



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

*Medida del número de Mach en un tubo de
choque para la caracterización dinámica de
captoreadores de presión aeronáuticos*

Autor:

Del Campo Estrada, Rodrigo

Responsable de Intercambio en la Uva:

Giménez Olavarria, Blanca

Universidad de destino

ENSAM

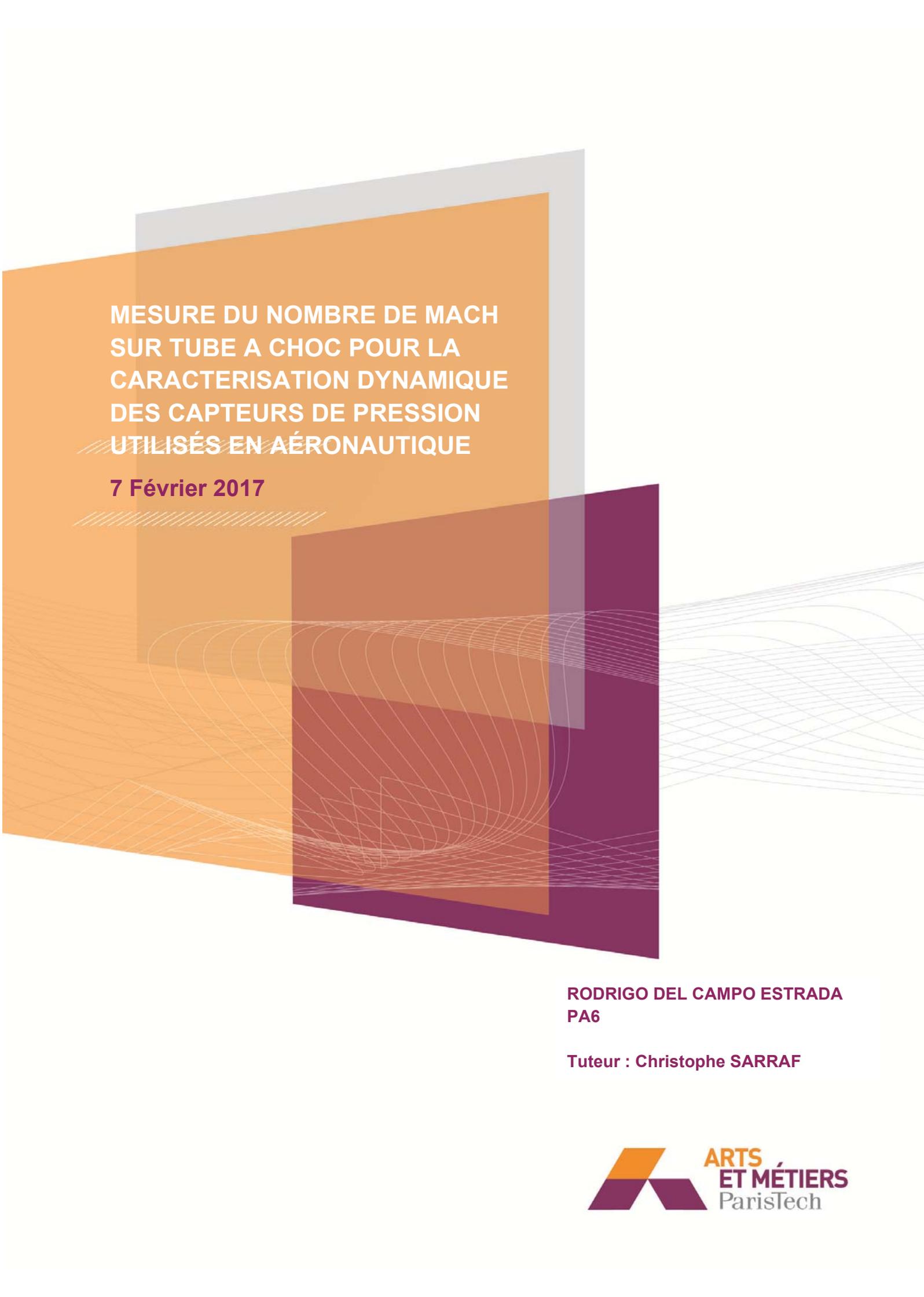
Valladolid, Septiembre 2017.

Resumen:

El proyecto trata sobre el estudio del comportamiento de los fluidos compresibles en el interior de un tubo de choque y las condiciones de formación de las ondas de choque y sus fenómenos asociados. Se presenta una investigación bibliográfica sobre la aerodinámica de los fluidos compresibles. La parte central del proyecto ha consistido en la concepción CAD en Catia V5 de un tubo de choque a petición de la empresa ARIANE GROUP (antiguamente Airbus Safran Launchers) y la simulación CFD del mismo para diferentes condiciones iniciales con ayuda del código de cálculo NS3D "Star-CCM+".

