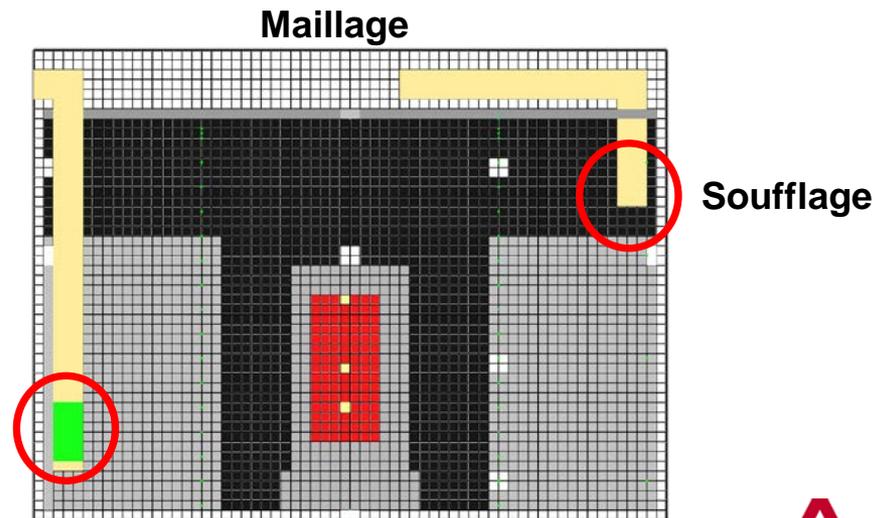
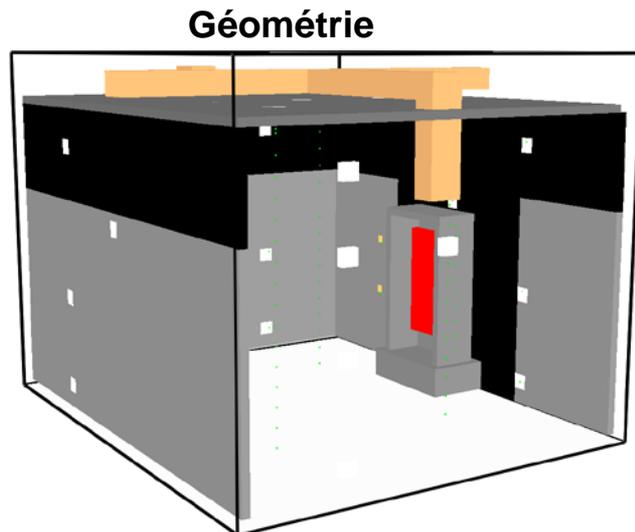
NIST
National Institute of
Standards and Technology



Feu de nappe simulé avec FDS

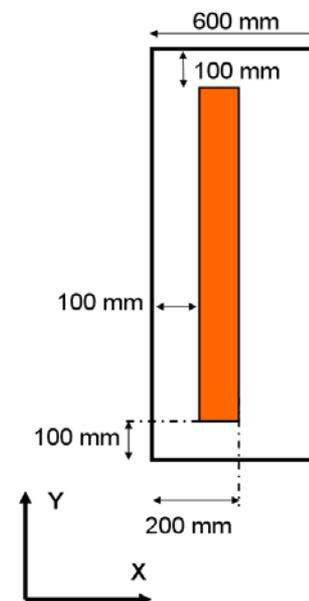
Géométrie et maillage

- ▶ La géométrie est relativement conforme à la réalité (armoires, parois calorifugées, fluxmètres, gaine de ventilation) mais est quelque peu simplifiée (supports thermocouples non représentés notamment)
- ▶ Le maillage est composé de cubes de 10 cm de côté, ce qui correspond à un critère « medium » tel que défini par le NIST et le NUREG [8] pour un feu d'environ 1 MW, ce qui conduit à un maillage de 155 520 mailles
- ▶ Une étude de sensibilité avec des mailles de 5 cm de côté est réalisée (correspondant à un critère « fine » [8])



Principales hypothèses

- ▶ Le combustible est représenté par une plaque statique positionnée dans l'armoire, dont les propriétés sont celles du PMMA
- ▶ La puissance du feu est imposée (*via* un débit de produits de pyrolyse) et non calculée
- ▶ Les produits combustibles de pyrolyse sont injectés de manière homogène en face avant de la plaque de combustible
- ▶ Composition en volume simplifiée supposée :
 - ◆ 50% PVC
 - ◆ 25% PMMA
 - ◆ 25% PE
- ▶ Soit une composition chimique moyenne de : $\text{CH}_{1,65}\text{O}_{0,1}$
- ▶ Fraction radiative : 35% (valeur par défaut dans FDS)

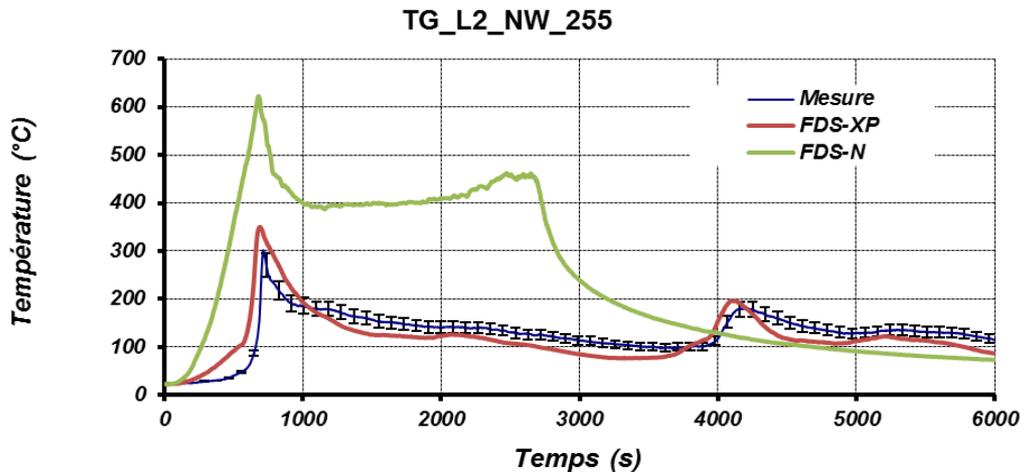


Plaque de combustible
(vue de haut)

