الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالى
Ministère de l'Enseignement Supérieur

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
ECOLE NATIONALE POLITECHNIQUE D'ALGER
E. N. P. A

DEPARTEMENT GENIE MECANIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

INGENIORAT D'ETAT EN GENIE MECANIQUE

THEME :

BANC D'ESSAI DE MESURE DE LA PORTANCE D'UNE AILE

1 PLAN

Etudié par :
NOURA BELKHEIR

Proposé par :
A. WERNER

Promotion Janvier 1985

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالى
Ministère de l'Enseignement Supérieur

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
ECOLE NATIONALE POLITECHNIQUE D'ALGER
E. N. P. A

DEPARTEMENT GENIE MECANIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

INGENIORAT D'ETAT EN GENIE MECANIQUE

THEME :

BANC D'ESSAI DE MESURE DE LA PORTANCE D'UNE AILE

Etudié par :

NOURA BELKHEIR

Proposé par :

A. WERNER

Promotion Janvier 1985

DEDICACES

Je dedie ce modeste travail.

- A mes chers parents qui se sont sacrifiés pour me voir atteindre ce but.
- A mes frères et soeurs.
- A tous ceux qui me sont chers
- A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin, durant mes études.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tous les enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique qui ont contribuer à ma formation d'Ingenieur et en particulier ceux du département de Genie Mecanique.

J'exprime ma vive reconnaissance aux agents et techniciens de l'atelier et de la maintenance et en particulier Mr. Abdelkader pour sa sympathique assistance technique, materielle et morale.

Je reitère mes remerciements à Mr. ANDRZEJ WERNER pour ces conseils et son suivi constant qu'il ma prodiguer tout le long de mon travail.

Que tous ceux qui ont contribuer de loin ou de près à la mise en forme de ce projet trouveront ici l'expression de ma profonde gratitude.

ملخص

يتمثل هذا العمل في انجاز مركب تجريبي بداكوجي لقياس قوة الحمل للجناح، ويشمل هذا الجهاز على ميزان هوائي-ديناميكي لقياس قوة الحمل للجناح الموضوع بداخل منفخة الهواء بالمخبر الطاقوي وكذلك على مسبر لسرعة ومقياس للحرارة، هذان الأخيرين يستعملان لمعرفة خواص الهواء المتحرك بداخل المنفخة وكل هذا سيمكننا من معرفة خاصية الجناح المستعمل.

Résumé.

Le sujet consiste à réaliser un banc d'essai de mesure de la portance d'une aile ; celui-ci comprend alors une balance aérodynamique pour mesure de la portance de l'aile plongée dans la soufflerie du laboratoire, une sonde de vitesse, et un thermomètre afin de connaître les paramètres de l'air circulant. Ce qui va nous permettre de relever la caractéristique de notre aile.

Summary.

The point of this work is realizing a test rig that permits to mesure the wing lift. It is compounded of a aerodynamic balance measuring the lift of a wing installed within a laboratory wind tunnel, of a Pitot head and of a termometer, the two later for determination of air wind parameters. This set permits to reveal the lift caracteristics in function of the angle of attack.

SOMMAIRE

INTRODUCTION

Les phénomènes aerodynamiques interviennent dans un très grand nombre de problèmes, chaque fois qu'un corps se trouve en mouvement relatif par rapport à un fluide.
L'ecoulement dans une tuyère, le déplacement d'un mobile dans l'air mettent en cause des phénomènes physiques soumis aux lois de l'aerodynamique ou plus généralement de la mecanique des fluides.
Des travaux ont été entrepris depuis plusieurs siecles sur le plan theorique comme celui de la decouverte des lois expériment-ales. En raison des problèmes posés par les programmes d'avions modernes, les recherches aerodynamiques tiennent maintenant une place considerable dans les differents domaines conserneés ; les théoriciens ont la possibilité de traiter numeriquement des problèmes jusqu'ici inabordables, les physiciens et les Ingenieurs disposent de moyen de simulation du vol et d'appareillage de mesure mieux adaptés.
La technique des essais sur modèle reduit est un moyen de simulation qui permet d'etudier un bon nombre de problèmes.
Ce moyen de simulation n'est autre que des lois de similitudes.
Nous utiliserons ce moyen de simulation pour mesurer les forces aerodynamiques s'exerçant sur l'aile.

Les appareils ou instruments de mesure, ces mesures qui peuvent être locales ou globales, donnent souvent de bon résultats. Nous mesurons la vitesse de l'air en écoulement dans la tuyère ainsi que la température de cet air avec ces instruments de mesure.

BUT DU PROJET

Nous nous disposons d'une soufflerie dans notre laboratoire et de deux travaux faits par Mr. Diffallah et Mr. Djouadi.

Mr. Diffallah a fait une étude théorique sur cette soufflerie, à determiner les caracteristiques aerodynamiques et géometriques du N.A.C.A 4409, ainsi que ces coordonnés, et la réalisation de ce dernier.

Il a fait aussi une étude sur une balance aérodynamique permettant la mesure direct des efforts s'exerçant sur l'aile.

Comme suite de ce travail, Mr. Djouadi a fait l'étude et la réalisation d'une balance aerodynamique permettant la mesure de la portance qui s'exerce sur cette aile en modele reduit déjà disponible dans notre laboratoire.

Notre tache est au premier lieu d'ameliorer la fidélité de cette balance déjà realiseé, ensuite installé une sonde de vitesse qui necessite une installation de prise de pression statique, dynamique et totale. Et aussi installé un thermomètre afin de relever la temperature du vent dans la soufflerie.

Connaissant cette dernière c'est à dire la temperature et la pression statique, nous pouvons connaitre avec exactitude la masse volumique du vent dans la soufflerie en assimulant l'air circulant à un gaz parfait.

Ensuite nous allons réaliser la fixation de l'aile à cette balance, toute en assurant son orientation variable afin de mesurer la portance exercer sur cette aile.
En dernier lieu, connaissant la vitesse, la masse volumique du vent dans la soufflerie, la surface de l'aile plongée dans celle-ci et la portance exercée sur l'aile, nous allons relever ou encore tracer la caractéristique de notre aile.
En résumé, nous concevons un banc d'essai de mesure de portance exercée sur une aile, qui va rendre cette soufflerie existante dans notre laboratoire operationnelle.

GENERALITES

1_Ecoulement dans les tuyéres

Toute étude energetique des écoulements dans les tuyères est basé sur les equations suivantes :

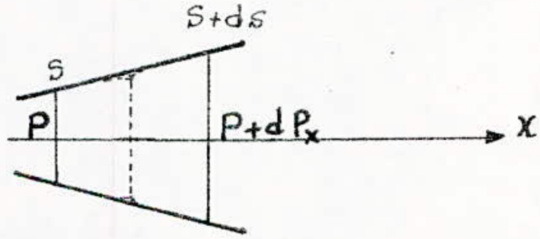
a) Equation de continuite.

b) Equation de quantité de mouvement.

c) Equation d'energie.

sur cette base, nous allons faire une etude sur l'ecoulement unidimentionnel d'un gaz parfait sans frottement:

Soit un fluide traversant une tuyère



S_etant une section dans la tuyère.

P_etant la pression en tout points de la section S.

