



CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES



Sciences Techniques Jeunesse

ASSOCIATION NATIONALE SCIENCES TECHNIQUES JEUNESSE

Secteur ESPACE

16, Place Jacques Brel - 91130 RIS ORANGIS

Téléphone : 01-69-02-76-10 / Télécopie : 01-69-43-21-43

E-Mail : espace@anstj.mime.univ-paris8.fr

Web: <http://anstj.mime.univ-paris8.fr>

Edition Octobre 1999

Tube de Pitot (Projet Cyrius club ESO)

Note technique ANSTJ

- Sommaire -

| | |
|--------------------|---|
| Remerciements..... | 4 |
| Preliminaires..... | 5 |

A. ETUDE THEORIQUE

| | |
|--|----|
| 1. Généralités..... | 7 |
| 1.1. Introduction..... | 7 |
| 1.2. Principe du tube de Pitot..... | 7 |
| 2. Mesures des pressions..... | 8 |
| 2.1. Mesure de la pression statique..... | 8 |
| 2.1.1. Description..... | 8 |
| 2.2.2. Coefficient de pression..... | 9 |
| 2.2. Mesure de la pression d'arrêt..... | 12 |
| 3. Imprécision sur les mesures..... | 12 |
| 3.1. Nature de l'écoulement..... | 12 |
| 3.1.1. Compressibilité..... | 12 |
| 3.1.2. Nombre de Mach..... | 13 |
| 3.1.3. Nombre de Reynolds - viscosité..... | 13 |
| 3.1.4. Gradient transversal de vitesse..... | 13 |
| 3.2. Angle d'incidence..... | 14 |
| 3.3. Etat de surface de 13 sonde..... | 14 |
| 3.4. Temps de réponse (retard manométrique)..... | 14 |
| 3.5. Altitude..... | 15 |

B. CONCEPTION

| | |
|--|----|
| 1. Emplacement optimal du tube de Pitot sur la fusée..... | 16 |
| Schéma général de la fusée CYRIUS..... | 16 |
| 2. Conception générale du tube de Pitot..... | 17 |
| 2.1. Généralités..... | 17 |
| 2.2. Conception des Pièces composant le tube de Pitot..... | 18 |
| 2.2.1 Extrémité du tube de Pitot..... | 18 |
| 2.2.2. Liaison tube de Pitot - cône de la fusée..... | 18 |
| 2.2.3. Pièce de fixation..... | 19 |
| 2.2.4. Antenne de télémétrie numérique..... | 19 |
| 2.2.5. Longueur des tubes..... | 20 |
| 4.3 Cotes et tolérances de pièces..... | 20 |
| Usinage des pièces..... | 26 |
| 4.1. Extrémité de la sonde..... | 26 |
| Schéma Phases d'usinage..... | 28 |
| 4.2. Liaison Cône / Pitot..... | 29 |
| 4.3. Fixation Pitot / Cône..... | 30 |
| 5. Recherche de partenaires..... | 31 |
| 6. Montage final du tube de Pitot..... | 31 |
| 7. Intégration sur la fusée CYRIUS..... | 32 |
| 8. Complément sur les capteurs de pression..... | 32 |
| 8.1. Hypothèses..... | 32 |
| 8.2. Pression statique..... | 33 |
| 8.3. Pression totale..... | 34 |
| 8.4. Tensions délivrées par les capteurs..... | 35 |
| 8.5. Principe des chaînes de mesures..... | 35 |
| 8.6. Montage du capteur..... | 36 |
| 8.7. Calcul de l'amplificateur..... | 36 |

| | |
|---|----|
| 8.8. Réglage de l'offset..... | 37 |
| 8.9. Limitation en tension..... | 38 |
| 8.10. Filtre anti-repliement..... | 40 |
| 8.11. Platines d'essais..... | 40 |
| 8.12. Routage du circuit sur le logiciel ORCAD..... | 40 |

C. ETALONNAGE

| | |
|---|----|
| 1. Description de la soufflerie:..... | 41 |
| 2. Description de l'expérience:..... | 43 |
| 3. Relevés expérimentaux..... | 44 |
| 3.1. Incidence nulle..... | 44 |
| 3.1.1. $M = 0.27$, $P_{io} = 400$ mb..... | 44 |
| 3.1.2. $M = 0.27$, $P_{io} = 700$ mb..... | 44 |
| 3.1.3. $M = 0.48$, $P_{io} = 400$ mb..... | 45 |
| 3.1.4. $M = 0.48$, $P_{io} = 700$ mb..... | 46 |
| 3.1.5. $M = 0.66$, $P_{io} = 400$ mb..... | 46 |
| 3.1.6. $M = 0.66$, $P_{io} = 700$ mb..... | 47 |
| 3.1.7. $M = 0.66$, $P_{io} = 700$ mb..... | 47 |
| 3.1.8. $M = 0.8$, $P_{io} = 400$ mb..... | 48 |
| 3.1.9. $M = 0.8$, $P_{io} = 700$ mb..... | 50 |
| 3.1.10. $M = 1.15$, $P_{io} = 600$ mb..... | 50 |
| 3.2. Incidence $= 10^\circ$ | 54 |
| 3.2.1. $M = 0.33$, $P_{io} = 400$ mb..... | 54 |
| 3.2.2. $M = 0.48$, $P_{io} = 400$ mb..... | 54 |
| 3.2.3. $M = 0.63$, $P_{io} = 400$ mb..... | 55 |
| 4. Conclusion..... | 56 |

- Conclusion générale -

A. ETUDE THEORIQUE

1. Généralités

1.1. Introduction

L'utilisation de sondes de pression pour la mesure de la vitesse d'un fluide est couramment utilisée. On distingue deux types de sondes, suivant qu'elles permettent la mesure du module de la vitesse uniquement, ou du module et de la direction.

En ce qui nous concerne, seul le premier type nous intéresse

Nous utilisons ici un tube de PITOT, qui est une "machine pour mesurer la vitesse des eaux courantes et le sillage des vaisseaux" selon sa première définition. Cette méthode de mesure a été inventée par Henri PITOT qui, en 1732, imagina ce tube pour mesurer les pressions totales.

Le physicien DARCY le compléta, permettant ainsi la mesure simultanée des deux pressions totale et statique. C'est enfin, PRANDTL qui pensa à utiliser ce tube dans une canalisation pour y relever, en chaque point, ces mêmes pressions et obtenir ainsi les vitesses locales (le tube de PRANDTL utilisant un orifice à la paroi de la veine pour prendre la pression statique).

1.2. Principe du tube de Pitot

Le tube de PITOT double permet la détermination de la vitesse locale grâce à la mesure d'une différence entre la pression statique p_s et la pression totale p_t .

En fluide incompressible, l'équation de BERNOULLI nous donne une expression de la pression totale au point d'arrêt du tube (vitesse nulle en ce point) :

$$p_t = p_s + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2$$

(Le terme $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2$ correspond à la pression dynamique et ρ étant la masse volumique du fluide et V la vitesse moyenne incidente.)

Connaissant la pression statique p_s , la pression totale p_t et la masse volumique ρ , on en déduit la vitesse V :

$$V = \sqrt{\frac{p_t - p_s}{\frac{1}{2} \rho}}$$

Cette équation permet alors de déterminer la vitesse du fluide dans lequel évolue la sonde de Pitot.

2. Mesures des pressions

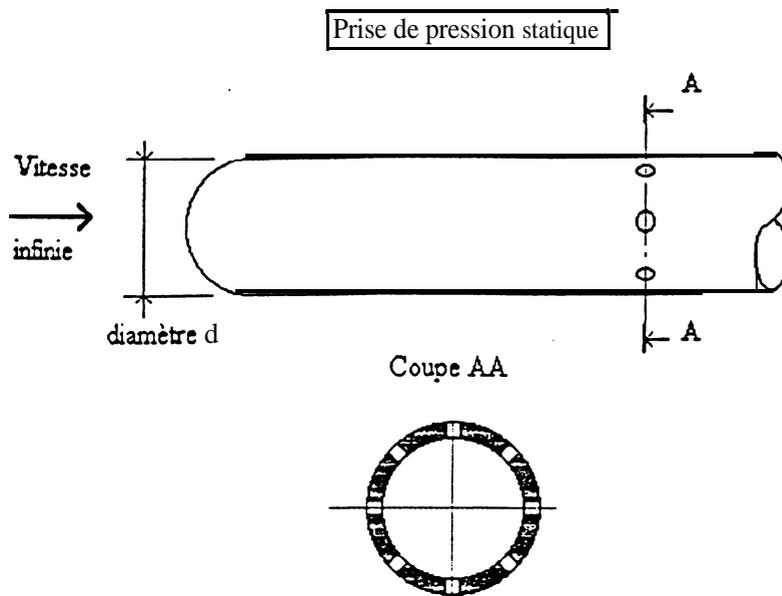
2.1. Mesure de la pression statique

2.1.1. Description

Une sonde ,qui serait un corps de petites dimensions entraîné avec la même vitesse que le fluide qui l'entoure, serait soumise à la pression statique.

Sur une sonde fixe, on aura la pression statique à un orifice percé dans une paroi telle que les lignes de courant à son voisinage et jusqu'en amont soient parallèles à la vitesse en amont.

En fait, on utilise plusieurs orifices répartis sur la **circonférence** afin de respecter les conditions de symétrie de l'écoulement autour du tube et d'optimiser la mesure de la pression grâce aux nombres d'orifices utilisés.



2.2.2. Coefficient de pression

Si nous notons p la pression en amont cherchée et en reprenant les notations précédentes, on définit le coefficient de pression :

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2}$$

Ce coefficient de pression permet de déterminer la position de prises de pression statique.

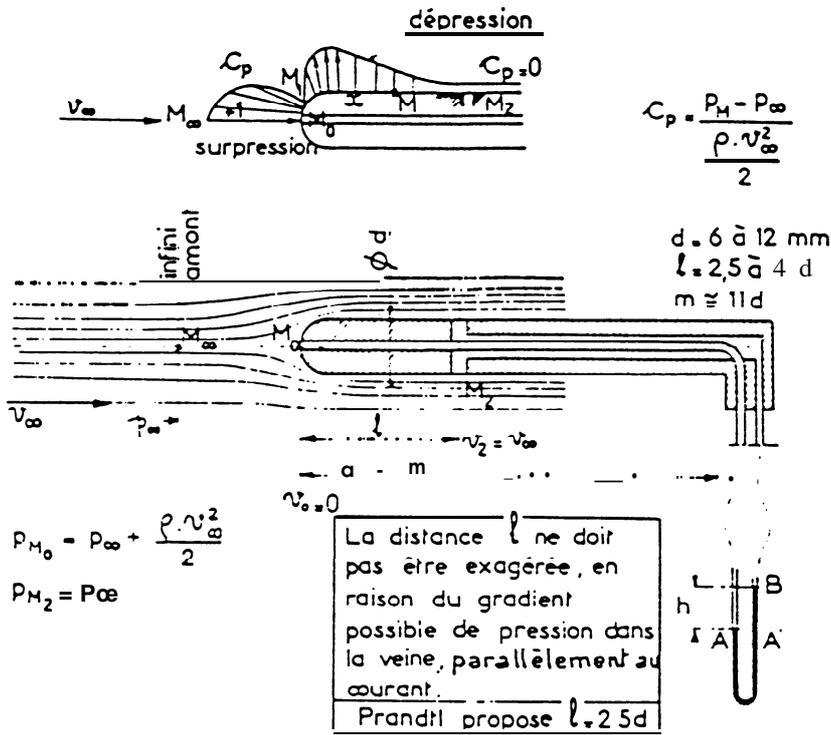
On peut se rendre compte de cette influence grâce aux équations de la Mécanique des Fluides. En effet, on assimile l'extrémité du tube de Pitot à un écoulement résultant de la superposition d'un écoulement uniforme caractérisé par le vecteur vitesse \vec{V}_∞ , parallèle et de sens opposé à l'axe de révolution Oz et d'une source ponctuelle à l'origine de débit $2 \cdot \pi \cdot Q$.

Les C_p peuvent être représentés sur le tube de Pitot (cf page suivante).

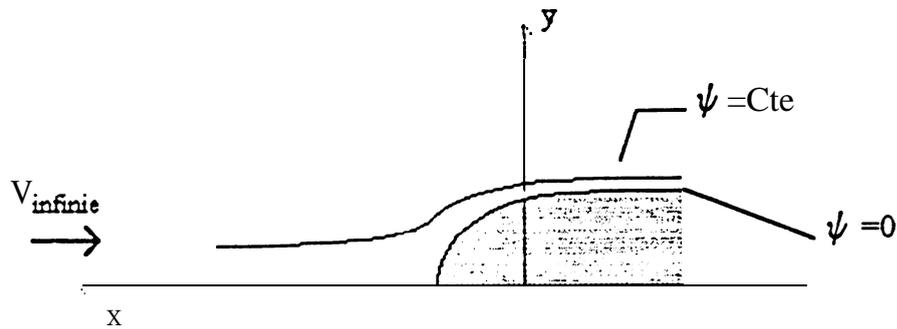
Schéma des Cp sur le tube de Pitot

TUBE DE PITOT - DARCY

perfectionné par PRANDTL



- M₀ : Point d'arrêt ou de vitesse nulle, C_p = +1, v_{M₀} = 0
- M₁ : Premier point de vitesse ; C_p = 0 , v_{M₁} = v_∞
- M₂ : Second point de vitesse ; C_p = 0 , v_{M₂} = v_∞
- M₀ : Point de prise de pression totale
- M₂ : Point de prise de pression statique



En deux points **symétriques** par rapport à x , la translation \vec{V}_∞ comme la vitesse induite par la source, ont même composante selon z . Tandis que les composantes en y , dues seulement à la vitesse induite sont opposées.

