

# *Étude des surpressions générées par une explosion d'hydrogène dans un bâtiment et de ses conséquences mécaniques sur un réservoir*

## Plan de la présentation :

1. Introduction
2. Géométrie du problème et création des maillages
3. Modèles utilisés
  - i. Calculs de combustion
  - ii. Calculs de distribution
4. Résultats
  - i. Scénario « enveloppe » (scénarii 1 et 2)
  - ii. Scénarii plus « réalistes » (scénarii 3 à 6)
    - Calculs de distribution
    - Calculs de combustion
5. Étude de la tenue mécanique d'un des réservoirs
6. Conclusion

## 1. Introduction

- **Contexte de l'étude :**

- Apparition d'une fuite d'hydrogène dans des locaux du Bâtiment des Auxiliaires Nucléaires (BAN) d'un réacteur de 900 MWe.
- Dispersion de l'hydrogène dans les locaux.
- Présence d'un système de ventilation.
- Étincelle qui vient enflammer le mélange Air/H<sub>2</sub>.
- Explosion.
- Propagation des surpressions dans les locaux adjacents.
- Comportement mécanique d'un des réservoirs.

- **Objectif :**

Évaluer les surpressions engendrées par une telle explosion et vérifier la tenue mécanique d'un réservoir contenant des matières radioactives.

- **Scénarii proposés :**

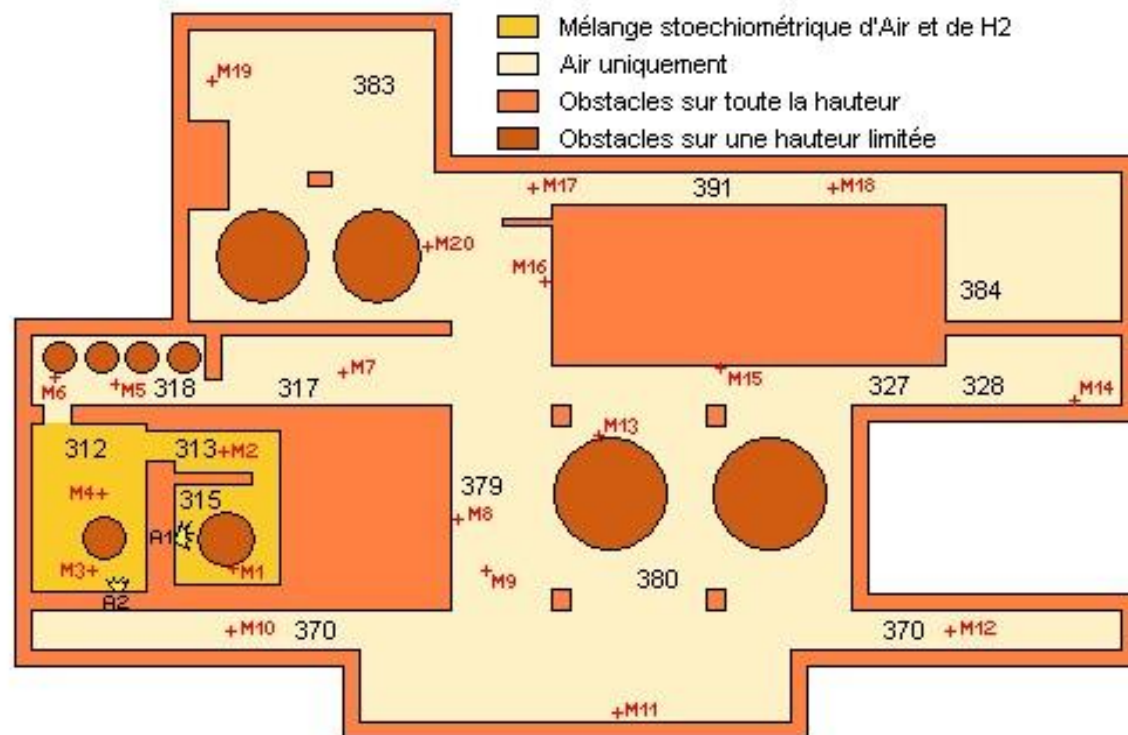
- Scénario « enveloppe » (scénarii notés 1 et 2) : Allumage d'un mélange d'air et d'hydrogène à stœchiométrie et étude de l'influence de la position d'inflammation.
- Scénarii plus « réalistes » (scénarii notés 3 à 6) :
  - Simulation d'une fuite d'hydrogène (plus ou moins importante).
  - Modélisation de l'interstice sous les portes fermées permettant néanmoins le passage de fluide.
  - Allumage du mélange Air/Hydrogène obtenu à un instant et à une position donnés.

- **Étude de la tenue mécanique d'un réservoir**

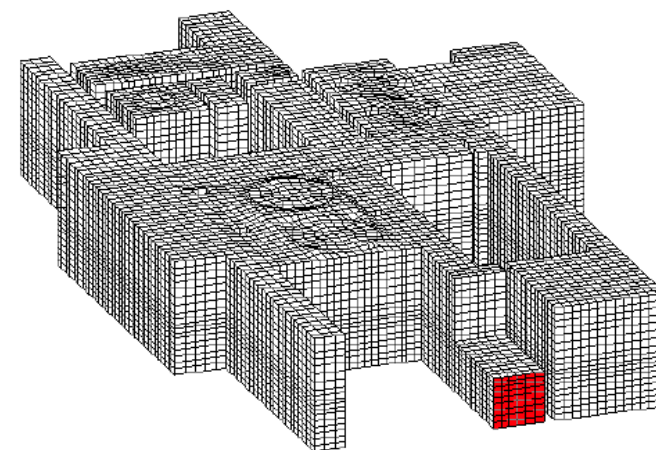
	Soufflage S1	Soufflage S2	Extracteur E1	Extracteur E2
Position	2m du sol, 312	4m du sol, 313	1m du sol, 412	2m du sol, 315
Direction	-Oz	-Oz	Oy	-Oy
Débit (m <sup>3</sup> /h)	550	370	670	410
Section (cm <sup>2</sup> )	20 x 20	20 x 40	20 x 40	20 x 20

## 2. Géométrie et maillage

- Extrusion de plans 2D pour différentes hauteurs
- Maillage complet (tenant compte des pièces adjacentes) pour les calculs de combustion
- Maillage plus fin se limitant à la zone d'étude (locaux 312,313,315,318,412) pour les calculs de distribution

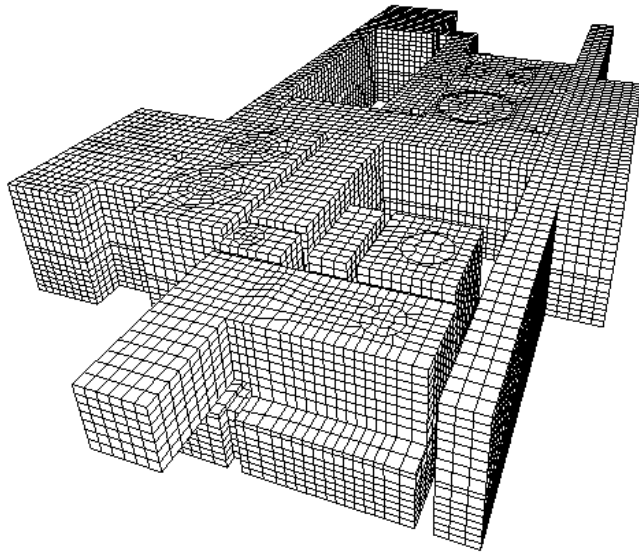


Vue du maillage global avec le mur « critique »

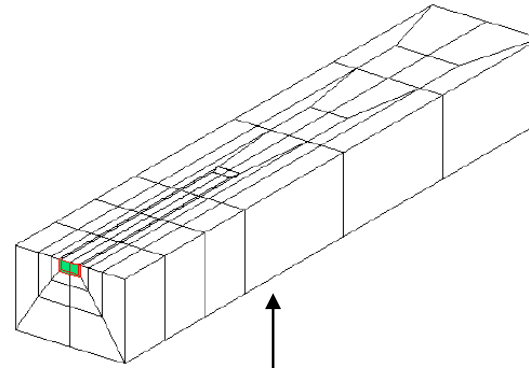


### Caractéristiques du maillage global :

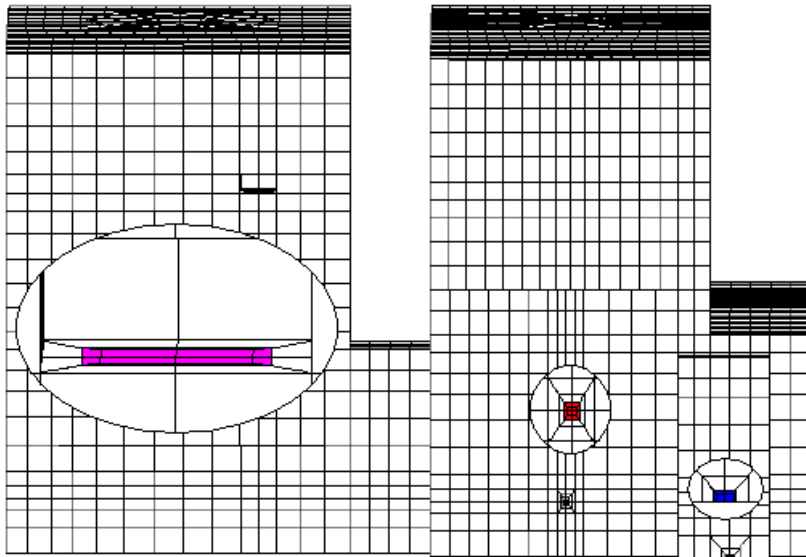
- $0.15\text{m} < \Delta X < 0.48\text{m}$
- Nombre d'éléments : 42000
- Volume total : 2478 m<sup>3</sup>