Palabras clave:

Mach, Tubo de choque, Fluidos, Aerodinámica, CFD



**MESURE DU NOMBRE DE MACH
SUR TUBE A CHOC POUR LA
CARACTERISATION DYNAMIQUE
DES CAPTEURS DE PRESSION
UTILISÉS EN AÉRONAUTIQUE**

7 Février 2017

**RODRIGO DEL CAMPO ESTRADA
PA6**

Tuteur : Christophe SARRAF

- 1. RESUMÉ DU PROJET**
 - 1.1 Contexte
- 2. INTRODUCTION ET CONCEPTS PREALABLES**
 - 2.1 Définition du tube à choc
 - 2.2 Fonctionnement du tube à choc
- 3. MODELE THEORIQUE**
 - 3.1 Conditions initiales
 - 3.2 Détermination du Mach onde de choc (Ms_1)
 - 3.3 Etat (2) en aval du choc
 - 3.4 Etat (3)
 - 3.5 Mach limite
 - 3.6 Temps utile d'essai
- 4. CONCEPTION MECANIQUE DU TUBE A CHOC**
 - 4.1 Consignes de conception
 - 4.2 Solution proposée
 - 4.3 Filetage haute pression
 - 4.4 Mécanisme de surpression de la membrane
 - 4.5 Calcul de l'épaisseur du tube
 - 4.6 Analyse éléments finis sur CATIA
- 5. SIMULATION CFD SUR STAR-CCM+ (v.10)**
 - 5.1 Création de la géométrie et régions
 - 5.2 Maillage 3D et 2D
 - 5.3 Affichage de résultats

1. RESUMÉ DU PROJET

Contexte

La caractérisation dynamique des capteurs de pression aéronautiques (moteurs d'avions ou de fusées) va permettre la réalisation des mesures de pression rapidement variables. À fin de connaître la dynamique des capteurs, ils sont calibrés sur tube à choc.

Ce projet d'expertise consiste à l'étude des tubes à choc, les conditions de formation des ondes de choc et les phénomènes associés.

Le déroulement du projet incluse des différents étapes, d'abord une étude bibliographique sur les phénomènes à analyser à fin d'obtenir une base en l'aérodynamique des fluides compressibles et plus concrètement en notre sujet d'étude. On a continué à faire la conception d'un tube à choc à partir des données préalables, et au même temps on a réalisé la simulation CFD du tube à choc à concevoir en utilisant le logiciel Star-CCM+.

2. INTRODUCTION ET CONCEPTS PREALABLES

Définition tube à choc

Un tube à choc est constitué par un tube cylindrique, de section circulaire ou carré (circulaire dans notre cas), fermé à ses deux extrémités, et divisé en deux compartiments initialement isolés l'un de l'autre. Le compartiment à basse pression, contient un gaz de pression P_1 et température T_1 , on appelle ce gaz comme « gaz de travail ». Dans l'autres coté, le compartiment haute pression est rempli d'un gaz de pression P_4 et température T_4 , appelé « gaz de travail ».

Le tube à choc est un moyen simple de réaliser des écoulements supersoniques, il va nous aider à simuler les écoulements hypersoniques qui se distinguent par une enthalpie totale élevée, et aussi pour étudier les conditions de formation des ondes de choc ainsi ses phénomènes de propagation.

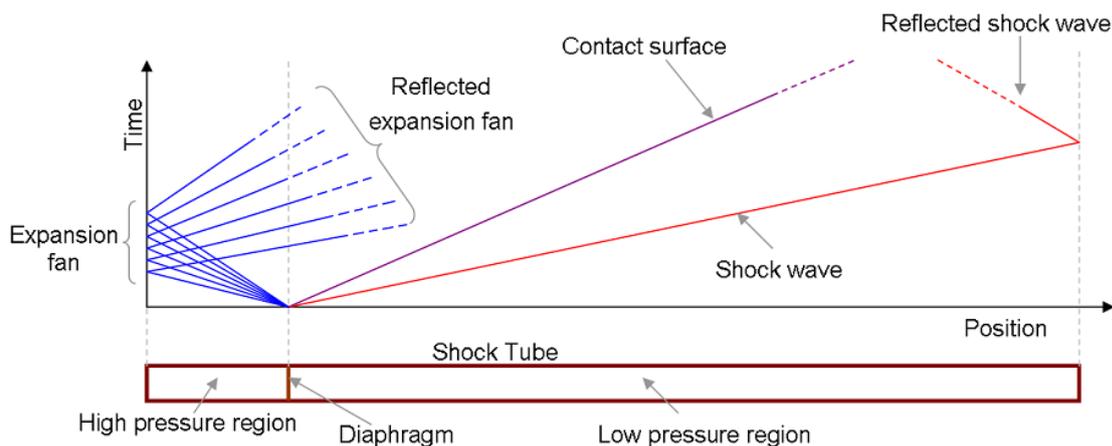


Figure 1 Tube à choc

Fonctionnement tube à choc

Initialement les deux gaz sont séparés par une paroi (membrane), ou diaphragme. À l'instant $t = 0$, on supprime instantanément (idéalement) la membrane par rupture, le problème sera de déterminer les phénomènes dans le tube pour tout temps d'essai $t > 0$.