Appliquant l'equation de quantite de mouvement on a :

$$\Sigma \vec{F} = m\vec{\gamma}$$

$$= \left(S + \frac{dS}{2}\right) dx\, \rho\, \frac{d\vec{V}}{dt} =$$

$$= P.S - (P + dP_x)\left(S + \frac{dS}{2}\right).$$

on neglige $\frac{dS}{2}$ devant S.

d'où $$S\, dx\, \rho \frac{dV}{dt} = S\,(P - P - dP_x).$$

$$dx\, \rho \frac{dV}{dt} = -\, dP_x .$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} dt + \frac{\partial v}{\partial x} v.$$

alors on a $\quad dx\, \rho \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} v \right) = - d P_x$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} v \right) = - \frac{\partial P}{\partial x}.$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} v + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = 0.$$

Pour un ecoulement permanant $\quad \frac{\partial v}{\partial t} = 0$

finalement on a :

$$\frac{\partial v}{\partial x} v + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = 0.$$

c'est l'equation de mouvement d'un fluide en ecoulement permanent.

2 - Equation de Bernouilli

Cette equation est obtenue par integration de l'equation de mouvement précédente avec la condition que la masse volu-mique du fluide est constante.

on obtient : $\quad P + \frac{1}{2} \rho v^2 = c^{te}.$

ou encore $\quad \frac{P}{\rho} + \frac{1}{2} v^2 = c^{te}.$

Pour une masse unité : $\frac{v^2}{2}$ est l'energie cinetique, $\frac{P}{\rho}$ est l'energie potentielle de pression, la somme de ces deux energies est l'energie potentielle de pression totale.

d'où $\quad P + \frac{1}{2} \rho v^2 = P_t.$

P_t etant la pression totale du fluide.

A partir de cette formule on peut deduire la vitesse d'ecoulement du fluide :

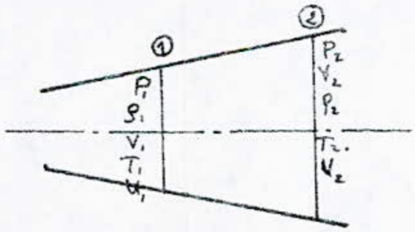
$$V = \sqrt{\frac{2(P_1 - P)}{\rho}}$$

L'equation de Bernouilli n'est applicable que pour un fluide incompressible en ecoulement permanent.

3_ Equation de Saint-venant.

La masse volumique d'un fluide en mouvement n'est pas forcement constante, c'est à dire pour les fluides compressibles l'equation de Bernouilli n'est plus applicable

Soit un fluide compressible en ecoulement dans une tuyrè ; cet ecoulement s'effectue sans échange de chaleur, d'energie mécanique, chimique avec le milieu exterieur (systeme isotherme)



Appliquant a ce fluide le premier principe de la thermodynamique avec les suppositions faites on a

$$P_1 V_1 + gz_1 + U_1 + \frac{1}{2} V_1^2 = P_2 V_2 + gz_2 + \frac{1}{2} V_2^2 + U_2$$

Pour un gaz compressible adiabatique

$$U + PV + \frac{1}{2} V^2 = c^{te}.$$

le facteur gz est negligeable.

En faisant apparaitre l'enthalpie on ecrit:

$$H_S + \frac{1}{2} V^2 = c^{te}.$$

H_S : etant l'enthalpie statique
$\frac{1}{2} V^2$: etant l'energie cinetique } enthalpie totale (H_t)

$$H_t = H_S + \frac{1}{2} V^2$$

c'est l'equation d'energie.

Appliquant ceci pour un ecoulement isentropique dans une tuyère

on a $H = c_p T$

$$\Rightarrow H_t = c_p T + \frac{1}{2} V^2$$

d'autre part $c_p = \frac{\gamma}{\gamma - 1} r \Rightarrow H_t = \frac{\gamma}{\gamma-1} r T + \frac{1}{2} V^2.$

$$H_t = \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{P}{\rho} + \frac{1}{2} V^2.$$

de ceci on a :

$$\frac{1}{2} V_1^2 + \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{P_1}{\rho_1} = \frac{1}{2} V_2^2 + \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{P_2}{\rho_2}.$$

$$\Rightarrow \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} = \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[\frac{P_2}{\rho_2} - \frac{P_1}{\rho_1} \right].$$

or $\frac{P_1}{\rho_1^\gamma} = \frac{P_2}{\rho_2^\gamma} \Rightarrow \rho_2 = \rho_1 \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{1}{\gamma}}.$

en utilisant ceci on a :

$$\frac{V_1^2 - V_2^2}{2} = \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[\frac{P_2}{\rho_2} \cdot \frac{\rho_1}{P_1} - 1 \right] \frac{P_1}{\rho_1}.$$

$$= \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[\frac{P_2}{\rho_1} \cdot \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \frac{\rho_1}{P_1} - 1 \right]$$

finalement :

$$\frac{V_1^2 - V_2^2}{2} = \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{P_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right].$$

L'équation de Saint-Venant n'est qu'un cas particulier de cette équation avec $V_1 = 0$

$$\text{d'où} \quad -\frac{V^2}{2} = \frac{\gamma}{\gamma-1}\,\frac{P_1}{\rho_1}\left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1\right].$$

$$\text{ou encore} \quad V = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1}\,\frac{P_s}{\rho_s}\left[1 - \left(\frac{P_t}{P_s}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right]}$$

cet équation permet de calculer la vitesse du fluide en écoulement, en connaissant la pression statique et totale de ce fluide compressible.

En conclusion nous avons vu comment on peut calculer la vitesse du fluide en écoulement permanent connaissant la pression statique et totale, ainsi que la masse volumique et ceci pour un fluide incompressible ou compressible.

4 - Pression statique, dynamique et totale.

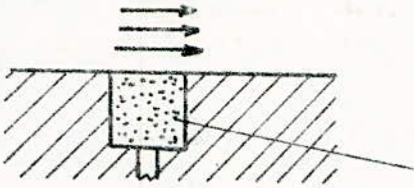
a - Pression statique :

C'est la pression du fluide au repos dans un récipient c'est à dire la vitesse du fluide est nulle.

si on a le fluide en écoulement dans une conduite, la pression statique est la pression mesurée lorsque on se trouve à l'intérieur de la conduite et on se déplace avec le fluide avec la même vitesse, on voit que c'est impossible de faire une mesure pareille.

Le principe de mesure de la pression statique d'un fluide en

ecoulement dans une conduite est le suivant :
un trou de faible diametre dans une paroi de la conduite donne lieu à un ecoulement avec fluide mort.



Il s'etablit une couche limite entre le fluide en mouvement et le fluide au repos, la pression est constante dans le trou et égale à celle qui regne de l'autre côté de la couche limite puisque $\frac{\partial P}{\partial y} = 0$ à travers une couche limite à rayon de courbure infini. On prend généralement le diametre d du trou de l'ordre de 0,4 à 1 mm.

b - Pression dynamique :

C'est la pression due à la vitesse du fluide dans la conduite. Elle agit sur l'orifice d'un tube placé dans le sens contraire du courant, en augmentant la pression statique d'une valeur proportionnelle au carré de la vitesse du fluide.
Cette pression résultant de la force vive du fluide, s'exprime par la formule :

$$P_d = \frac{1}{2} \rho V^2.$$

Dans laquelle :

P_d : est la pression dynamique (en Pascals).

ρ : est la masse volumique du fluide (Kg/m^3).

