

La simulation numérique des explosions

Le Groupe de travail

Guillaume Lecocq, Emmanuel Leprette (INERIS)



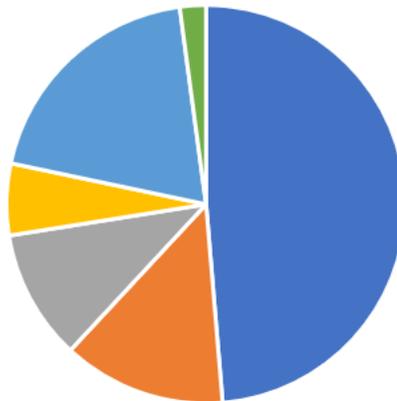
Qui êtes-vous ?

Quel est votre profil de poste ?



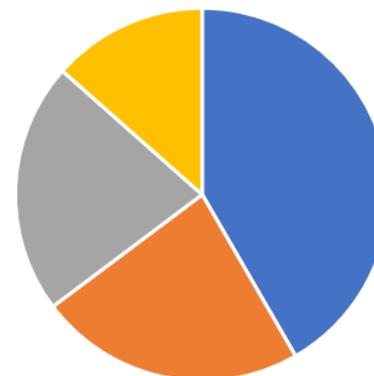
- Expert CFD ou Risques Industriels
- Expert explosion
- Expert modélisation CFD explosion
- Décideur/chef de projet
- Instructeur dossier réglementaire
- Autres

Quel type de phénomène vous intéresse ?



- Déflagration en phase gazeuse
- TDD
- Explosion de poussières
- Détonation en phase solide
- Explosion physique (ruine, ...)
- Autres

Dans quel contexte utilisez-vous la modélisation (CFD) ?



- Etudes réglementaires
- Etudes de sécurité internes
- Dimensionnement d'installation
- Autres



La modélisation des explosions d'échelle industrielle

- Modéliser / Simuler :
 - 1) réduire un problème réel à un problème pouvant être résolu. Cette phase requiert une part d'expertise afin de ne pas laisser de côté les paramètres prépondérants.
 - 2) mettre en œuvre un outil permettant d'obtenir la solution du problème réduit.
 - Dans le cas des explosions industrielles, quel intérêt ?
 - Fourniture d'éléments de compréhension additionnels pour une interprétation (campagne expérimentale voire un accident réel)
 - Prédiction des effets d'un scénario d'explosion identifié dans le cadre d'études de dangers réglementaire ou d'une étude de sécurité interne
 - Dimensionnement de systèmes de sécurité : événements d'explosion, murs de protection, ...
-

Les explosions d'échelle industrielle en phase gazeuse et leurs spécificités

- Exemple de l'accident sur la raffinerie de Tamaulipas (Mexique) en 2012.



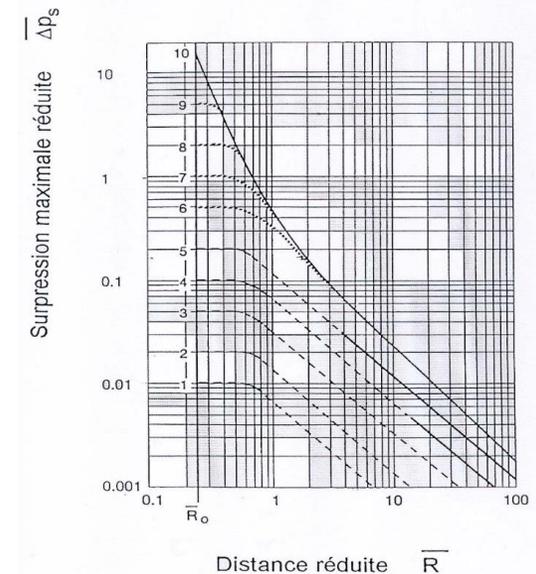
- Quelques constats :
 - l'onde de pression est générée par la propagation d'une flamme sur une centaine de mètres environ,
 - des obstacles de forme et de taille variées sont présents sur le chemin de la flamme.

Quelles méthodes de modélisation sont en pratique utilisées ?