La suppression de la membrane fait que les deux gaz à pressions très différentes sont séparés par une **surface de contact**. Cette surface de contact se déplace vers le tube à basse pression et se comporte comme un piston mécanique qui provoquera :

- Une onde de choc dans le gaz de travail (tube à basse pression) qui se dirige vers la droite comme on peut voir dans la figure ci-dessus (rouge).
- Ondes de détente dans le gaz moteur qui se dirigent vers la gauche (bleues).

3. MODÈLE THEORIQUE

Le modèle théorique que l'on va présenter va nous permettre de connaître toutes les propriétés du fluide du tube à chaque instant et pour les différents sections (X,t) , à partir des conditions initiales à chaque coté du tube, dans le gaz moteur comme le gaz de travail.

À partir de $t > 0$, l'onde de choc Ω_1 se propage dans la chambre à basse pression, en provoquant une transition de l'état (1) vers l'état (2) à déterminer. Au même temps une détente des ondes simples (η) se propage dans la chambre haute pression, qui passe de l'état (4) à l'état (3). Comme on peut voir sur le diagramme ci-dessous les états (3) et (2) inconnus, sont séparés par la surface de contact (Σ) .

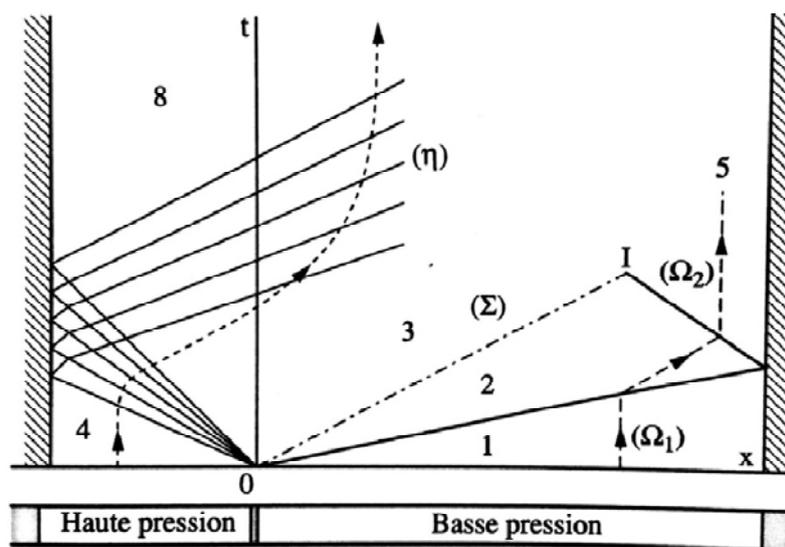


Figure 2 Diagramme (x,t) tube à choc

Cette surface de séparation satisfait d'un part et de l'autre la continuité de pressions et de vitesses. Pourtant on formule ces conditions :

$$P_2 = P_3$$

$$U_2 = U_3$$

Conditions initiales

Les données à partir lesquels on établie notre étude seront les états dans les deux parties du tube à choc, ainsi la nature des gaz (dans notre simulation on supposera le gaz de travail et moteur de la même nature).

Définition des conditions initiales :

- État 1 : P_1, T_1, u_1 (gaz en repos), γ_1 .
- État 2 : P_4, T_4, u_4 (gaz en repos), γ_4 .

Détermination du Mach onde de choc (Ms_1)

A partir des états initiaux (1) et (4), on peut calculer le nombre de Mach de l'onde de choc en fonction du rapport de pressions avec la relation suivante :

$$\frac{P_4}{P_1} = \frac{\frac{\gamma_1 - 1}{\gamma_1 + 1} \left(\frac{2\gamma_1}{\gamma_1 - 1} Ms_1^2 - 1 \right)}{\left[1 - \frac{\gamma_4 - 1}{\gamma_1 + 1} \frac{a_1}{a_4} \left(Ms_1 - \frac{1}{Ms_1} \right) \right]^{\frac{2\gamma_4}{\gamma_4 - 1}}}$$

La connaissance de Ms_1 permet définir entièrement l'état (2) à l'arrière de l'onde de choc.

Etat (2) en aval du choc

- Célérité du choc

$$D_1 = a_1 * Ms_1$$

- Le rapport de pression

$$\frac{P_2}{P_1} = 1 + \frac{2\gamma}{\gamma + 1} (Ms_1^2 - 1)$$

- Le rapport de température

$$\sqrt{\frac{T_2}{T_1}} = \sqrt{\frac{P_2 (\gamma - 1) \frac{P_2}{P_1} + (\gamma + 1)}{P_1 (\gamma + 1) \frac{P_2}{P_1} + (\gamma - 1)}} = \frac{a_2}{a_1}$$

- Vitesse de l'écoulement

$$u_2 = V_{\text{piston}} \text{ (vitesse surface de contact)}$$

Etat (3)

Le passage des ondes de détente est un processus isentropique, alors on utilise les équations isentropiques pour obtenir l'état (3) à partir de (4), un utilisant de la même façon les équations de continuité de vitesse et pression de la surface de contact.