V : est la vitesse du fluide (en m/s).

C_ Pression totale :

La pression totale est la somme des pressions statique et dynamique, un simple tube recourbé dont la partie anterieure est disposée parallèlement à la vitesse et l'encontre du courant, mesure la pression totale.

$$P_t = P_s + \frac{1}{2} \rho V^2.$$

5_ Temperature statique et totale

a _ Température statique.

C'est la temperature du fluide quand celui-ci est au repos, et pour un fluide en mouvement, c'est la temperature mesurée quand on voyage avec le fluide avec la même vitesse de celui-ci, comme si on a ce fluide au repos.

La mesure ou l'appreciation de la température repose sur cette augmentation du volume des corps lorsque la temperature augmente. On mesure l'augmentation $\Delta\theta$ de la temperature par l'augmentation relative $\frac{\Delta V}{V}$ du volume.

Le thermometre à dilatation est un instrument qui permet de mesurer cette temperature.

b_ Température totale.

C'est la température du fluide si on arrête totalement celui-ci appelé encore température d'arrêt.

De l'équation d'énergie pour un fluide compressible adiabatique

$$H_s + \frac{1}{2} V^2 = H_t.$$

On sait que pour un gaz parfait

L'enthalpie statique $H_s = C_p T_s$

L'enthalpie totale $H_t = C_p T_t$

d'où $C_p T_s + \frac{1}{2} V^2 = C_p T_t$.

$$T_t = T_s + \frac{1}{2 C_p} V^2.$$

L'énergie cinétique se transforme en énergie thermique et s'ajoute à l'énergie du fluide.

6-Masse volumique

La masse volumique d'un corps est la masse de l'unité de volume de ce corps, pour les gaz et les vapeurs le volume d'une masse donnée varie avec la température et la pression, il en résulte que la masse volumique des gaz dépend de la température et de la pression.

Pour un gaz parfait, on peut déterminer sa masse volumique en connaissant sa pression et sa température.

D'après la loi des gaz parfaits

$$\rho = \frac{P}{r.T}.$$

P: étant la pression statique (en Pascals).

T : étant la température statique (°K)

r : étant le constante de ce gaz parfait.

7_L'air peut être assimilé à un gaz parfait

Aux températures usuelles et sous des pressions pas trop élevées, l'air peut être assimilé à un gaz parfait, c'est à dire obéissant aux lois de Mariotte et de Gay_Lussac qui se résument à

$$PV = RT.$$

cette dernière appelée équation caractéristique des gaz parfaits. L'équation caractéristique est valable en tout point d'un fluide, en équilibre ou en mouvement.

8-Compressibilité de l'air

L'air est compressible, assimilé à un gaz parfait, et dans une transformation isentropique on a :

$$\frac{dP}{P} = \gamma . \frac{d\rho}{\rho} .$$

si ΔP est suffisamment faible, $\Delta\rho$ peut être negligé ou encore $\Delta\rho \simeq 0$ comme si on a la masse volumique ρ constante qui est l'équation d'état d'un fluide incompressible.

D'autre part, les variations de pression auxquells donne lieu le mouvement relatif d'un corps dans un fluide sont liées aux vitesses relatives. Elles sont d'autant plus grande que les vitesses sont élevées, il en résulte que l'incompressibilité de l'air est une hypothèse légitime tant que les vitesses sont faible, on peut demontrer ceci aisement.

Apartir de l'equation d'ecoulement unidimentionnel

$$\frac{dP}{\rho} + V\,dV = 0$$

utilisant la vitesse du son $a^2 = \frac{dP}{d\rho}$.

la vitesse du son est une fonction de la temperature.

utilisant encore le nombre de Mach $M = \frac{V}{a}$.

L'equation I donne :

$$\frac{dP}{\rho} \cdot \frac{dV}{V} \frac{V^2}{a^2} \cdot a^2 = 0$$

$$\frac{dP}{\rho} + \frac{dV}{V} M^2 \frac{dP}{d\rho} = 0$$

$$\frac{dP}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dP} + \frac{dV}{V} \cdot M^2 \frac{dP}{d\rho} \cdot \frac{d\rho}{dP} = 0$$

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dV}{V} M^2 - 0$$

Cette expression montre qu'une variation relative de vitesse $\frac{dV}{V}$ produit une variation correlative de masse volumique d'autant plus grande que le nombre de mach est grand.

Exemples pour apprecier ceci

$M = 0,10 \quad \frac{\Delta\rho}{\rho} = 0,5\ \%$

$M = 0,14 \quad \frac{\Delta\rho}{\rho} = 1,9\ \%$

On remarque que pour un nombre de Mach faible, la variation relative de la masse volumique est trés faible.

On conclu pour des faibles vitesses, l'air peut être considerer comme un fluide incompressible.

MESURE DE LA VITESSE LOCALE

1_ Principe de mesure de la vitesse de l'air

Précédement nous avons vu qu'on peut considerer l'air comme un fluide incompressible.

A partir de l'equation de Bernouilli vu dans le chapitre précédent que pour un fluide incompressible en ecoulement permanent la vitesse d'ecoulement est donnee par :

$$V = \sqrt{\frac{2}{\rho}\left(P_t - P_s\right)}$$

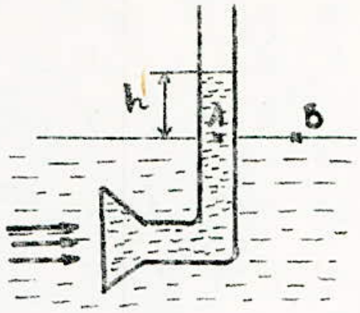
Alors pour mesurer la vitesse du fluide dans une veine sous pression, nous mesurons la difference entre la pression totale et statique c'est à dire la pression dynamique.

L'instrument qui peut nous donner cette difference de pression est le tube de pitôt ou Prandtl.

Il faut connaitre aussi la masse volumique du fluide pour connaître cette dernière, il faut mesurer la temperature et la pression statique de la veine.

2_ Tube de Pitôt

C'est en 1732, que le savant français HENRI PITOT proposa le premier instrument qui porte son nom. Il servait uniquement à mesurer la pression totale et par suite la vitesse des cours d'eau



Le tube de pitôt se composait d'un tube de cuivre recourbé à angle droit dont la branche horizontale munie à son extrimité d'une pavillon plongeant en entier dans l'eau, parallèlement au courant, l'ouverture du pavillon etant dirigeé à l'encontre du courant. L'eau monte dans la branche verticale à un niveau d'autant plus élevée au dessus du niveau d'eau, que la vitesse du courant était elle même plus grande, c'est à dire l'energie cinetique du fluide est transformée en energie potentielle de pression.

$$P_A = P_B \Longrightarrow P_{at} + \rho g h = P_s + \frac{1}{2}\rho V^2$$

P_A, P_B c'est la pression totale.

Comme c'est un ecoulement à l'air libre $P_s = P_{at}$.

