

Cas n°8 : BARPPRO (BARrière Physique de PROtection face à une détonation gazeuse)

Elena Vyazmina, Air Liquide

Sophie Trélat, IRSN



Objectifs

- Objectifs :
 - Interaction d'une onde de choc avec un obstacle de géométrie complexe (forme trapézoïdale, mur type merlon)
 - Comparer les niveaux de surpression maximale en champ libre, sur l'obstacle et en aval de l'obstacle obtenus par l'expérience avec les résultats numériques
 - Définir des « bonnes pratiques » pour les applications industrielles
- Méthodologie
 - Choix de ne pas modéliser la réaction chimique de combustion
 - Reproduire la détonation gazeuse en la représentant par un réservoir d'air chaud comprimé
 - Reproduire l'interaction de l'onde de souffle avec l'obstacle considéré comme infiniment rigide

“ Expérimentations et simulations numériques ne peuvent exister séparément ”

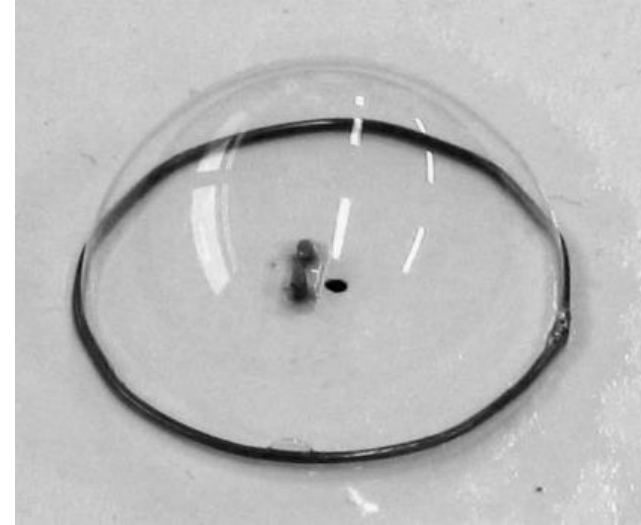
Phénoménologie

- Contexte : pourquoi modéliser ce phénomène ? Les ondes de souffle, qu'elles soient consécutives à une forte explosion ou toute autre source de pression, sont susceptibles de porter atteinte à l'intégrité des infrastructures qu'elles rencontrent lors de leur propagation quelque soit le contexte, industriel ou nucléaire
- Phénoménologie : propagation d'une onde de surpression aérienne en champ libre puis phénomènes de contournement d'une structure (réflexion, diffraction d'onde au franchissement de l'obstacle)
- Expérience modélisée à échelle de laboratoire



Expérimentation choisie

- Origine des données :
 - Extraites de la thèse de Sébastien Eveillard (2010-2013), projet ANR BARPPRO
- Charge hémisphérique de propane-oxygène stoechiométrique (rayon = 6 cm)
- Régime de détonation : initiation du choc par “fil explosé”
- Géométrie
 - Merlon trapézoïdal de 60 x 80 cm en bois
 - Maquette considérée comme indéformable

