



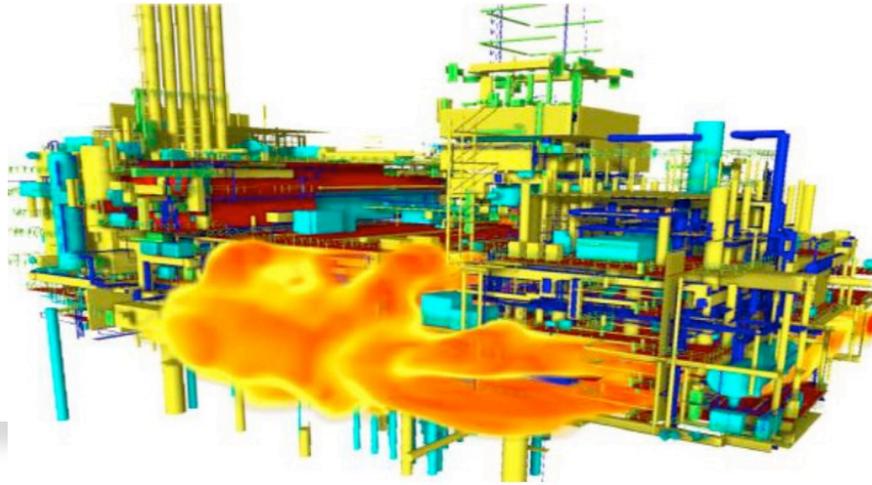
Modélisation de la propagation de flammes partiellement confinées

Sergey KOUDRIAKOV
Olivier VERMOREL

CEA/Saclay, DES/DM2S/STMF
CERFACS CFD Team



Objectifs



Accident : rejet de gaz inflammables

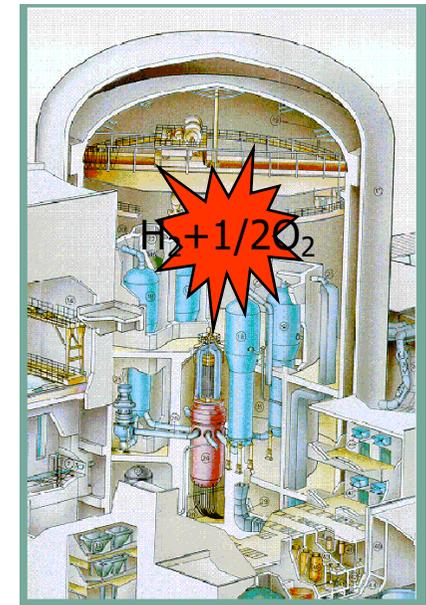
Formation d'un mélange potentiellement explosif GAZ_INFL + Air

sources d'inflammation

Propagation de flamme:
(déflagration rapide ou détonation)

Il faut estimer les conséquences d'une explosion !!!

Charges en pression → attention à l'intégrité des équipements





Contexte

- La propagation et l'accélération d'une flamme dans un environnement confiné ou semi-confiné avec obstacles est l'ingrédient central d'un scénario d'explosion en milieu industriel
- La surpression générée lors de l'explosion est directement liée au **dégagement de chaleur** généré par la flamme:

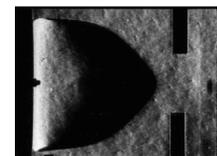
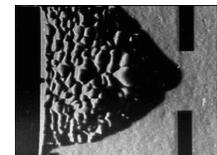
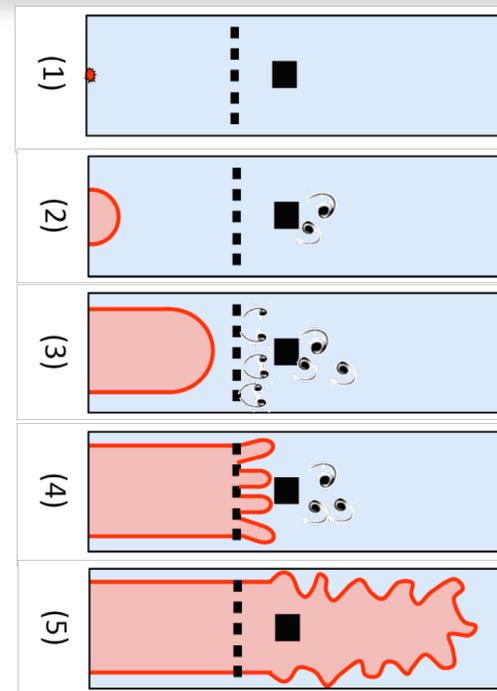
$$\frac{D}{Dt} \left(\frac{1}{\gamma-1} P \right) V_{chambre} = \dot{\omega} V_{chambre} - \underbrace{(\rho C_p T U_n) S_{sortie}}_{= 0 \text{ si chambre confinée}}$$

Phénoménologie: accélération de flamme en milieu confiné avec obstacles

1. Allumage
2. Propagation laminaire (hémi)sphérique
3. Propagation laminaire "finger flame" ou quasi-laminaire plissée (instabilités)
4. Interaction flamme/obstacle/turbulence
5. Propagation turbulente

Pour les flammes suffisamment rapides:

- Création d'ondes de choc
- Transition à la détonation



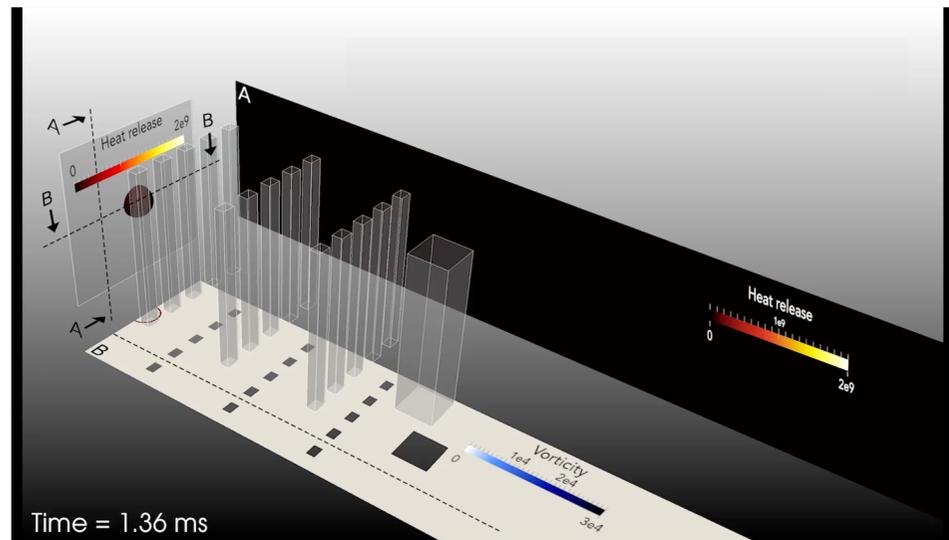
[Ciccarelli 2008]

Phénoménologie: accélération de flamme en milieu confiné avec obstacles

1. Allumage
2. Propagation laminaire (hémi)sphérique
3. Propagation laminaire "finger flame" ou quasi-laminaire plissée (instabilités)
4. Interaction flamme/obstacle/turbulence
5. Propagation turbulente

Pour les flammes suffisamment rapides:

- Création d'ondes de choc
- Transition à la détonation



Expérimentation choisie 1: canal confiné avec obstacles



- $W \times H \times L = 7.6 \text{ cm} \times 7.6 \text{ cm} \times 2.44 \text{ m}$
- $BR = 0.33$
- stœchiométrique CH_4/air (9.5 % CH_4)
- $P_0 = 47 \text{ kPa}$