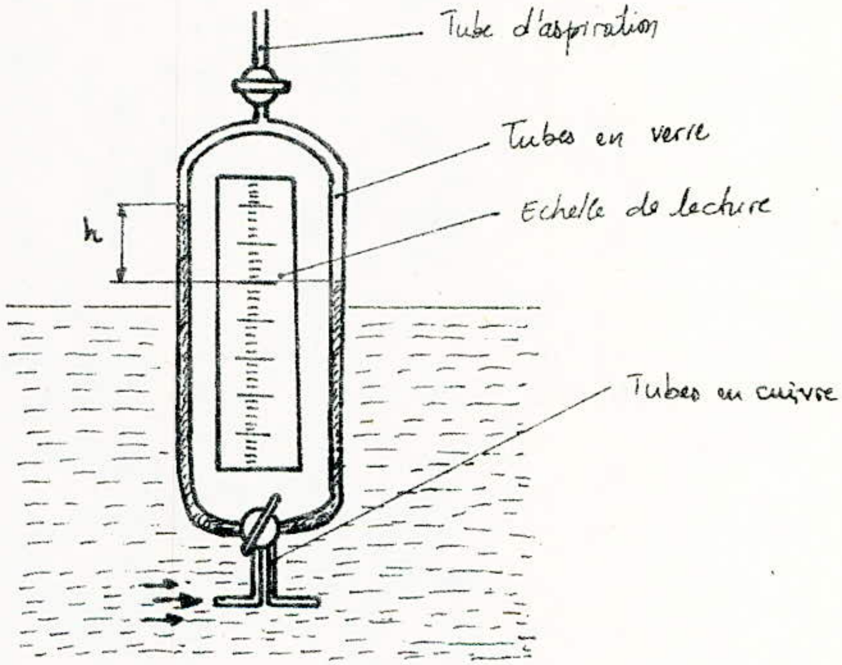
$$\Longrightarrow \rho g h = \frac{1}{2}\rho V^2 \Longrightarrow h = \frac{V^2}{2g}.$$

De cette manière Mr. HENRI PITOT a determine la vitesse de l'ecoulement de l'eau.

Dés lors ce tube ne c'est arrêté d'être perfectionner.

3_Tube de Darcy

En 1856, Darcy perfectionna le tube de pitôt et le nouvel instrument, appelé « tube de Pitôt de Darcy » fût également utilisé par son auteur pour la mesure de la vitesse des cours d'eau.



Pour utiliser l'instrument, on plongeait les tubes en cuivre dans l'eau, parallèlement au sens du courant.
Dans la branche située à l'encontre du courant, le liquide montait au dessus du niveau de l'eau, dans la branche située en sens inverse, le liquide descendait en dessous du niveau de l'eau. Pour faire la lecture plus aisement, on pouvait ramener les niveaux dans les tubes au-dessus du niveau de l'eau, en creant une aspiration à l'ajutage superieur, cette aspiration ne modifiait pas la dénivellation entre les branches du tube.

La théorie qui régit le fonctionnement du tube de Darcy est la suivante :

Le tube situé à l'encontre du courant, mesure la somme de la pression statique et de la pression dynamique on a donc

$$P_s + \rho \frac{V^2}{2}$$

Le tube situé en sens inverse du courant mesure la différence de la pression statique et la pression dynamique on a donc :

$$P_s - k . \rho \frac{V^2}{2}.$$

Le coefficient k tient compte de l'influence des remous provoqués par le tube lui-même sur le second orifice. Il est établi expér-imentalement. En soustrayant algébriquement les deux termes ci-dessus, on obtient la pression différentielle que nous désignerons par la lettre h.

$$h = \rho \frac{V^2}{2} (1 + k).$$

C'est à dire la différence de pression lue sur les tubes en verre. Toujours étalonnés après construction, les tubes de Darcy donnent des indications coïncidant le plus souvent avec les valeurs théoriques c'est à dire que le coefficient k est égal à 1, on peut écrire donc

$$h = 2 . \frac{\rho V^2}{2}$$

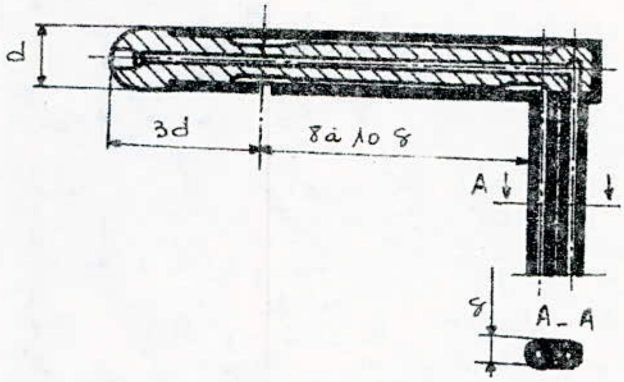
h : pression différentielle lue sur les tubes (en Pascals)

ρ : masse volumique du fluide dans la conduite (kg/m³)

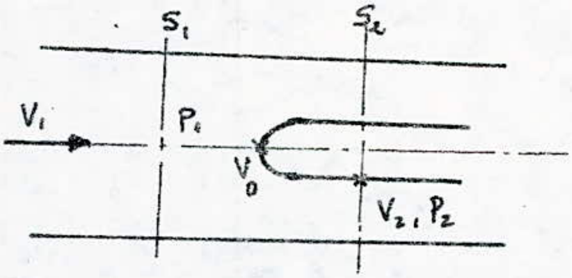
V : vitesse du fluide (m/s).

- Tube de Prandtl

: tube de Prandtl mesure la difference entre la pression totale + la pression statique c'est à dire la pression dynamique



Considerons, ci-dessous un tube de Prandtl placé au centre d'une conduite dans laquelle circule un fluide avec une vitesse V_1 et une pression statique P_1.



On constate qu'à l'entreé de la prise de pression totale, la veine fluide est arretée et sa vitesse est nulle.

Cet endroit porte le nom de point de stagnation.

Appliquons l'equation de Bernouilli, dans les sections S_1 et S_2

nous aurons :

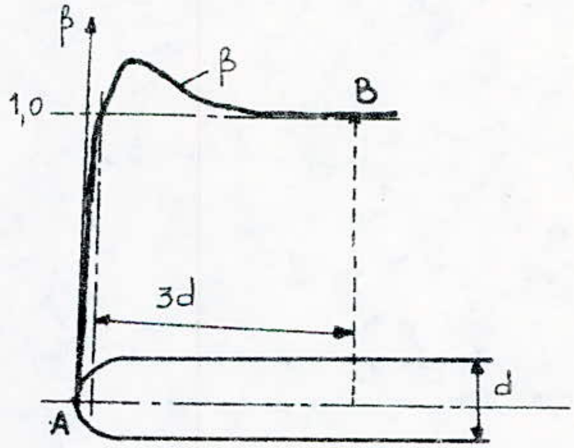
$$P_1 + \rho\frac{V_1^2}{2} = P_2 + \rho\frac{V_2^2}{2}.$$

Posons maintenant que : $\beta = \frac{V_2^2}{V_1^2}$.

nous aurons

$$P_2 = P_1 - (\beta - 1)\rho\frac{V_1^2}{2}.$$

Or l'expérience montre qu'en déplaçant la section S_2 le long du tube de Prandtl, le coefficient β varie comme indiqué par la courbe suivante :



L'examen de cette courbe montre qu'au point A, le coefficient β est nul, c'est à dire qu'en ce point, la vitesse V_2 est nulle et la pression statique est augmentée de la valeur de la pression dynamique.