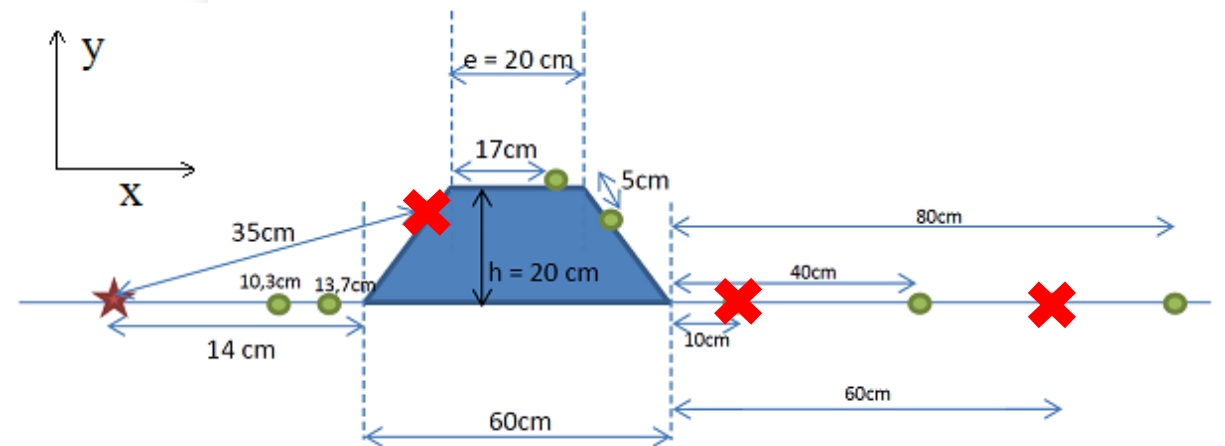
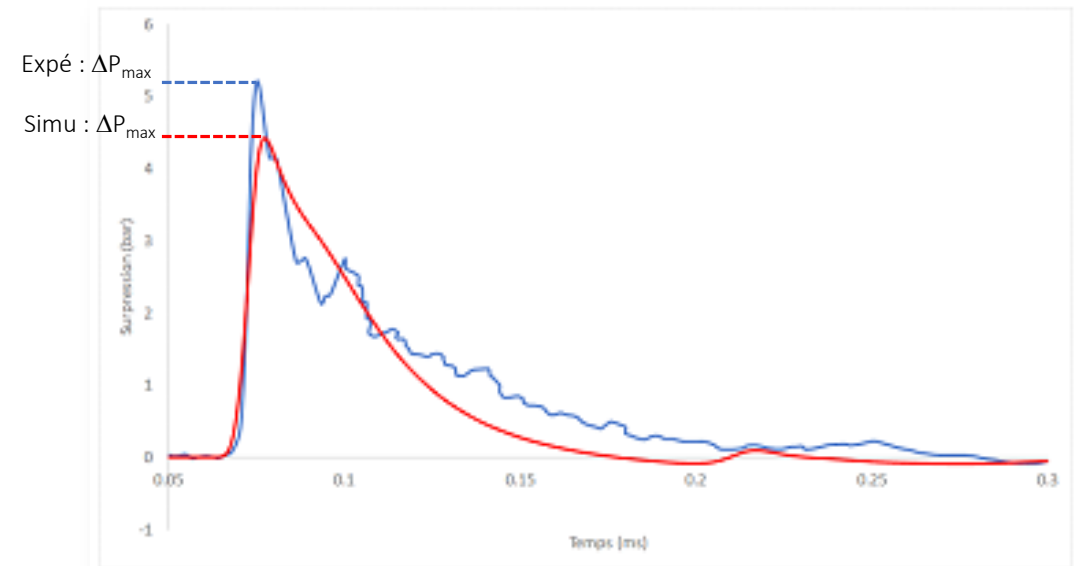


Images du set-up expérimental



Conditions de la modélisation

- Méthodologie :
 - En « non-aveugle »
- Points de comparaison avec les résultats expérimentaux :
 - Signaux temporels de pression
 - Surpression maximale
- Points d'attention éventuels
 - 6 sondes de pression “utiles” sur une propagation de l'ordre du mètre
 - Incertitude expérimentale +/- 14% pour les surpressions, +/- 15% sur les impulsions



Modélisateurs

- Types d'entités représentées : industriel, bureau d'étude, organisme étatique, centre de recherche privé
- Air Liquide, APSYS, Fluidyn, IRSN, INERIS, CERFACS
- FLACS 10.6, Openfoam 3.0.0, Fluidyn-Ventex, LS-Dyna-CeSe, AVBP 7.1