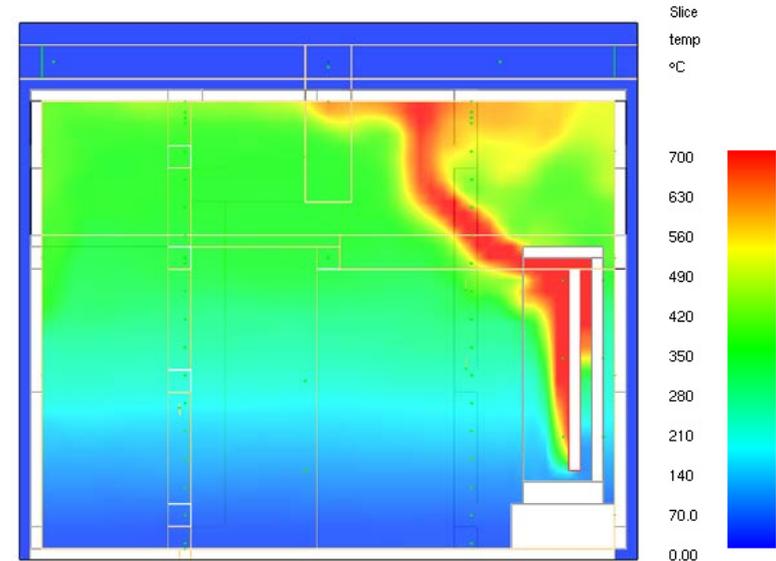
Résultats – Températures de gaz

► De manière générale, la modélisation FDS :

- ◆ reproduit plutôt bien les mesures avec le profil de puissance expérimental
- ◆ permet de produire des résultats conservatifs avec le profil de puissance NUREG

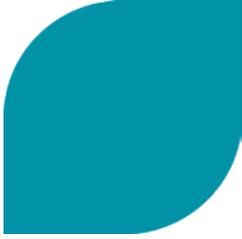


Thermocouple dans le gaz à 2,55 m du sol
(exemple de bonne reproduction des mesures)



Champ de température de gaz

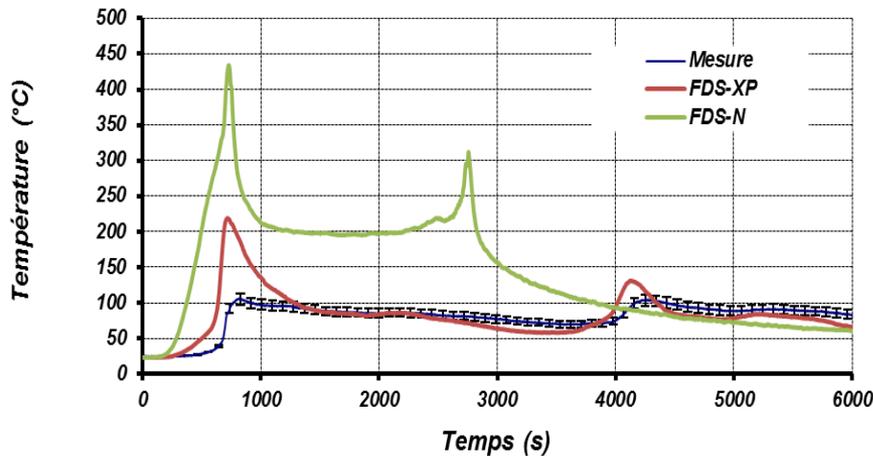
Résultats – Températures de gaz



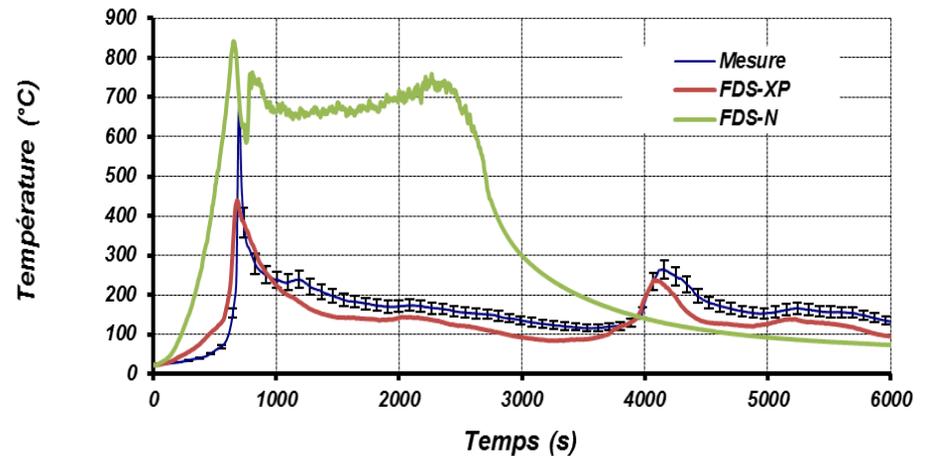
► Il existe cependant des cas où la modélisation FDS :

- ◆ sous-estime ou surestime assez fortement les mesures avec le profil de puissance expérimental
- ◆ mais permet néanmoins toujours de produire des résultats conservatifs avec le profil de puissance NUREG

TG_L2_NW_105



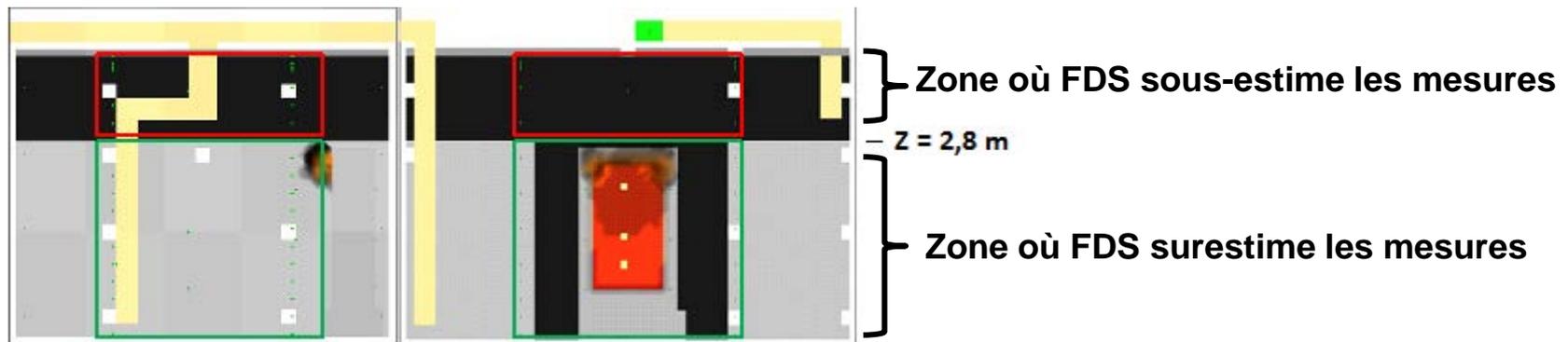
TG_L2_NW_385



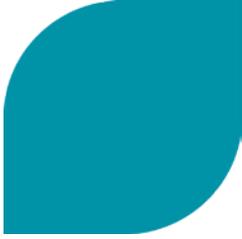
Thermocouples dans les gaz à 1,05 et 3,85 m du sol
(exemples de surestimation et de sous-estimation des mesures)