- Approche phénoménologique : par ex., la méthode Multi-Energy [1]. Celle-ci décrit le champ de pression généré par une propagation de flamme hémisphérique à vitesse constante en absence d'obstacles périphériques par un abaque. L'utilisation de cette méthode requiert deux paramètres pour caractériser l'explosion :
 - Un volume inflammable ou une énergie d'explosion,
 - Un indice de violence ou une pression maximale d'explosion.

Le volume inflammable peut par exemple être considéré comme le plus gros hémisphère pouvant être inscrit dans le nuage.

Des règles génériques proposent des gammes d'indice de violence en fonction d'une description qualitative du cas considéré (encombrement, force de la source d'inflammation, ...) [2]



[1] VAN DEN BERG A. C.,(1984) : The Multi-Energy Method - a framework for vapour cloud explosion blast prediction, Rapport TNO-PML 1984-C72

[2] J. DAUBECH (2016) Rapport Omega UVCE. Les explosions non confinées de gaz et de vapeurs. Rapport INERIS.

Quelles méthodes de modélisation sont en pratique utilisées ?

- Approche phénoménologique : par ex., la méthode Multi-Energy [1].

Avantages :

- Pratiques :
 - temps de retour rapide,
 - mise en œuvre aisée,
 - aucune limite d'utilisation liée à l'échelle de l'explosion.
- Méthode reconnue : elle est couramment mise en œuvre dans les études réglementaires.

Inconvénients :

- la quantification de l'indice de violence peut en pratique être délicate,
 - intrinsèquement, la méthode ne peut pas :
 - rendre compte de certains effets physiques liés à des singularités spatiales (par ex.: vitesse de propagation de flamme distincte suivant les directions de l'espace)
 - rendre compte d'un signal de pression complexe lié à des variations de vitesse de la flamme.
-

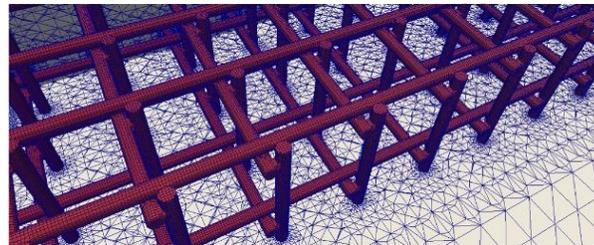
Quelles méthodes de modélisation sont en pratique utilisées ?

- Approche CFD (en français « Mécanique des Fluides Numérique ») :
 - En quelques mots : l'approche CFD consiste à **résoudre les équations de transport discrétisées en temps et en espace**, décrivant un écoulement. Ces équations de transport intègrent une modélisation intrinsèque ou choisie par l'utilisateur pour certains phénomènes physiques. En ce qui concerne les explosions, il s'agit essentiellement :
 - De la turbulence (induite par la propagation de flamme),
 - De l'interaction flamme/turbulence,
 - Des phénomènes de diffusion différentielle entre les espèces et la chaleur au travers du front de flamme.

Equation de transport physique

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{\rho} (\tilde{u}_i \tilde{u}_j - \tilde{u}_i \tilde{u}_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j}$$