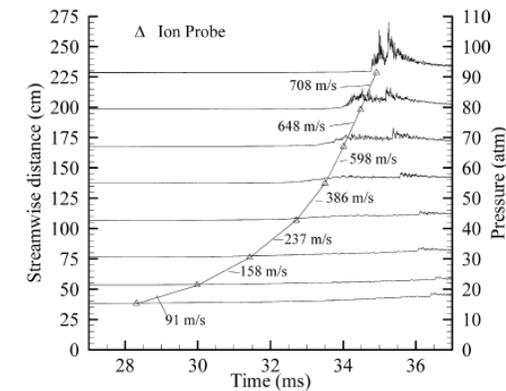
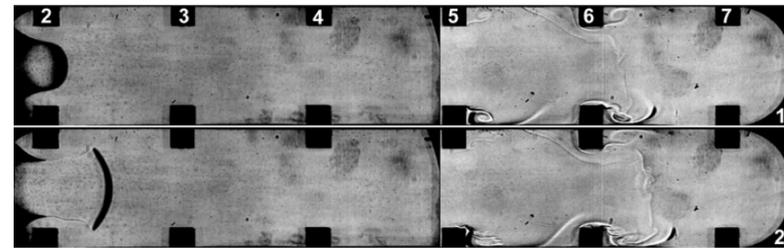
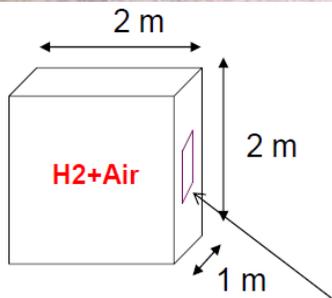


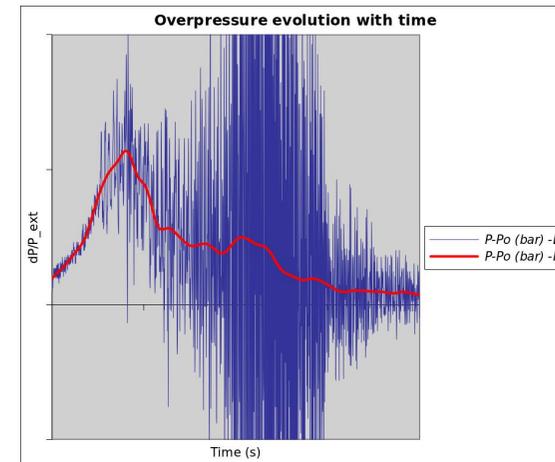
Fig. 4. Pressure traces and flame time-of-arrival corresponding to sensors positioned down the entire length of the channel. Average flame velocities shown are based on time-of-arrival ($BR = 0.33$, ignition position A).



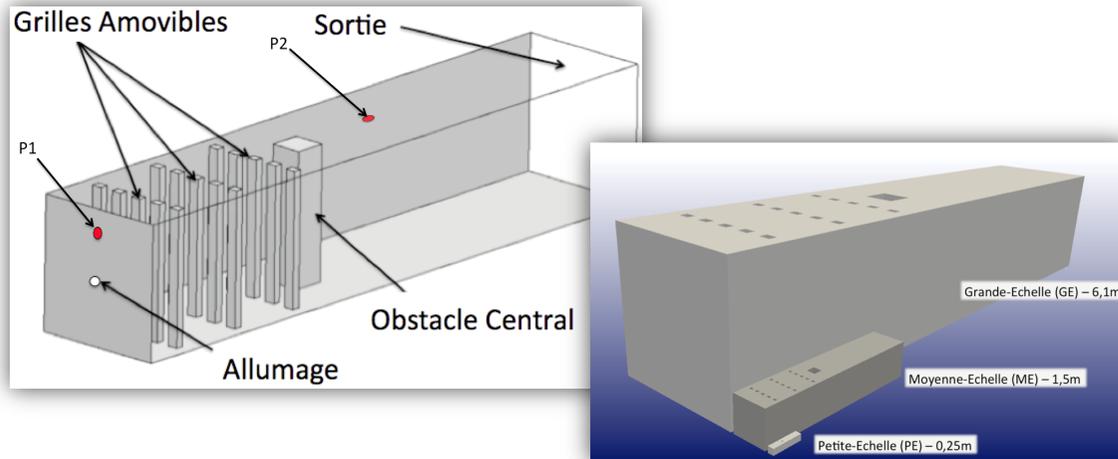
Expérimentation choisie 2: boite munie d'un événement