$$P_A = P_1 - (0 - 1)\rho\frac{V^2}{2}$$

d'où

$$P_A = P_1 + \rho\frac{V^2}{2}.$$

Par contre au point B, le coefficient est égale à 1, ce qui signifie qu'en ce point, les vitesses V_1 et V_2 sont égales, d'où l'égalité des pressions statiques P_1 et P_B

$$P_B = P_1 - (1-1)\rho\frac{V^2}{2}$$

$$P_B = P_1 .$$

D'où, entre les points A et B, on a une difference de pression égale a:

$$P_1 + \rho\frac{V^2}{2} - P_1$$

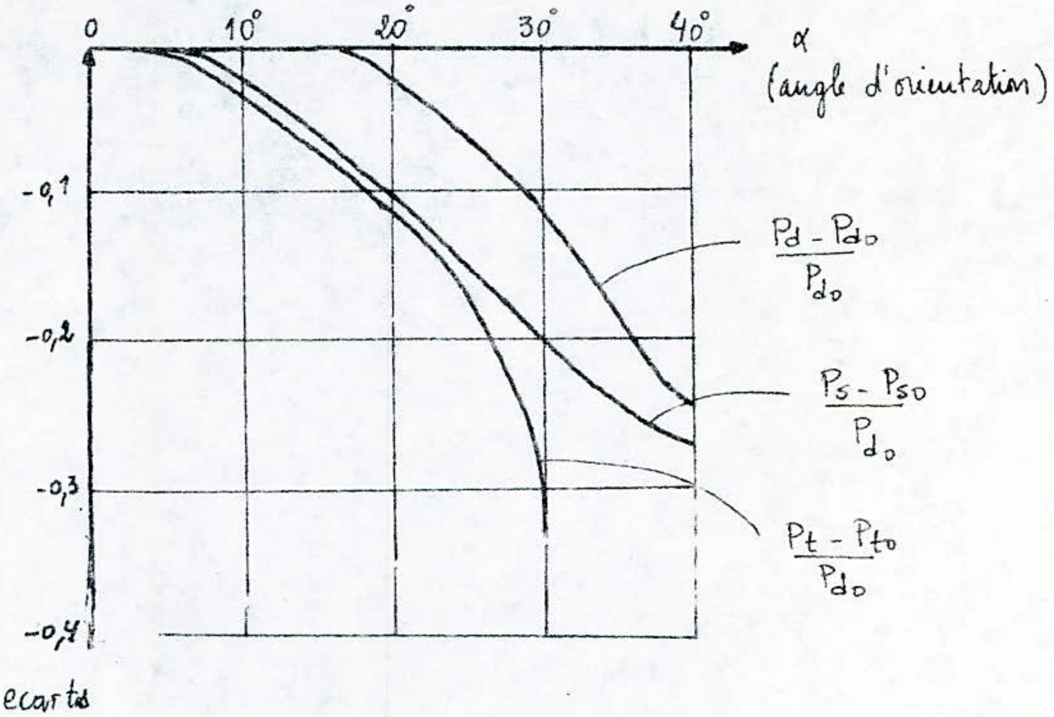
c'est à dire $\rho\frac{V^2}{2}$.

C'est la pression dynamique du fluide considéré.

Remarques:

Pour obtenir des mesures précises, il est necessaire que l'axe du tube de Pitot soit dans le même sens que celui du courant fluide. une erreur d'orientation superieure a 10° provoque une erreur sur la mesure de la pression differentielle de 1% environ, car le coefficient β que nous venons de définir precédement varie d'une manière differente que celle indiquee pour un angle d'inclinaison nul, et par suite la vitesse V_2 est differente de V_1 au point B, de même que pour le point A la vitesse en ce point n'est pas nulle.

Le graphique suivant donne les ecarts sur les quantités mesurées rapportés à la pression differentielle (P_{do}) dans le domaine incompressible pour un tube de Prandtl.



P_{d_0} : pression dynamique pour $\alpha = 0$

P_{s_0} : pression statique pour $\alpha = 0$

P_{t_0} : pression totale pour $\alpha = 0$.

De toute manière, en général la vitesse est determinée à 0,5% près.

En conclusion, les tube de Pitôt, Darcy ou Prandtl ont l'avantage de ne creer presque aucune perte de charge dans le circuit du fluide lors de leurs utilisations.

Ils sont trés pratiques et si faciles de les installer pour mesure de la vitesse.

TRAVAUX EFFECTUES

1 - Amelioration de la fidelité de la balance

Notre banc d'essai comporte une balance aerodynamique permett-
-ant la mesure de la portance exercée sur l'aile.
La réalisation de cette balance qui a donné des resultats
insatisfaisants aprés essais n'était pas au point et apte
pour aucune utilisation.
Les resultats des essais faites sur la balance (polycopie de Mr.
Djouadi) montre une mauvaise fidelité de cette balance, c'est-
ā dire pour un même effort appliqué sur le levier de la
balance, on a deux lectures differentes sur le tube gradué
pour des temps differents.
La précision estimeé lors de ces dernières essais était de l'ordre
de 5%.
L'emploi d'une membrane moins epaisse de l'ordre de 1 mm,
que celle utilisée et avec une raideur plus faible, dans le
transmetteur de force comme a été jugé va nous permettre d'obtenir
une meilleure fidélité de la balance.
Dans le même but c'est à dire pour ameliorer la fidélité de la
balance, nous avons utilisé un tube gradué de plus grand
diamètre que celui utilisé avant.
Pour une meilleure emplacement de la membrane, nous avons

été amené à adapter un nouveau montage de la membrane, pour avoir une certaine liberté dans l'emplacement de celle-ci, pour ce faire nous avons échangé tout le transmetteur de force, une cuve en plexi-glasse (figure n°1), et un anneau pour fixation de la membrane toute en assurant une bonne etanchéité.

2 - Vérification de la fidelité de la balance

Après avoir changé la membrane du transmetteur de force de notre balance, nous avons procédé à des essais permettant de contrôler le bon fonctionnement de la membrane

Pour simuler la portance qui s'exerce sur la maquette, nous avons materialisé celle-ci par des poids obtenus à partir de differents volume d'eau (Figure n°2).

Le poids étant dirigé dans le sens contraire de la portance que l'on a à mesurer, tous les effets que l'on pourrait obtenir par cette methode sont inversés. Pour tester le fonctionnement de la balance, nous avons imposé à la membrane une certaine pression initiale P_o. cette pression est obtenue par l'utilisation d'un contrepoids placé sur le levier de la balance du coté du transmetteur de force. sous l'effet du contrepoids un volume V_o est chassé dans le tube, ce qui entraine une deviation d'eau d'une hauteur h_o.