+



+

Approximation des opérateurs de l'équation de transport par schémas numériques

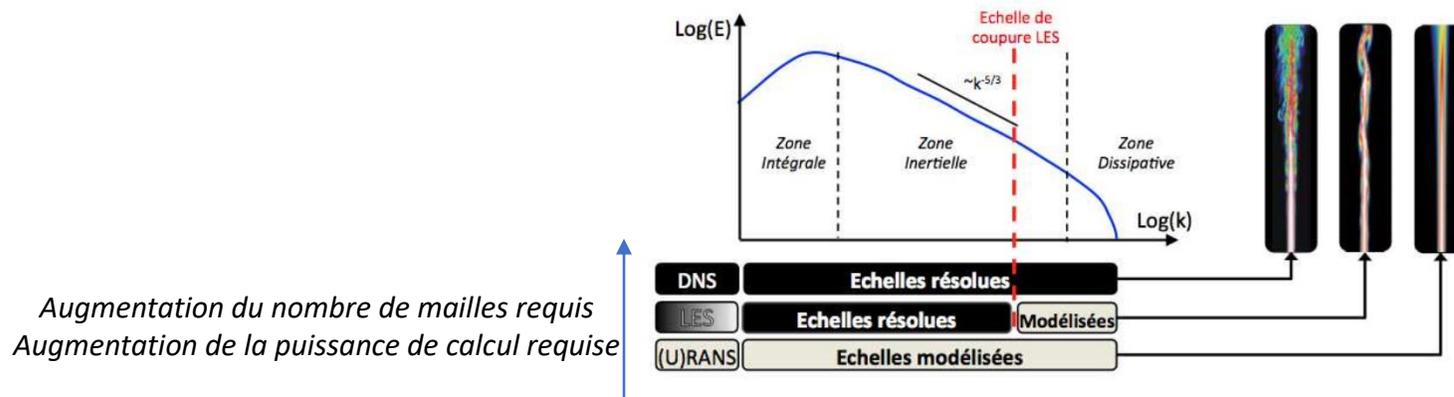
+

Résolution du système d'équations ainsi obtenu

Calcul CFD

Quelles méthodes de modélisation sont en pratique utilisées ?

- Approche CFD (en français « Mécanique des Fluides Numérique ») :
 - En quelques mots : l'approche CFD consiste à résoudre les équations de transport discrétisées en temps et en espace, décrivant un écoulement. **Ces équations de transport intègrent une modélisation intrinsèque ou choisie par l'utilisateur pour certains phénomènes physiques.** En ce qui concerne les explosions, il s'agit essentiellement :
 - De la turbulence (induite par la propagation de flamme ou préexistante à l'inflammation),
 - De l'interaction flamme/turbulence,
 - Des phénomènes de diffusion différentielle entre les espèces et la chaleur au travers du front de flamme.



Quelles méthodes de modélisation sont en pratique utilisées ?

- Approche CFD (en français « Mécanique des Fluides Numérique ») :
 - En quelques mots : l'approche CFD consiste à résoudre les équations de transport discrétisées en temps et en espace, décrivant un écoulement. **Ces équations de transport intègrent une modélisation intrinsèque ou choisie par l'utilisateur pour certains phénomènes physiques.** En ce qui concerne les explosions, il s'agit essentiellement :
 - De la turbulence (induite par la propagation de flamme ou préexistante à l'inflammation),
 - **De l'interaction flamme/turbulence,**
 - Des phénomènes de diffusion différentielle entre les espèces et la chaleur au travers du front de flamme.

Contexte RANS :

- Modèle Eddy-dissipation Concept [3],
- Modèle à densité de surface de flamme [4],
- fermé algébriquement ou par équation de transport
-

Contexte LES :

- Modèle à densité de surface de flamme [5],
- Modèle de flamme épaissie [6],
- ...

Contexte DNS [7]

[3] K.E. Rian et al. (2016) Coherent Computational Analysis of Large-Scale Explosions and Fires in Complex Geometries – From Combustion Science to a Safer Oil and Gas Industry. Chemical Engineering Transactions

[4] B.J. Arntzen (1998) Modelling of turbulence and combustion for simulation of gas explosion in complex geometries. Manuscrit de these

[5] H Xiao (2012) Experimental and numerical investigation of premixed flame propagation with distorted tulip shape in a closed duct. Combust. Flame 159(4)

[6] P. Quillatre (2014) Simulation aux grandes échelles dans un milieu confiné. Manuscrit de thèse. Université de Toulouse.

[7] O. Dounia (2019) Influence of kinetics on DDT simulations. Combust. Flame 200



Quelles méthodes de modélisation sont en pratique utilisées ?

- Approche CFD (en français « Mécanique des Fluides Numérique ») :

Avantages :

- Peut rendre compte intrinsèquement de spécificités propres à l'explosion considérée :
 - Effet de la distribution dans l'espace du produit inflammable
 - Effet d'un arrangement d'obstacles spécifique et éventuellement localisé dans le nuage inflammable
 - Effet de la localisation du point d'inflammation
 - ...