Résultats – Températures de gaz

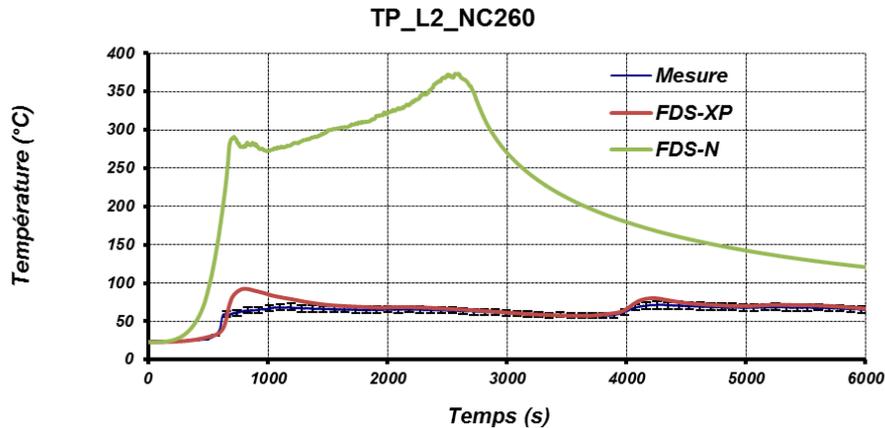
- ▶ Il semble y avoir une forte corrélation entre le comportement de FDS par rapport aux mesures et la présence de calorifuge en parois
- ▶ Ce comportement n'est pas expliqué mais pourrait être dû :
 - ◆ à une sous-estimation de la qualité de l'isolation apportée par le calorifuge
 - ◆ un trop fort « écrantage » par les suies



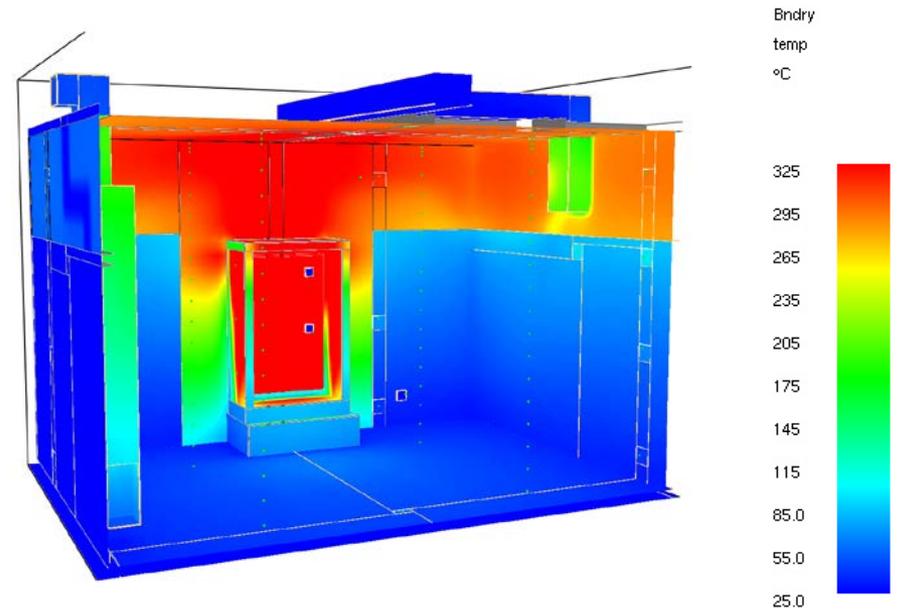
Résultats – Températures de parois



- ▶ Le même comportement que pour les températures des gaz est observé : relativement bonne représentativité de FDS avec le profil de puissance expérimental et résultats conservatifs avec le profil NUREG



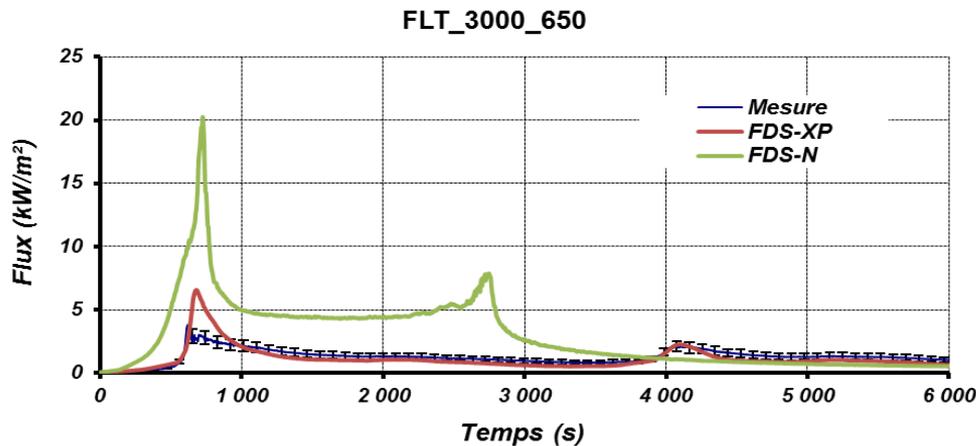
Thermocouple en paroi à 2,6 m du sol
(exemple de bonne reproduction des mesures)



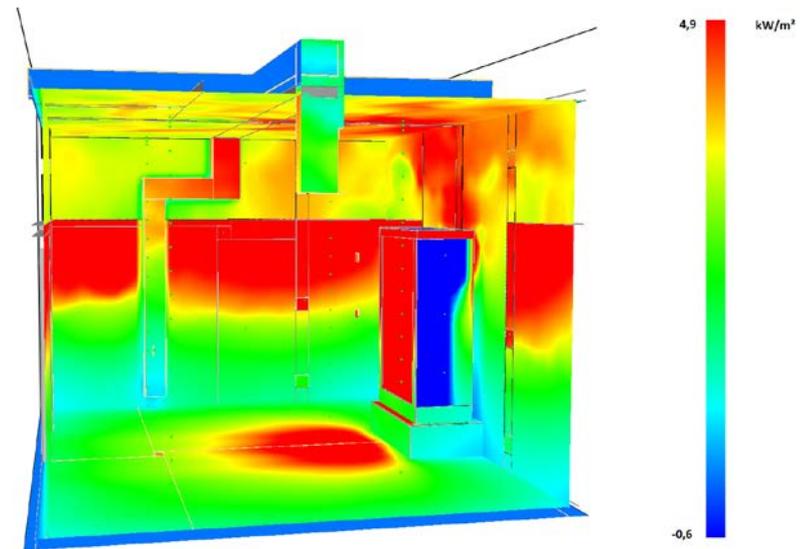
Champ de température en parois

Résultats – Flux

- ▶ Le même comportement est une nouvelle fois observé : relativement bonne représentativité de FDS avec le profil de puissance expérimental et résultats conservatifs avec le profil NUREG