Maillage global : visualisation de la mezzanine 412



Raffinement local en 3D  
au niveau de la brèche

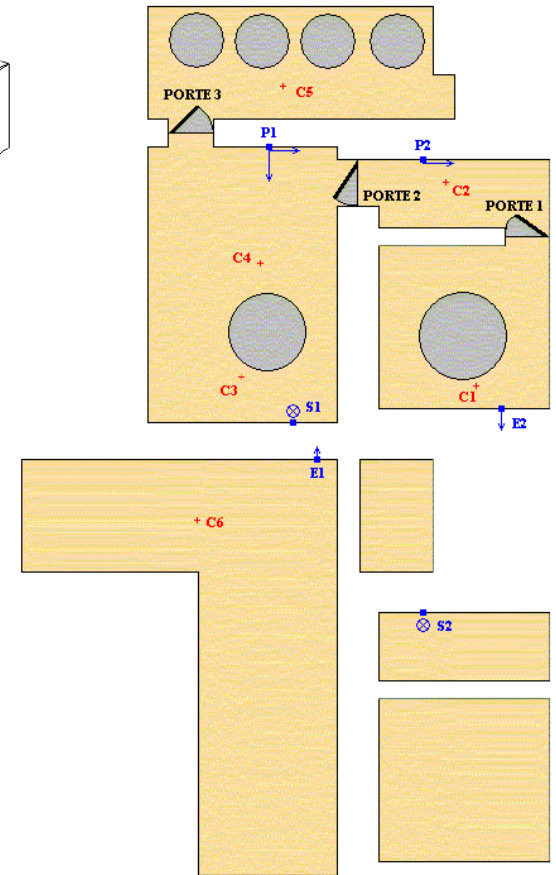


Caractéristiques du maillage de  
la zone d'étude :

- $0.017m < \Delta X < 0.29m$
- Nombre d'éléments : 25400
- Nombre de nœuds : 31000
- Volume total :  $306 \text{ m}^3$
- Rayon de la brèche : 2cm

Coupe passant par la porte 3 :

- En rouge, surface de la brèche
- En bleu, l'interstice sous la porte 3
- En magenta, le souffleur 2



Schémas du 1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> plancher

### 3. Modèles utilisés

#### i. Calculs de combustion

Utilisation du code CAST3M-TONUS.

Modèle numérique :

- Solveur Volumes Finis de type choc-choc, ordre 2 en espace, ordre 1 en temps.
- Algorithme explicite, le pas de temps respectant la condition CFL.

Modèle de combustion :

Modèle CREBCOM pour des mélanges gazeux non-homogènes.

Deux paramètres utilisateurs :

- $K_0$  correspondant à la vitesse de propagation.
  - $\varepsilon$  correspondant au critère d'avancement de la flamme.
- (les corrélations permettant de trouver  $K_0$  en fonction du mélange initial ont été effectuées avec un  $\varepsilon=0.5$ )

## ii. Calculs de distribution

### Utilisation du code CAST3M-TONUS et de la procédure « enceinte »

#### Modèle numérique :

- Discrétisation des différentes équations par la méthode des Éléments Finis décentrés amont (SUPG)
- Navier Stokes résolue par une méthode de projection
- Résolution implicite de chaque équation et découplage du système
  - > Algorithme semi-implicite
- Modèle à faible nombre de Mach

#### Modèle de turbulence :

Modèle de type longueur de mélange.  $L_{mel} = R_{brèche}$

#### Modélisation du système de ventilation :

- Souffleurs** : identiques à des injections d'air (nécessite le transport de l'air)
- Extracteurs** : débit volumique d'extraction connu
  - > vitesse de sortie imposée sur les surfaces d'extraction et réévaluation des bilans globaux en masse et énergie.

## Procédures personnelles :

### Modélisation des extracteurs (spécifique à l'étude)

#### Maillage :

- Création de procédures pour le raffinement local au niveau de la brèche, des souffleurs et des extracteurs.
- Création des portes : dédoublement des nœuds de la porte et fusion des nœuds correspondant à l'interstice permettant le passage du fluide.

#### Post-traitement :

- Tracé de champs en fonction du temps.
- Suivi temporel de grandeurs en des points donnés.
- Suivi du volume du nuage inflammable au cours du temps et calcul du volume équivalent pour la même masse d'hydrogène, mais pour un mélange à stœchiométrie.

#### Propriétés de l'hydrogène :

- Limites d'inflammabilité dans l'air (vol %) : 4-75
- Limites de détonation dans l'air (vol %) : 13-65

#### Mode de calcul du volume stœchiométrique équivalent :

$$m_{H_2} = \int_{V_{\text{inf}}} \rho_{H_2} dV = \int_{V^*} \rho Y_{H_2}^* dV = Y_{H_2}^* \int_{V^*} \rho dV$$

$$\int_{V^*} \rho dV \approx \int_{V^*} \bar{\rho} dV \quad \text{où} \quad \bar{\rho} = \frac{1}{V_{\text{inf}}} \int_{V_{\text{inf}}} \rho dV$$

$$\Rightarrow V^* = \frac{m_{H_2}}{Y_{H_2}^* \bar{\rho}}$$

## 4. Résultats

### i. Scénario « enveloppe » (1 et 2)

#### Conditions initiales et aux limites pour le calcul de combustion :

- Zone d'allumage : en position A1 ou A2 (Scénario 1 ou 2).
- Zone d'étude (locaux 312,313,315,412) : mélange Air/H<sub>2</sub> à stœchiométrie.
- Le reste des locaux : Air uniquement.
- $P_{ini} = 1.015 \cdot 10^5$  Pa.
- $T_{ini} = 300$  K.
- Les gaz sont supposés initialement au repos.
- Les pertes thermiques par convection et rayonnement ne sont pas modélisées.

#### Choix des paramètres du modèle CREBCOM :

- Mélange stœchiométrique Air/H<sub>2</sub> ->  $140 < K_0 < 160$  m/s (d'après des calculs préalables comparés à des résultats expérimentaux).

Calculs avec  $K_0=140$  m/s et  $K_0=500$  m/s → résultats similaires

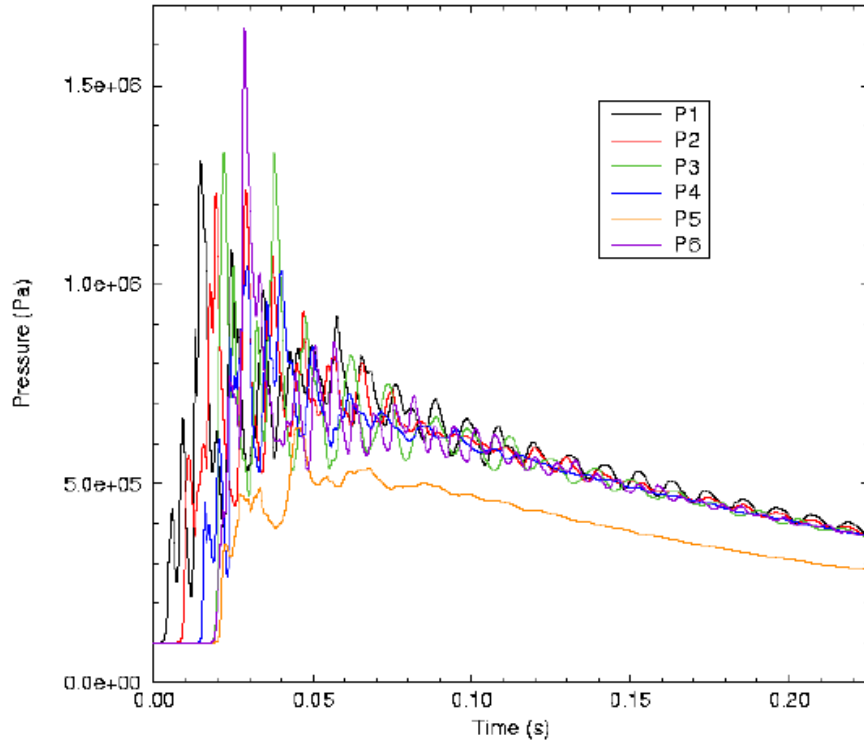
→ Régime de détonation (peu influencé par la valeur de  $K_0$ )

- $\varepsilon = 0.5$



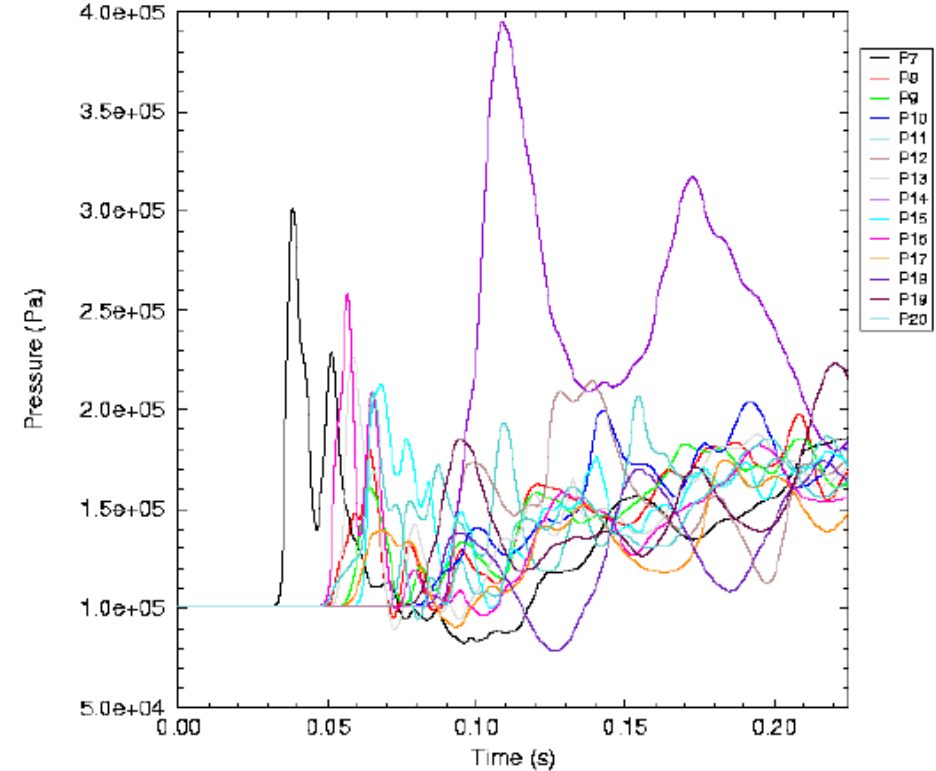
## Scénario 1 : mélange à stœchiométrie et allumage en A1

Pression mesurée au niveau des capteurs 1 à 6  
(zone d'explosion)



Pression assez importante dans la zone d'explosion  
( $P > 10\text{bars}$ ).