Contraintes :

- Besoin d'une expertise de l'utilisateur pour le choix des sous-modèles physiques
- Besoin de vérifier la faible dépendance des résultats aux méthodes numériques
- L'approche CFD a été couramment mise en œuvre pour l'ingénierie de la propulsion, caractérisée par des échelles bien inférieures à celles des explosions d'échelle industrielle. Une surcouche de modélisation doit éventuellement être intégrée.
- Pratiques : Mise en données du cas plus longue, préparation du calcul plus complexe, temps de calcul relativement long. Varie néanmoins avec les sous-modèles physiques mis en œuvre.
- Méthode moins reconnue que l'approche phénoménologique pour les Etudes de Dangers françaises.

Quelles méthodes de modélisation sont en pratique ?

Quelle méthode de calcul utilisez-vous ?

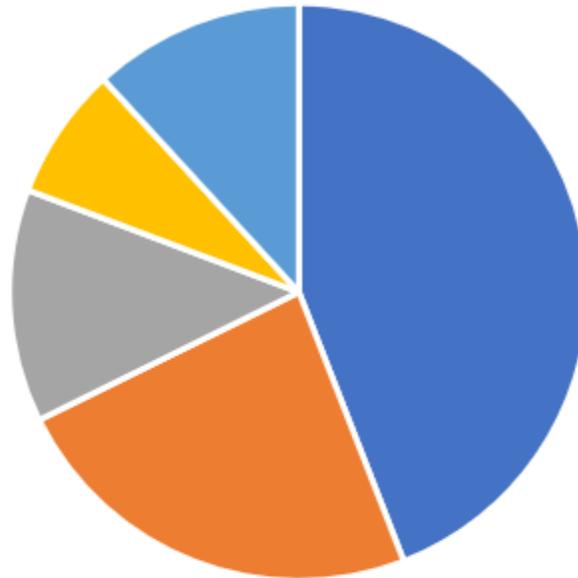
- Approche CFD (en français)

Avantages :

- Peut rendre compte intrinsèquement
 - Effet de la distribution dans l'espace
 - Effet d'un arrangement d'obstacles
 - Effet de la localisation du point
 - ...

Contraintes :

- Besoin d'une expertise de l'utilisateur
- Besoin de vérifier la faible dépendance aux conditions initiales
- L'approche CFD a été couramment utilisée pour des explosions d'échelle industrielle.
- Pratiques : Mise en données du modèle, validation des sous-modèles physiques mis en œuvre
- Méthode moins reconnue que l'approche expérimentale



■ Modélisation CFD

■ Méthode Multi-Energy

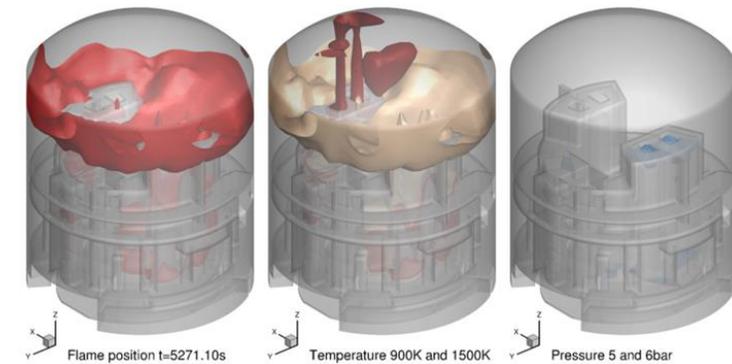
■ Phast ou équivalent

■ Méthode équivalent TNT : souvent long. Varie néanmoins avec les échelles bien inférieures à celles des

■ Autres

Et dans d'autres domaines analogues ?