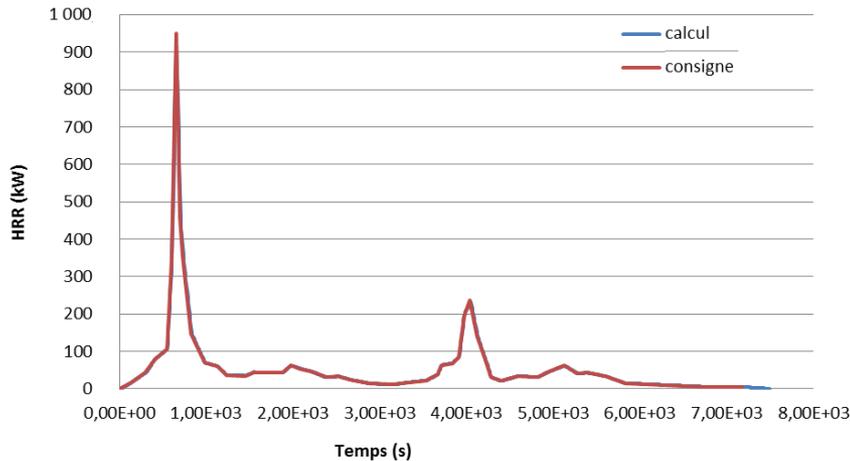
Flux total à 3 m face au foyer et 65 cm du sol



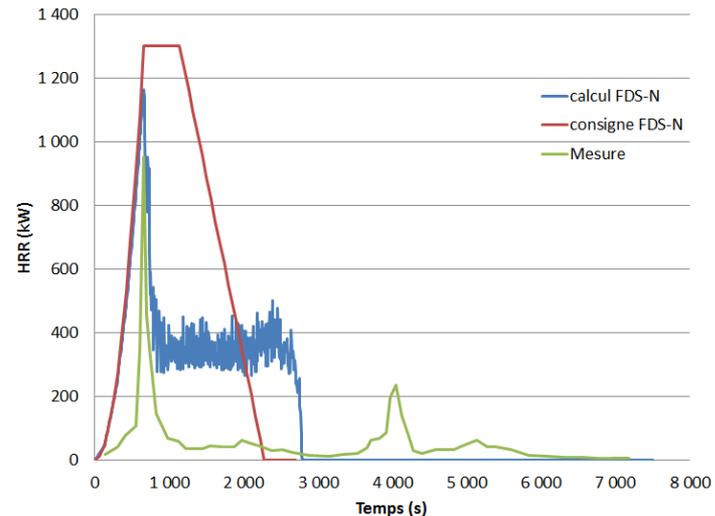
Flux net en parois

Résultats – Puissance

- ▶ Avec le terme source expérimental, il n'y a pas d'écart en puissance entre le calcul et la consigne
- ▶ Avec le terme source NUREG en revanche, l'oxyprivation est très forte, ce qui fait qu'en pratique seule une faible partie de la puissance est dissipée, avec des déplacements de flamme vers le soufflage



Avec terme source expérimental



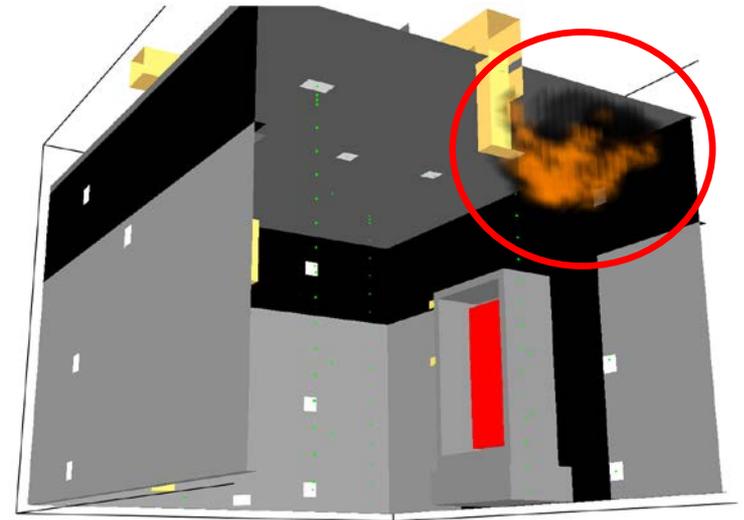
Avec terme source NUREG

Résultats – Déplacements de flamme

- ▶ Avec le terme source NUREG, tant qu'il y a de l'oxygène résiduel dans le local, la flamme reste bien localisée au niveau foyer, mais lorsqu'il n'y a plus assez d'oxygène, la flamme se déplace au niveau du soufflage
- ▶ Ce comportement est possible (« ghost flame ») mais semble ici exacerbé



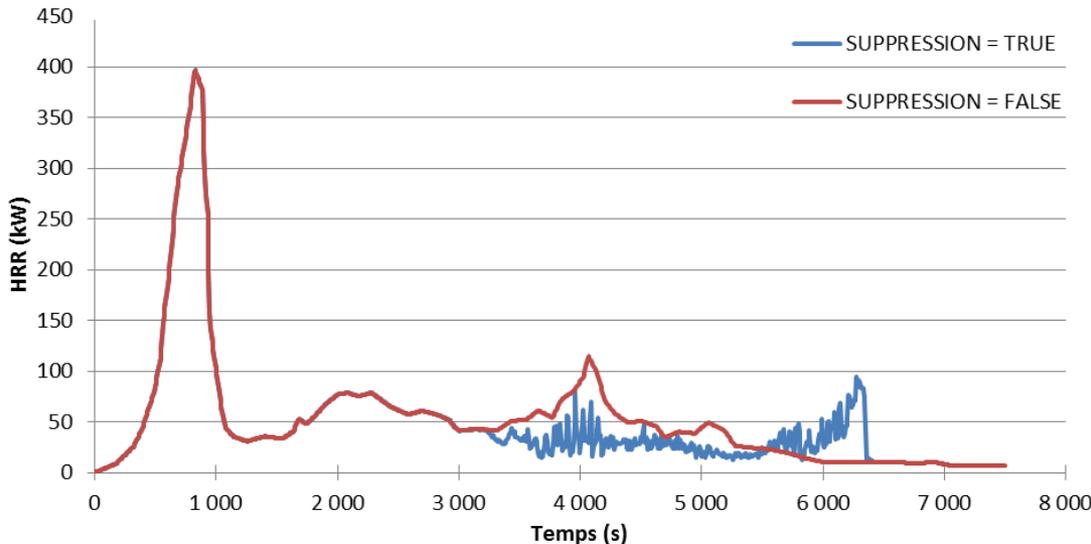
Oxygène suffisant dans le local



Oxygène insuffisant dans le local

Résultats – Déplacements de flamme

- ▶ Il est possible de limiter voire de supprimer les déplacements de flamme et de respecter le profil de puissance imposé en mettant l'algorithme **SUPPRESSION** en **FALSE**. Ici un exemple avec le terme source expérimental d'un autre essai (PXR 2) :