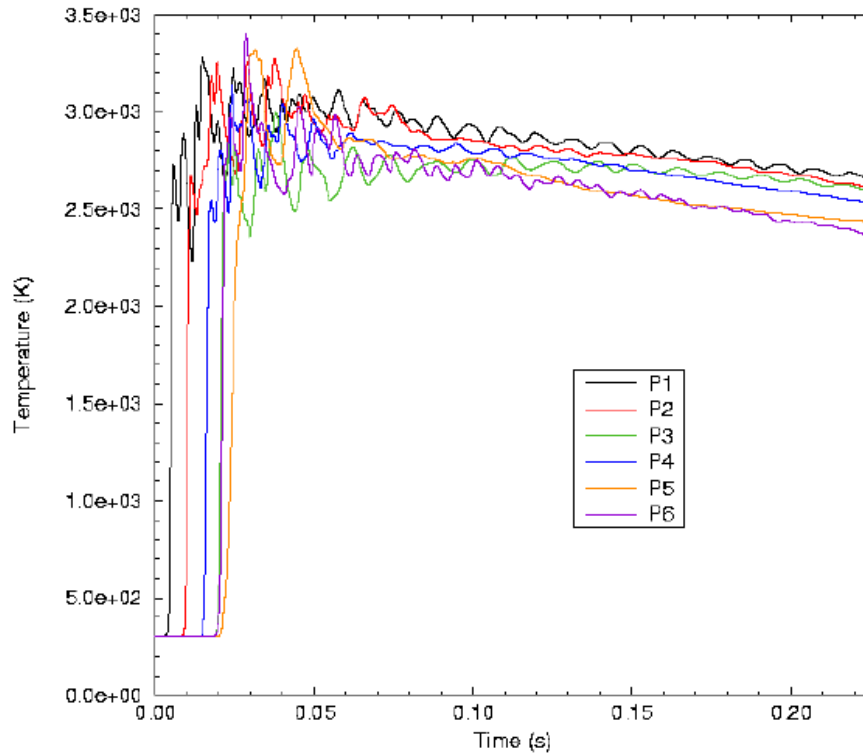
Pression mesurée au niveau des capteurs 7 à 20  
(situés en dehors de la zone d'explosion)



En dehors de la zone d'explosion, une onde de choc se propage à une vitesse supersonique.  
Les obstacles et les ondes de réflexion ont tendance à augmenter la pression

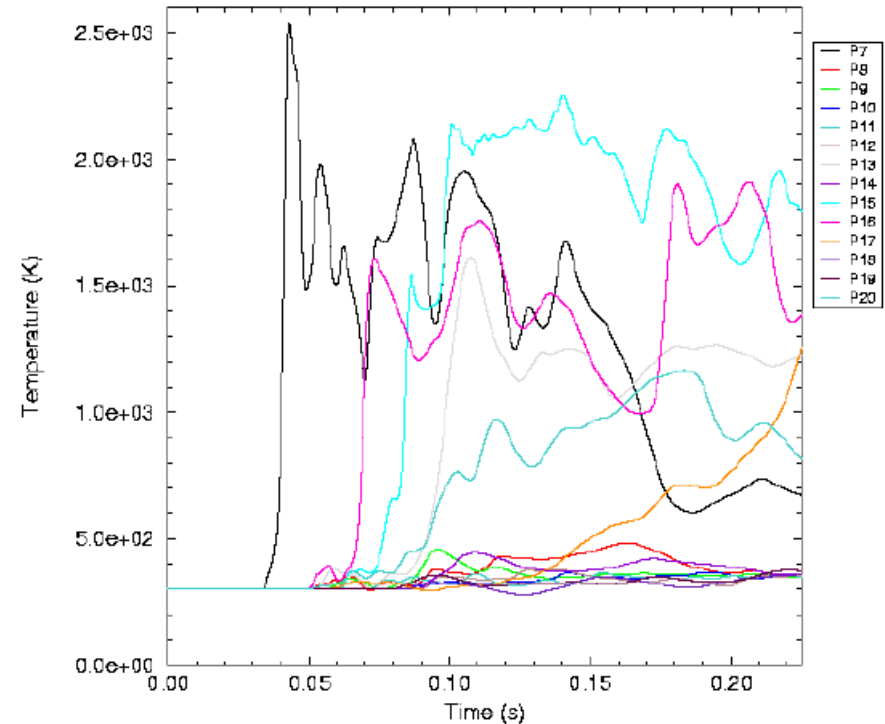
## Scénario 1 : mélange à stœchiométrie et allumage en A1

Température mesurée au niveau des capteurs 1 à 6 (zone d'explosion)



Température très importante ( $2500 < T < 3300$  K).

Température mesurée au niveau des capteurs 7 à 20 (situés en dehors de la zone d'explosion)

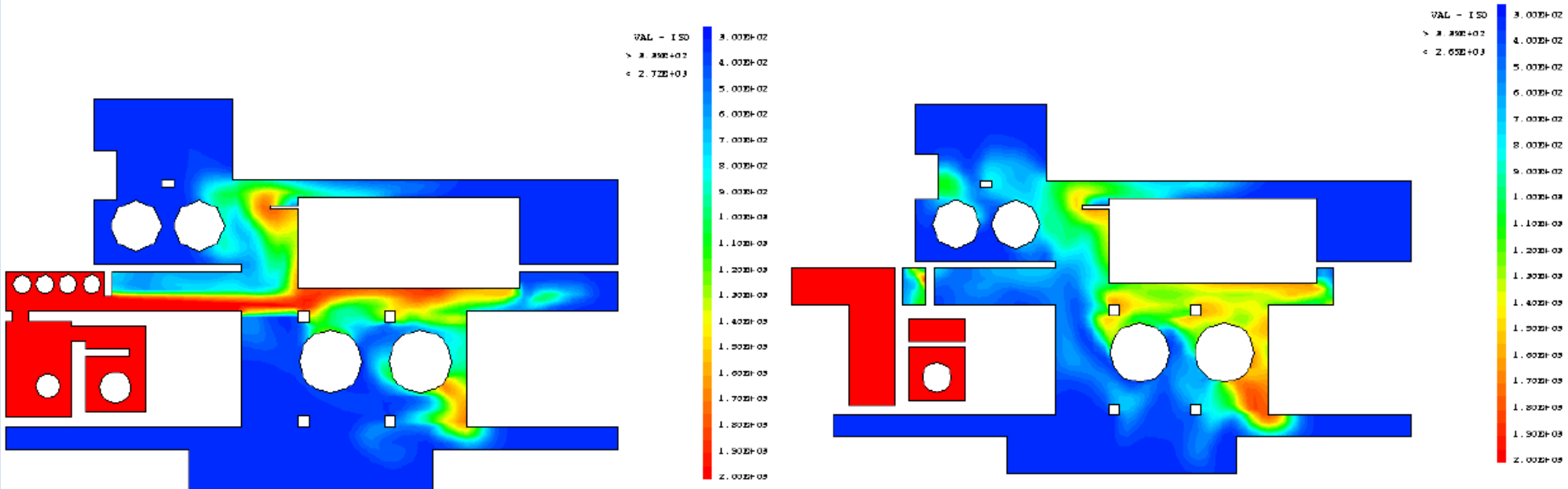


Deux zones se distinguent:

- Une zone où la température dépasse les 1000K qui correspond au déplacement des gaz brûlés (convection de la vapeur d'eau).
- Une zone où la température reste inférieure à 500K due aux échauffements provoqués par les ondes de chocs et les réflexions de celles-ci sur les obstacles éventuels.

## Scénario 1 : mélange à stœchiométrie et allumage en A1

Champ de température à  $t=0.225s$  ( $K0=140m/s$ )