- Dans le domaine nucléaire, un outil utilisé dans le cadre d'une étude de démonstration doit être qualifié via soumission d'un dossier spécifique à l'Autorité de Sûreté nucléaire [8]. Celui-ci doit contenir :
 - Une description de champ d'application
 - Une identification des phénomènes physiques dominants et leur hiérarchisation
 - Grandeurs d'intérêts ?
 - Phénomènes prépondérants ?
 - ...
 - Des éléments de vérification (quelle est la sensibilité du résultats aux méthodes numériques ?)
 - Des éléments de validation
 - Une quantification des incertitudes
 - Une démonstration de l'accord de la validation de l'outil avec le champ d'application visé



Ex: Evaluation de tenue d'enceinte suite à une explosion d'hydrogène



Le groupe de travail CFD explosion

- Depuis 2015, un GT national, a été constitué autour de la modélisation par approche CFD de l'explosion pour :
 - Établir une analyse des points forts et faiblesses des modèles envisageables pour prédire des dynamiques de flamme et des champs de pression,
 - Réaliser un premier positionnement des approches CFD par rapport aux outils simples,
 - Proposer des axes de R&D permettant d'améliorer les outils.
- Pas de financement extérieur
- Animé par l'Ineris
- GT constitué de 12 membres : industriels, bureaux d'études, établissements publics, centres de recherche. Certains sont développeurs/éditeurs de codes numériques, d'autres sont utilisateurs
- Géré par une convention qui définit les règles de partage des données, des résultats, et les règles de diffusion et de publication

Le groupe de travail CFD explosion

Membre		Développeur / Utilisateur	Europlexus	FLACS	AVBP	CALIF ³ S-P ² REMICS	FLUIDYN VENTEX	OPENFOAM	EXSIM	LS-DYNA
Industriels	AIR LIQUIDE	Utilisateur		X						
	EDF	Utilisateur	X	X						
	GRT GAZ	Utilisateur		X						
	TOTAL	Utilisateur		X						
Bureaux d'études	APSYS	Utilisateur						X		
	DNV-GL	Utilisateur		X					X	
	FLUIDYN	Développeur					X			
	ODZ Consultants	Utilisateur		X						
Etablissements publics	CEA	Développeur	X							
	IRSN	Développeur Utilisateur				X				X
	INERIS	Utilisateur						X		
Centre de recherche privé	CERFACS	Développeur Utilisateur		X	X					

Le groupe de travail CFD explosion

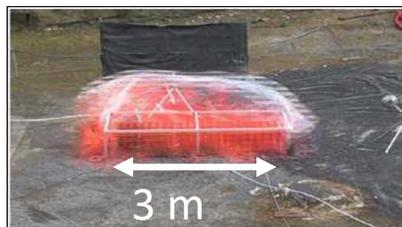
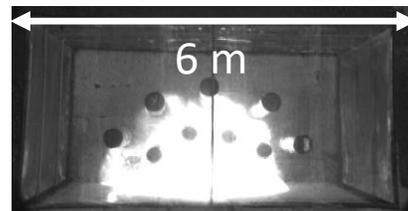
- Démarche:
 - Identification de cas tests
 - représentatifs de phénoménologies rencontrées lors d'explosions industrielles,
 - présentant une métrologie suffisante,
 - de la plus grande échelle possible.

Inflammation dans un jet libre

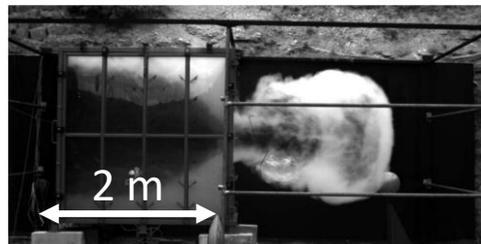


Débit massique ~ quelques centaines g/s

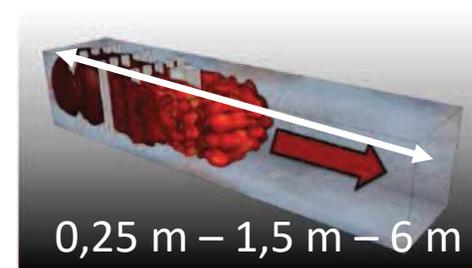
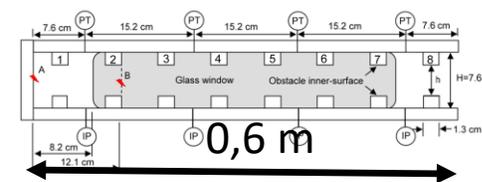
Inflammation dans un nuage inflammable recouvrant un ensemble d'obstacles