$$\frac{\rho_3}{\rho_4} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\frac{1}{\gamma}}$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$\frac{a_3}{a_4} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}}$$

On rappelle :

$$P_3 = P_2$$

$$U_3 = U_2$$

Mach limite

Si le rapport de pression entre les états initiaux (4) et (1) devient très grand, le nombre de Mach (M_{s1}) tend vers une valeur que l'on appelle $M_{s(\text{lim})}$. Cette valeur limite va annuler le dénominateur de la relation donné avant.

$$M_{s(\text{lim})} = \frac{1 + \sqrt{1 + 4\alpha^2}}{2\alpha}$$

$$\text{Avec : } \alpha = \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \frac{a_1}{a_4}$$

Le paramètre α dépend de la nature du gaz de travail et moteur, de la même façon on constate que $M_{s(lim)}$ est d'autant plus grande que α est plus petit. Par conséquent un gaz moteur avec une masse molaire plus réduite aura une vitesse du son (a_4) plus élevée ce qui provoque une diminution de α et la respective augmentation du $M_{s(lim)}$. Dans notre cas le gaz moteur et le gaz de travail est de l'air.

Gaz moteur	Masse molaire (Kg/mole)	γ	$M_{s(lim)}$
Air	0,029	1,4	6,16
Hélium	0,004	1,667	10,67
Hydrogène	0,002	1,407	22,84

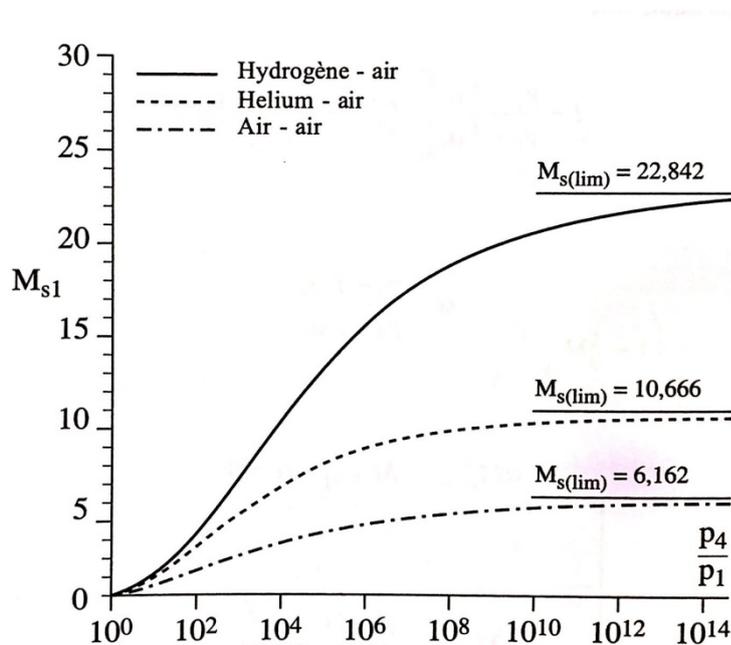


Figure 3 Graphique Mach limite pour différents gaz moteur

Temps utile d'essai

Les capteurs de mesure sont situés à l'abscisse $x=L$ en étant $x=0$ la position de la membrane au début. On définit le temps utile d'essai (τ) comme la période de temps compris entre le passage de l'onde de choc (Ω_1) et la surface de séparation (η).

$$\tau = \frac{L}{u_2} - \frac{L}{D_1}$$

Avec D_1 : célérité du choc.

4. CONCEPTION MÉCANIQUE DU TUBE À CHOC

Consignes de conception

Le tube à choc à concevoir a les consignes suivantes :

- Longueur total de 1 m.
- Rapport longueur HP et longueur BP un tiers.
- Trois capteurs de pression situés un au bout du tube, autre à 20 mm et le troisième à 100 mm de celui-ci.
- Situation de vie : le tube à choc doit être capable de fonctionner avec sécurité aux niveaux de HP de l'ordre de 250 bars.
- DTC : « Design To Cost »