Plan z=0.9m

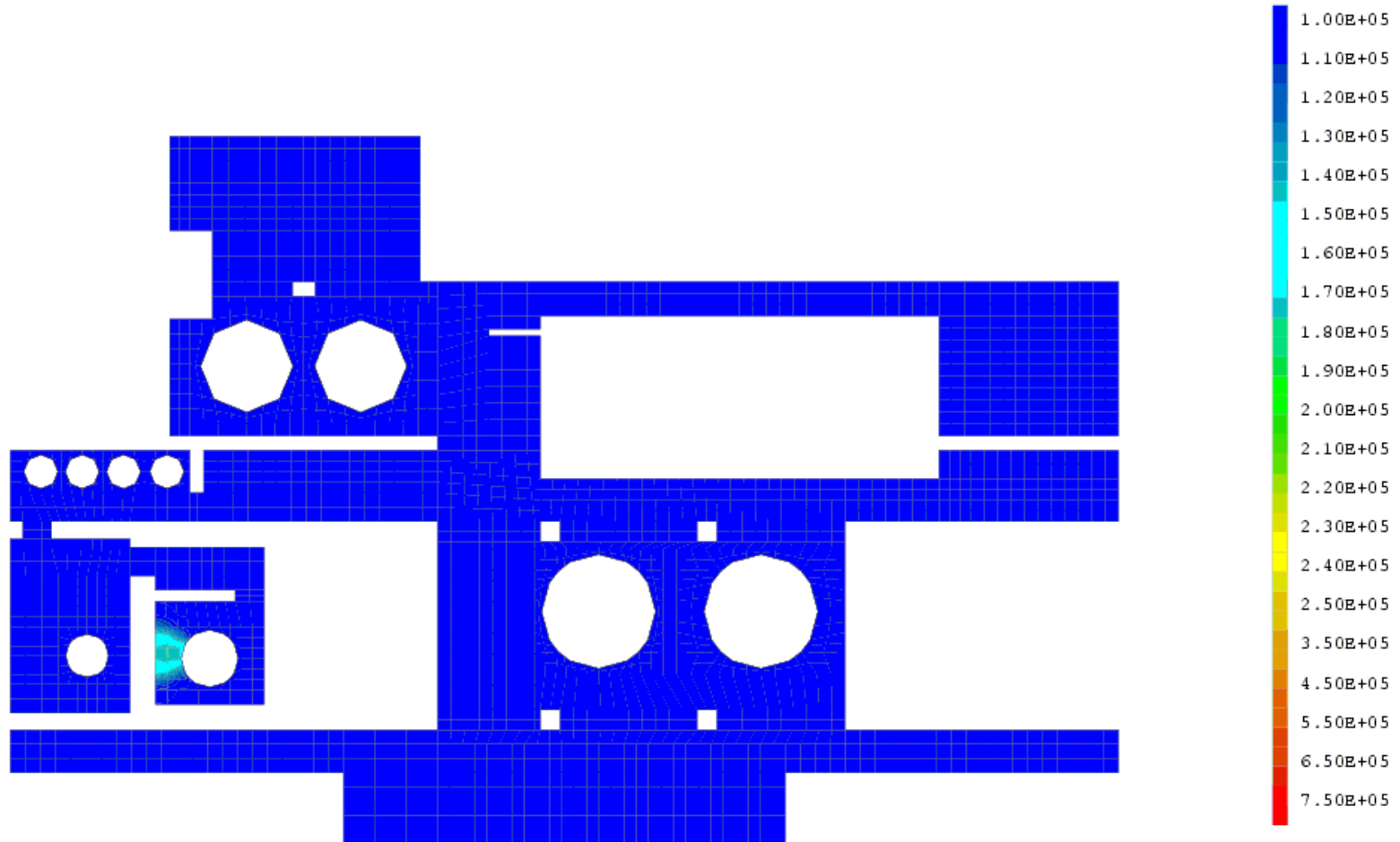
Plan z=3.8m

On voit distinctement la localisation de la flamme (composée d'air et de vapeur d'eau).

Si on regarde l'évolution de cette flamme au cours du temps, on observe un phénomène de battement en sortie du local 317.

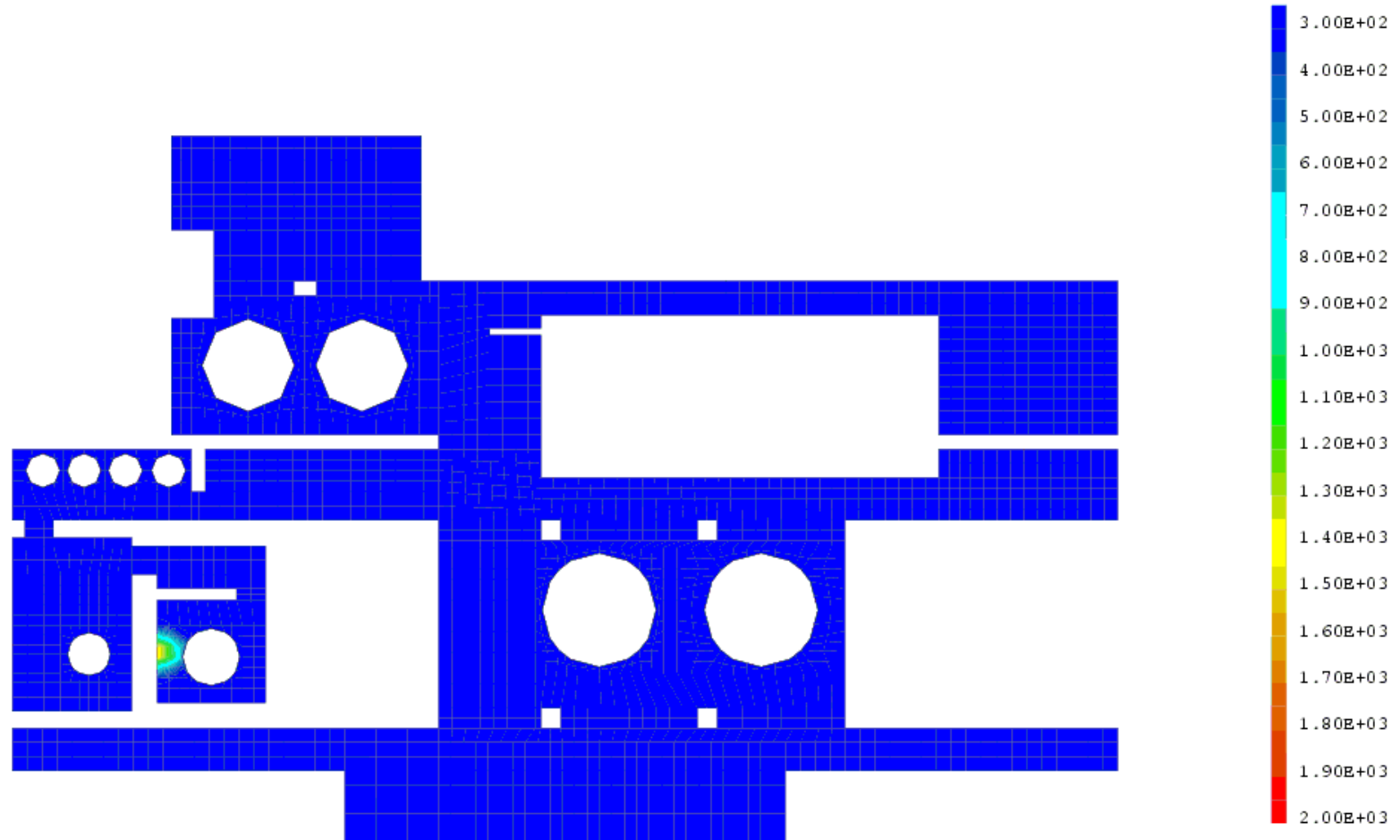
## Scénario 1 : mélange à stœchiométrie et allumage en A1

Évolution du champ de pression au cours du temps ( $\Delta t=7.5E-3s$ ,  
Vitesse de défilement : 20 images/sec, Temps final : 0.225s)



## Scénario 1 : mélange à stœchiométrie et allumage en A1

Évolution du champ de température au cours du temps ( $\Delta t=7.5E-3s$ ,  
Vitesse de défilement : 20 images/sec, Temps final : 0.225s)



- ii. Scénarii plus « réalistes »
  - Calculs de distribution

### Zone d'étude :

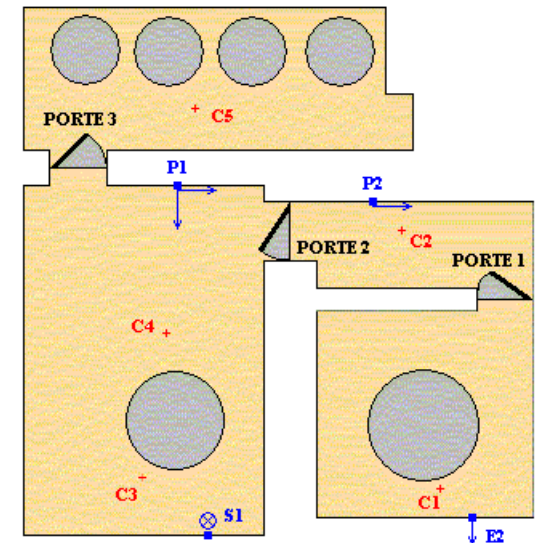
-Locaux 312 (C3 et C4), 313 (C2), 315 (C1), 318 (C5) et 412 (C6).

### Étude paramétrique :

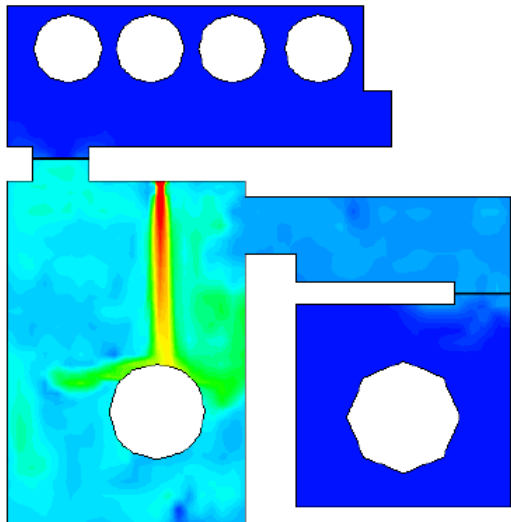
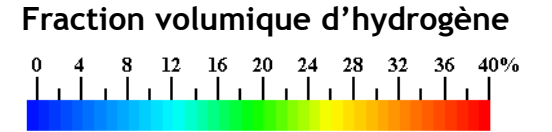
- Variation du débit de fuite d'hydrogène : 9g/s (scénario 3 et 4) et 1g/s (scénario 5 et 6).
- Variation de la position et de la direction de fuite.
- Les portes 1 et 3 sont toujours supposées fermées mais existence d'un interstice permettant le passage du fluide.
- La porte 2 est supposée fermée pour les scénarii 5 et 6.