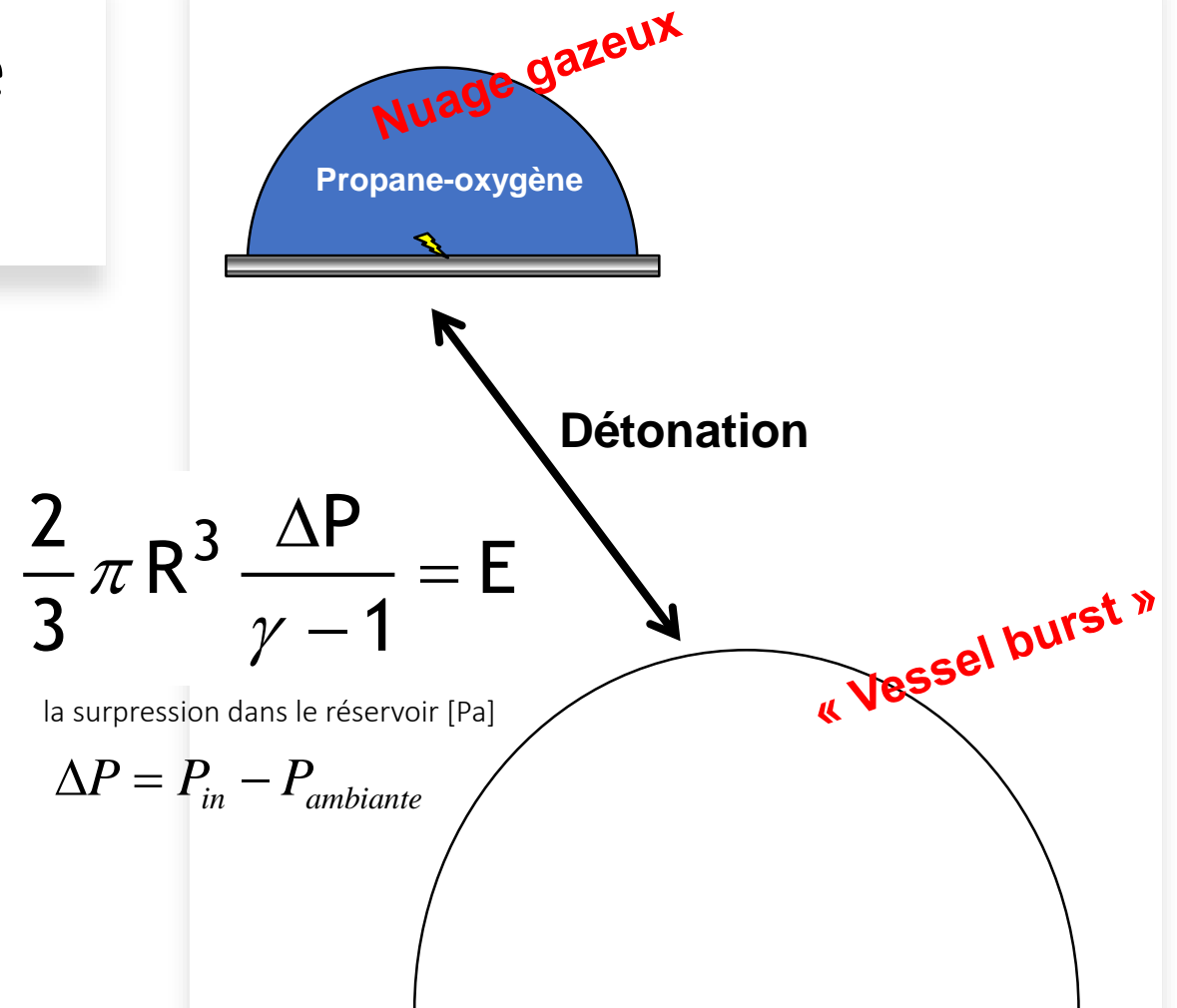
Logiciel	Openfoam	LS-DYNA Ce-Se	FLACS	Fluidyn	AVBP
Version	Version 3.0.0	Ce-Se	Version 10.6	Ventex	Version 7.1
Bureaux d'études	APSYS			Fluidyn	
Editeurs				Fluidyn	CERFACS
Industriels			Air Liquide		
Centre de recherche privé					CERFACS
Organisme étatique	INERIS	IRSN			

Stratégies de modélisation (logiciels)

Modélisation		Méthode					
		AL	APSYS	CERFACS	Fluidyn	INERIS	IRSN
Numérique	Code	FLACS v10.6	OpenFoam 3.0.0	AVBP 7.1	Fluidyn-Ventex	OpenFoam 3.0.0	LS-DYNA CESE
	Equations de transport	Navier-Stokes	Euler	Navier-Stokes	Navier-Stokes	Euler	Euler
	Topologie du domaine	3D 2.3x2.4x0.6 m	3D 1.95x0.6x0.6 m	3D 2 m rayon	2D-axi 2 m x 0.5 m	2D-axi 2 m x 1 m	2D-axi 1.5 m x 0.8 m
	Taille de maille dans zone intérêt	2.5 mm ou 5 mm ou 10 mm	3.75 – 7.5 mm	0.1 – 1 mm	1 – 2 mm	0.7 mm	1 - 5 mm
	Schémas numériques	Tps : Euler Conv : pondéré centré 2 ^e ordre / Upwind	Tps : Euler Conv : Tadmor/ Kurganov	Convection : TTG4A (éléments finis, ordre 4 en temps, 3 en espace) Choc : application de Diffusion Artificielle Localisée (LAD)	Tps : Euler Conv : UDS	Tps : Euler Conv : Tadmor/ Kurganov	Tps : Euler Conv : CE-SE