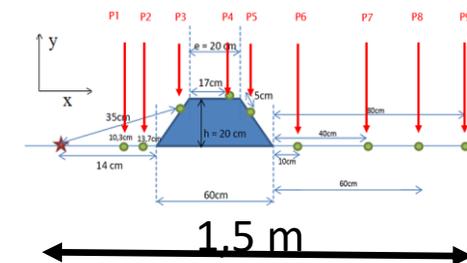
Inflammation dans volume confiné présentant une surface ouverte



Inflammation dans une veine obstruée



Propagation d'une onde de choc et interaction avec structure



Le groupe de travail CFD explosion

- Démarche:
 - Identification de cas tests
 - représentatifs de phénoménologies rencontrées lors d'explosions industrielles,
 - présentant une métrologie suffisante,
 - de la plus grande échelle possible.

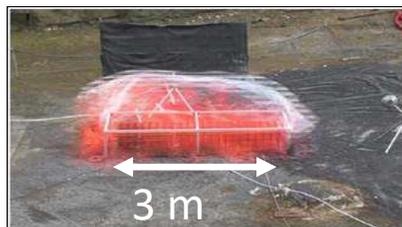
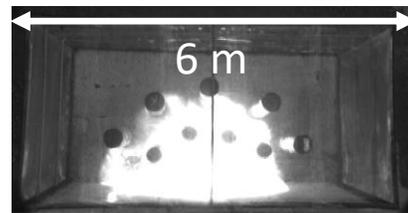
Cas publiés

Inflammation dans un jet libre



Débit massique ~ quelques centaines g/s

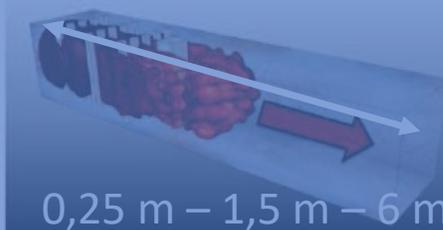
Inflammation dans un nuage inflammable recouvrant un ensemble d'obstacles



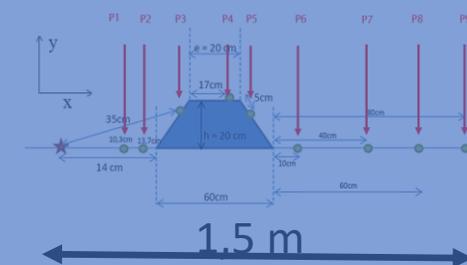
Inflammation dans volume confiné présentant une surface ouverte