### Conditions initiales et aux limites :

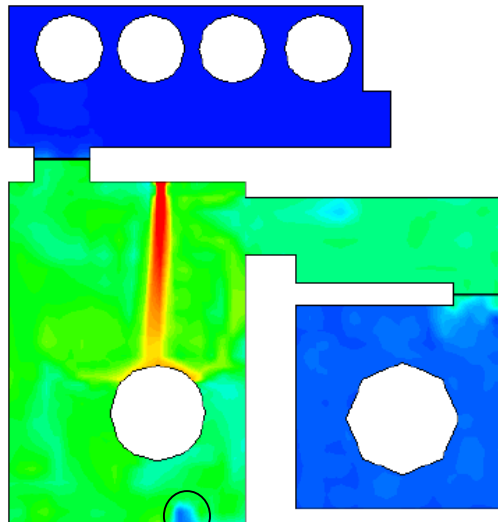
- Pression et température ambiante.
- Simulation de la ventilation seule pendant 100s (2 bouches de soufflage et 2 bouches d'extraction).
- Puis injection de l'hydrogène à température ambiante et à débit constant.
- Les parois sont supposées adiabatiques.



**Scénario 3 : forte injection d'hydrogène, fuite située dans le local 312 et dirigée orthogonalement au mur**



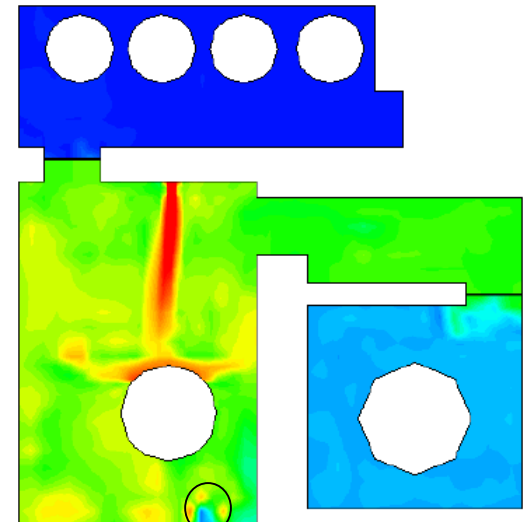
T=400s



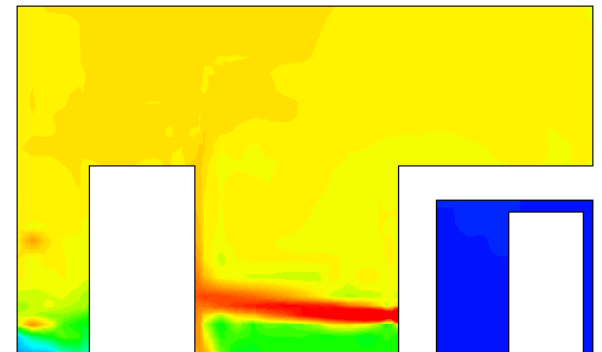
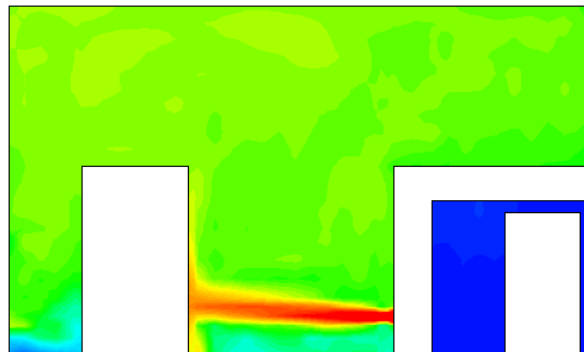
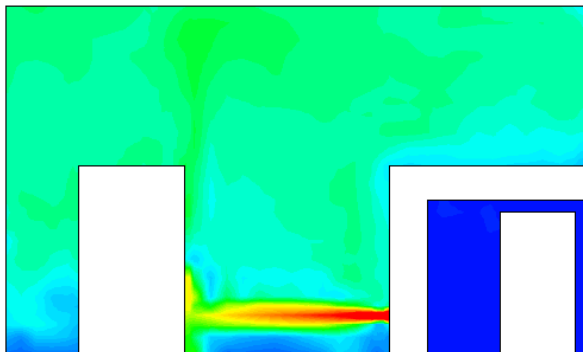
T=700s

Bouche de soufflage

Anomalies très certainement causés par le raffinement

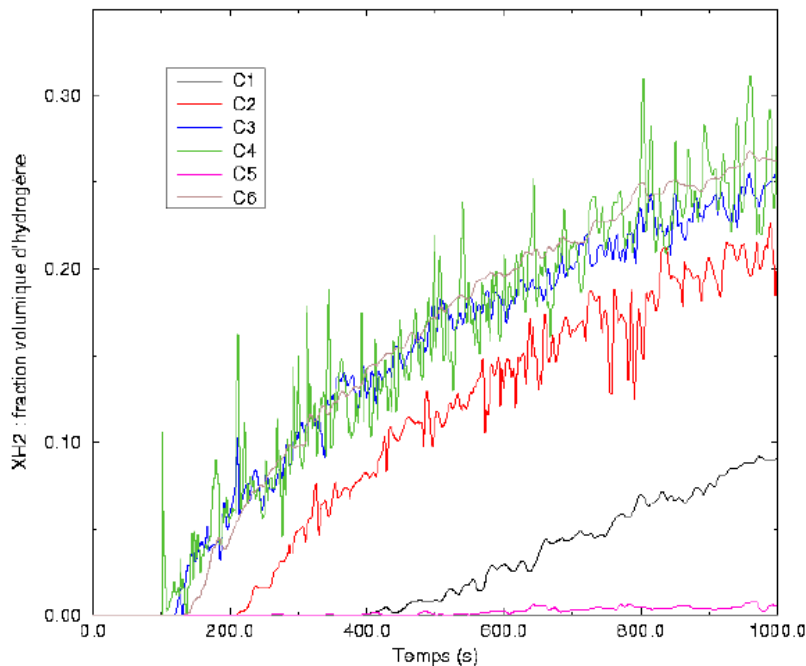


T=1000s

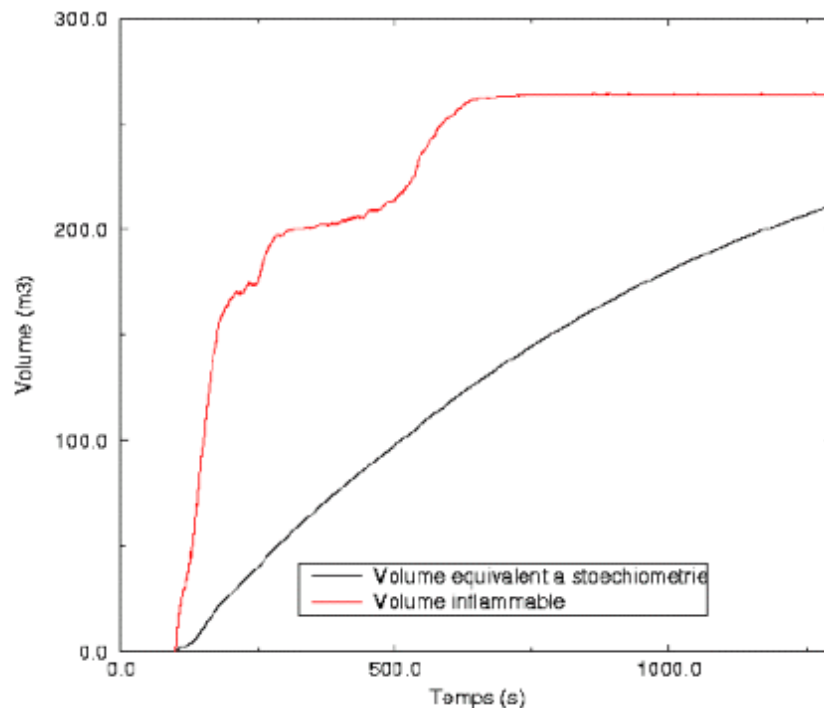


**Scénario 3 : forte injection d'hydrogène, fuite située dans le local 312 et dirigée orthogonalement au mur**

Évolution de la fraction volumique d'hydrogène en fonction du temps



Évolution du volume inflammable et du volume stœchiométrique équivalent au cours du temps

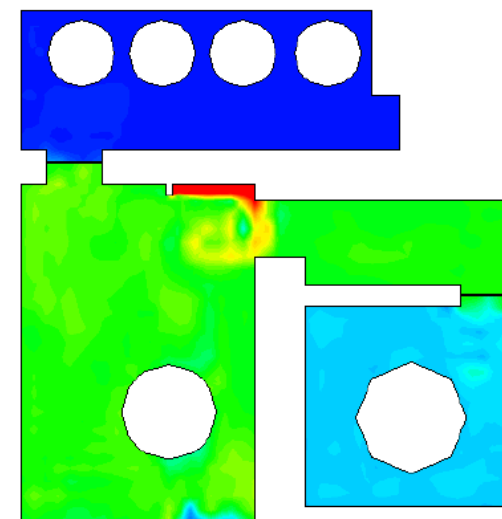
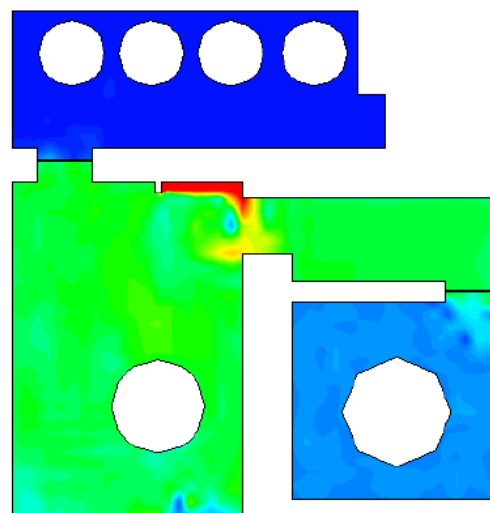
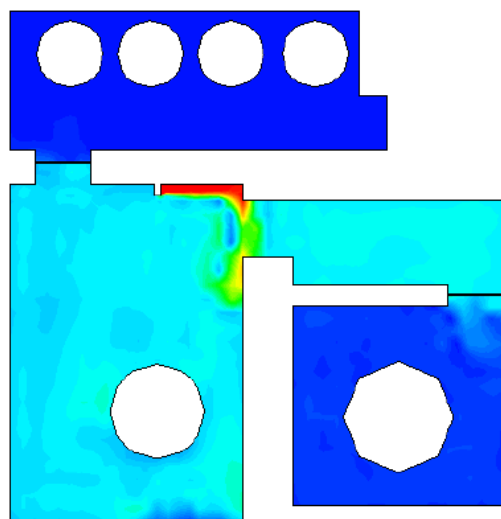
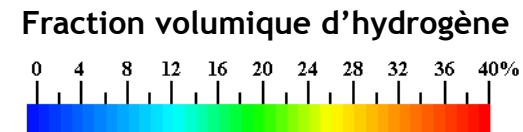