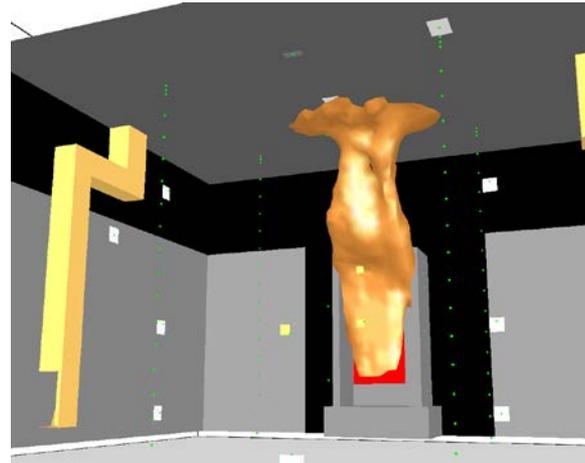


- ▶ Lorsque l'oxyprivation est trop forte, **SUPPRESSION=FALSE** ne suffit plus à empêcher les déplacements de flamme

Résultats – Flamme

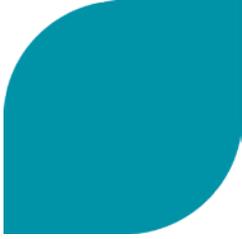
- ▶ Il est possible de « fitter » les extrémités de la flamme réelle raisonnablement bien avec une iso-surface à 460° C
- ▶ Cette valeur semble un peu faible, même si Babrauskas [9] indique des températures d'extrémité de flamme en milieu ouvert comprises entre 320 et 400° C (mais en milieu confiné comme ici, où la flamme « voit » des parois environnantes chaudes, la température d'extrémité de flamme pourrait être plus élevée)
- ▶ Le calcul de sensibilité avec des mailles de 5 cm au lieu de 10 cm ne produit pas de résultats très différents