Modélisation de la source de pression

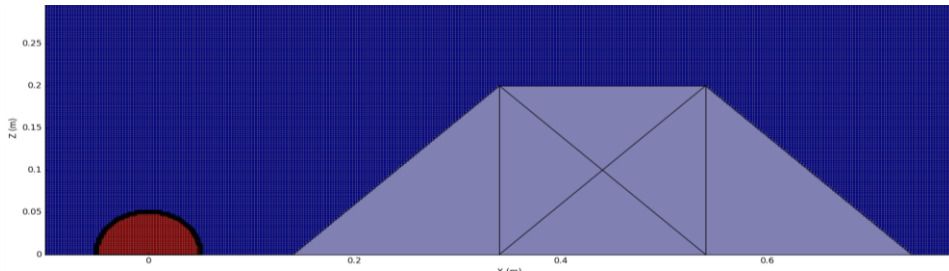
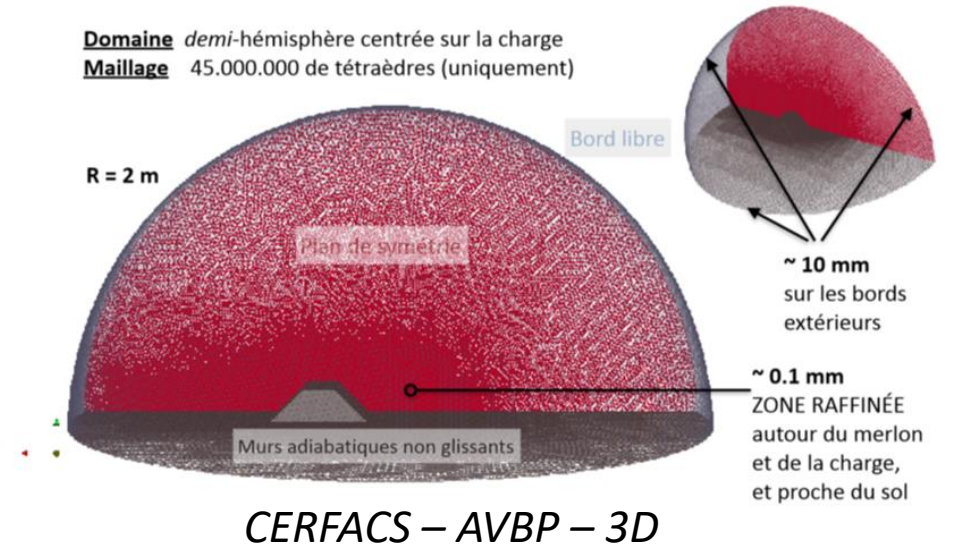
- L'onde de pression consécutive à la détonation gazeuse est considérée comme équivalente à celle produite par l'éclatement d'un réservoir chaud sous pression appelé par la suite "vessel".
- $E(\text{vessel}) = \text{énergie } E \text{ relâchée par la combustion}$
- $T_{in}(\text{vessel}) = T(\text{gaz chauds}) = T_{CJ}$
- $P_{in}(\text{vessel}) = P(\text{gaz chauds}) = P_{CJ}$
- $R = X \text{ mètres}$



Stratégies de modélisation (source)