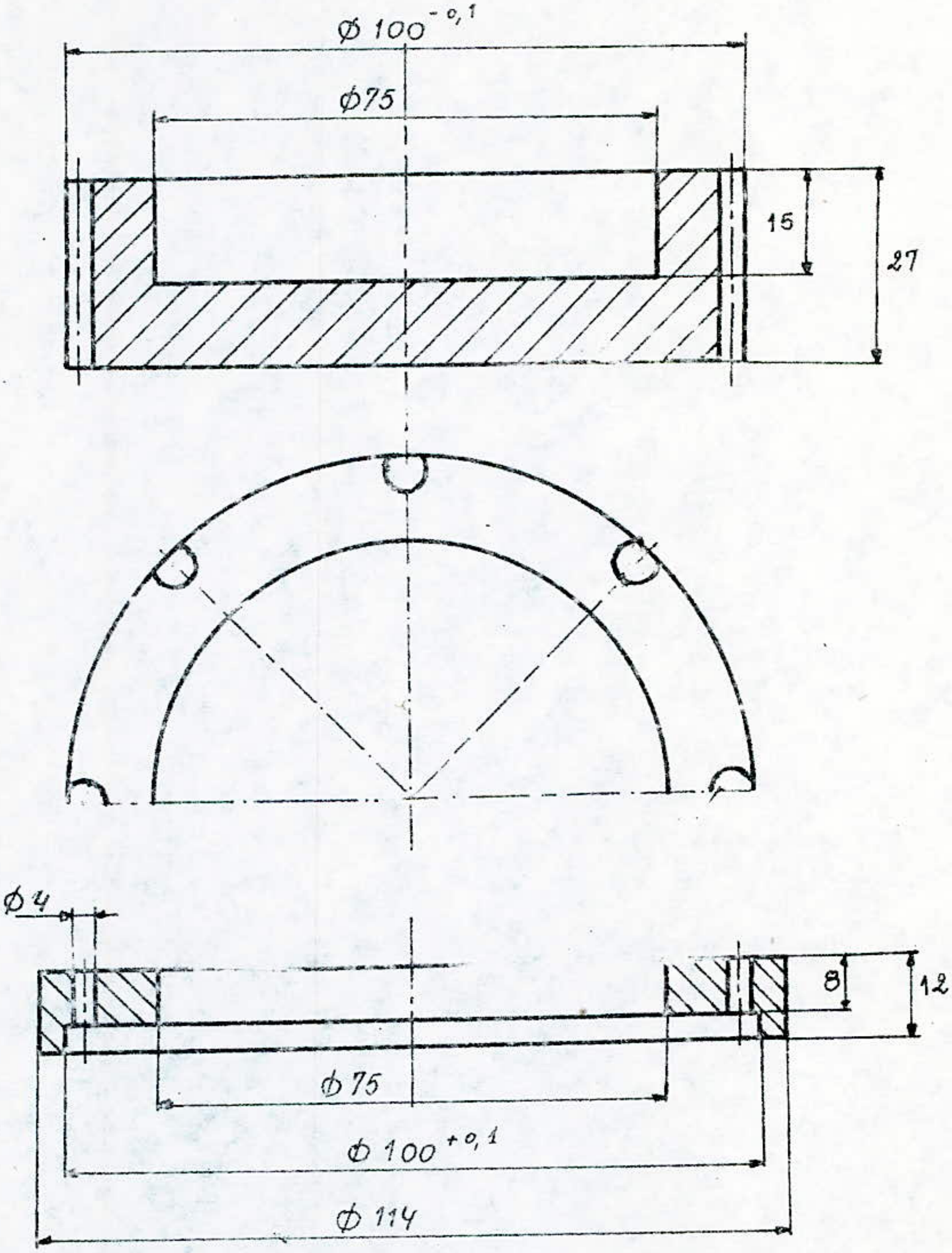


figure n° 1   Récipient avec verre - membrane.