Solution proposée

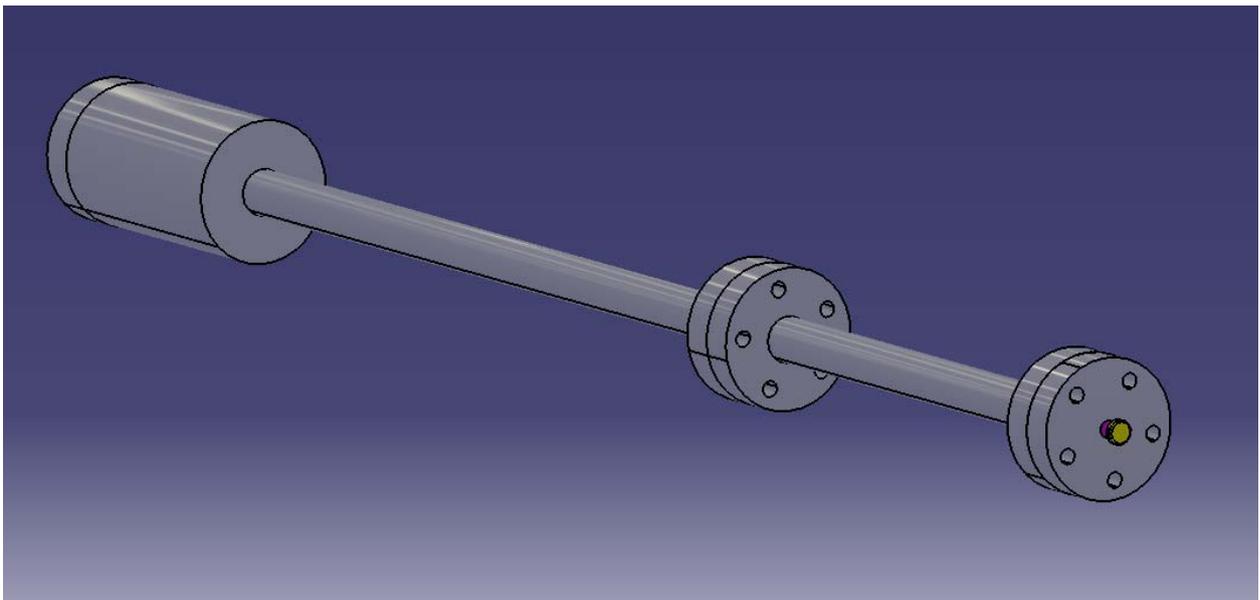


Figure 4 Conception CAO

Le tube à choc est constitué des parties suivantes :

- Tube BP (x1)
- Tube HP (x1)
- Tube capteurs (x1)
- Plateau membrane (x3)
- Plateau extrémité (x2)
- Système étanchéité BP (x1)
- Aguille (x1)
- En plus des éléments normalisés

Filetage haute pression

Le montage des tubes et des disques en acier est réalisé grâce à vises de haute pression. En matière de haute pression, on utilise généralement pour ces applications deux types de filetage :

- Le filetage métrique de pas fin : Identifié par le diamètre de la partie mâle du raccord il s'agit d'un raccord avec un filetage fin.
- Le filetage gaz : c'est celui que l'on trouve sur les réseaux d'eau domestiques. Son utilisation est quasiment générale en tuyauterie et robinetterie.

Tableau de correspondance des filetages gaz et métriques



gaz	femelle	mâle	métrique	femelle	mâle
1/8" (5 x 10)	8,566 mm	9,728 mm	M12 x 1,5	10,38 mm	12 mm
1/4" (8 x 13)	11,445 mm	13,157 mm	M14 x 1,5	12,38 mm	14 mm
3/8" (12 x 17)	14,950 mm	16,662 mm	M16 x 1,5	14,38 mm	16 mm
1/2" (15 x 21)	18,631 mm	20,955 mm	M18 x 1,5	16,38 mm	18 mm
3/4" (21 x 27)	24,117 mm	26,441 mm	M21 x 1,5	19,38 mm	21 mm
1" (26 x 34)	30,291 mm	33,249 mm	M22 x 1,5	20,38 mm	22 mm
1.1/4" (33 x 42)	38,952 mm	41,910 mm	M24 x 1,5	22,38 mm	24 mm
1.1/2" (40 x 49)	44,324 mm	47,803 mm	M27 x 1,5	25,38 mm	27 mm
2" (50 x 60)	56,656 mm	59,614 mm	M30 x 1,5	28,38 mm	30 mm

Figure 5 Tableau filetage

On a choisi une métrique de pas fin (M22 x 1,5) qui va s'adapter à nos requis géométriques.

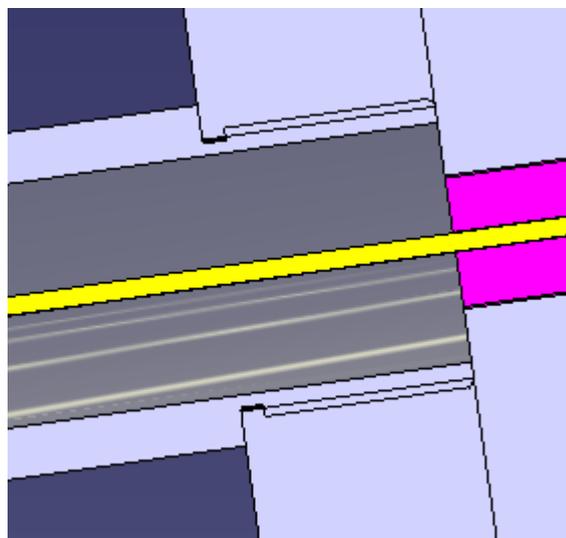


Figure 6 Détail filetage CAO

Mécanisme de suppression de la membrane

On a pensé à faire un système de suppression de la membrane simple, manuelle et avec un fonctionnement mécanique, parce que la longueur du tube n'est pas très importante et le petit diamètre présente des difficultés pour l'installation d'un mécanisme plus complexe.