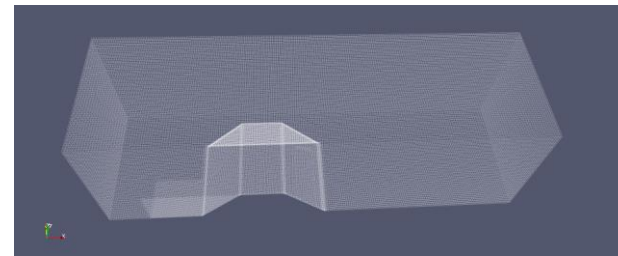
	AL	APSYS	Fluidyn	INERIS	IRSN	CERFACS
Eq. source	R=5.05cm	R=6cm	R=6cm	R=6cm	R=5.05cm	R=5.05cm
T	3843 K	3815 K	3815 K	3830 K	3843 K	3843 K
P	35.1 barg	36.3 barg	34.1 barg	17.5 barg	35.1 barg	36.1 barg
Gas	air	air	air	air	air	air
γ	1.213	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
ρ	3.26kg/m ³	3.3 kg/m ³	3.18 kg/m ³	1.65 kg/m ³	3.18 kg/m ³	3.2 kg/m ³
E	4.4kJ	4.1 kJ	3.9 kJ	1.9 kJ	2.4 kJ	2.4 kJ

Exemples de maillages



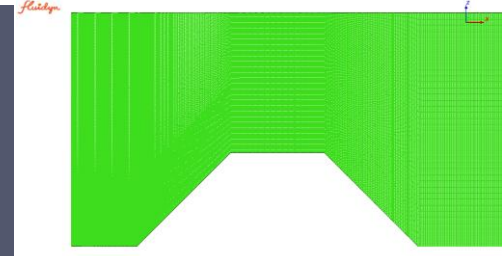
Air Liquide – FLACS – 3D

Δx	Nombre de mailles
2.5mm	18.2 M
0.5mm	15.2 M
1 cm	2.5 M



APSYS – Openfoam – 3D

Δx	Nombre de mailles
3.75mm	1.8 M

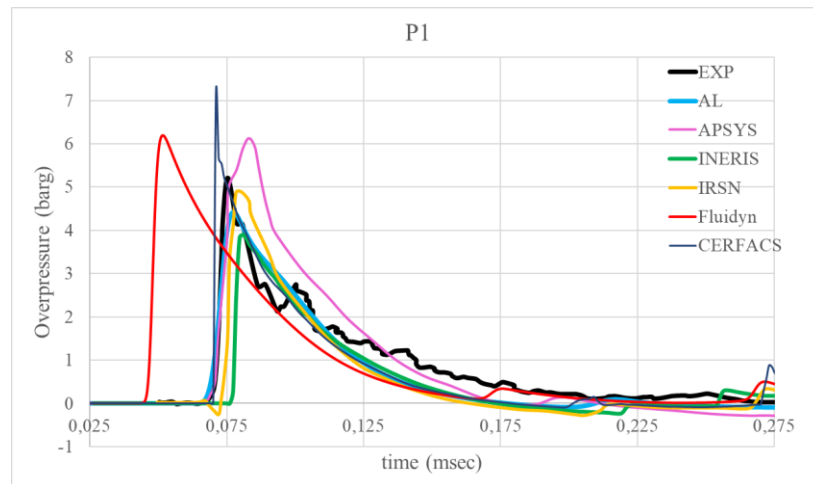
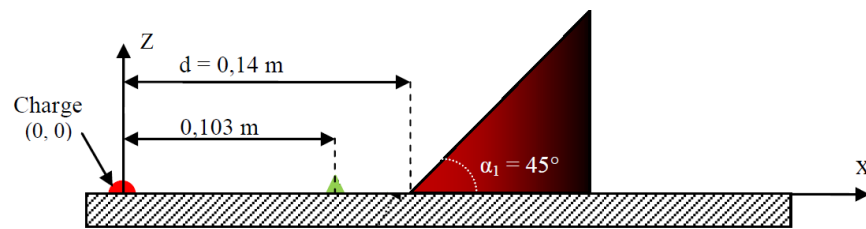


Fluidyn – fluidyn – 2D

Δx	Nombre de mailles
1mm	363 k

Exemples de résultats

(avant le merlon)