Flamme réelle

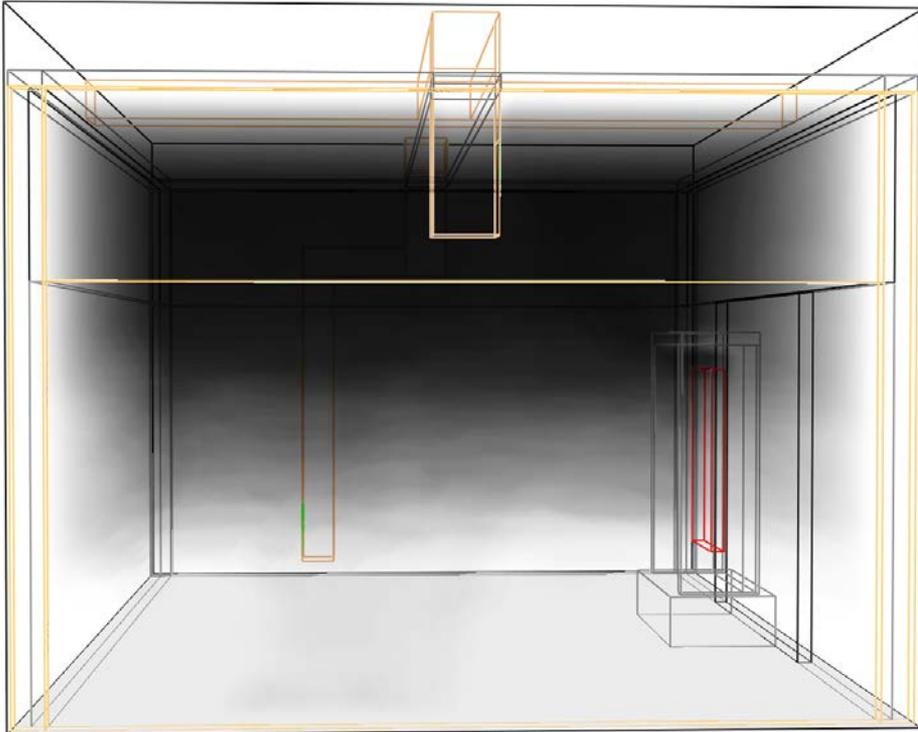


Isosurface à 460° C dans FDS

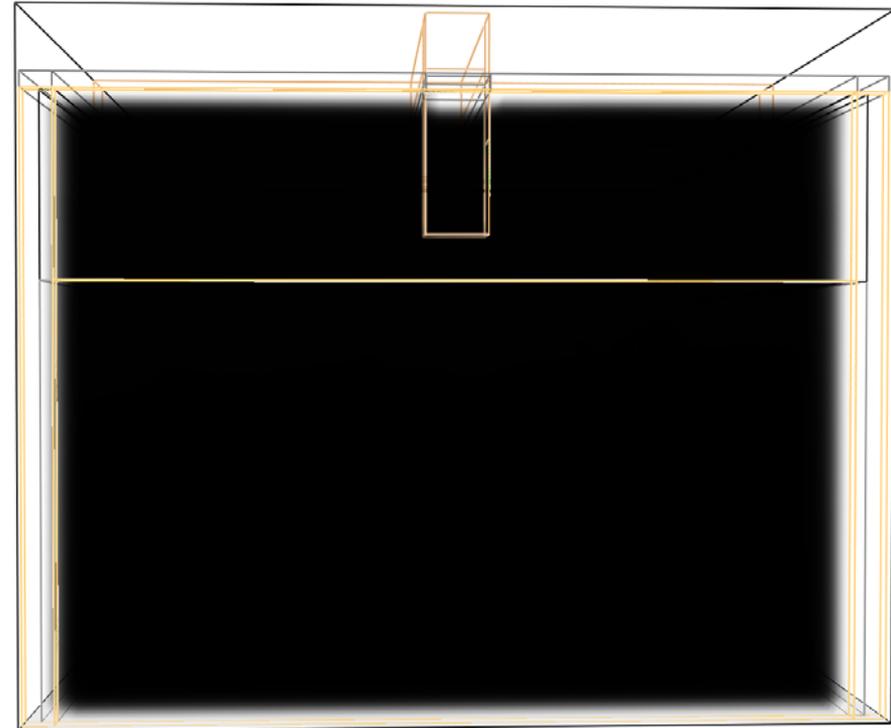
Résultats – Suies



- Aveuglement total de la caméra en accord avec la modélisation



Fumées quelques minutes après le début de l'incendie

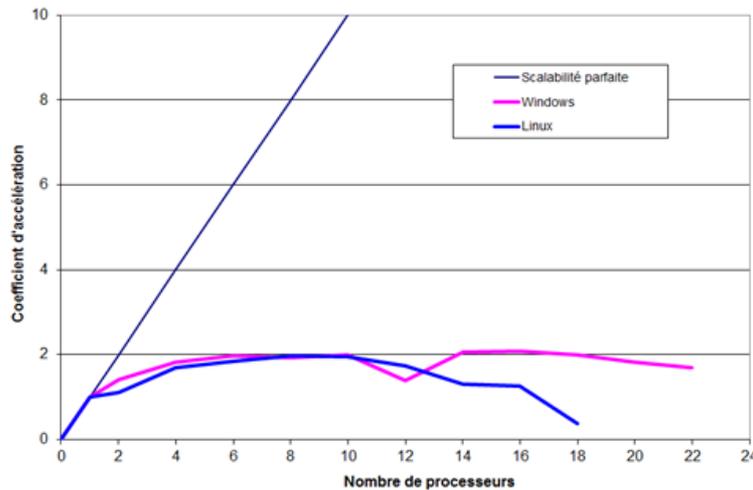


Fumées 30 minutes après le début de l'incendie

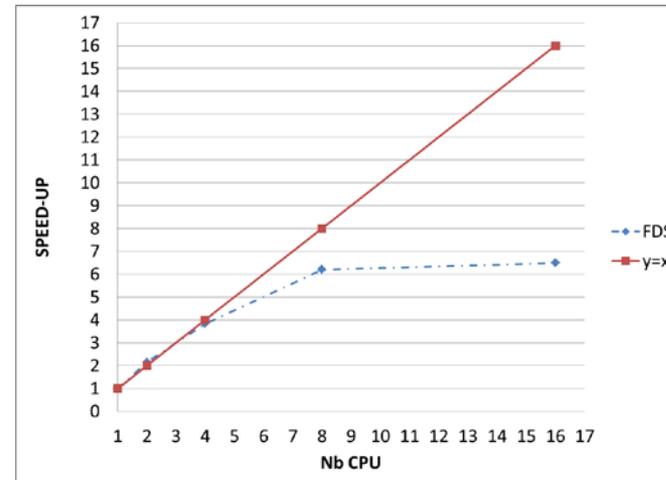
Résultats – Temps de calcul

- ▶ Le temps de calcul pour simuler les 37,5 min du profil de puissance NUREG en monoprocesseur sur Intel Xeon 5675@3,07 GHz est de 33,8h, soit un ratio assez « classique » sur nos modélisations de $\sim 3,4 \cdot 10^{-4}$ seconde de calcul par seconde physique et par maille
- ▶ En parallèle, les performances sont :
 - ◆ catastrophiques sur FDS 6 avec OpenMP
 - ◆ correctes sur FDS 5.5.3 avec MPI jusqu'à 8 CPU

OpenMP



MPI



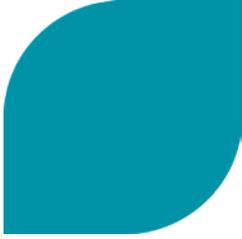
Conclusion

- ▶ **En conclusion, le logiciel FDS 5.5.3 apparaît capable, pour un feu d'armoire électrique en local ventilé, de :**
 - ◆ **bien reproduire les mesures de flux et de températures lorsque le profil de puissance est connu**
 - ◆ **fournir des résultats conservatifs en aveugle avec le terme source NUREG**

- ▶ **Trois points restent potentiellement problématiques et mériteraient des investigations complémentaires :**
 - ◆ **la température de flamme qui semble sous-estimée avec le profil de puissance réelle**
 - ◆ **la température de gaz en partie haute du local parfois sous-estimée avec le profil de puissance réelle**
 - ◆ **les déplacements de flamme quelque peu « intempestifs » au niveau du soufflage en cas de forte oxyprivation**

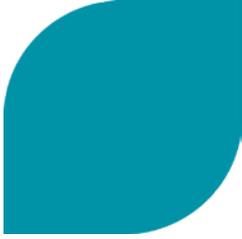
Références

- ▶ [1] NUREG 2178 – EPRI 3002005578
Refining And Characterizing Heat Release Rates From Electrical Enclosures During Fire (RACHELLE-FIRE)
- ▶ [2] M. Coutin *et al.*, *Energy balance in a confined fire compartment to assess the heat release rate of an electrical cabinet fire*, Fire Safety Journal, vol. 52, 2012
- ▶ [3] M. Coutin *et al.*, *Characterisation of open-door electrical cabinet fires in compartments*, Nuclear Engineering and Design, vol. 286, 2015
- ▶ [4] NUREG 6850 – EPRI 1011989
Final Report Fire PRA Methodology for Nuclear Power Facilities – Volume 2: Detailed Methodology
- ▶ [5] J. G. Quintiere, *Fundamentals of Fire Phenomena*, Wiley, 2006
- ▶ [6] É. Guillaume, *Effets du feu sur les personnes – Synthèse bibliographique*, LNE, 2006
- ▶ [7] C. A. Wilkie, A. B. Morgan, *Fire Retardancy of Polymeric Materials*, CRC Press, 2010
- ▶ [8] NUREG 1824 – EPRI 1011999
Final Report Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications – Volume 7: Fire Dynamics Simulator (FDS)
- ▶ [9] V. Babrauskas, *Temperatures in flames and fires*, Fire & Science Technology, 2006