L'écoulement est donc **symétrique** par rapport à x . Il suffit de l'étudier dans le **demi-plan** y positif. Il n'y a pas symétrie par rapport à y .

Les composantes de la vitesse en un point courant (r, θ) sont :

$$\begin{cases} V_r = \frac{Q}{2r^2} - V_\infty \cos \theta \\ V_\theta = V_\infty \sin \theta \end{cases}$$

On a une expression du coefficient de pression C_p en fonction de l'angle θ :

$$c_p(\theta) = 1 - \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \left(1 + 3 \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)$$

d'où $c_p(\theta) = \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \left(1 - 3 \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)$

On remarque que $C_p(0) = 1$ au point d'arrêt, et que le C_p s'annule à l'infini pour θ égal à π . D'autre part, on peut définir un point pour lequel le C_p s'annule. Celui-ci est caractérisé Par :

$$\theta = 2 \cdot \arcsin \frac{1}{3} \approx 74^\circ$$

Cependant, la prise de pression statique ne peut être placée en ce point car à son voisinage le gradient $\frac{dp}{d\theta}$ est très grand et une erreur très petite sur θ peut entraîner une variation importante du C_p .

La prise de pression statique sera donc aménagée à une distance x du point d'arrêt. On prendra une distance x égale à huit fois le diamètre extérieur du tube (θ environ égal à 160°), ce qui donne un C_p inférieur au 1/100ème.

2.2. Mesure de la pression d'arrêt

Soit un corps plongé dans une veine fluide uniforme (pression p_∞ , masse volumique ρ_∞ , vitesse V_∞). Une ligne de courant particulière se sépare au nez de la sonde pour la contourner.

Ce point de séparation est appelé point d'arrêt car la vitesse s'y annule.

Un petit orifice, pratiqué à cette extrémité et relié à un manomètre ou à un capteur de pression, transmet la pression d'arrêt locale P_t de l'écoulement.

L'équation de BERNOULLI appliquée entre le point d'arrêt et l'amont au loin donne la relation suivante :

$$P_t = p_\infty + \rho \frac{V_\infty^2}{2}$$

3. Imprécision sur les mesures

3.1. Nature de l'écoulement

3.1.1. Compressibilité

Un écoulement gazeux peut être considéré comme incompressible jusqu'à $Mach = 0,3$ soit environ 100 m/s. au-delà, on doit appliquer un facteur correctif au coefficient de pression au point d'arrêt. En effet, dans un écoulement compressible, en supposant un processus adiabatique, on a la relation suivante :

$$V_{\infty} = \sqrt{\frac{2\gamma \cdot p_{\infty}}{\gamma - 1} \rho_{\infty} \left[\left(\frac{p_t}{p_{\infty}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]}$$

Au point d'arrêt, on aura un C_p qui sera supérieur à 1.

3.1.2. Nombre de Mach

Pour des vitesses supérieures à $Mach = 0.85$, l'apparition de petites ondes de choc locales sur le nez de la sonde peut légèrement fausser les mesures de pression. A partir de $Mach = 0.95$, il se forme devant le nez du tube de PITOT une onde de choc détachée mais le trou de pression est en écoulement subsonique. La pression relevée au nez de la sonde est alors la pression d'arrêt P_t' de l'écoulement en aval de cette onde.

On a les expressions suivantes pour les pressions statique et totale :

$$\left| \begin{array}{l} \frac{P_t}{P_{\infty}} = M_{\infty}^2 \cdot \left(\frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \cdot \left[\frac{2 \cdot \gamma \cdot M_{\infty}^2 - \gamma + 1}{M_{\infty}^2 (\gamma + 1)} \right]^{\frac{1}{\gamma - 1}} \\ \frac{P_t}{P_{\infty}} = M_{\infty}^2 \cdot \left(\frac{\gamma + 1}{2} \right) \cdot \left[\frac{\frac{\gamma + 1}{2} \cdot M_{\infty}^2}{\frac{2\gamma}{\gamma + 1} \cdot M_{\infty}^2 - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1}} \right]^{\frac{1}{\gamma - 1}} \end{array} \right|$$

3.1.3. Nombre de Reynolds - viscosité

L'influence de la viscosité n'intervient que pour des nombres de Reynolds inférieurs à 500 ; les effets visqueux étant alors regroupés dans le domaine de la couche limite.

Cependant, dans le cadre de notre étude, les nombres de Reynolds obtenus sont bien supérieurs à 500 (écoulement turbulent).

3.1.4. Gradient transversal de vitesse

La turbulence de l'écoulement se manifeste par un échange de quantité de mouvement entre particules donnant naissance à des vitesses parasites transversales par rapport à l'écoulement général.

Un tube de PITOT, dans ce type d'écoulement, mesure la pression **d'arrêt** avec une erreur par excès. En effet, l'interaction de l'étrave du tube et de l'écoulement provoque une déviation des trajectoires telle que la prise de pression totale capte une ligne de courant à vitesse supérieure à celle qu'elle aurait capté sans déviation. L'erreur commise est cependant négligeable.

3.2. Angle d'incidence

La sensibilité à l'incidence est fonction de la forme de l'étrave du tube. Avec une étrave hémisphérique, la sonde présente une courbe d'erreur, en fonction de l'inclinaison, assez favorable. En effet, l'erreur reste **inférieure** à 1 % pour une incidence allant jusqu'à 6° et inférieure à 5 % pour une incidence atteignant 20 °.

C'est pour cette raison que l'on n'utilise pas le tube de PITOT comme indicateur de direction de vitesse (clinomètre).

3.3. Etat de surface de la sonde

Il est impératif que le corps de la sonde soit tenu en **parfait** état de propreté. De plus, la réalisation d'une prise de pression statique sur un tube de PITOT nécessite une attention **toute** particulière. En effet, la moindre bavure extérieure, réalisée lors du perçage d'un trou de petit diamètre au droit de la paroi, peut provoquer le décollement de la couche limite à travers laquelle se transmet la pression statique. Le gradient de pression normal n'est alors plus nul et la mesure est faussée.

3.4. Temps de réponse (retard manométrique)

L'utilisation de prises de pression s'accompagne, dans la quasi-totalité des cas, de longues tuyauteries reliant les prises aux manomètres correspondants. L'un des points importants, si l'on s'intéresse aux valeurs instantanées, est la détermination de la bande passante de l'ensemble **ou** retard manométrique. Celui ci est, en fin de compte, le temps que met la pression pour atteindre l'autre extrémité de la tuyauterie.

NOUS faisons les hypothèses suivantes :

- ⇒ L'écoulement se produit par tranches, et les forces de viscosité sont proportionnelles à la vitesse de la tranche considérée.

⇒ Les variations de pression et de masse volumique dues à la perturbation à l'entrée de la canalisation restent faibles devant leurs valeurs moyennes.

⇒ Les relations isentropiques peuvent s'appliquer au fluide.

⇒ La conduite est indéformable.

On a la relation donnant le retard manométrique en fonction du diamètre D de la conduite, de la viscosité dynamique μ , de la longueur de la tuyauterie et de la pression p :

$$\varepsilon(t) = \frac{16 \cdot \mu \cdot l^2}{\gamma \cdot P \cdot D^2}$$

Par exemple, cette formule donne dans le cas du tube en cuivre de diamètre intérieur 2 mm et de longueur 55 cm, à la pression atmosphérique, un retard de :

$$\varepsilon(t) = \frac{16 \times 17,9 \cdot 10^{-6} (55 \cdot 10^{-2})^2}{1,4 \times 101325 \cdot (2 \cdot 10^{-3})^2}$$

Soit un retard de l'ordre du 10000ème de seconde, ce qui est bien évidemment négligeable.

3.5. Altitude

Le tube de PITOT permet d'obtenir la vitesse pour une valeur donnée de la masse volumique de l'air (prise généralement au sol) alors que cette dernière varie en fonction de l'altitude. En conséquence, il faut apporter une correction à chaque altitude. On distingue ainsi la vitesse mesurée V_m de la vitesse propre V_p .

La conservation de la pression dynamique en vol nous permet d'écrire la relation suivante :

$$\frac{1}{2} \rho_0 V_m^2 = \frac{1}{2} \rho(z) V_p^2$$

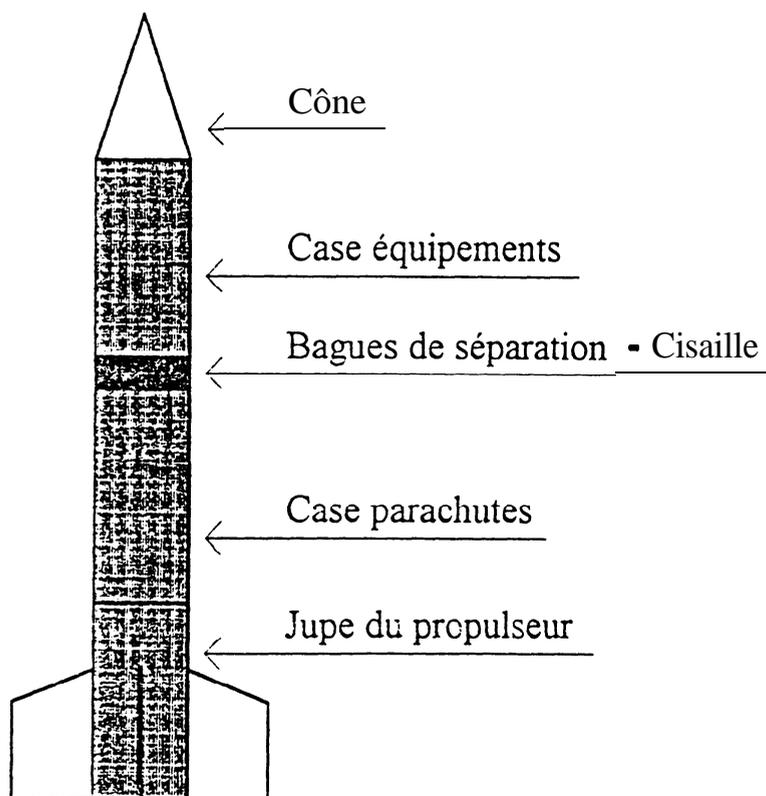
$$\text{on a donc : } V_p = \frac{V_m}{\sqrt{\frac{\rho(z)}{\rho_0}}} \quad \text{avec } \rho_0 = 1,225 \text{ kg / m}^3$$

La vitesse propre est ainsi toujours plus grande que la vitesse mesurée; cet écart étant une fonction croissante de l'altitude.

B. CONCEPTION

1. Emplacement optimal du tube de Pitot sur la fusée

Schéma général de la fusée CYRIUS

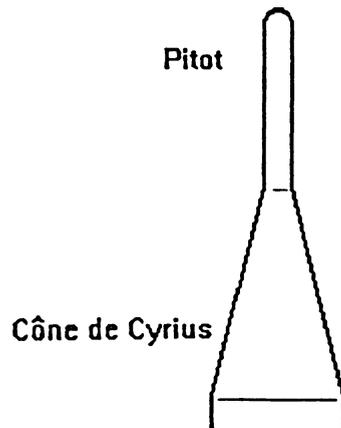


Nous cherchons à obtenir la vitesse de la fusée, par conséquent il faut placer le tube de Pitot de telle façon qu'un minimum de phénomènes viennent perturber les mesures.

Il faut **premièrement** éviter les perturbations aérodynamiques de la fusée, et pour cela, il faut place; le tube le **plus** en amont dans l'écoulement qui se crée autour de la fusée; c'est à dire **sur** le cône de celle-ci.

De plus, il faut penser au fait qu'on peut avoir une mise en rotation du lanceur **Cyrius** autour de son axe vertical. Ceci peut provoquer des erreurs de mesures (phénomènes de **vorticité**), et il faut par conséquent placer le Pitot dans le prolongement de cet axe, ce qui revient à le fixer sur le sommet du cône de la fusée.

Le tube de Pitot est donc installé de la façon suivante :



L'emplacement étant défini, on peut alors penser à la réalisation de la sonde et les différents éléments qui la compose.

2. Conception générale du tube de Pitot

2.1. Généralités

Cette sonde doit être facilement réalisable pour un club de **fusées** expérimentales, c'est à dire dans un atelier de mécanique comportant des fraiseuses et tours classiques.

La sonde à réaliser permettant de mesurer la pression cinétique est une combinaison de sonde de pression d'arrêt et de sonde de pression statique.