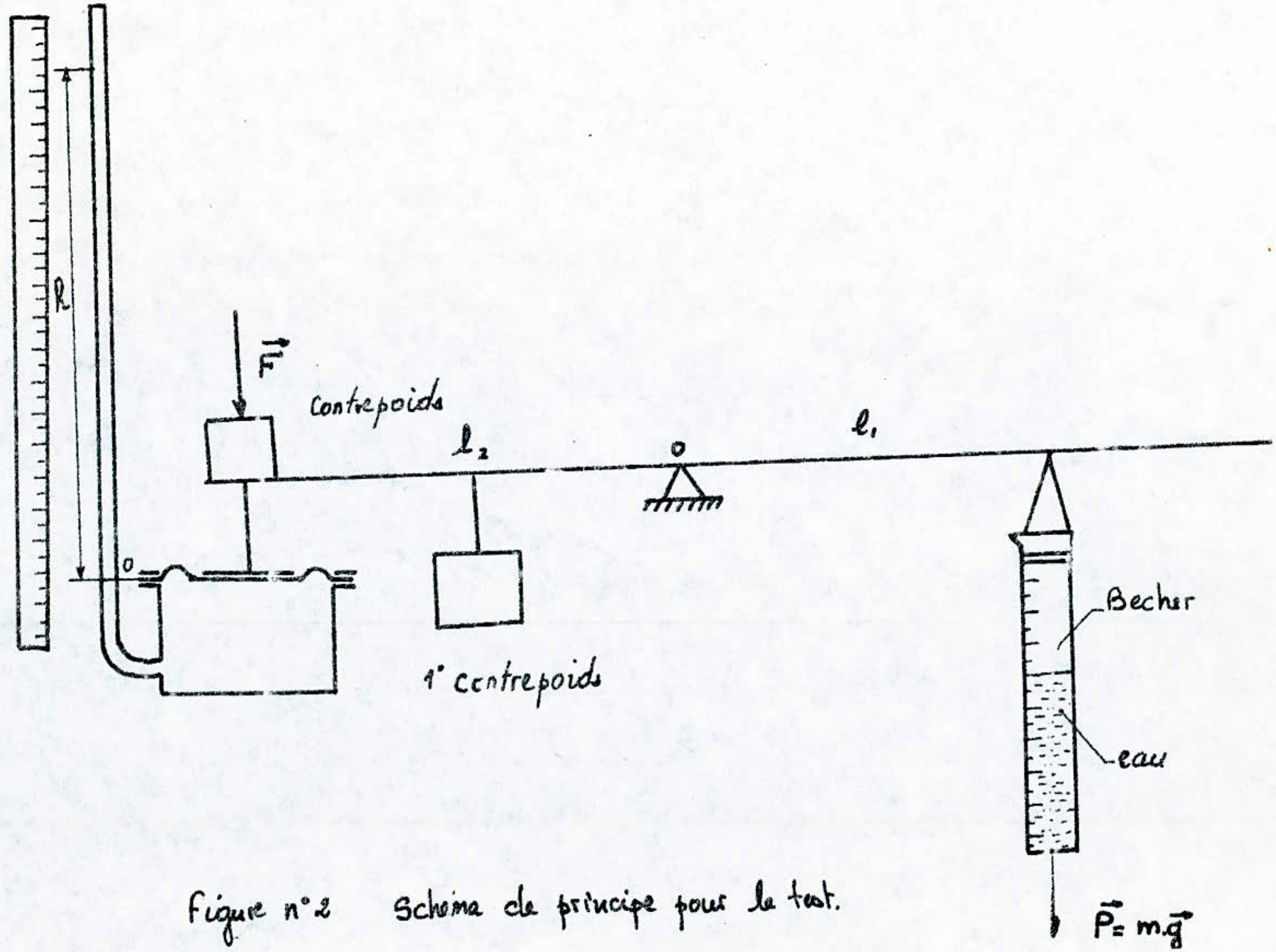


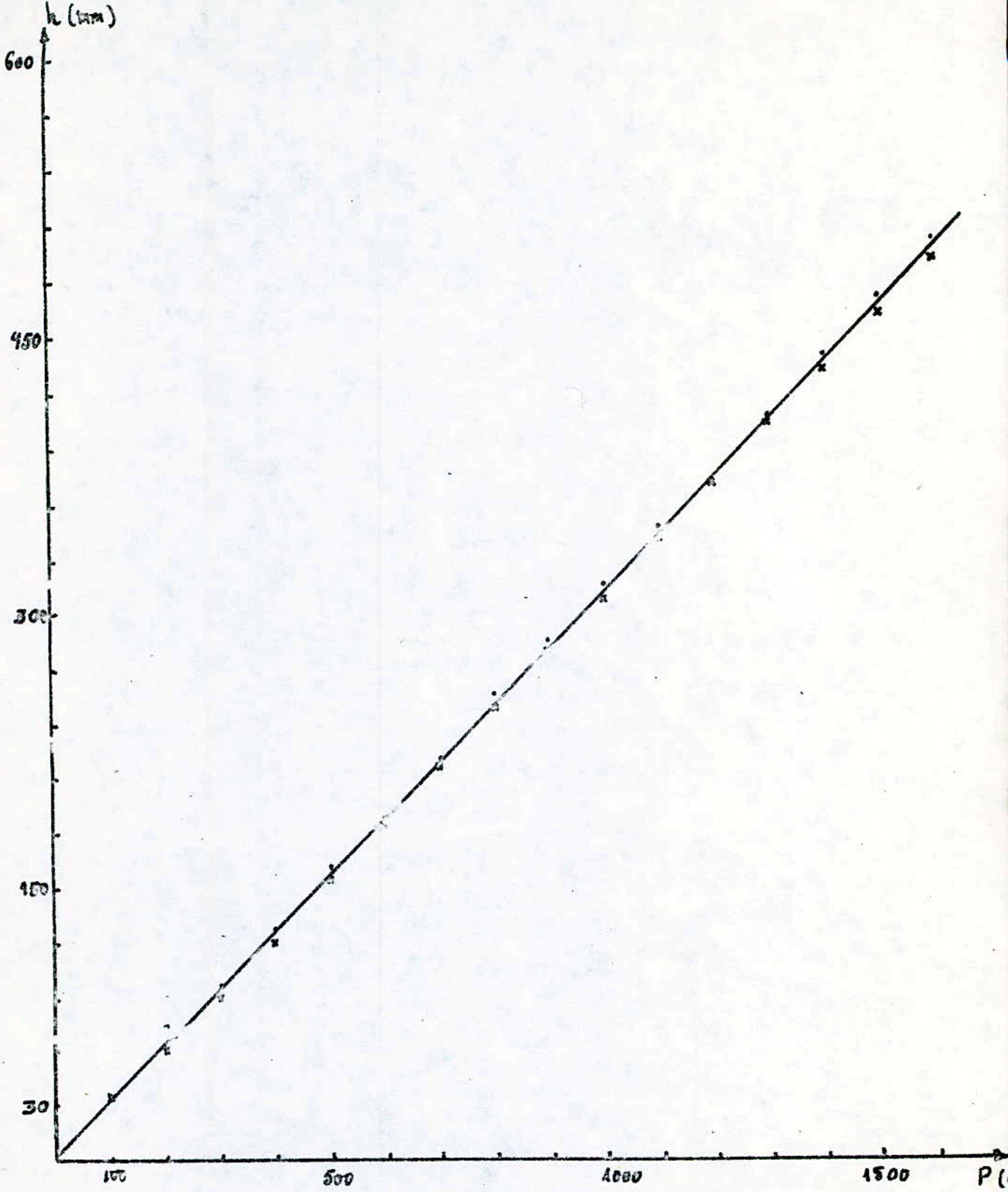
figure n° 2 Schéma de principe pour le test.

sous l'action d'un poids connu, placé en un point connu sur l'axe portant l'aile ; la force dûe au contrepoids tend à être equilibrée entraînant ainsi une diminution de hauteur h dans le tube.

La hauteur $h_0 - h$ doit être proportionnelle au poids appliqués.
Pour pouvoir varier l'effort appliqué à l'extremité du levier, nous avons utilisé un becher dans lequel nous avons versé des quantités d'eau variant de 100 à 100 g. Pour chaque effort appliqué, nous avons relevé la valeur $h - h_0$ correspondante.

Le test à été effectué aussi bien dans le sens croissant des poids, que dans le sens décroissant, pour ce dernier, nous avons pipeté à partir de la valeur maximale, des poids de 100 à 100 g.
Nous avons fait ce test plusieurs fois afin d'être sûr de notre test.

Les resultats obtenus pour les deux sens sont coherents et nettement meilleurs que celle obtenues par l'ancienne membrane (utilisée par Mr. Djouadi), une courbe représentative traduit ces resultats.
Les points obtenus lors du test son lineaire, et on peut dire que notre courbe est une droite d'equation $y = kx$ aux erreurs de manipulation et de lecture à cause de la capilarité près, la droite obtenue pour l'essai des poids croissants est presque confondue avec celle obtenue pour l'essai des poids decroissants.



Courbe représentative expérimentale du test de la membrane.

. points expérimentaux dans le sens croissant des efforts.

x " " " " décroissant " "

On conclu, que notre balance fonctionne bien ainsi que sa fidélité est bonne.

3_ Réalisation du dispositif de mesure de la vitesse locale.

a_ Realisation du tube de pitôt.

Le tube de pitôt, comme nous avons indiqué permet de mesurer la pression totale d'un fluide en écoulement.

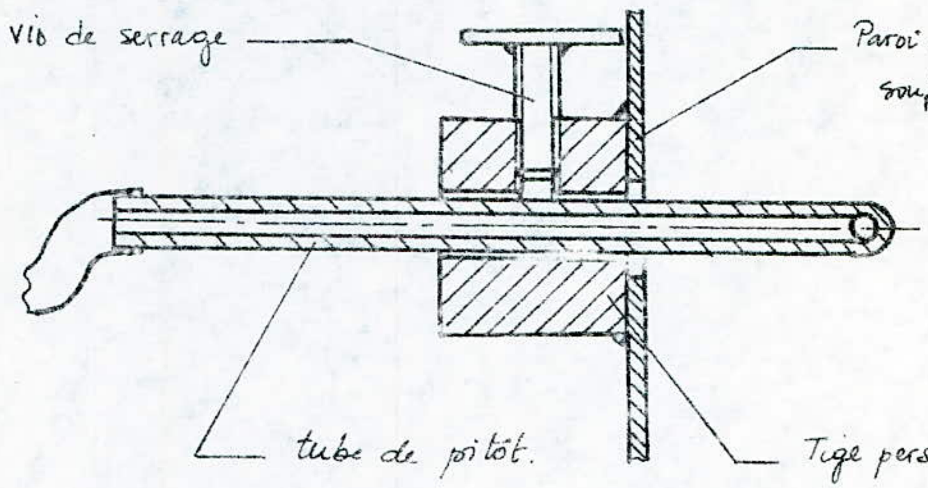
Pour realiser ceci, nous avons pris un tube en cuivre de diametre interieur et exterieur respectivement 4 et 6 mm, et nous l'avons coudé à angle droit, la branche horizontale est plongé dans la soufflerie parallèlement au courant, dont l'ouverture est dirigé à l'encontre du courant.

Nous avons choisi un tube de diametre petit pour ne pas perturber l'ecoulement du fluide, qui a une influence directe sur la mesure de la portance s'exerçant sur l'aile.