- $X_{H_2} = 16.5 \%$
- $P_0 = P_{atm}$
- $T_0 = T_{atm}$



Expérimentation choisie 3: canal semi-confiné avec obstacles



- **Une configuration, trois échelles:**
 - Petite échelle: $W \times H \times L = 5 \times 5 \times 25 \text{ cm}^3$
 - Moyenne échelle: petite échelle x 6
 - Grande échelle: petite échelle x 24

- Mélange $\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$ ($\phi=1.0$), $P \text{ atm}$, $T \text{ atm}$
- $BR = 0.4$ (grilles) & 0.24 (obstacle central)



Conditions de la modélisation



- Méthodologie :
 - *Résultats connus à l'avance*
- Points de comparaison avec les résultats expérimentaux :
 - *Surpression en différents points du canal*
 - *Vitesse du front de flamme*

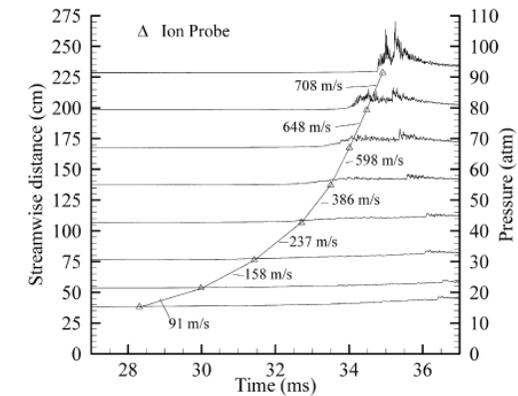
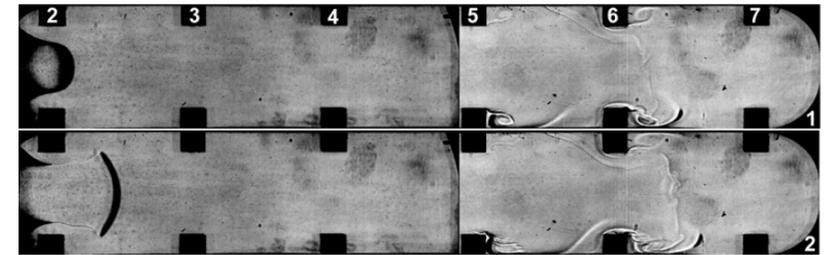


Fig. 4. Pressure traces and flame time-of-arrival corresponding to sensors positioned down the entire length of the channel. Average flame velocities shown are based on time-of-arrival (BR = 0.33, ignition position A).



Visualisation de la propagation de flamme et du gaz non-brulé



Modélisateurs

- Types d'entités représentées : industriel, organisme étatique, centre de recherche privé
- IRSN, CERFACS, TOTAL, EDF, CEA
- CALIF3S-P²REMICS, AVBP, FLACS, EUROPLEXUS

Logiciel	P ² REMICS	AVBP	FLACS	EUROPLEXUS
Bureaux d'études				
Editeurs				
Industriels			TOTAL	EDF
Centre de recherche privé		CERFACS		
Organisme étatique	IRSN			CEA

Stratégies de modélisation (logiciels)