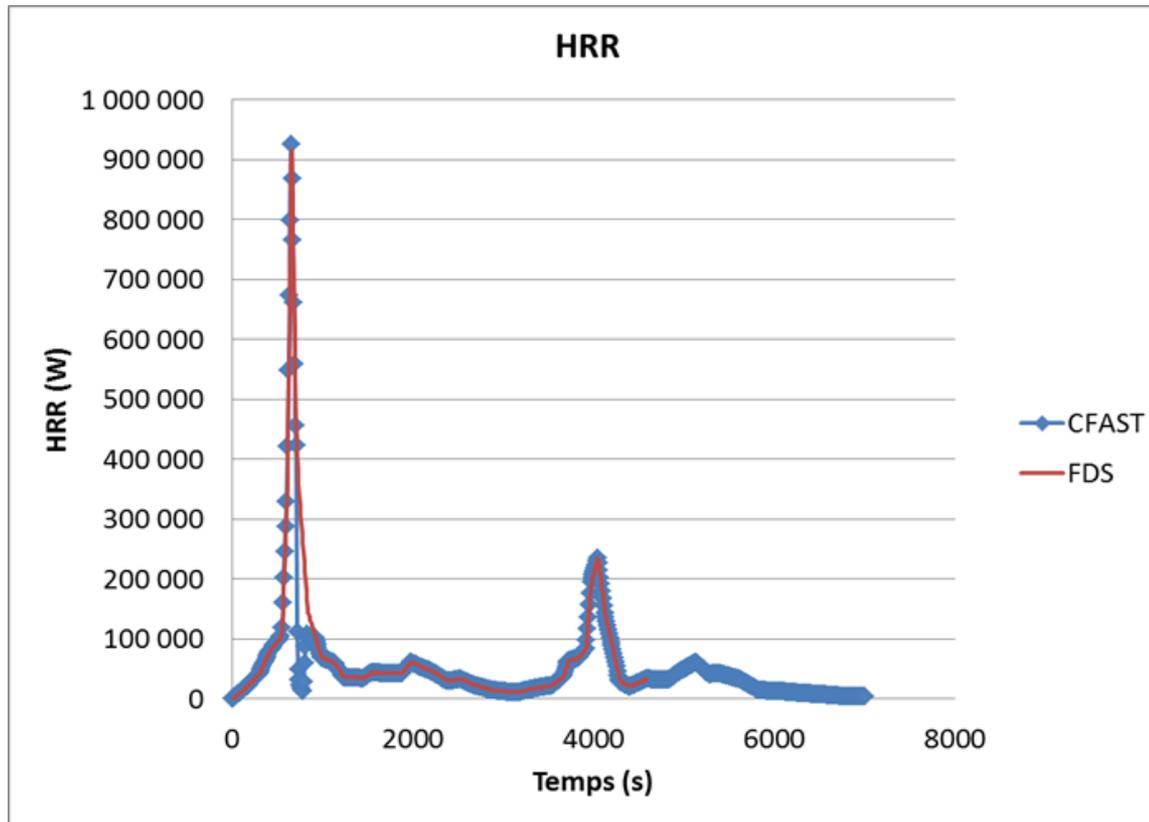
Des questions?



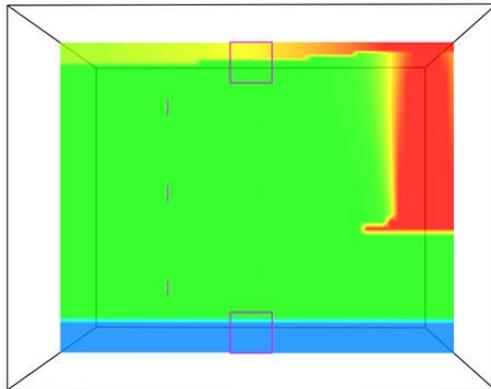
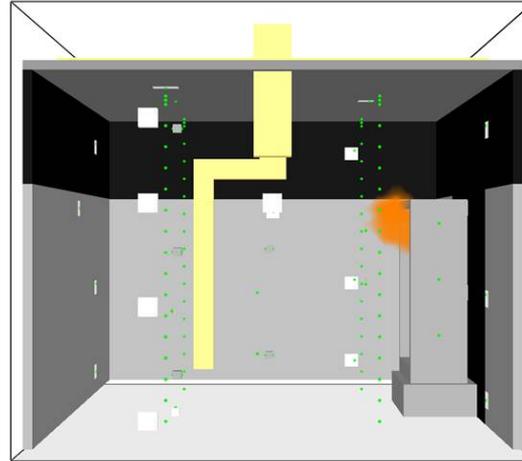
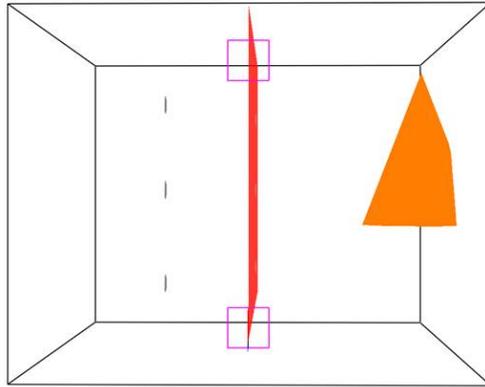
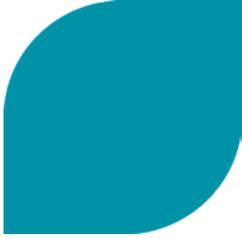


BACK-UP

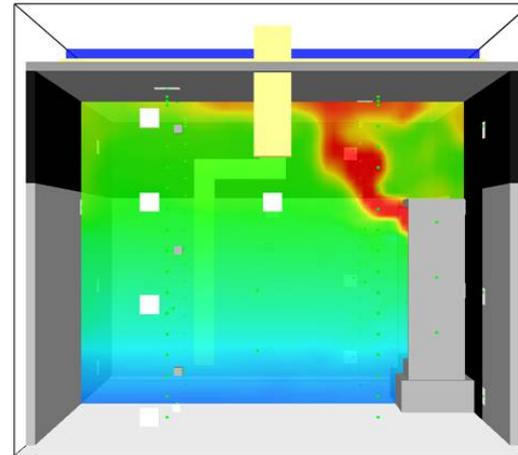
CFAST-FDS



CFAST-FDS FLAMME ET TEMPÉRATURE GAZ

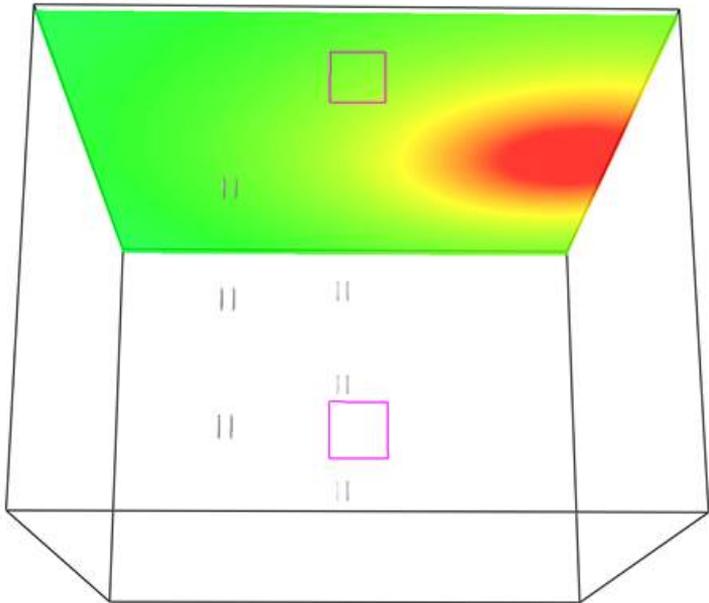
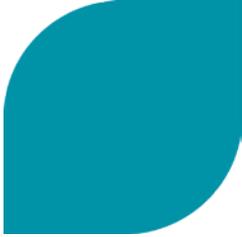