Elle est constituée de deux tubes coaxiaux. Le tube intérieur, ouvert à l'avant, transmet la pression d'arrêt, et le tube extérieur, qui porte des orifices latéraux, donne la pression statique.

En reliant les deux prises à chacune des branches d'un manomètre (dans le cas de **Cyrius**, des capteurs de pression), on obtient la **différence** de pression $P_{totale} - P_{statique}$ proportionnelle à $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2$. Couramment, le facteur de proportionnalité est déterminé lors de l'étalonnage du tube de Pitot en soufflerie.

Il faut concevoir trois pièces permettant de maintenir les deux tubes et de fixer la sonde de Pitot au corps de la fusée.

De plus, il faut déterminer la longueur des tubes que nous utiliserons.

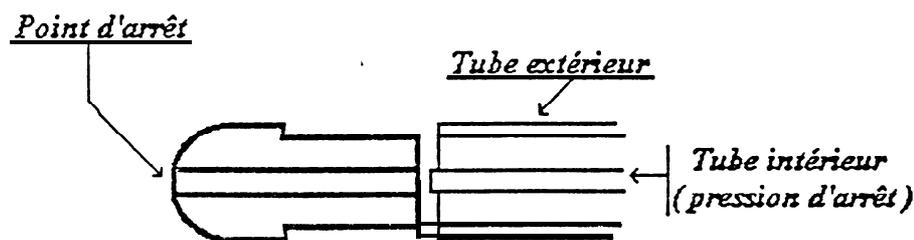
2.2. Conception des Pièces composant le tube de Pitot

2.2.1 Extrémité du tube de Pitot

Lorsqu'on place un corps dans un fluide uniforme, une ligne de courant particulière se sépare au nez de la sonde pour la contourner. Le point de séparation est appelé point d'arrêt, car la vitesse y est nulle. On obtient alors la pression d'arrêt, qui est collectée par un tube relié à un capteur de pression.

Le but de cette pièce est donc de créer ce point d'arrêt et de permettre de récupérer la pression locale qui s'y trouve.

Cette pièce est très simple dans sa conception :



Elle possède la forme hémisphérique classique de la sonde de Pitot, un alésage permettant d'installer un tube collectant la pression d'arrêt, ainsi qu'un épaulement sur lequel s'appuie le tube extérieur.

2.2.2. Liaison tube de Pitot - cône de la fusée

Cette pièce sert d'interface sonde / fusée. Elle supporte les éléments du tube et se fixe sur le cône de Cyrius.

La partie conique permet de faire la continuité entre le tube extérieur et l'angle au sommet de quinze degrés du cône.

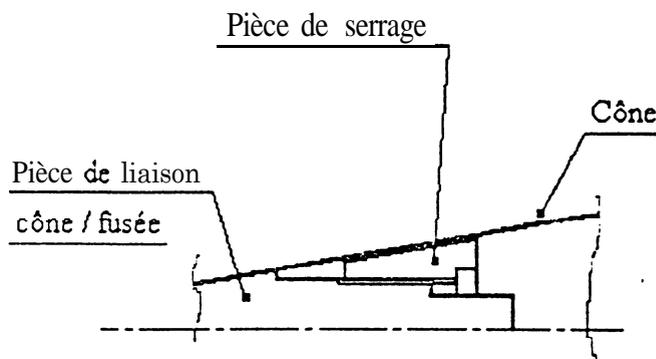
De plus la pièce comporte une rainure sur toute sa longueur dans laquelle viennent se glisser le tube de pression d'arrêt, mais aussi juste au-dessus de lui un second tube récoltant la pression statique.

Il faut ensuite **fixer l'ensemble** au moyen d'un **filetage** venant se visser dans une pièce située **dans le cône**, permettant aussi le centrage du système.

Il faut prévoir un **filetage** de pas relativement élevé pour assurer une bonne prise de la **pièce (en augmentant la surface de contact des deux pièces)** et éviter d'écraser accidentellement les filets du pas de **vis**.

2.2.3. Pièce de fixation

Cette dernière pièce se place dans le cône de Cyrius, afin de permettre à la sonde d'être "vissée" par son intermédiaire à l'ensemble de la fusée. L'avantage de cette pièce et de sa forme est d'assurer le centrage de la sonde.



2.2.4. Antenne de télémétrie numérique

Afin de transmettre en temps réel les mesures effectuées par la fusée, on utilise une antenne d'environ 55 centimètres qui sert de télémétrie numérique.

Il nous est venu à l'idée que nous pourrions essayer d'intégrer **cette** antenne dans le tube de Pitot.

Après différents essais pour placer un tube d'une telle longueur, nous avons décidé d'utiliser un tube qui servirait à la fois d'émetteur et de mesure de la pression d'arrêt.

Par conséquent, une première extrémité de l'antenne est au point d'arrêt et la seconde, sur laquelle est soudée un connecteur relié au système de télémétrie, se trouve dans le cône.

2.2.5. Longueur des tubes

En prenant compte des conditions aérodynamiques imposées par la théorie, il a été décidé de prendre une distance de 8 fois le diamètre extérieur de la sonde entre le point d'arrêt et les prises statiques et 6 fois le diamètre extérieur entre les prises statiques et la naissance du cône.

Par conséquent un a un tube (comprenant la pièce d'extrémité de la sonde) d'une longueur de $(8+6) \times 18 = 252 \text{ mm}$.

Le tube de pression totale en cuivre doit, quant à lui, faire 550 mm pour servir d'antenne. Le tube collectant la pression statique doit voir une longueur permettant à celui-ci de "traverser" la pièce de liaison Pitot / cône et d'avoir un dégagement nécessaire pour mettre un tube plastique.

3. Cotes et tolérances de pièces

Nous avons décidé pour des questions de facilité de montage, d'utiliser de la colle pour assembler les pièces.

Il faut donc prévoir un, voire deux dixièmes de tolérances pour pouvoir appliquer la colle.

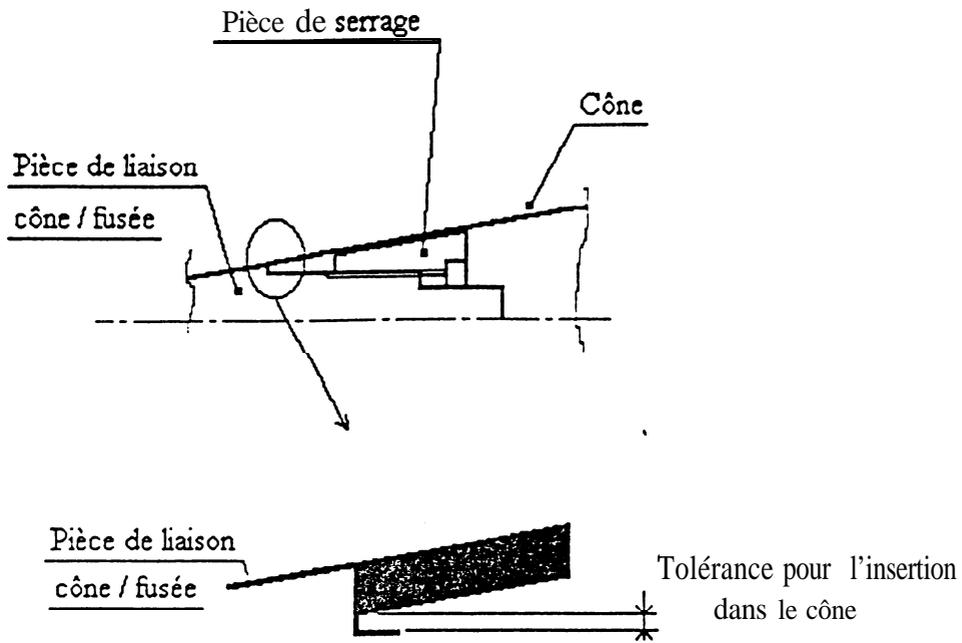
Connaissant les tolérances des tubes utilisés et celle nécessaire à la colle, on peut définir totalement les pièces et le schéma d'ensemble (Voir pages suivantes).

On pourra noter que certaines côtes ne nécessitent pas de tolérances très précises, comme les diamètres d'implantation dans le tube extérieur (diamètre 18 mm), ou les longueurs filetées.

Dans le premier cas, on respecte toutefois une longueur d'implantation minimale de une fois et demie le diamètre extérieur, pour assurer une bonne prise des pièces.

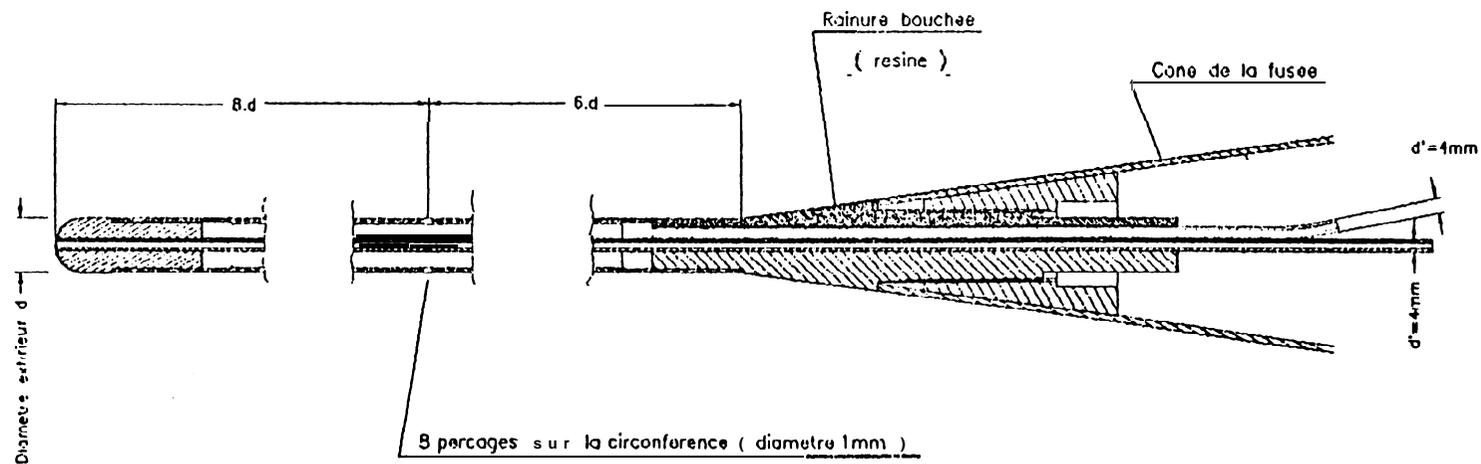
Les parties coniques doivent respecter la cote de $7,5^\circ \pm 0,5^\circ$ pour assurer une bonne intégration dans le cône de la fusée qui possède cette même tolérance angulaire.

La pièce de liaison cône / Pitot vient prendre appui sur le cône qui est biseauté à un diamètre $30 \text{ mm} \pm 0,1$, et un épaulement doit permettre l'insertion du cône qui fait 2 mm d'épaisseur.



Les autres tolérances prévoient les dimensions de tubes de diamètres 4 et 18 mm sur les pièces pour permettre une bonne intégration de ces tubes et pour faciliter la mise en place de la colle. Par exemple, la rainure pratiquée prévoit une cote de 4 mm plus quelques dixièmes pour être sûr que les tubes pourront se loger sans difficultés dans celle ci.