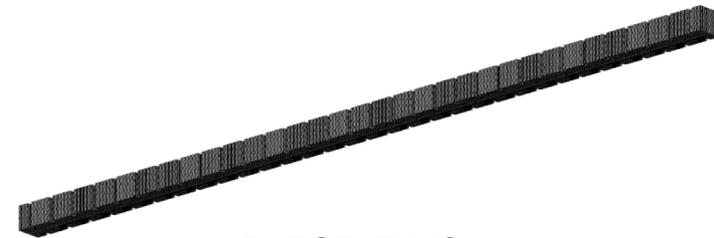
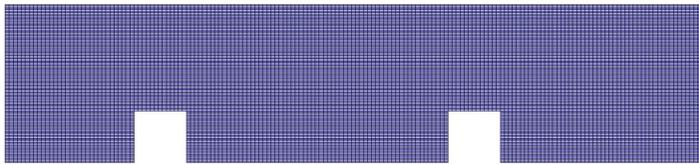
Code	Modèle de turbulence	Equations résolues	Modélisation de la combustion	Schémas numériques	Modélisation des obstacles
P²REMICS	Formalisme RANS : modèle k-omega	Navier-Stokes	G- equation + corrélation St (Bray)	Schéma VF avec correction de pression	Obstacles résolus explicitement par le maillage
AVBP	Formalisme LES : modèle WALE	Navier-Stokes	Modèle de flamme épaissie TFLES + fonction d'efficacité	Schéma VF 2ème ordre en temps et espace	Obstacles résolus explicitement par le maillage
FLACS	Formalisme RANS : modèle k-ε	Navier-Stokes	Modèle de flamme β (flamme épaissie) + corrélation St (Bray)	Schéma VF pondéré Upwind et centré 2 nd ordre	Obstacles non résolus, modèle de porosité
EUROPLEXUS	Modèles algébriques	EULER	Modèle RDEM + corrélation St (Bray)	Schéma VF Upwind 2 nd ordre	Obstacles résolus explicitement par le maillage

Stratégies de modélisation (utilisateur)

Code	Maillage	Conditions limites	Conditions initiales
P²REMICS	2-D structuré non-uniforme N=765 000 $\Delta x_{\min} = 0.2\text{mm}$ $\Delta x_{\max} = 1.6\text{ mm}$	Fonctions de paroi standard	Ecoulement au repos Allumage par volume de gaz brûlés
AVBP	3-D non-structuré N= 14.5 Mcells $\Delta x_{\min} = 0.35\text{mm}$ $\Delta x_{\max} = 2.0\text{ mm}$	Loi de paroi isotherme	Ecoulement au repos Allumage par volume de gaz brûlés
FLACS	3-D structuré N= 500 $\Delta x = 2\text{cm}$	Fonctions de paroi standard	Ecoulement au repos Allumage par volume de gaz brûlés
EUROPLEXUS	CEA: 3-D structuré N = 381000; $\Delta x = 3.27\text{ mm}$ EDF: 3-D structuré N = 43000; $\Delta x = 6.75\text{ mm}$	Loi de paroi adiabatique	Ecoulement au repos Allumage par volume de gaz brûlés

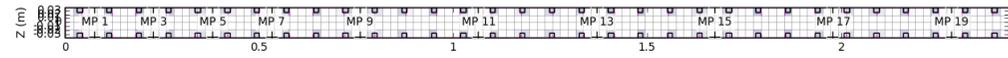
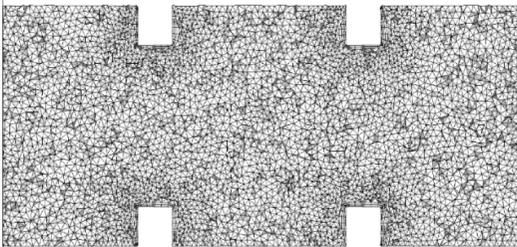
Stratégies de modélisation (utilisateur)

P²REMICS
(IRSN)