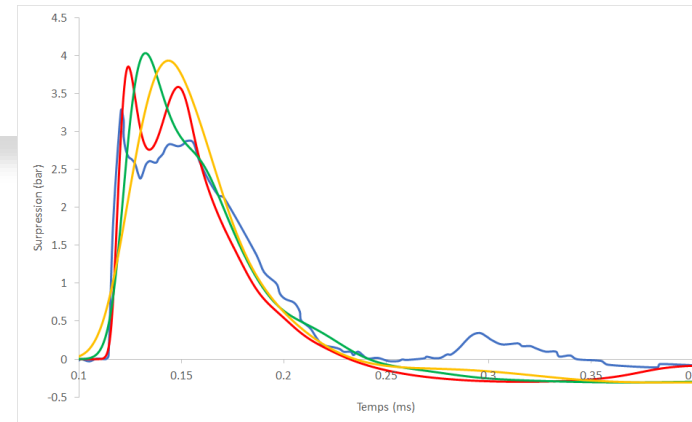
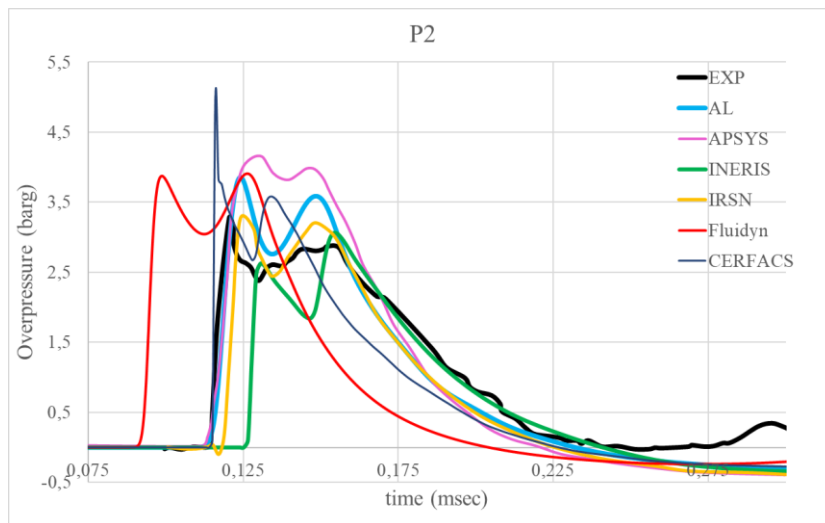
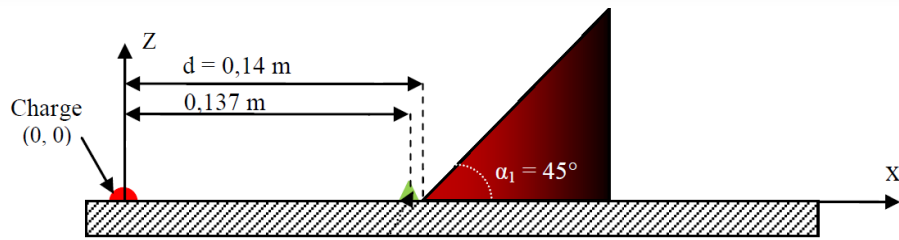
CERFACS **surestime** les niveaux de surpression aux deux positions de l'ordre de **40 %**

APSYS et Fluidyn **surestiment** les niveaux de surpression aux deux positions de l'ordre de **20 %**

AL et INERIS **sous-estiment** la surpression d'environ **15 %** et **25 %**

Données IRSN : **sous-estimation** de la surpression de **7 %**

Exemples de résultats (avant le merlon)