Projet tube de Pitot

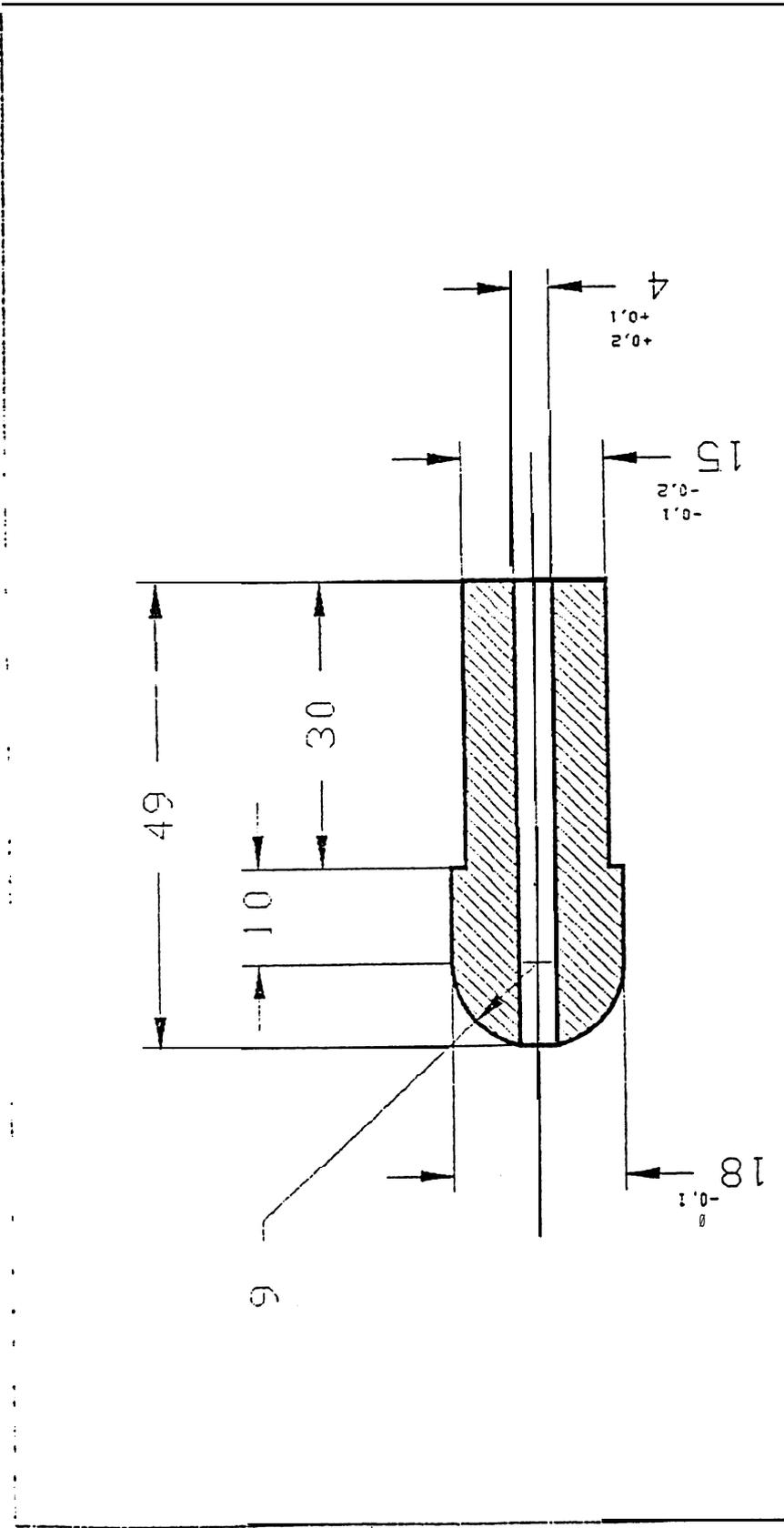


Projet 4eme annee E.S.T.A.C.A.

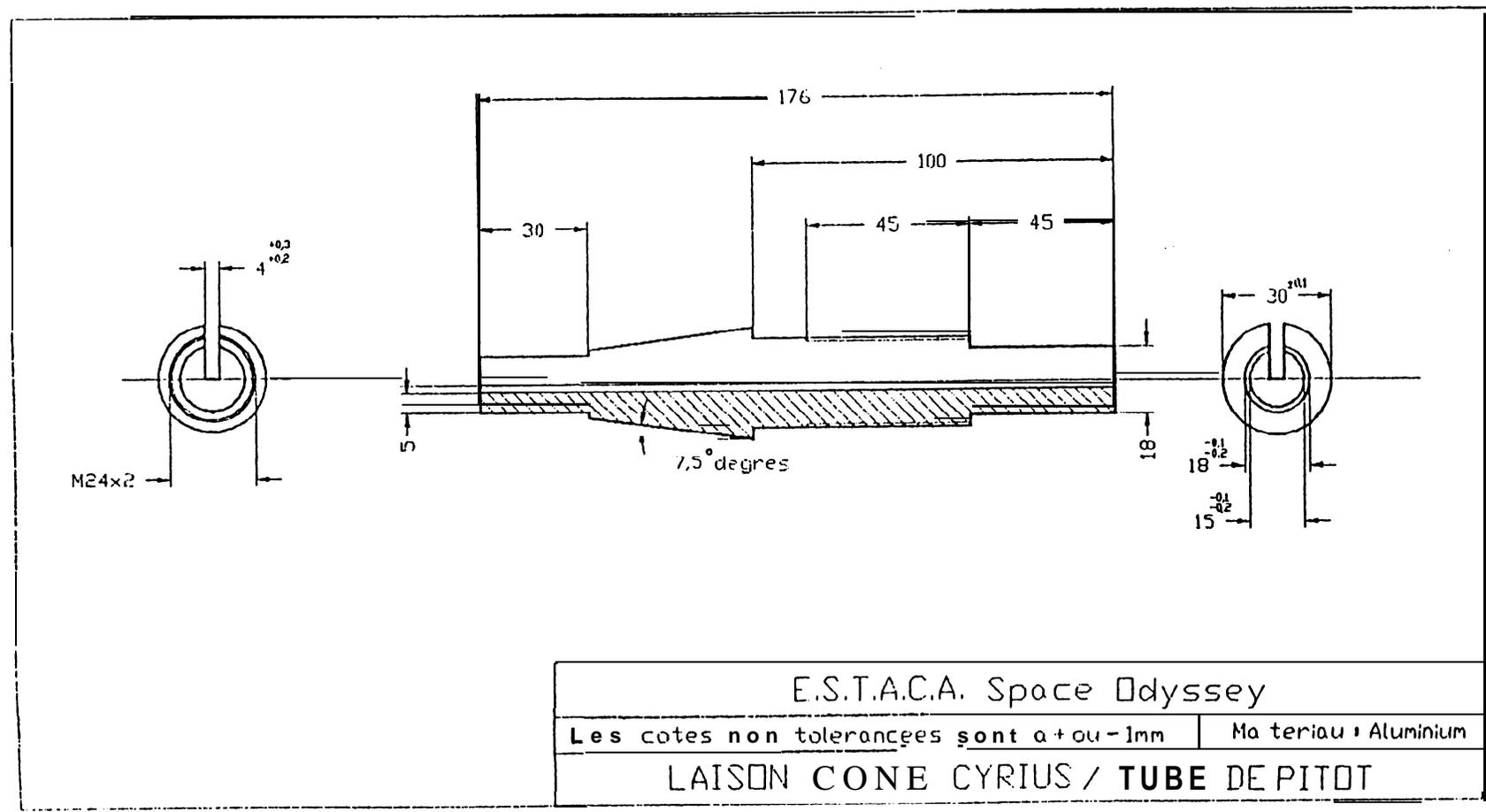
SCHEMA D ENSEMBLE DU TUBE DE PITOT

B. Dussourd - C. Lepine - C. Jacquelard

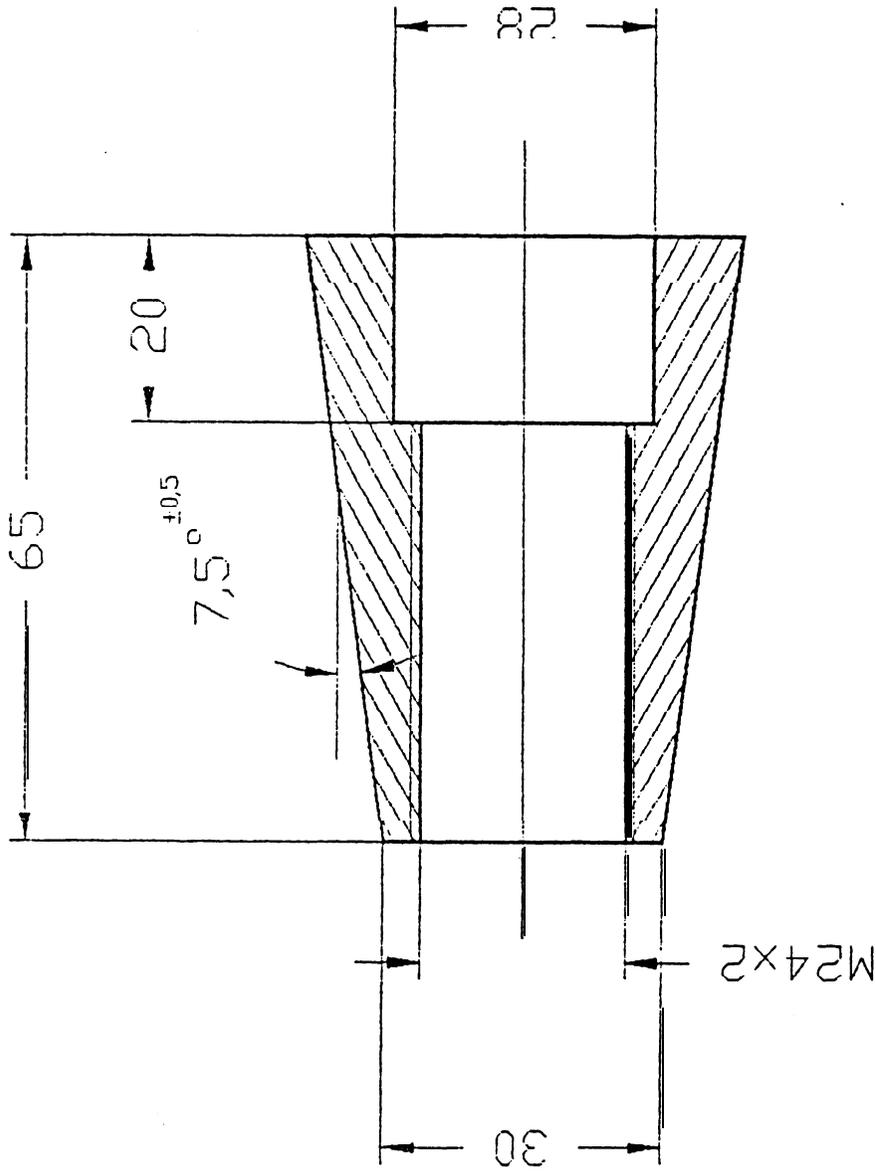
Plan N°2



| |
|--|
| Materiou : Aluminium |
| Les cotes non tolerances sont a + ou - 1mm |
| Extremite du tube de Pitot |
| E.S.T.A.C.A. Space Odyssey |



Plan N°4



Material : Aluminium

FIXATION PITOT/CONE

Les cotes non tolerances sont a + ou - 1mm
Le filetage est de diametre 24 mm et de pas 2mm

E.S.T.A.C.A. Space Odyssey

Il faut tout d'abord préparer les pièces qui vont être collées avec un passage de toile émeri sur les surfaces à coller, et ensuite procéder à un nettoyage de tous les éléments.

On peut alors coller les pièces et finalement appliquer la résine pour remplir la rainure tout en prenant garde à chaque phase du montage à l'étanchéité du tube.

Le tube est alors prêt à l'utilisation et aux essais en soufflerie pour l'étalonnage et à l'intégration finale sur le cône de la fusée.

7. Intégration sur la fusée CYRIUS

Cette intégration se déroulera probablement à la fin du mois de Juillet.

La pièce de fixation Pitot / cône est alors collée à l'intérieur du cône et le tube de Pitot se visse sur le cône par l'intermédiaire de cette pièce.

On vient ensuite mettre deux tubes plastiques sur chaque tube sortant de la sonde qui sont reliés aux capteurs de pressions.

8. Complément sur les capteurs de pression

Cette partie a été étudiée plus particulièrement par un groupe de travail de l'E.S.T.A.C.A. Space Odyssey, et elle est une partie complémentaire de notre travail car c'est grâce aux capteurs que nous transmettons les pressions.

8.1. Hypothèses

- Masse de la fusée: $m \# 20$ kg,
- Diamètre de la fusée: $\phi = 115$ mm,
- $0,6 < C_x < 0,9 \implies 6232 \text{ mm}^2 < S_{C_x} < 9300 \text{ mm}^2$,
- Mach $< 1,1$ d'après les caractéristiques du propulseur,
- $Z_{\text{max}} \# 3$ km.

8.2. Pression statique

En fonction de l'altitude, la pression statique varie selon la loi:

$$\frac{P}{P_0} = (1 - 0,0226 \times Z)^{5,25}$$

À $Z = 3 \text{ km}$, $P = 700 \text{ mbar}$

À $Z = 500 \text{ m}$, $P = 942 \text{ mbar}$

Puisque nous envisageons une vitesse de $M = 1,1$, il faut prévoir que le capteur se situera derrière l'onde de choc au passage du mur du son. Or, à $M=1,1$, $P1/P_0 = 1,245$. Il nous faut donc estimer l'altitude de vitesse maximale pour avoir une idée de ce que sera la pression statique maximale.

D'après les tableaux des caractéristiques du propulseur CARIBOU, nous pouvons estimer la vitesse maximale atteinte par la fusée;

$$300 \text{ m/s} < V_{\max} < 350 \text{ m/s}$$

Nous allons évaluer maintenant l'altitude à laquelle cette vitesse maximale est atteinte.

$$m\Gamma = F - mg \quad F \# 3000 \text{ N}$$

$$\text{d'où } \Gamma = 3000/25 - 9,81 = 110,2 \text{ m/s}^2$$

Le temps mis pour atteindre V_{\max} est donc de: $t = V_{\max}/\Gamma = 3,18 \text{ s}$

L'altitude de la vitesse maximale est alors de: $Z(V_{\max}) = \frac{1}{2}\Gamma t^2 = 555,8 \text{ m}$

A cette altitude, la vitesse du son, qui dépend de la température, vaut:

$$T = T_0(1 - 0,0226 Z) \quad \text{avec } T_0 = 298 \text{ K}$$

$$T(555,8 \text{ m}) = 294 \text{ K}$$

$$\text{donc } a = \sqrt{\gamma T} = \sqrt{1,4 \times 287,3 \times 294} = 344 \text{ m/s}$$

d'où le nombre de Mach maximal théorique (à $Z = 555,8 \text{ m}$):

$$M_{\max} \approx \frac{350}{344} \approx 1,02$$

En supposant que la fusée atteigne $M = 1,1$, la pression statique pourra atteindre:

$$P = 1,245 \times 0,940 = 1,17 \text{ bar}$$

Pour cette raison nous avons choisi un capteur de pression statique absolu balayant la plage de pression 0 bar - 2 bar. Il s'agit du SCX30AN de SENSYM dont la sensibilité est de 43 mV/bar.