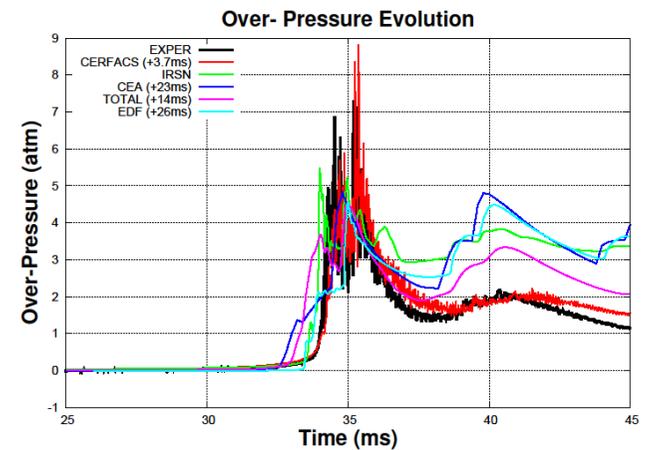
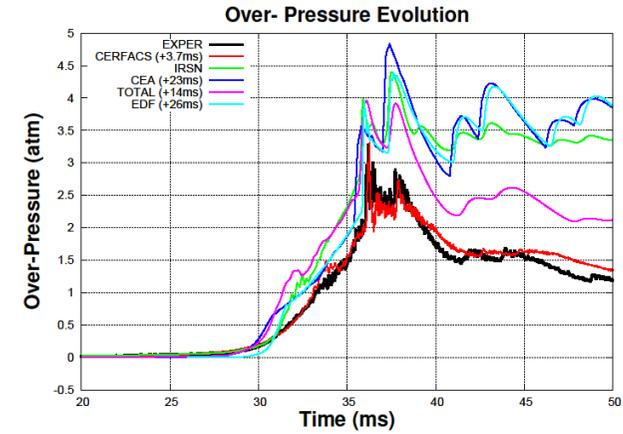
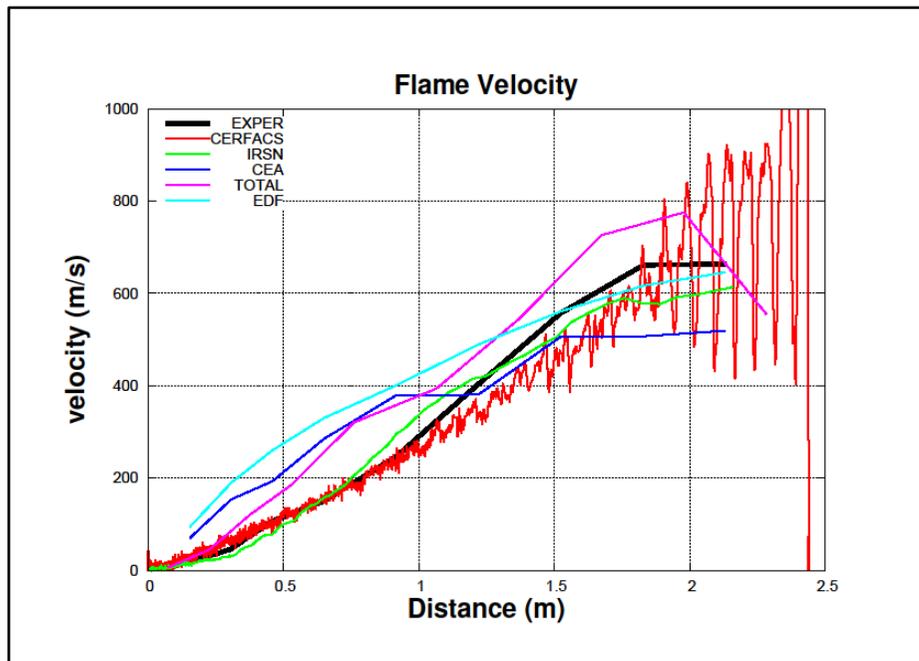
EUROPLEXUS
(EDF, CEA)

AVBP
(CERFACS)