Inflammation dans une veine obstruée



Propagation d'une onde de choc et interaction avec structure





Le groupe de travail CFD explosion

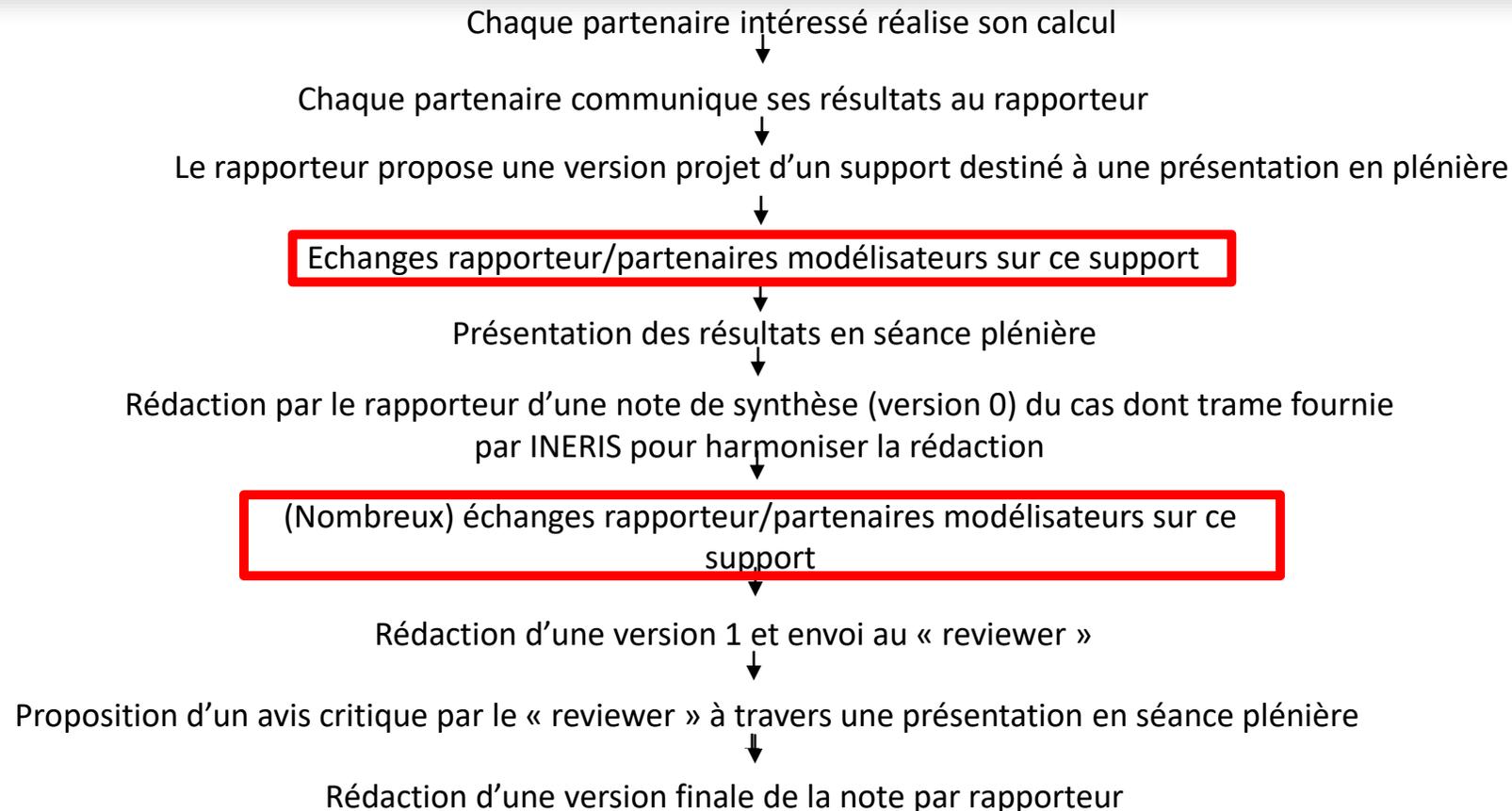
- Démarche:
 - Identification de cas tests
 - représentatifs de phénoménologies rencontrées lors d'explosions industrielles,
 - présentant une métrologie suffisante,
 - de la plus grande échelle possible.
 - Modélisation par chaque partenaire de 3-4 cas



Le groupe de travail CFD explosion

- Démarche:
 - Identification de cas tests
 - représentatifs de phénoménologies rencontrées lors d'explosions industrielles,
 - présentant une métrologie suffisante,
 - de la plus grande échelle possible.
 - Modélisation par chaque partenaire de 3-4 cas
 - Proposition d'une note de synthèse par cas :
 - un partenaire est rapporteur : il est responsable du suivi de la réalisation des calculs, il rédige présente les résultats en séance plénière, il rédige la note de synthèse
 - un partenaire est « reviewer » : non modélisateur du cas, il porte un avis extérieur sur le travail mené à travers une présentation en séance plénière.

Le groupe de travail CFD explosion





Présentations à suivre :

- **Modélisations de propagations de flammes dans un réseau d'obstacles** - ODZ et Fluidyn
 - **Modélisation de cas de propagations de flammes confinées ou partiellement confinées** - CEA et CERFACS
 - **Traitement d'une interaction onde de choc / obstacle** - Air Liquide et IRSN
-