8.3. Pression totale

En fonction de l'altitude, la masse volumique de l'air *varie* selon la loi:

$$\frac{P}{\rho_0} = (1 - 0,0226 \times Z)^{4,26}$$

$$A Z = 3 \text{ km}, \rho/\rho_0 = 0,741 \text{ kg/m}^3$$

$$A Z = 500 \text{ m}, \rho/\rho_0 = 0,953 \text{ kg/m}^3$$

La pression totale maximale est obtenue approximativement à la vitesse maximale et vaut:

$$P_t = P + \frac{1}{2} \rho V^2 = 0,936 \frac{1}{2} \times 0,947 \times 350^2 \times 10^{-5} = 1,51 \text{ bar}$$

Puisque c'est la pression dynamique qui nous intéresse, à savoir $\frac{1}{2}\rho V^2$, nous avons choisi un capteur de pression différentielle qui sera relié à un tube "Pitot" pour la mesure. Ainsi, nous avons opté pour le SCX30DN de SENSYS balavant la plage 0 bar - 2 bar avec une sensibilité de 43 mV/bar.

8.4. Tensions délivrées par les capteurs

Nous pouvons considérer, d'après ce qui précède, que la pression statique varie entre les valeurs 0,700 bar et 1,170 bar. Ceci nous donne une variation de tension en sortie de capteur de:

$$\Delta U = 43 \times (1,170 - 0,700) = 20,21 \text{ mV}$$

Pour utiliser au maximum la plage 0 V - 5 V qui nous est allouée, il nous faut un facteur d'amplification de:

$$G = \frac{5}{0,02021} = 247,4 \quad \text{arrondi à 240}$$

Nous pouvons considérer que la pression dynamique varie entre les valeurs 0 bar et 0,58 bar. Ceci nous donne une variation de tension en sortie de capteur de:

$$\Delta U' = 43 \times 0,58 = 24,94 \text{ mV}$$

Pour utiliser au maximum la plage 0 V - 5 V qui nous est allouée, il nous faut un facteur d'amplification de:

$$G' = \frac{5}{0,02494} = 200,47 \quad \text{arrondi à } 200$$

8.5. Principe des chaînes de mesures

Pour les mesures de pression statique comme de pression totale, nous adoptons le schéma de principe suivant:



Le cahier des charges nous impose de délivrer à la sortie de cette chaîne une tension variant entre 0 V et 5 V.

Le capteur est alimenté en +12 V, l'amplification en +12 V et -12 V.

Les filtres passe-bas seront calculés pour supprimer les fréquences supérieures à 20 Hz.

D'après ce qui précède, l'amplification aura un gain réglable autour de 240 pour la "chaîne statique" et autour de 200 pour la "chaîne dynamique".

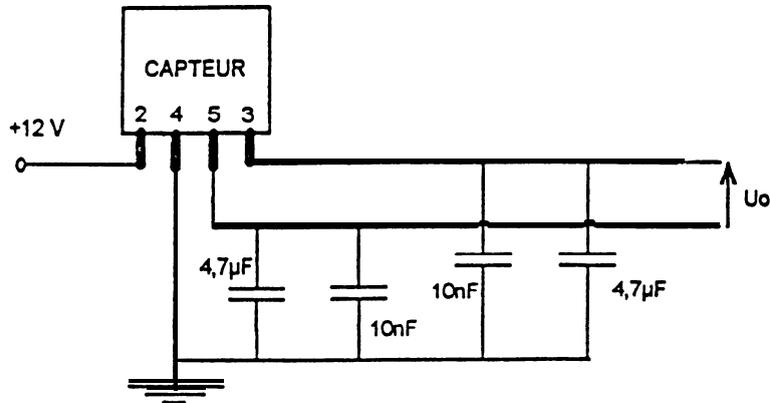
Le réglage de l'offset va nous permettre de décaler la tension pour qu'elle évolue bien entre 0 V et 5 V, et non entre 7 V et 12 V par exemple. C'est-à-dire que nous devons délivrer une tension nulle en sortie pour la pression minimale de 0,7 bar. La loi d'évolution est alors linéaire en fonction de la pression.

La limitation en tension est une sécurité pour éviter de dépasser 5 V en sortie de chaîne quoiqu'il arrive lors du vol.

Enfin, le filtre anti-repliement évite des effets pervers de la conversion analogique / numérique, mais ne sera pas intégré sur la carte "Pressions".

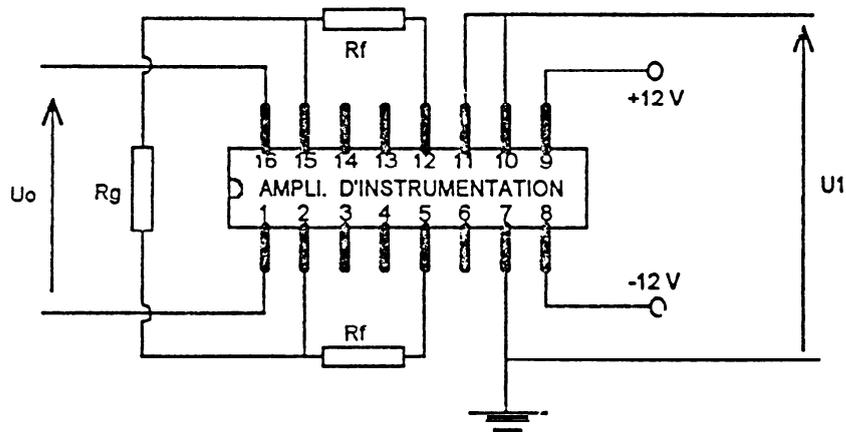
8.6. Montage du capteur

Le schéma proposé pour le câblage du capteur est le suivant :



8.7. Calcul de l'amplificateur

Le schéma que nous adoptons pour effectuer cette opération est le suivant:



Détermination des valeurs de R_g et R_f pour la mesure de pression statique, puis pour la mesure de pression dynamique.

Le gain de l'amplificateur opérationnel est donné par la loi:

$$\frac{U_1}{U_o} = \frac{2R_f}{R_g} + 1$$

Donc, dans la chaîne de pression statique, on veut avoir: $2R_f/R_g + 1 = 240$.

Pour éviter de grandes perturbations en sortie, nous avons dû adopter un amplificateur d'instrumentation .

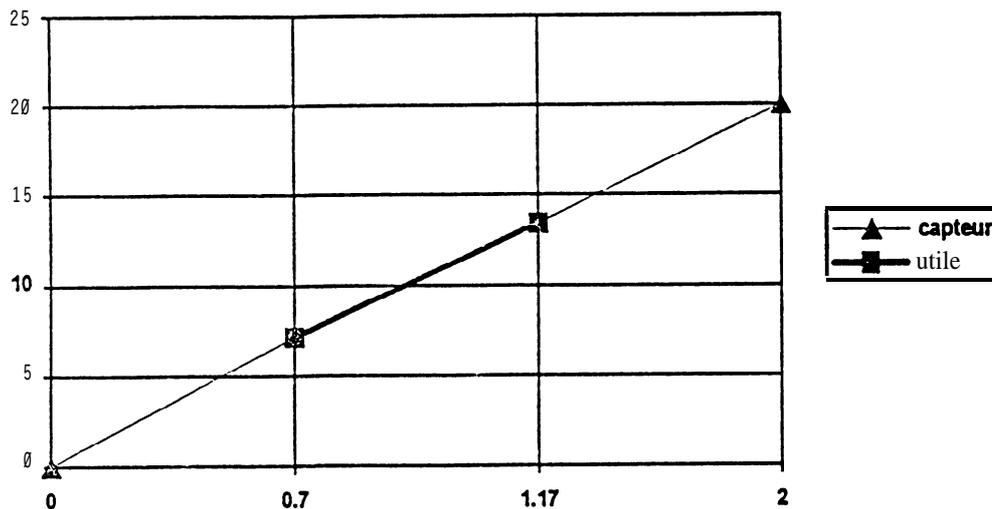
On peut prendre par exemple $R_f = 20 \text{ k}\Omega$ et $R_g = 170 \Omega$.

Dans la chaîne de pression dynamique, pour des raisons pratiques (pas de réglage d'offset), nous utilisons un amplificateur d'instrumentation identique à celui utilisé pour la mesure de pression statique. Nous avons $2R_f/R_g + 1 = 200$. Donc nous pouvons prendre les valeurs $R_f = 20 \text{ k}\Omega$ et $R_g = 200 \Omega$. Le montage est le même.

8.8. Réglage de l'offset

Position du problème:

D'après les calculs que nous avons effectués au début de ce dossier, nous pouvons tracer la courbe suivante:

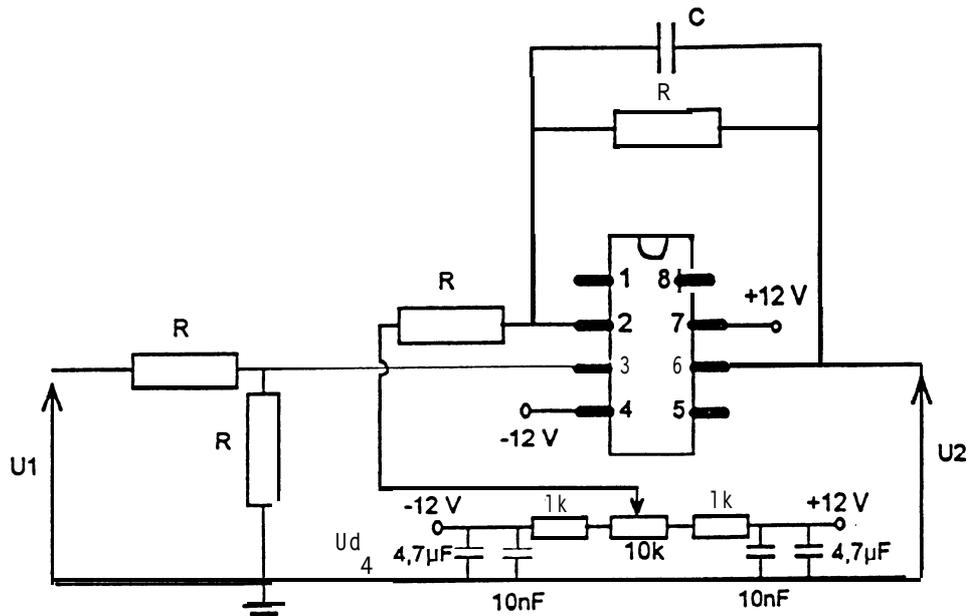


Nous aimerions caler notre plus faible pression à 0 V. Il faut donc décaler la courbe de $V_d = -7,224 \text{ v}$.

Pour la pression dynamique, le problème ne se pose pas car la tension de sortie est nulle tant qu'il n'y a pas de vitesse.

En toute rigueur, les mesures ont fait apparaître une petite tension de sortie résiduelle de 0,430 V. Aussi, nous pouvons en tenir compte dans le réglage de l'offset dans le montage de pression statique qui s'élève alors à -7,654 V.

Le montage que nous proposons pour le réglage de cet offset est le suivant:



On choisit R arbitrairement à $1\text{ k}\Omega$.

On doit vérifier là encore que $1/C\omega \ll R$, ce qui nous donne $C = 10\text{ }\mu\text{F}$

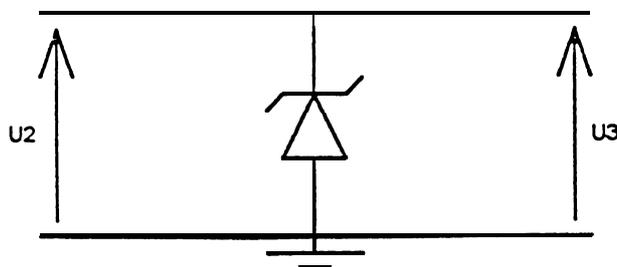
La fonction de transfert de ce montage soustracteur est :

$$U_2 = U_1 - U_d$$

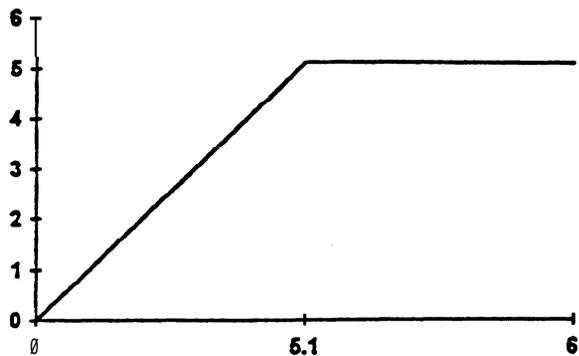
La tension de décalage U_d est réglée à l'aide du potentiomètre basé sur la résistance de $10\text{ k}\Omega$. Il suffit donc de décaler la tension de $7,654\text{ V}$.