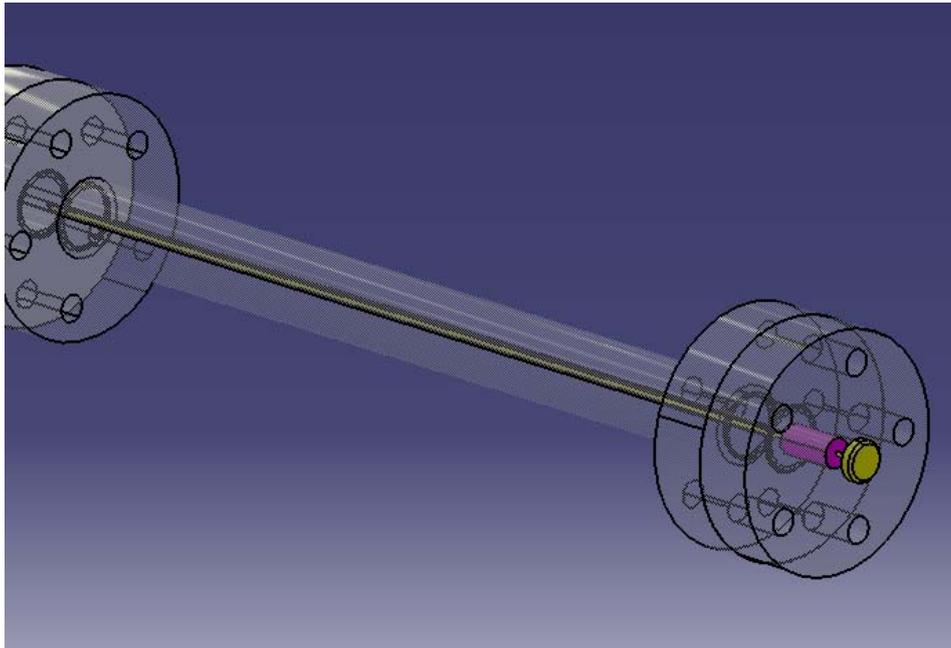


Figure 7 Détail mécanisme suppression membrane CAO

Une aiguille dans la chambre à haut pression va casser la membrane par action mécanique comme se montre sur la figure ci-dessus. Il y aura un dispositif d'étanchéité entre l'aiguille et le bout du tube qui n'a pas été conçu (pièce violette).

Calcul de l'épaisseur du tube

La relation suivante nous donne le coefficient l'épaisseur du tube nécessaire pour à fin de garantir un coefficient de sécurité déterminé.

$$e = \frac{n * P * r}{\sigma_e}$$

Avec :

- n : coefficient de sécurité
- P : pression interne du tube
- r : rayon interne du tube
- σ_e : limite élastique de l'acier

Epaisseur calculé égal à 3,6 mm, on prend 4 mm pour simplifier et sur dimensionner plus.

Diamètre extérieur 26 mm

Analyse éléments finis sur CATIA

L'analyse en éléments finis sur CATIA vérifie nos hypothèses et calculs analytiques dès point de vue résistent. On modélise les charges appliqués sur le tube à choc ainsi comme les appuis. Dans cette première conception du tube on n'a pas étudié la convenance des appuis et son optimisation, par conséquent on a fixé trois encastremets où la masse est plus importante (les deux extrémités du tube et la membrane) à fin de supprimer trois degrés de liberté chaque un.

La taille de maille de référence est 1,5 mm, du type linéal (cela n'était possible de mailler en parabolique par des raisons de mémoire disponible).