Résultats très chahutés probablement dus à l'utilisation d'un pas de temps trop grand

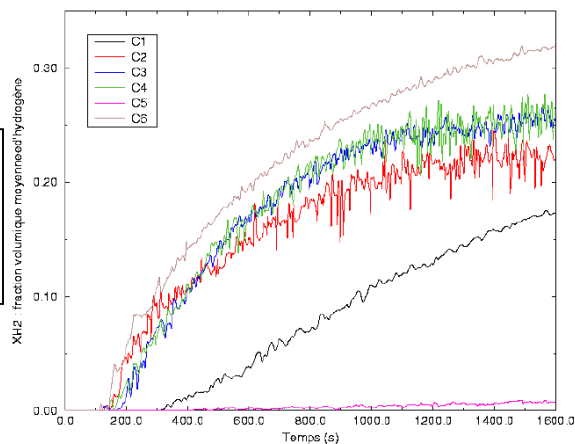
**Question : à quel moment allumer le mélange ?**



**Scénario 4 : forte injection d'hydrogène, fuite située dans le local 312 et dirigée horizontalement et parallèlement au mur**

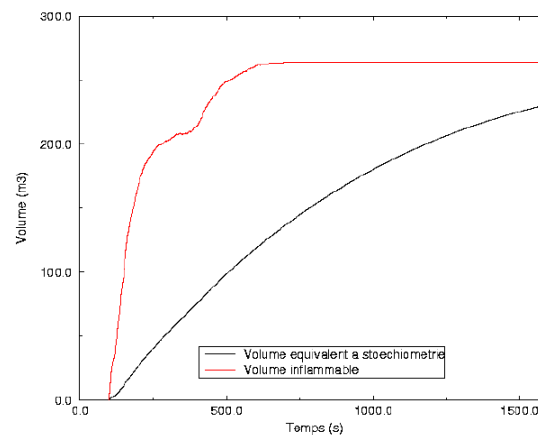


T=400s



Évolution de la fraction volumique d'hydrogène en fonction du temps

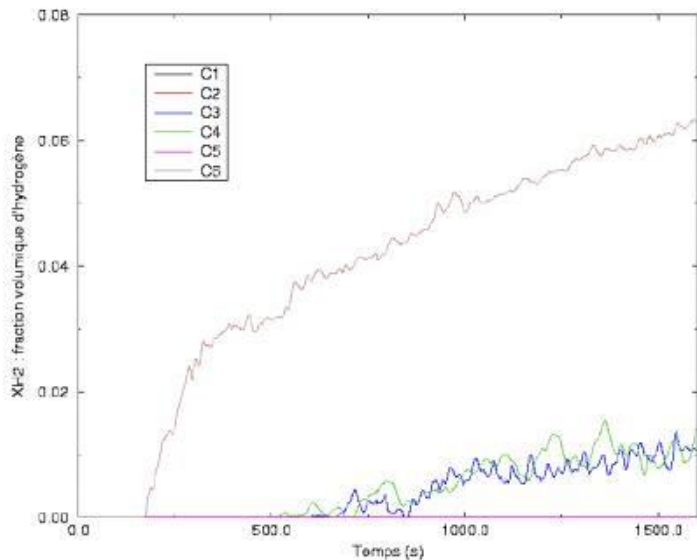
T=700s



T=1000s

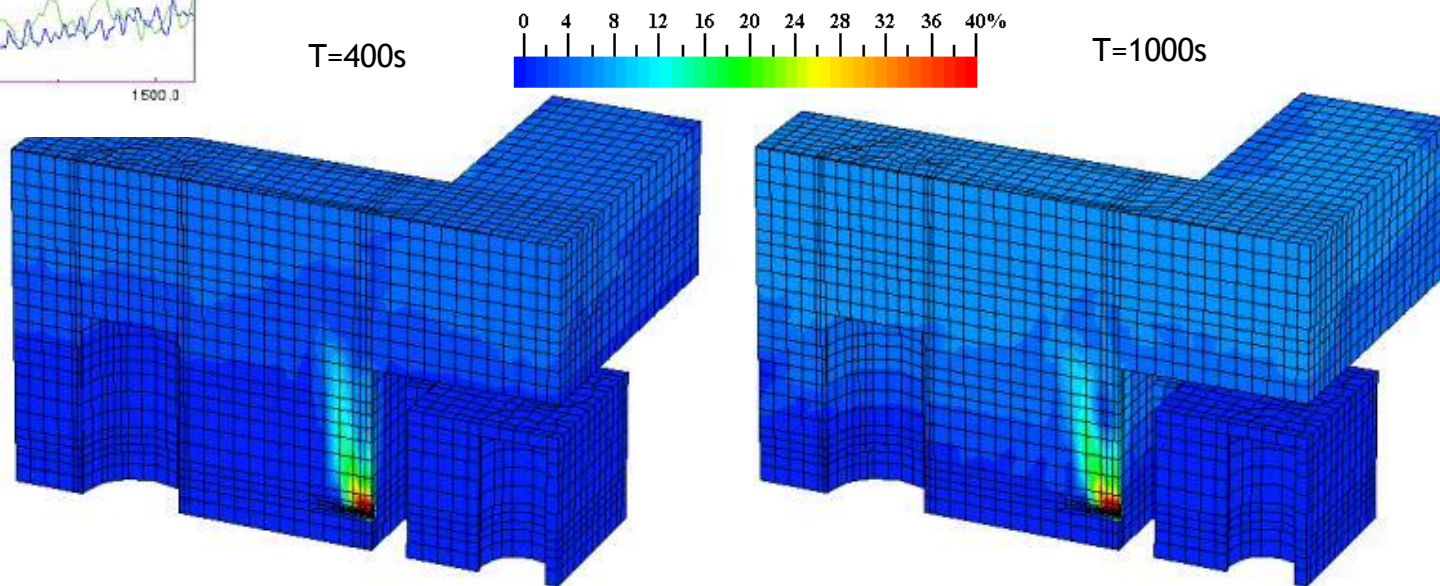
Évolution du volume inflammable et du volume stœchiométrique équivalent au cours du temps

## Scénario 5 : faible injection d'hydrogène, fuite située dans le local 312 et dirigée orthogonalement au mur (porte 2 fermée)

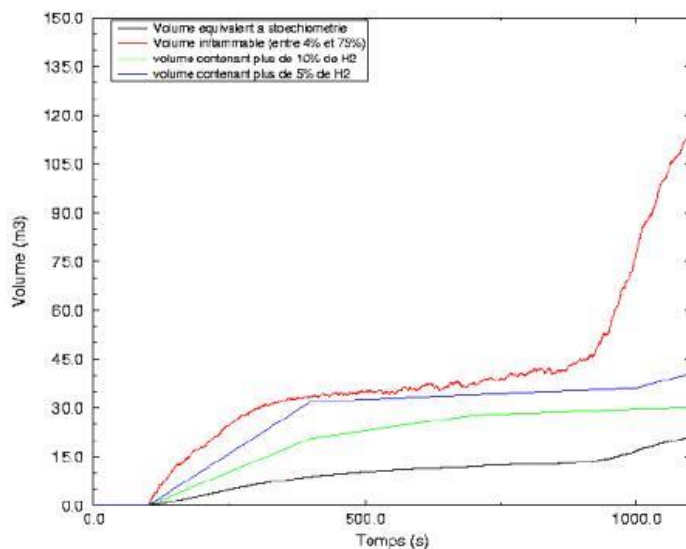


Concentration de l'hydrogène en haut des pièces.  
Concentration néanmoins faible.  
Regarder l'effet sur des temps d'injection plus longs.  
-> Scénarii avec faible débit pas : pas de calcul de combustion !

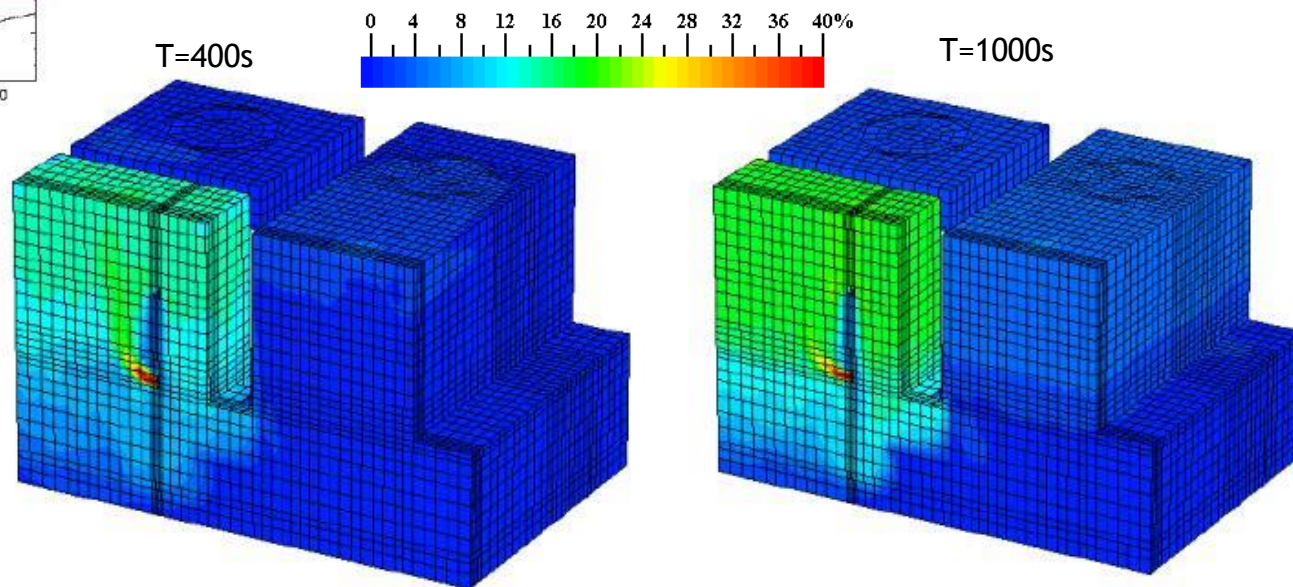
Évolution de la fraction volumique d'hydrogène en fonction du temps



## Scénario 6 : faible injection d'hydrogène, fuite située dans le local 313 et dirigée orthogonalement au mur (porte 2 fermée)



Concentration assez importante de l'hydrogène en haut de la pièce 313,  
Mais rappel : - les portes 1 et 2 sont fermées, la pièce 313 est « isolée »  
- les points d'allumage sont situés dans les locaux 315 et 312, la concentration d'hydrogène dans ces locaux y est très faible (<1%).