8.9. Limitation en tension

Par sécurité, nous avons décidé de placer vers la sortie du montage un **limiteur** de tension à 5 V . Ceci est réalisé très simplement à partir d'une diode **Zener** montée en inverse (voir schéma ci-dessous).



Dans les catalogues, nous avons vu qu'il existe des diodes dont le seuil est soit de 4,7 V, soit de 5,1 V. Nous avons choisi une diode Zener dont le seuil dit "Zener" est de 5.1 V, car le traitement du signal en sortie de la carte "Pression" accepte sans problème particulier un faible dépassement.



8.10. Filtre anti-repliement

• Réalisé à part par un troisième groupe du club E.S.O. et mis en **place sur** une carte séparée.. .

8.11. Platines d'essais

Les circuits électroniques réalisés sur platines d'essais se sont révélés concluants.

Nous avons relevé les consommations en courant suivantes :

- $I = 7,75 \text{ mA}$ pour la pression statique
 - $I = 7,2 \text{ mA}$ pour la pression dynamique
- pour une alimentation en 12 V.

Puissance totale consommée :

$$P = U \cdot I = 12 \times (7,75 + 7,2) \cdot 10^{-3} = 0,180 \text{ W}$$

Les composants effectivement utilisés lors des essais sont répertoriés dans un tableau en Annexe.

8.12. Routage du circuit sur le logiciel ORCAD

Les circuits imprimés ont été routés sur un logiciel (ORCAD) permettant d'obtenir les plans et les typons des circuits afin de réaliser les plaques et de faciliter le **soudage** des composants.

Les dimensions des cartes de circuits imprimés sont 69 mm x 69 mm pour s'intégrer dans la boîte qui a pour dimensions 75x75x40 avec une épaisseur de paroi de 3 mm.

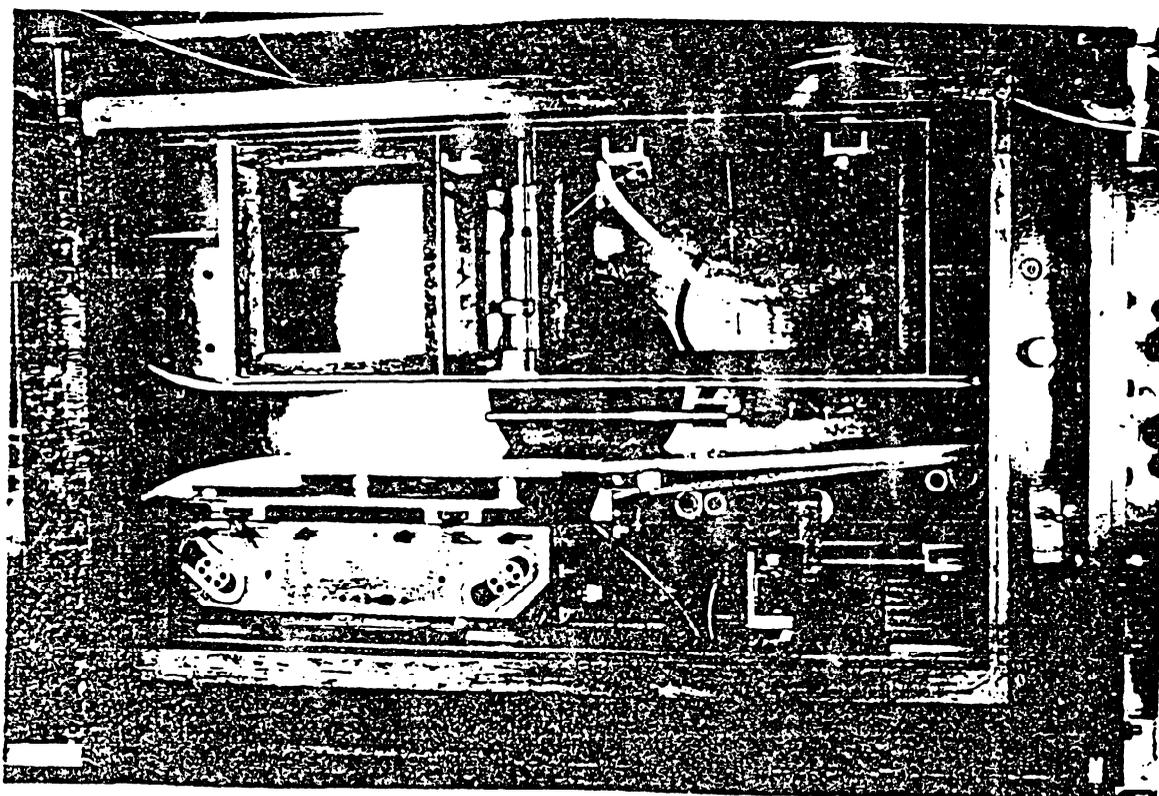
C. Etalonnage

1. Description de la soufflerie:

Nous avons eu la chance de pouvoir étalonner notre tube de Pitot dans la soufflerie S5 Ch qui se trouve à l'O.N.E.R.A. sur le site de MEUDON. C'est une soufflerie transsonique et supersonique à retour qui peut atteindre un nombre de Mach égal à trois. Son moteur distribue une puissance de 1400 kW dont 1100 kW servent au refroidissement. Le tube de Pitot a été étalonné dans la veine 1.

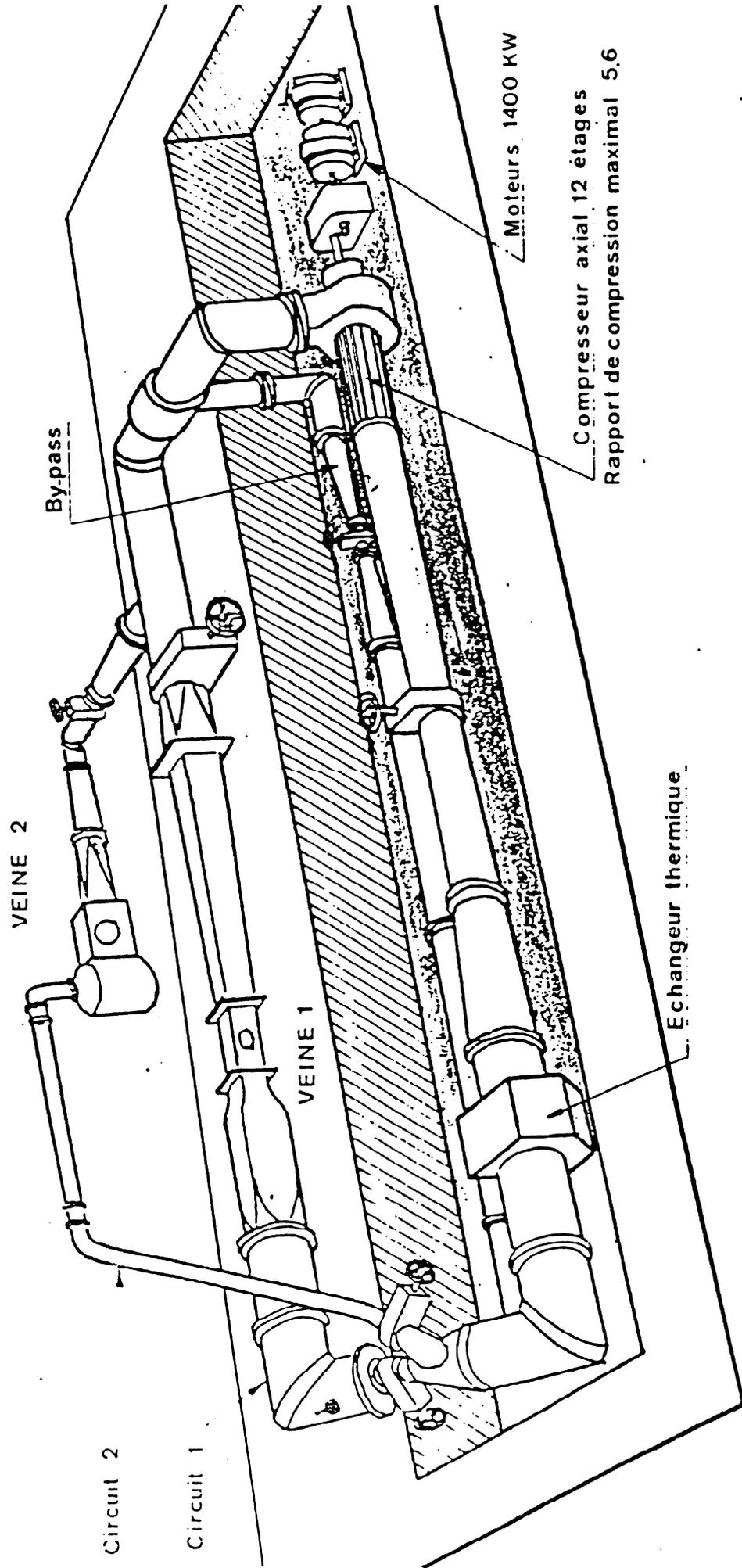
Schéma de la Soufflerie

(Cf. page suivante)



SOUFFLERIE S5 Ch

transsonique et ∞ personique



Moteurs 1400 KW

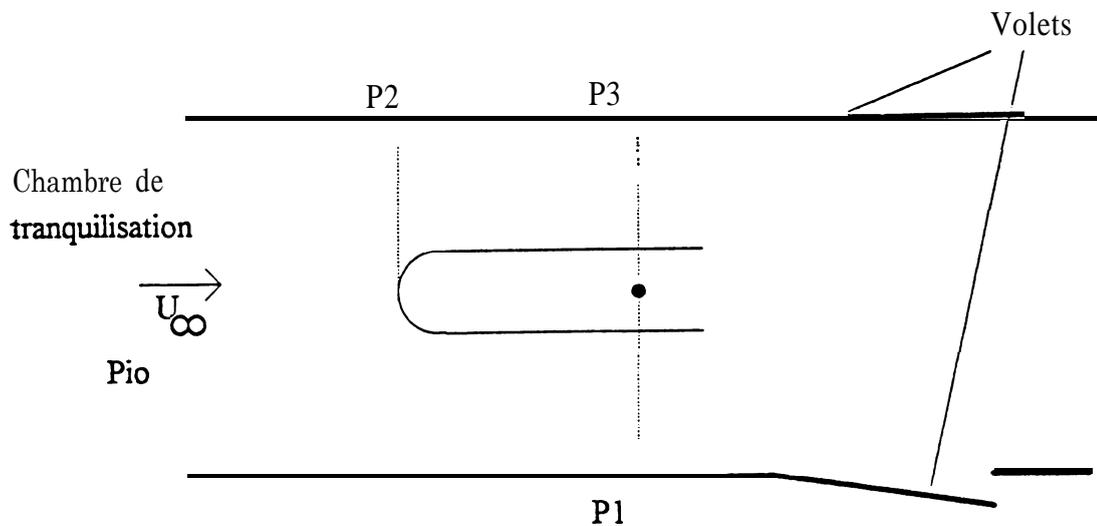
Compresseur axial 12 étages
Rapport de compression maximal 5.6

Echangeur thermique

$T_i = 300^\circ K$

$0.4 < P_i < 1 \text{ bar}$

2. Description de l'expérience:



Il faut tout d'abord mettre la soufflerie sous vide pour sécher la veine. Durant cette expérience la veine se trouvera toujours en dépression par rapport à l'extérieur. A l'arrière de la maquette se trouvent des volets qui servent à changer la section utile de la veine et par conséquent de régler la vitesse:

On relève trois pressions que nous allons comparer à la pression génératrice de la veine.

- P1 est la pression statique de la veine = P_0
- P2 est la pression d'arrêt (ou pression totale) relevée à l'aide d'un capteur de pression relié au tube de Pitot.
- P3 est la pression statique relevée à l'aide d'un capteur de pression relié au tube de Pitot.

Les pressions sont relevées pour une pression génératrice variable, un nombre de Mach variant de 0.2 à 1.16 et une incidence variable. On suppose lors de l'expérience que l'écoulement est stabilisé.