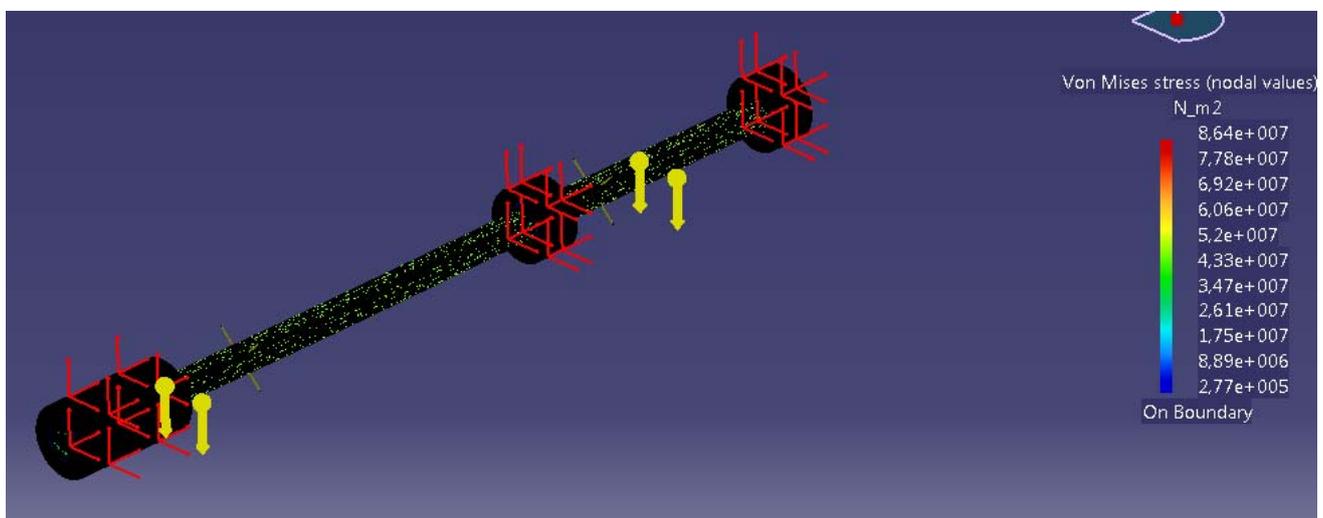


Figure 8 Solution Von-Misses

La solution de Von-Misses après la simulation nous donne une valeur critique de $87 \cdot 10^6$ N/m², qui est très inférieure à la limite élastique de l'acier. On travaille dans ce cas là avec un coefficient de sécurité proche à 3. On remarque, après localiser ce point critique dans le modèle, que cette valeur correspond au point critique à cause du maillage (le maillage ne peut pas s'adapter correctement à la géométrie).

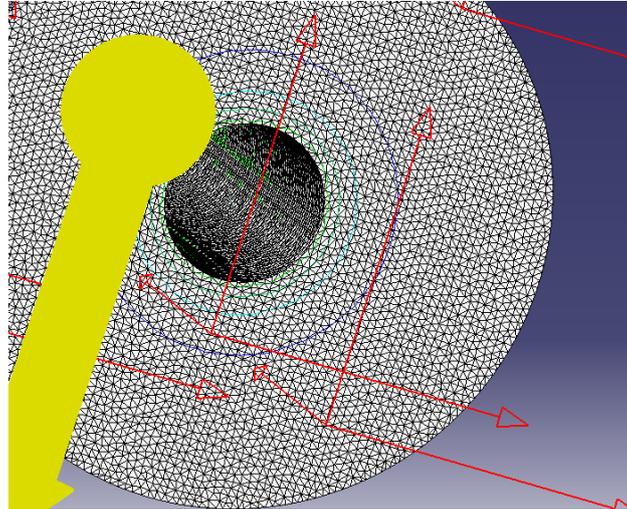


Figure 9 Détail maillage CAO

Les déplacements du tube ont des ordres de grandeur négligeables, on peut le expliquer par l'importance de la pression appliquée (axial-symétrique) par rapport à la pesanteur propre du tube.

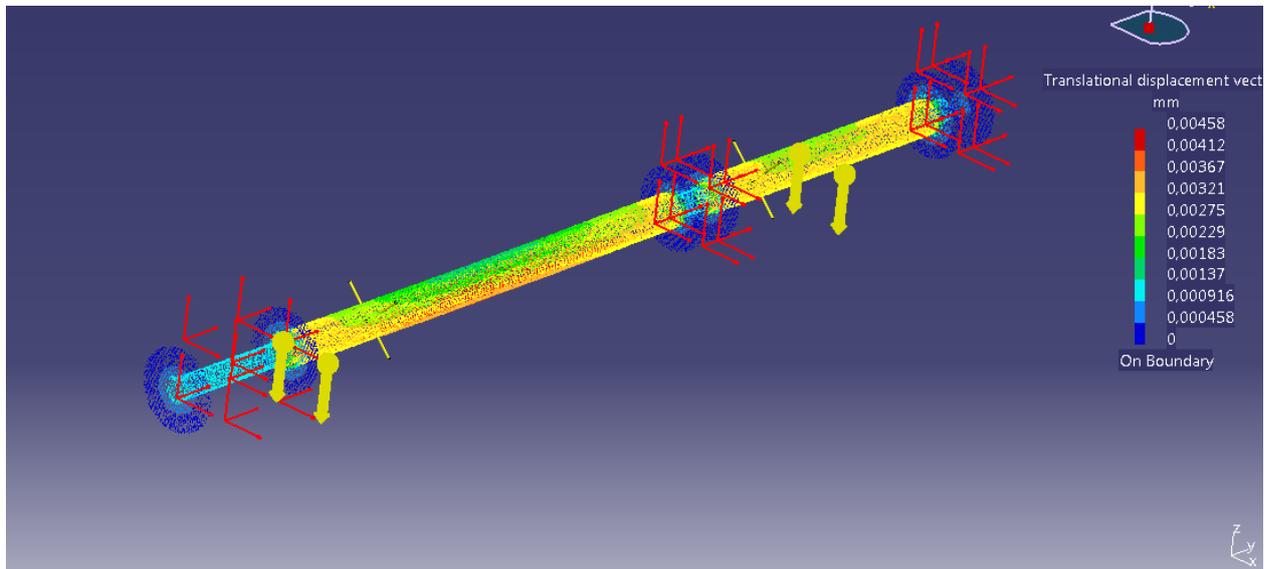


Figure 10 Solution déplacements

5. SIMULATION CFD SUR STAR-CCM+ (v.10)

On a fait la simulation de tube à choc à concevoir sur star CCM, avec l'objectif de faire une comparaison avec les résultats du modèle théorique. A continuation on va exposer tout le déroulement de la simulation ainsi les paramètres et modèles considérés et son justification.