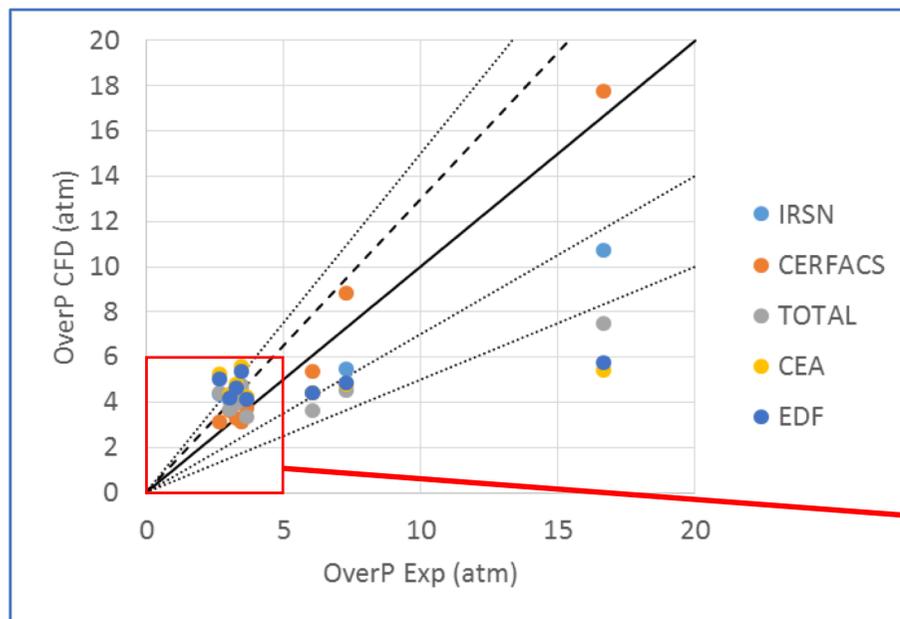


FLACS
(TOTAL)

Exemples de résultats

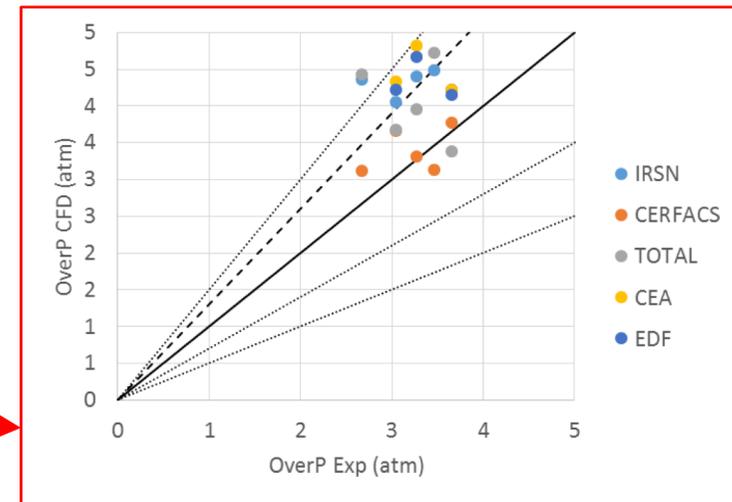


Exemples de résultats

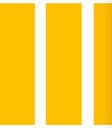


Pour la plupart des participants, les niveaux de pression sont:

- **surestimés** pendant la phase initiale de développement de la flamme,
- **sous-estimés** durant la phase ultérieure de propagation de la flamme



Pression maximale calculée vs pression expérimentale mesurée sur 6 capteurs le long du canal



Conclusions, enseignements et perspectives

- *Bonne prédiction globale de la surpression par tous les codes*
 - *Mais... la physique sous-jacente n'est pas forcément toujours bien reproduite!*
 - *Topologie de flamme*
 - *Transition entre régimes de propagation*
 - *→ nécessité d'expériences bien contrôlées (conditions initiales, conditions limites, ...) et de diagnostics plus poussés qu'une simple courbe de pression pour évaluer plus précisément les capacités prédictives des codes*
 - *Difficulté de la montée en échelle du problème: besoin de modèles plus dynamiques dans leur conception*
 - *La LES apporte une plus-value notable par rapport au RANS, notamment vis-à-vis de la description de l'interaction flamme/turbulence. Ceci cependant au prix d'un coût de calcul fortement augmenté*
 - *Bonne robustesse aux choix de modélisation de l'utilisateur, hors choix du maillage (faible convergence en maillage observée)*
-