Le domaine aérodynamique étudié en soufflerie est le suivant :

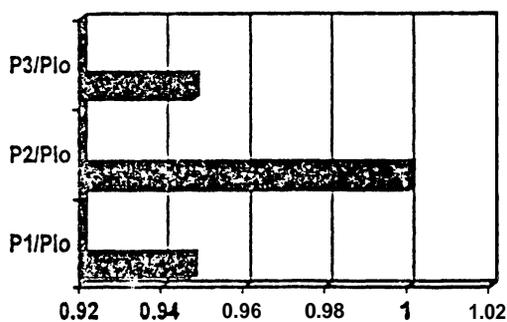
- ⇒ Nombre de Mach variant de 0,2 à 1,15
- ⇒ Pression génératrice de 400 mb et 700 mb
- ⇒ Incidence de 0° et 10°

3. Relevés expérimentaux:

3.1. Incidence nulle

3.1.1. M = 0.27. P_{io} = 400 mb

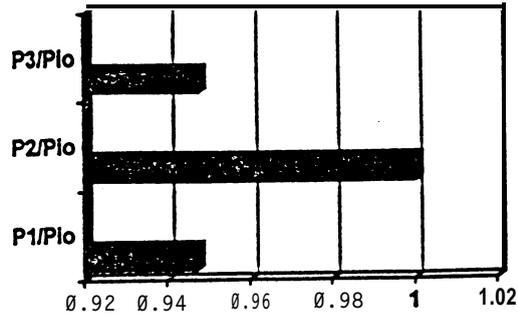
| | P1/P _{io} | P2/P _{io} | P3/P _{io} | P _{io} (mb) | T _{io} (°C) |
|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| | 0.9471 | 1.0002 | 0.9475 | 399.9 | 30.6 |
| Mach | 0.2798 | -0.0003 | 0.2787 | | |



Dès la première mesure, on peut constater que les pressions relevées par le tube de Pitot sont tout à fait satisfaisantes. En effet, on peut calculer que le pourcentage d'erreur est de -l'ordre du 10000ème pour les prises statiques, du 100ème pour la prise totale et pour le nombre de Mach.

3.1.2. M = 0.27. P_{io} = 700 mb

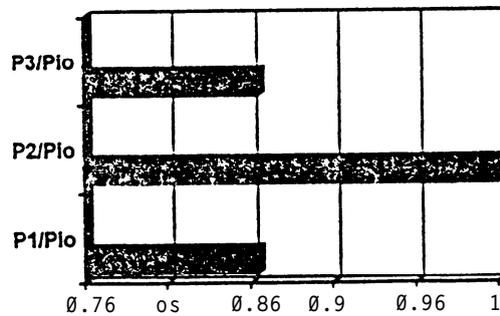
| | P1/P _{io} | P2/P _{io} | P3/P _{io} | P _{io} (mb) | T _{io} (°C) |
|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| | 0.9405 | 1.0002 | 0.9408 | 695.7 | 41.2 |
| Mach | 0.2973 | -0.0003 | 0.2967 | | |



Si on fait varier la pression génératrice, on remarque que le nombre de Mach ne varie presque pas ce qui normal car le Reynolds ne varie pas. D'autre part le pourcentage d'erreur est de l'ordre du 10000ème pour les prises statiques et pour le nombre de Mach.

3.1.3. $M = 0.48$. $P_{io} = 400$ mb

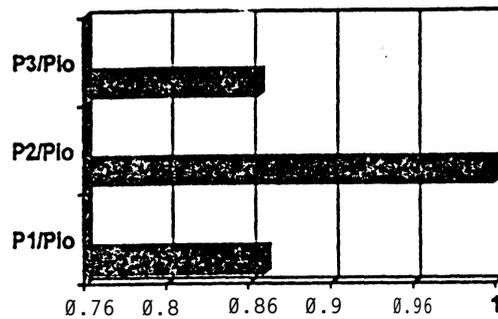
| | P1/Pio | P2/Pio | P3/Pio | Pio(mb) | Tio(°C) |
|-------------|--------|--------|--------|---------|---------|
| | 0.8537 | 0.9994 | 0.8541 | 398.1 | 28.2 |
| Mach | 0.4809 | 0.0295 | 0.4800 | . | |



Le pourcentage d'erreur est de l'ordre du millième pour les prises statiques et le nombre de Mach.

3.1.4. $M = 0.48$. $P_{io} = 700$ mb

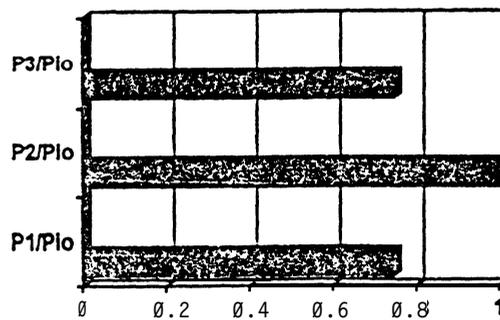
| | $P1/P_{io}$ | $P2/P_{io}$ | $P3/P_{io}$ | P_{io} (mb) | T_{io} (°C) |
|------|-------------|-------------|-------------|---------------|---------------|
| | 0.8589 | 0.9987 | 0.8552 | 699.1 | 42.5 |
| Mach | 0.4809 | 0.0432 | 0.4781 | | |



La variation de la pression génératrice n'influence pas le nombre de Mach. Le pourcentage d'erreur est le même que pour la pression à 400 mb.

3.1.5. $M = 0.46$. $P_{io} = 400$ mb

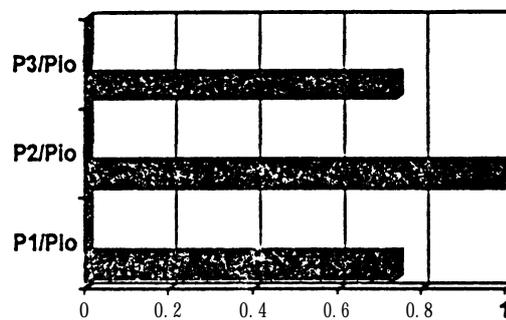
| | $P1/P_{io}$ | $P2/P_{io}$ | $P3/P_{io}$ | P_{io} (mb) | T_{io} (°C) |
|------|-------------|-------------|-------------|---------------|---------------|
| | 0.7450 | 0.9997 | 0.7444 | 397.2 | 34.3 |
| Mach | 0.6624 | 0.0220 | 0.6634 | | |



Le pourcentage d'erreur est de l'ordre du millième pour les prises statiques et le nombre de Mach.

3. 1. 6. $M = 0.66$, $P_{io} = 700$ mb

| | P1/P_{io} | P2/P_{io} | P3/P_{io} | P_{io}(mb) | T_{io}(°C) |
|------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | 0.7383 | 0.9984 | 0.7391 | 698.2 | 47.3 |
| Mach | 0.6729 | 0.0484 | 0.6717 | | |

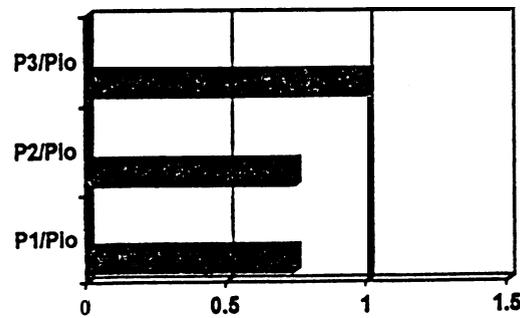


On observe une petite augmentation du nombre de Mach avec une pression génératrice de 700 mb. Le pourcentage d'erreur est de l'ordre du 1000ème pour les prises statiques et du 10000ème pour le nombre de Mach.

3. 1. 7. $M = 0.66$, $P_{io} = 700$ mb

On permute les capteurs P2 et P3

| | P1/P_{io} | P2/P_{io} | P3/P_{io} | P_{io}(mb) | T_{io}(°C) |
|------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | 0.7384 | 0.7391 | 1.0012 | 700 | 47.3 |
| Mach | 0.6729 | 0.6716 | -0.0018 | | |

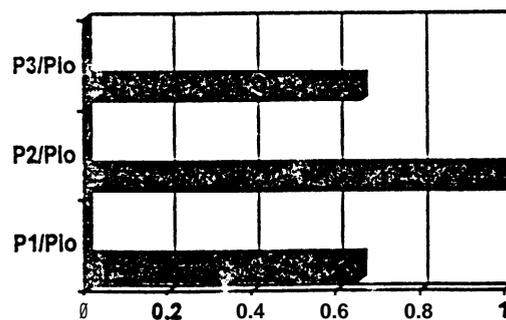


On observe une prise de mesure **différente** lorsque l'on inverse les capteurs. Le capteur qui correspond à la prise de pression P3 est moins précis que l'autre. Ce capteur est relatif à la pression atmosphérique qui varie en fonction de la température.

3.1.8. $M = 0.8$. $P_{io} = 400$ mb

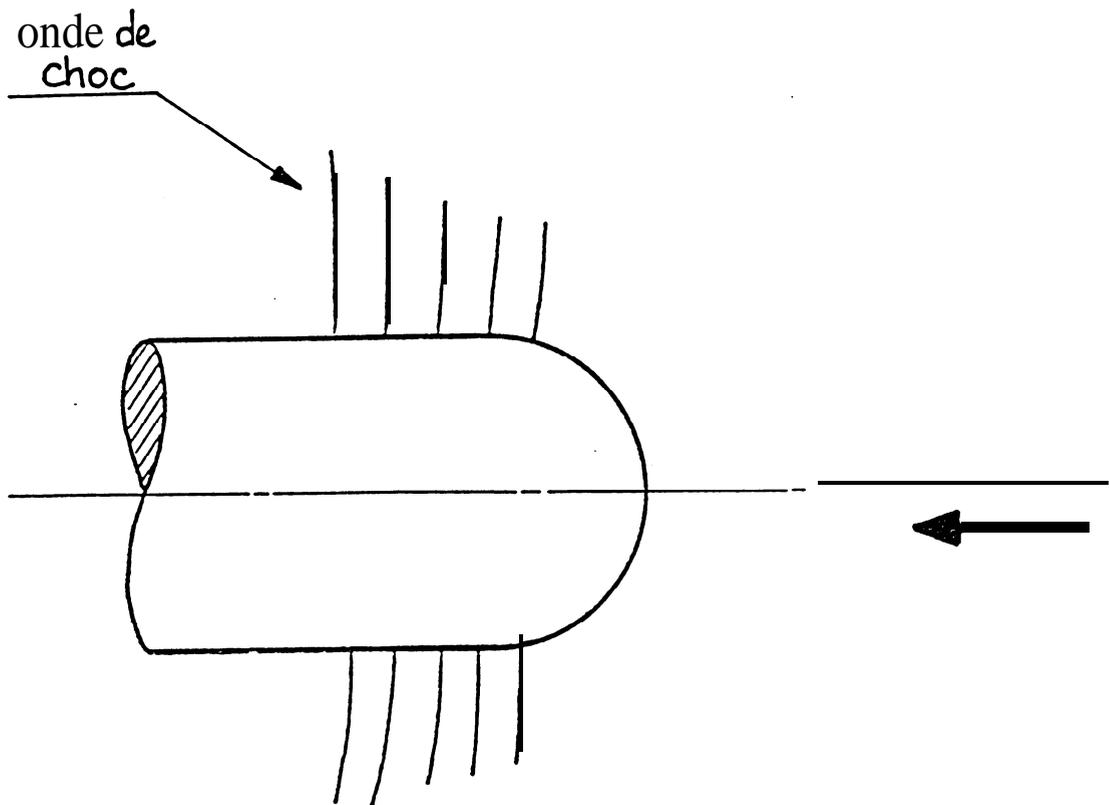
On se remet en bonne configuration

| | P1/Pio | P2/Pio | P3/Pio | Pio(mb) | Tio(°C) |
|-------------|--------|--------|---------------|---------|---------|
| | 0.6549 | 0.9987 | 0.6573 | 399.1 | 37.4 |
| Mach | 0.8017 | 0.0425 | 0.7986 | | |



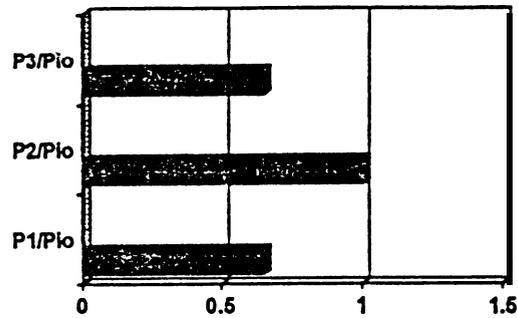
A ce stade de l'expérience, on voit apparaître des petites ondes sur le nez. En effet on entre dans le domaine du transsonique et des perturbations commencent à **apparaître**. Le pourcentage d'erreur est de l'ordre du 1000ème pour les prises statiques et de l'ordre du 10000ème pour le nombre de Mach. On remarque donc que l'augmentation du nombre de Mach influe sur les prises de pression, toutefois les résultats sont encore très satisfaisants.