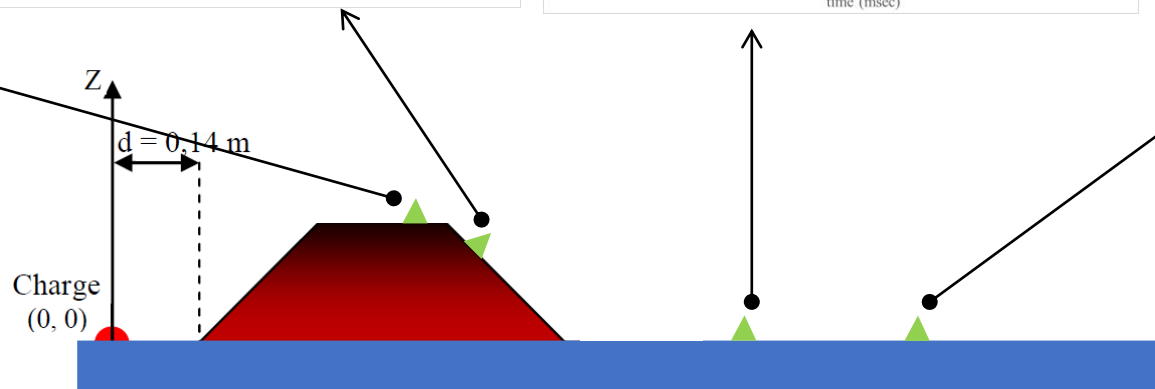
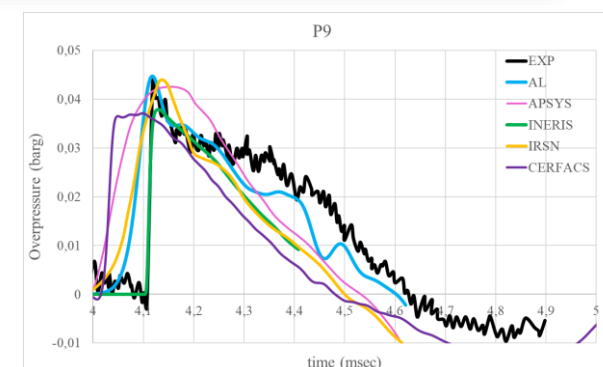
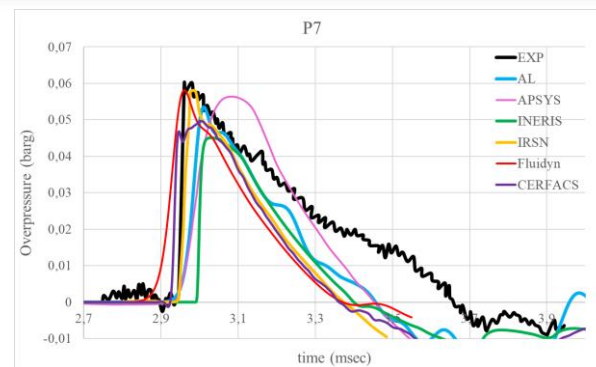
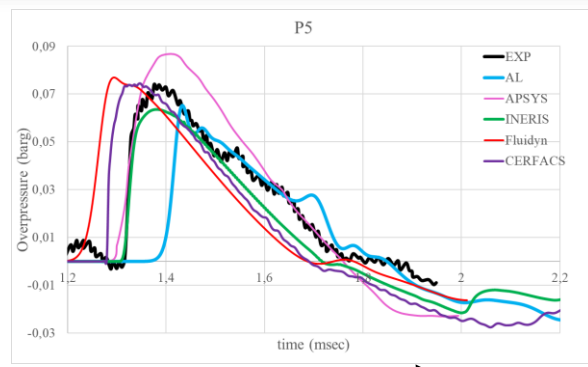
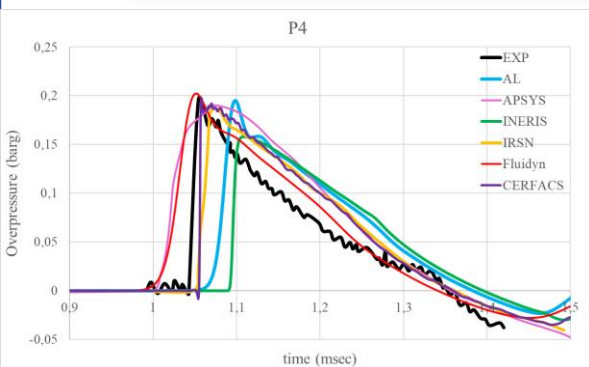


Signal de pression avec deux pics :
le pic de l'onde incidente et celui provenant
de la réflexion de l'onde sur l'obstacle.

Maillage grossier => **fusion** de ces deux pics
: au moins **deux mailles dans cette région**
sont nécessaires entre l'obstacle et le point
de mesure.

Exemples de résultats

(le long et en aval du merlon)