CFAST

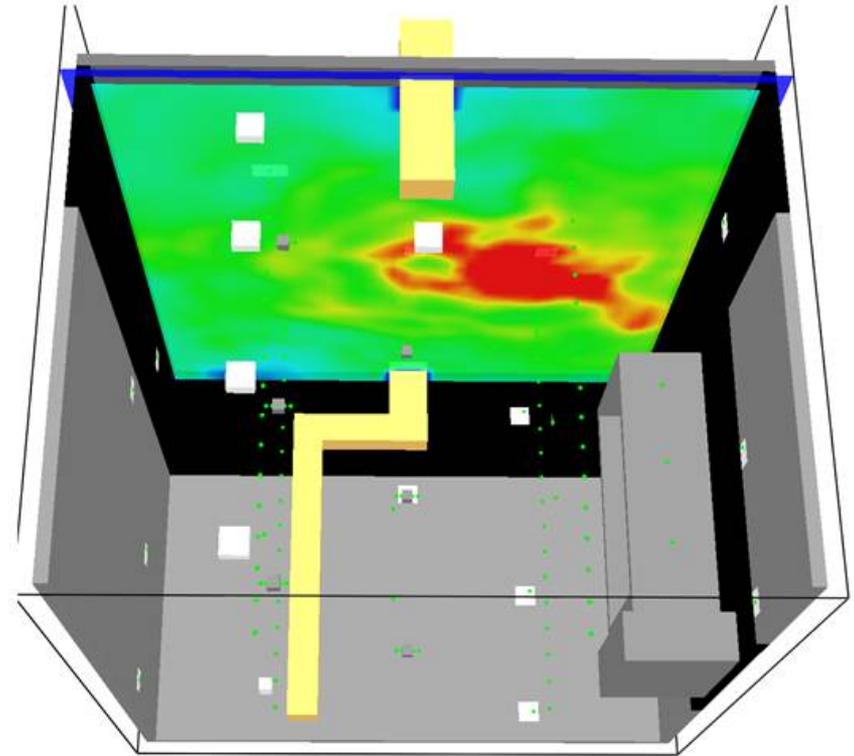


FDS

CFAST-FDS TEMPÉRATURE GAZ SOUS PLAFOND

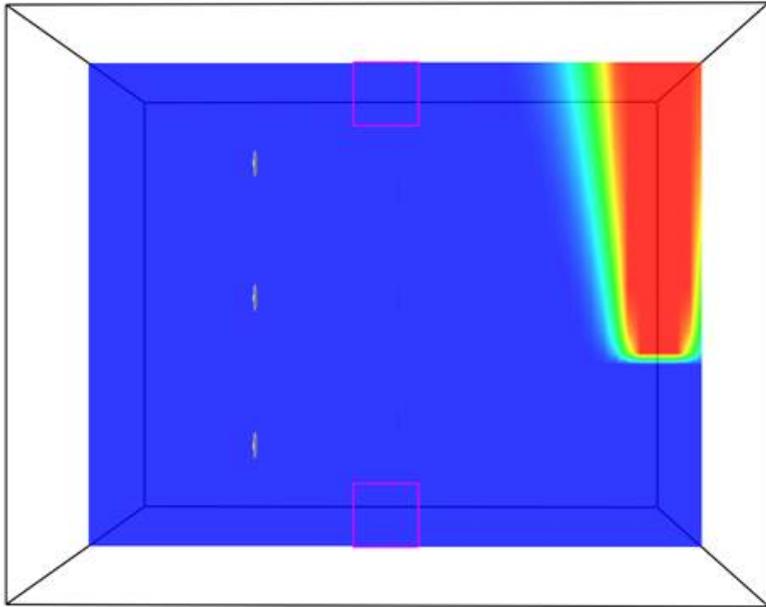
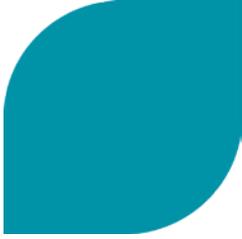


CFAST

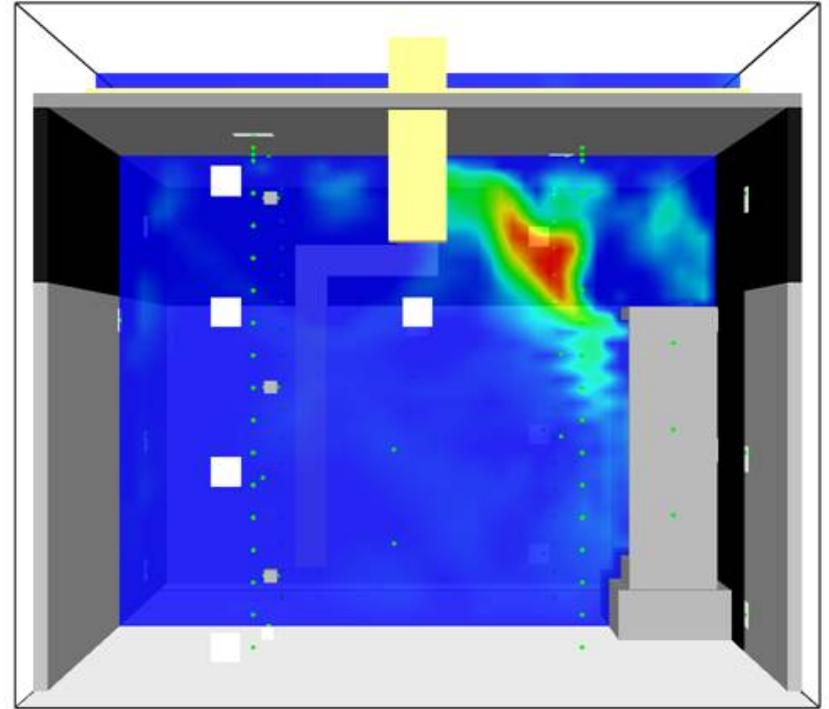


FDS

CFAST-FDS VITESSES ASCENDANTES



CFAST



FDS

CFAST-FDS TEMPÉRATURES CIBLES MÉTALLIQUES