Ombroscopie tube de Pitot à Mach = 0,8



3.1.9. $M = 0.8, P_{io} = 700 \text{ mb}$

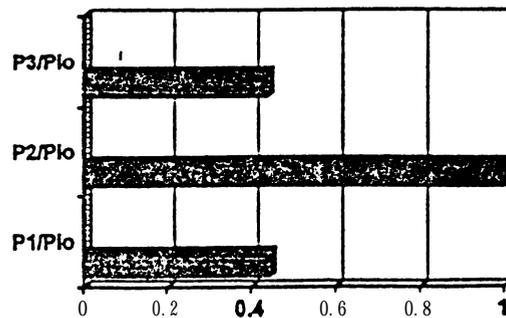
| | $P1/P_{io}$ | $P2/P_{io}$ | $P3/P_{io}$ | $P_{io}(\text{mb})$ | $T_{io}(^{\circ}\text{C})$ |
|------|-------------|-------------|-------------|---------------------|----------------------------|
| | 0.6472 | 1.0010 | 0.6482 | 702.3 | 51.1 |
| Mach | 0.8135 | -0.0014 | 0.8119 | | |



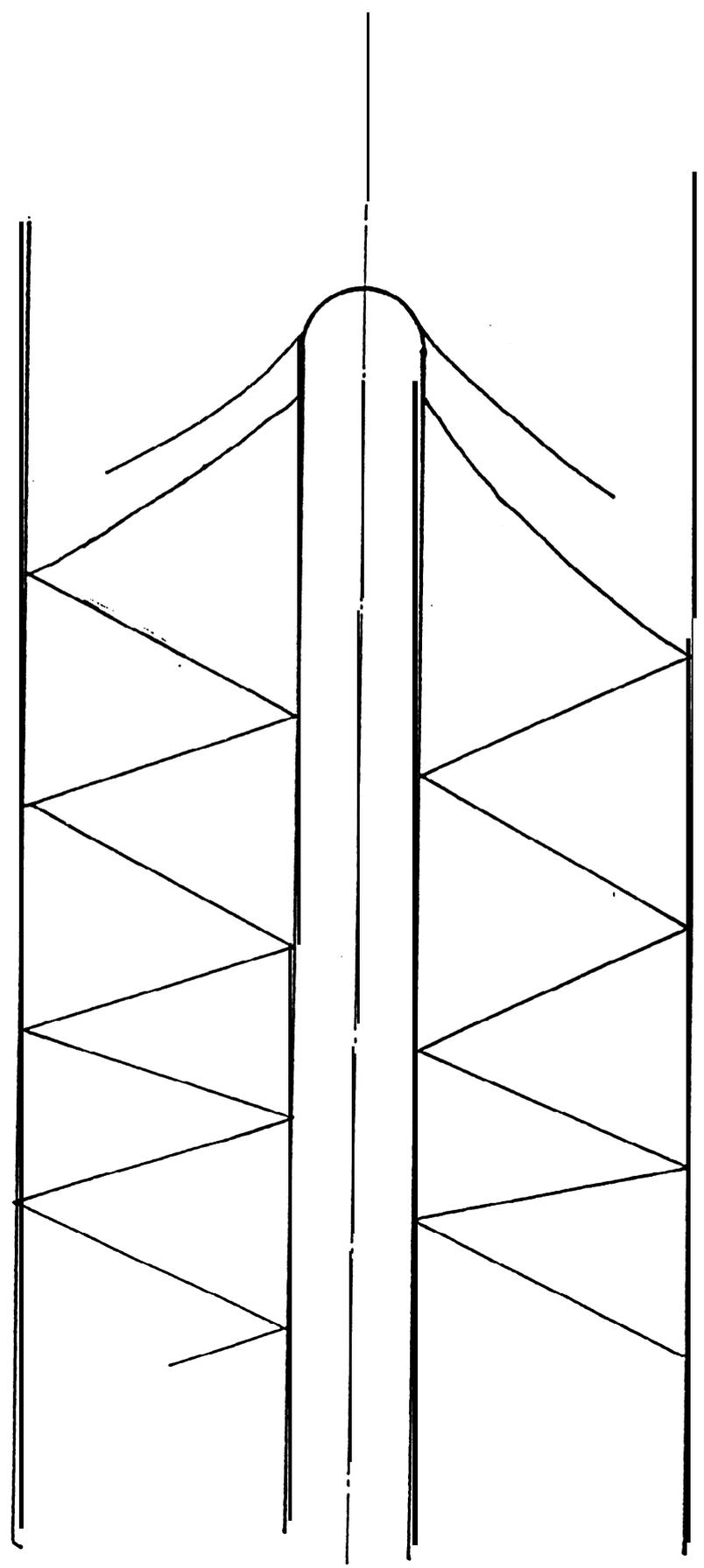
La pression génératrice ayant augmenté, la température de la veine a également augmenté ainsi que le nombre de Mach. Le pourcentage d'erreur est de l'ordre du centième pour les prises de pression et pour le nombre de Mach.

3.1.10. $M = 1.15, P_{io} = 600 \text{ mb}$

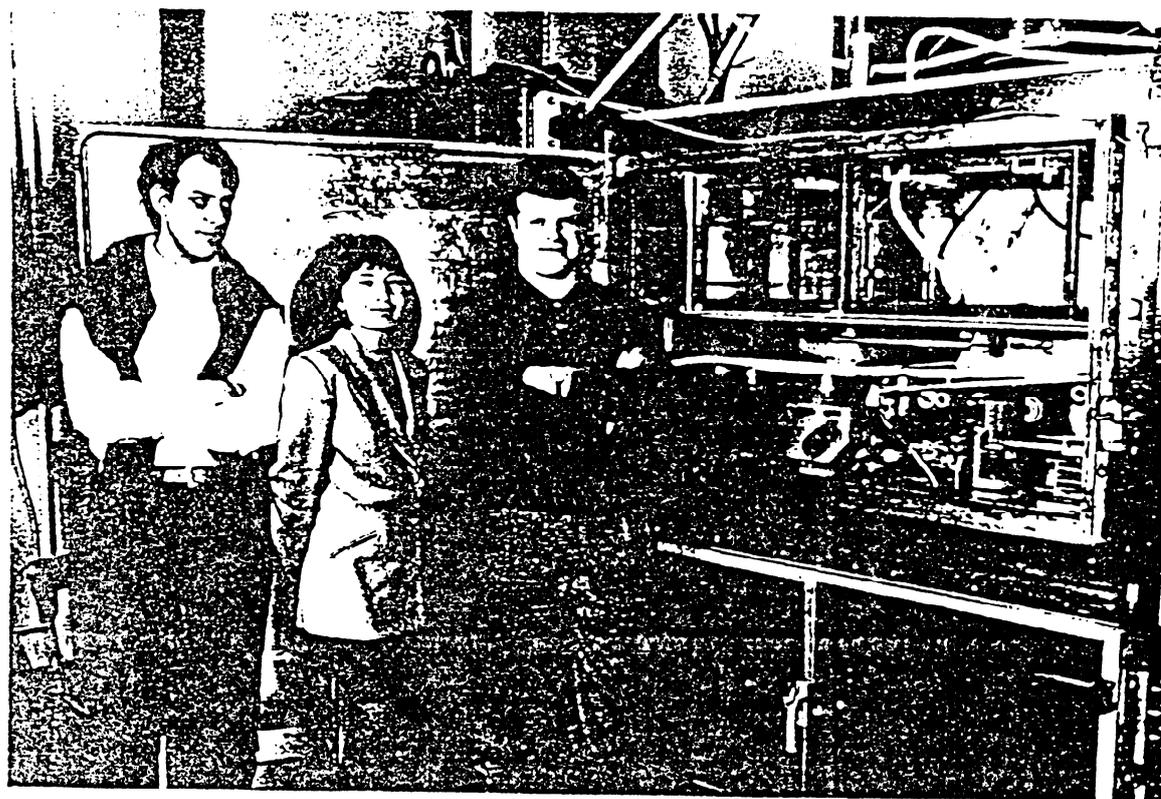
| | $P1/P_{io}$ | $P2/P_{io}$ | $P3/P_{io}$ | P_{io} | T_{io} |
|------|-------------|-------------|-------------|----------|----------|
| | 0.4406 | 0.9972 | 0.4349 | 600 | 43.5 |
| Mach | 1.1487 | 0.0605 | 1.1589 | | |



Ombroscopie tube de Pitot à Mach = 1,15



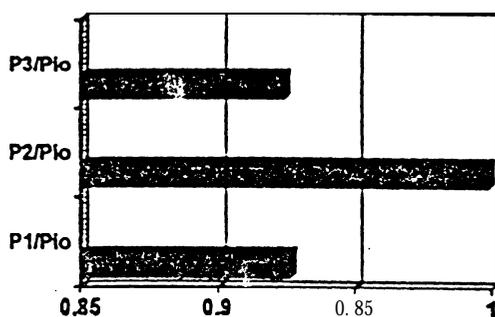
En supersonique on voit apparaître des ondes de chocs sur le nez du tubes de Pitot qui se reflètent ensuite sur la paroi puis à nouveau sur le tube de Pitot (Cf schéma relevé grâce à l'ombroscopie). Malgré ces ondes de chocs les résultats sont encore de l'ordre du 1000ème pour les prises statiques, et du 10000ème pour la pression d'arrêt et de l'ordre du millième pour le nombre de Mach.



3.2. Incidence = 10°

3.2.1. M = 0.33, P_{io} = 400 mb

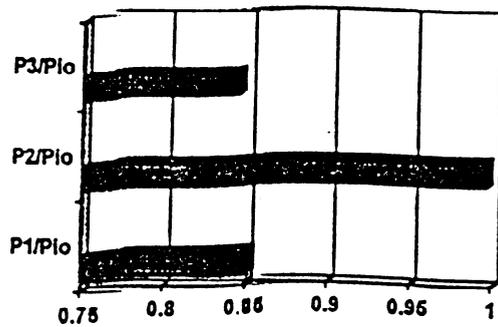
| | P1/P _{io} | P2/P _{io} | P3/P _{io} | P _{io} (mb) | T _{io} (°C) ₀ |
|------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| | 0.9255 | 0.9979 | 0.9232 | 395.5 | 31.3 |
| Mach | 0.3344 | 0.0546 | 0.3399 | | |



Avec une incidence de 10°, les pourcentages d'erreurs sont en dessous de l'ordre du millième pour les prises statiques, la pression d'arrêt et pour le nombre de Mach.

3.2.2. M = 0.45. P_{io} = 400 mb

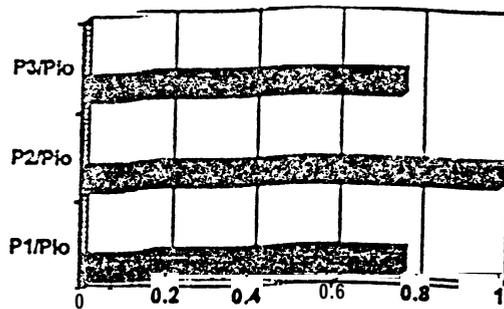
| | P1/P _{io} | P2/P _{io} | P3/P _{io} | P _{io} (mb) | T _{io} (°C) |
|------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------|
| | 0.8511 | 0.9959 | 0.8465 | 395.5 | 31.3 |
| Mach | 0.4856 | 0.0771 | 0.4987 | | |



Pour un nombre de Mach = 0.48, les pourcentages d'erreurs sont en de l'ordre du millième pour les prises statiques. Pour la pression d'arrêt et de l'ordre du centième pour le nombre de Mach.

3.2.3. M = 0.61, P_{io} = 400 mb

| | P1/P _{io} | P2/P _{io} | P3/P _{io} | P _{io} (mb) | T _{io} (°C) |
|------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------|
| | 0.7637 | 0.9941 | 0.7580 | 395.8 | 35.9 |
| Mach | 0.6326 | 0.9917 | 0.6418 | | |



Pour M=0.6 les pourcentages d'erreurs sont de l'ordre du centième pour les prises statiques, la prise totale et le nombre de Mach

4. Conclusion

four le domaine aérodynamique étudié en soufflerie :

- Nombre de Mach variant de 0.2 à 1.16
- Pression génératrice 400 mb et 700 mb
- Incidence de 0° et 10°

on peut constater que les pressions relevées par le tube de Pitot sont tout à fait satisfaisantes. En effet, le pourcentage d'erreur est de l'ordre du millième pour les prises statiques, du centième pour la prise totale et du centième pour le nombre de Mach.

On observe une différence de pression lorsque l'on inverse les capteurs. On peut donc en déduire que l'un des capteurs est moins précis que l'autre. Il faudrait tenir compte de ces erreurs de mesure lors de l'étalonnage, mais dans notre cas sont négligeables.

Pour un nombre de Mach ≈ 0.8 , on voit apparaître des petites ondes sur le nez du tube de Pitot. En effet, on entre dans le domaine du transsonique et des perturbations commencent à apparaître. Le pourcentage d'erreur reste de l'ordre du millième pour les prises statiques et pour le nombre de Mach. On remarque donc que l'augmentation du nombre de Mach influe sur les prises de pression, toutefois les résultats sont encore très satisfaisants.

En supersonique, des ondes de chocs apparaissent sur le tube de Pitot. Celles-ci se réfléchissent sur la paroi puis à nouveau sur le tube de Pitot. Ce phénomène est amplifié par le diamètre relativement faible de la veine par rapport à la sonde. Malgré ces ondes de chocs, le pourcentage d'erreur reste encore très faible.

Avec une incidence de 10° , les pourcentages d'erreurs sont en dessous de l'ordre du millième pour les prises statiques, la pression d'arrêt et pour le nombre de Mach.

Ces résultats étant dans l'ensemble tout à fait satisfaisants, il n'est pas utile d'établir un recalage pour l'utilisation du Tube de Pitot.