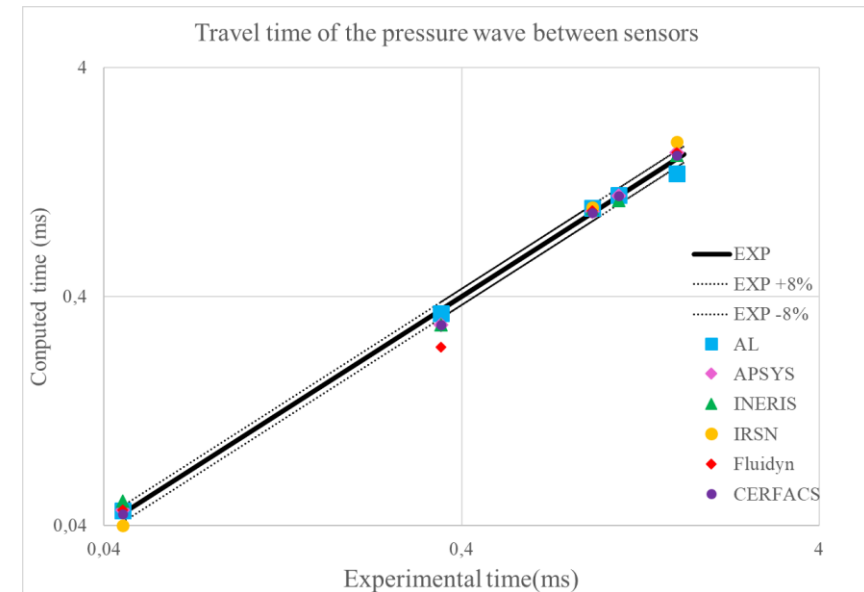


E. Vyazmina, G. Lecocq, S. Trélat, A. Mahon, L. Krumenacker, S. Jallais, Y. Gregoire, J. Commanay, A. Tripathi, "Overpressure Effects from Propane Detonation: Comparison of Simulation Results with Experimental Data", 9th International Seminar on Fire and Explosion Hazards, Saint-Petersburg, Russia, April 21-26, 2019.

Exemple de résultats (temps de parcours moyen)

Critères		Méthode						
		AL	APSYS	CERFAC S	Fluidyn	INERIS (CFD)	INERIS (DIFREX)	IRSN
Phys. Quantitatifs (Écarts relatifs maxi)	Pic	-15/+20%	0/+25 %	-20/+50 %	0/+20%	-25/-10%	-5/+30%	-5/10%
	Impulsion	-40/+15%	-25/+50 %	-40/+20 %	-40/+30%	-50/+5%	-40/+110 %	-45 /+15%
	Temps d'arrivée	-15/+5%	0/5%	0/+1%	+1/+5%	-15/+15%	N'est pas une sortie de l'outil	-10 /+15%
Puissance des calculs								
Temps de calcul (après mise en données)		~1 semaine. avec une dizaine de processeurs.	~1 semaine avec plusieurs processeurs.	41 h avec 360 processeurs	~2 semaines avec une dizaine de processeurs.	Quelques jours avec 64 processeurs.	Instantané.	Quelques jours avec plusieurs processeurs.

E. Vyazmina, G. Lecocq, S. Trélat, A. Mahon, L. Krumenacker, S. Jallais, Y. Gregoire, J. Commanay, A. Tripathi, "Overpressure Effects from Propane Detonation: Comparison of Simulation Results with Experimental Data", 9th International Seminar on Fire and Explosion Hazards, Saint-Petersburg, Russia, April 21–26, 2019.



Conclusions, enseignements et perspectives

- Expériences de détonation d'un mélange gazeux à échelle de laboratoire : champ libre et autour d'un merlon indéformable
- Les résultats de surpression obtenus par simulation numérique sont en assez bon accord avec les résultats d'essais.
- La méthode ("vessel burst") restitue correctement les niveaux de surpression (dans l'incertitude expérimentale).
- Les équations d'Euler (APSYS, INERIS and IRSN) semblent permettre de mieux représenter le choc même pour un maillage grossier.
- A proximité de l'obstacle, il paraît nécessaire d'utiliser au moins 1 maille (au moins pour FLACS), dans l'idéal, 3 mailles pour obtenir une prédiction correcte du signal de pression (forme et magnitude).
- Il serait nécessaire de poursuivre ce cas d'étude en réalisant par exemple :
 - une étude sur la question de la source (et en particulier sur l'énergie contenue par le « vessel ») ;
 - une comparaison des champs de pression réfléchi par la face avant de l'obstacle ;
 - nécessité de réaliser un essai dédié pour repasser ce cas ?
 - question de l'échelle ?

“ Expérimentations et simulations numériques ne peuvent exister séparément ”



MERCI POUR VOTRE ATTENTION !
DES QUESTIONS ?

elena.vyazmina@airliquide.com
sophie.trelat@irsn.fr

“ Expérimentations et simulations numériques ne peuvent exister séparément ”