1. Création de la géométrie et régions

Sur le 3D-CAD model on va générer la géométrie, justement deux parties (Parts), une par chaque tube (Haut et basse pression). Après on définira les régions fluides à partir de cette géométrie.

Parts >> « Body1 et Body 2 »>> Assign Parts to Regions

Sélection des options :

- ✓ One boundary per part surface
- ✓ Create interfaces from contacts
- ✓ One curve for all part curves
- ✓ Create interfaces from contacts (de cette façon on va créer la surface de séparation entre la partie HP et BP).

Sélection des conditions aux limites voulues :

Regions >> Boundaries

On va imposer condition de parois en toutes les surfaces sauf la surface de contact.

2. Maillage 3D et 2D

On maille le tube avec un maillage en carreaux (Trimmer) et en appliquant le mode « Prism Layer Mesher », qui affine le maillage proche à la surface et va nous permettre simuler plus précisément les pertes autour des parois.

Paramètres de la maille :

- ✓ Base size : 0,01 mm
- ✓ Surface minimum size : 5%
- ✓ Relative target size : 5%

Génération du volume maillé

Onglet Mesh >> Generate Volume Mesh

Visualisation du maillage (Scene)

Scenes >> new scene >> Mesh

Génération du maillage 2D

Onglet Mesh >> Convert 2D (Selection de « Delete 3D regions after conversion »)

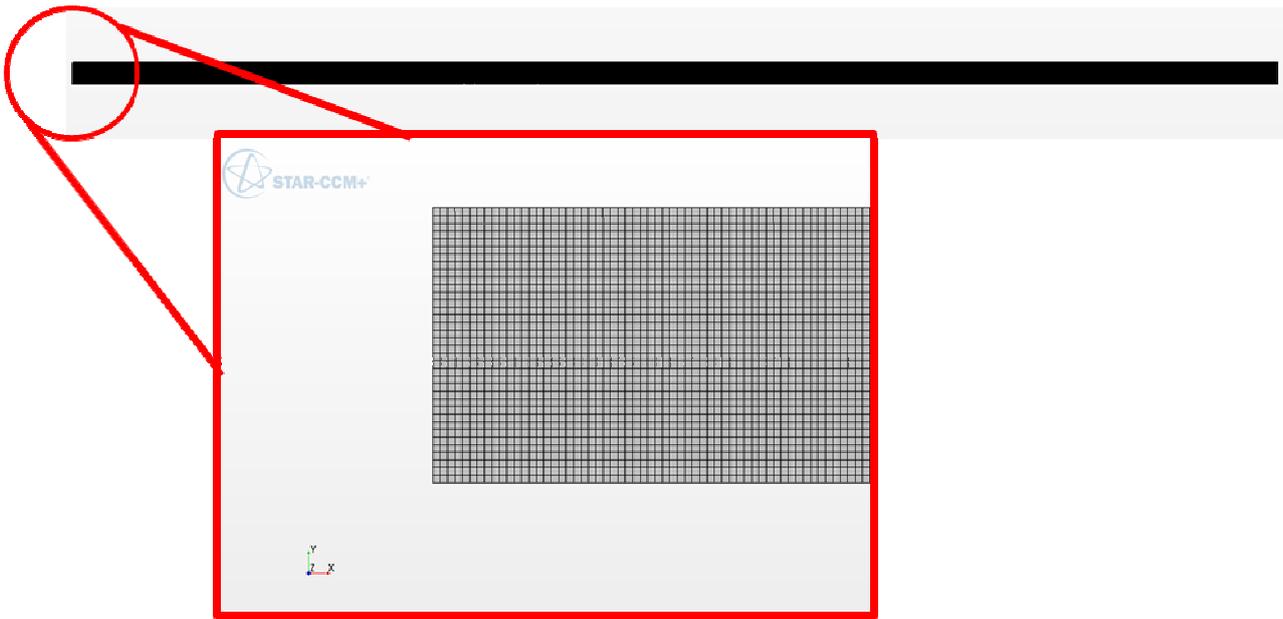


Figure 11 Maillage CFD

Affichage de résultats

Dans ces plots à pas de temps déterminé, on peut valiser le modèle théorique, ainsi comme voir les propriétés du fluide qui nous montrent la position de l'onde de choc et la surface de séparation à chaque instant. Particulièrement intéressant à fin d'identifier la surface de séparation, ce sont les plots de température et d'enthalpie totale, puisque on remarque des variations très importantes en positions concrètes du tube à choc, qui va permettre d'étudier la surface de séparation avec précision lorsque l'essai ou la simulation se déroule.