- **Calculs de combustion**

Plusieurs calculs ont été effectués : variation du temps d'allumage, de la position d'allumage

Scénario présenté ci-après : SCEN4 + allumage à 700s (injection d'hydrogène pendant 10min) en position A1.

**Récapitulatif des conditions initiales et aux limites :**

-Instant d'allumage :  $t=700s$ , qui correspondant à l'injection d'hydrogène à 9g/s pendant 10min.

-K0 : estimé cette fois-ci à partir d'une corrélation faisant intervenir la composition du mélange initial.

-Mélange inflammable obtenu à partir du scénario 4 (injection dirigée horizontalement et parallèlement au mur)

-Nécessité de **projeter** la fraction volumique d'hydrogène issue du calcul de distribution (maillage fin) sur le maillage plus grossier utilisé pour le calcul de combustion au niveau de la zone d'étude.

-Zone d'allumage : A1.

-Le reste des locaux : Air uniquement.

- $P_{ini} = 1.015 \cdot 10^5$  Pa.

- $T_{ini} = 300$  K.

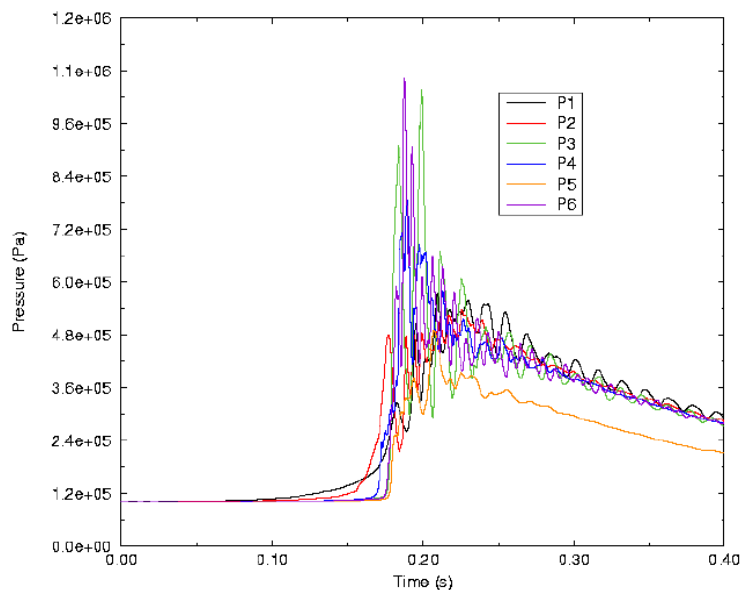
-Les gaz sont supposés initialement au repos.

-Les pertes thermiques par convection et rayonnement ne sont pas modélisées.

-Les parois sont supposées adiabatiques.

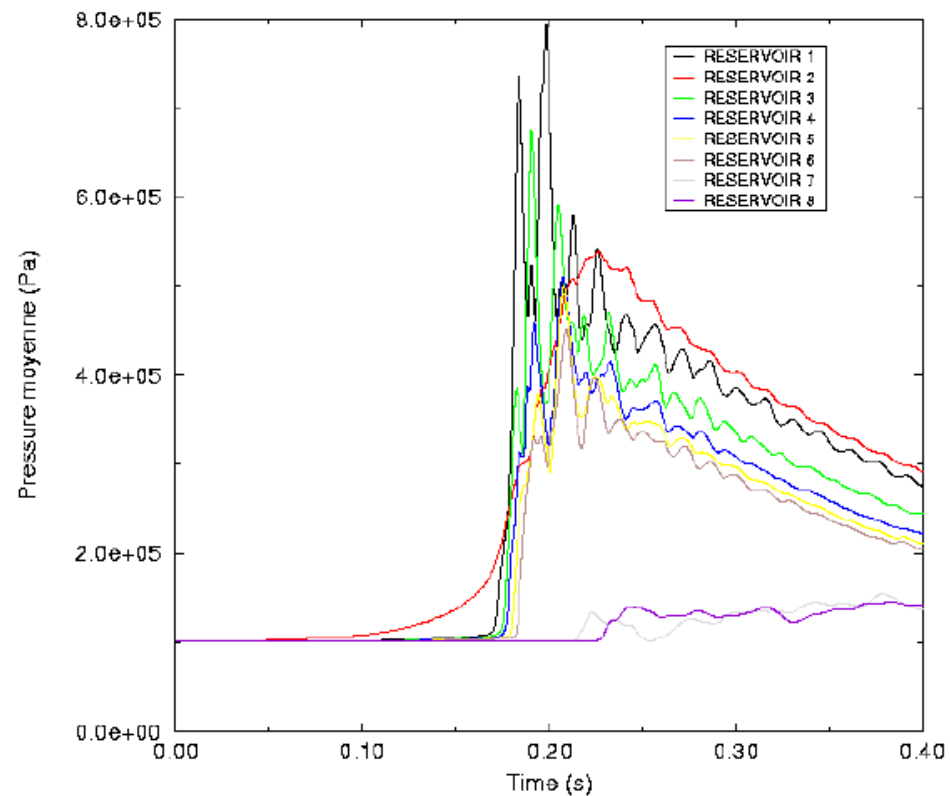
## Scénario 4 : forte injection d'hydrogène, fuite située dans le local 312 et dirigée horizontalement et parallèlement au mur puis allumage à 700S en A1

Pression mesurée au niveau des capteurs 1 à 6 (zone d'explosion)



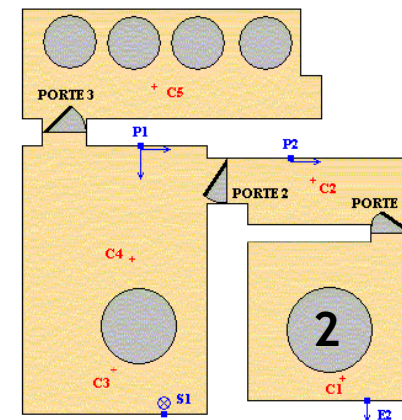
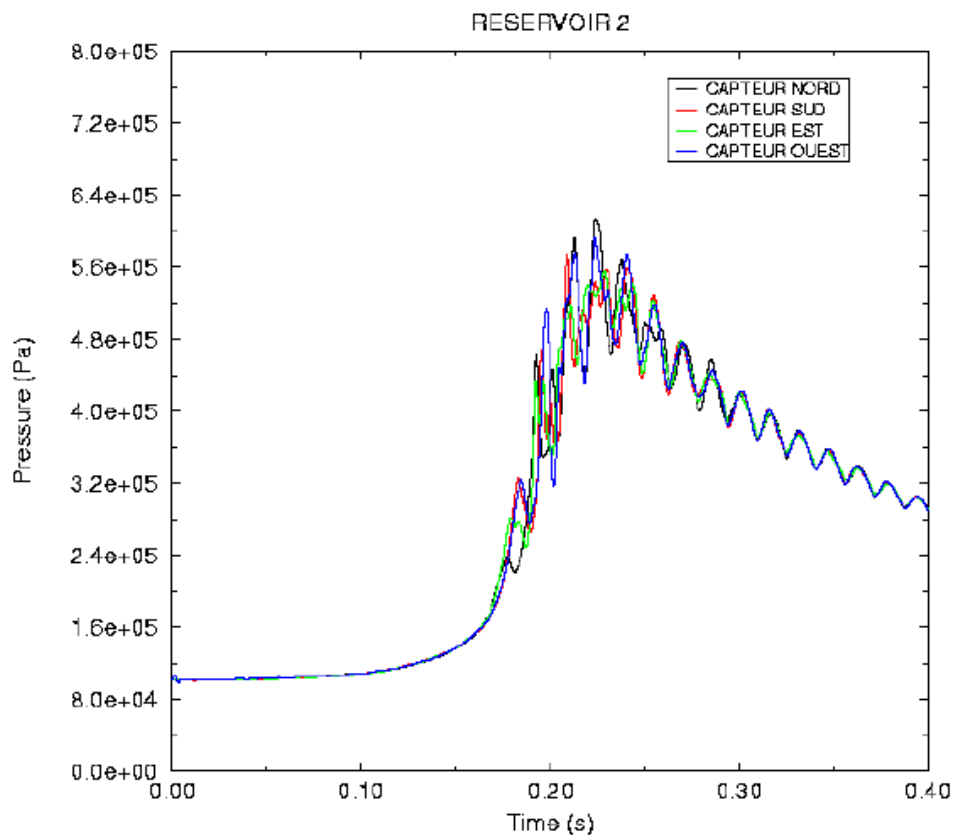
- La pression maximale dans la zone d'étude atteint tout de même 10bars.
- Dans le reste des locaux, les surpressions observées varient entre 0.2 et 1 bar.

Pression moyenne calculée au niveau des réservoirs



**Scénario 4 : forte injection d'hydrogène, fuite située dans le local 312 et dirigée horizontalement et parallèlement au mur puis allumage à 700S en A1**

**Pression subie par le réservoir 2 au niveau des quatre points cardinaux**



**Pression non uniforme autour du réservoir**

**Description du réservoir 2:**

- Réservoir appartenant au système RCV, système de refroidissement (RCV002BA)
- Contenu : fluide primaire

**Cas très intéressant d'un point de vue de sûreté !**

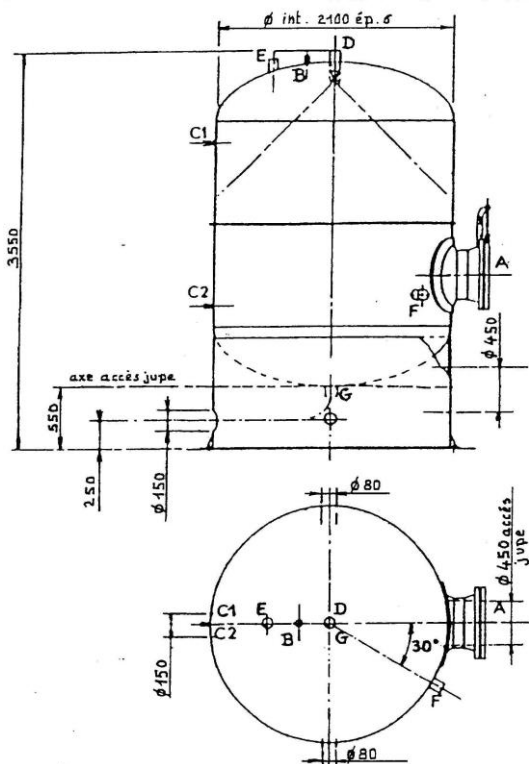
**Question : résiste-t-il aux surpressions calculées?**



## 5. Étude de la tenue mécanique d'un des réservoirs

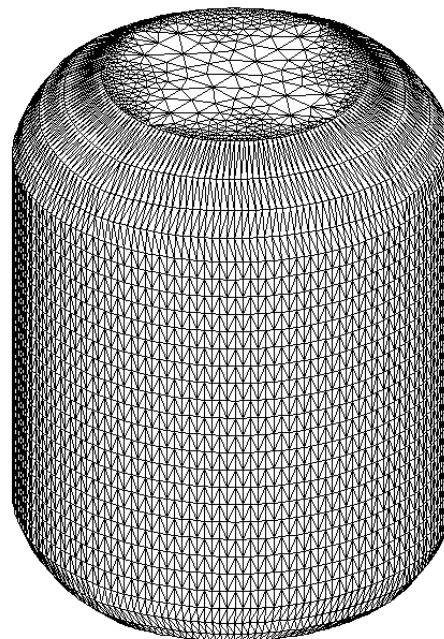
Calcul de structure réalisé via un autre code, néanmoins :

- Prise en compte de la géométrie réelle du réservoir
- Création du maillage solide avec CAST3M
- Projection du chargement dynamique issu du maillage fluide sur le maillage solide (utilisation de l'opérateur PROI)
- Transmission des données CAST3M vers un fichier data

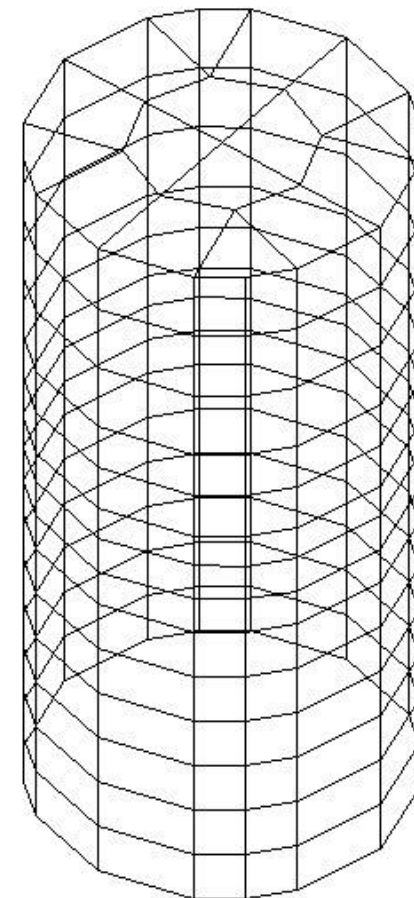


Géométrie réelle du réservoir

Maillage solide du réservoir



Maillage fluide du réservoir



## Hypothèses du calcul de flambage du réservoir :

- Blocage vertical du cercle inférieur de la virole.
- Réservoir vide (le chargement hydrostatique d'un éventuel fluide a peu d'influence).
- Chargement extérieur issu des résultats de TONUS.
  - Chargement non-uniforme correspond à une source suffisante d'instabilités (aucune imperfection géométrique n'est modélisée).
- Matériau : acier inoxydable Z2 CN18-10 (encore appelé 304L) (allongement à rupture de 40%).

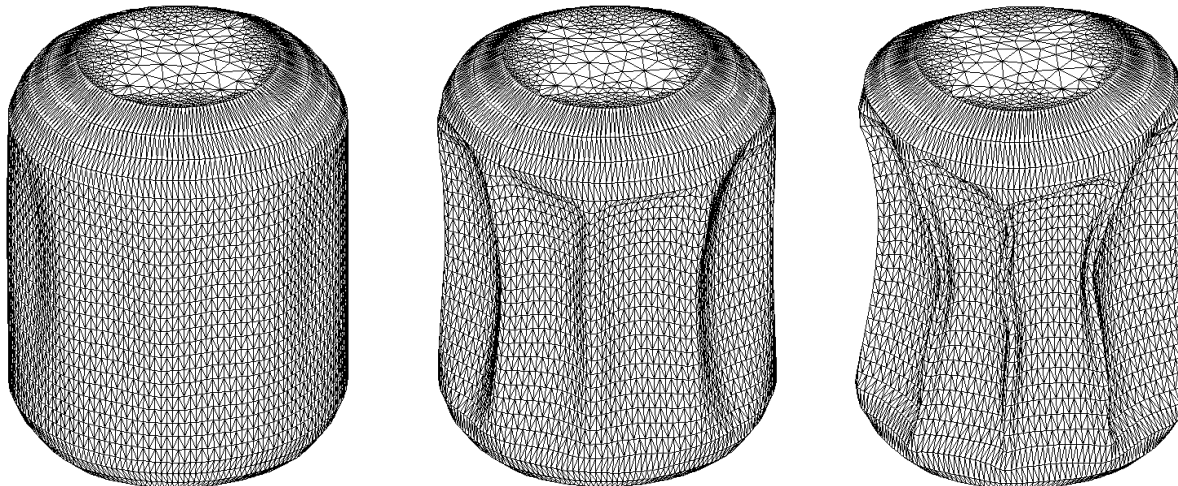
## Résultats

Déformation à rupture de l'acier de 40% atteinte au bout de  $t=219\text{ms}$ . (Pression moyenne  $\approx 4.1\text{bars}$ ).

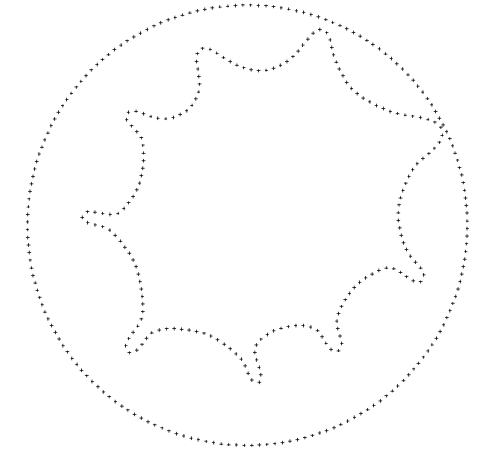
Déplacements radiaux restent limités à quelques centimètres jusqu'à  $t=210\text{ms}$ , puis deviennent très élevés.

Conclusion : rupture certaine du réservoir avec les hypothèses retenues.

Déformés du réservoir (amplification x1) aux instants  $t=208\text{ms}$ ,  $t=214\text{ms}$  et  $t=218\text{ms}$



Déformé de la section du réservoir à mi-hauteur à  $t=218\text{ms}$  et section initiale circulaire





## 6. Conclusion

### Scénarii 1 et 2 :

- Résultats peu différents entre les 2 scénarii (courbes des capteurs).
- Comportement du mélange → détonation (vitesse de propagation dans le local 317 supersonique)
- Maillage assez grossier → beaucoup d'obstacles non modélisés

### Calculs de dispersion des scénarii 3 à 6 :

- Les résultats semblent cohérents d'un point de vue physique.
- Les instabilités mesurées au niveau des capteurs sont dues principalement au choix du pas de temps assez élevé. Ce choix a été motivé par la durée du temps de calcul (plusieurs dizaines de jours).
- Des instabilités spatiales apparaissent au niveau des bouches d'extraction et de soufflage. Le raffinement local choisi n'est pas idéal. Un maillage plus fin serait appréciable mais cela augmenterait très nettement les temps de calculs.

### Calculs de combustion des scénarii 3 et 4 :

- Preuve de la faisabilité d'enchaîner un calcul de combustion à partir de résultats de calculs de dispersion.
- Les résultats semblent en accord avec ceux trouvés dans le cas enveloppe à moindre intensité (mélange initial moins riche).

### Étude de la tenue mécanique du réservoir 2

- Étape primordiale : projection chargement de pression obtenu à partir du maillage fluide sur le maillage plus fin de la peau du réservoir
- Réalisation d'un calcul de flambage conduisant à la conclusion d'une rupture du réservoir

Distribution → Combustion → Structure

**(3x) Hélas :** le calcul de structure n'a pas été réalisé avec CAST3M !