Pour la fixation de ce tube à la soufflerie existante nous avons conçu un dispositif qui va nous permettre de translater le tube avec un vis de serrage afin de fixer le tube à la position voulue, la translation de ce tube que de plus nous l'avons gradué tout les 5 cm se fait suivant l'axe de symetrie horizontal de la section de la soufflerie où on va placer notre aile qui est liée à la balance.

De cette façon, on va prendre des mesures en des points bien fixés et repérés

Notre tube de pitôt avec le système cité :



Pour pouvoir lire ces mesures, nous avons relié ce tube de pitôt à un poste de mesure.

b – Poste de mesure.

Pour determiner la vitesse d'1 fluide incompressible en ecoulement permanent, il nous faut la pression statique et totale, et la masse volumique de ce fluide.

Pour determiner ces parametres, nous avons pris deux prises de pression, une statique et l'autre totale, de la soufflerie

La prise de pression statique nous l'avons fait à la paroi à l'aide d'un trou percé sur la paroi pour [illegible]

La prise de pression totale est [illegible] par le tube de pitôt.

Notre dispositif de mesure comprend alors (figure n°3) :

- Un tube en U vertical, c'est un tube en verre recourbé en forme de U, et fixé sur une planchette graduée en millimetres.

Les lectures se font en mesurant la différence de niveau du liquide (dans notre tube il y a de l'eau) dans les deux branches et se lisent en millimètres de colonne du liquide utilisé.

$$P = \rho g h .$$

formule dans laquelle

P: pression mesurée.

ρ : masse volumique du liquide utilisé (eau)

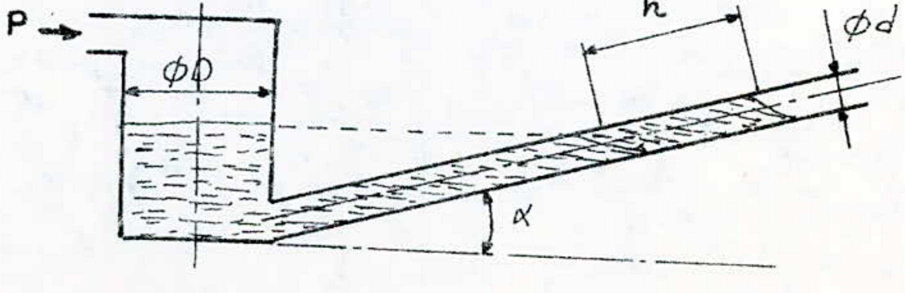
g : accélération de la pesanteur.

h : différence de niveau dans les deux branches.

Ce tube en U nous l'avons réalisé et monté pour mesurer la pression statique dans la soufflerie par rapport à la pression atmosphérique.

- Un tube en U à branche inclinée.

schéma de ce tube :



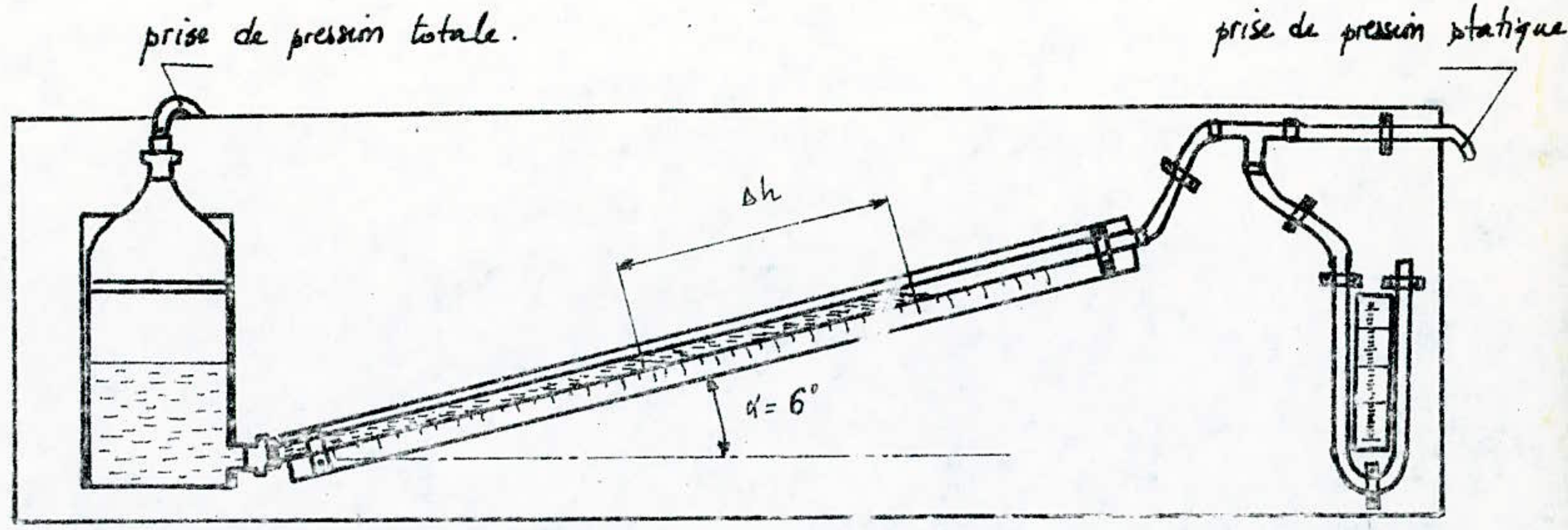


figure n° 3 Poste de mesure.

Le tube en U à branche inclinée dont l'une a un diam. plus grand que celui de l'autre branche, il necessite qu'une seule lecture.

L'equation d'equilibre du tube est donnée par la formule

$$P = \left(1 + \frac{d^2}{D^2}\right) \rho g h . \sin \alpha .$$

si on prend par exemple, un tube en U dont le diametre des branches sont respectivement $D = 100$ mm et $d = 10$ mm

Nous aurons $H = \frac{h}{100}$

H : deplacement dans la branche dont le diametre est grand.

h : deplacement du fluide dans l'autre branche.

La varration de niveau dans les tube est autant plus petite que leur diametre est grand.

Dans notre exemple, l'erreur est de 1 % s'il n'est pas tenu compte du déplacement du zéro de l'appareil.

Toute fois ici, le tube de petit diametre est incliné suivant un certain angle de façon à obtenir de grands deplacement du liquide pour de trés petites variations de pression. Notre tube a un angle d'inclinaison de 6° c'est à dire $\sin 6° \simeq 0,1$ on a un deplacement de 1 cm du liquide (eau) dans la branche inclinee pour une pression

de 1 mm. de colonne d'eau dans le tube en U vertical.
Cet instrument permet de mesurer des pressions à une précision de l'ordre de 0,02 mm de colonne d'eau, il faut toutefois lui assurer une parfaite horizontabilité, contrôlable d'ailleurs par un niveau à bulle.

4_ Mode de fixation de l'aile

Pour fixer l'aile à notre balance, nous avons pris une tige d'une longueur de 130 mm et de diamètre 8 mm en acier doux, un tel petit diamètre pour ne pas influencer la mesure de la portance de l'aile, car une partie de cette tige est plongée dans la soufflerie avec l'aile et les efforts appliqués sur cette tige viennent s'ajouter à ceux de l'aile, ce qui errona notre mesure.
A l'aide de deux tôles en acier doux XC 18 pliées sur l'aile toute en donnant la forme du profil à celles-ci, pour respecter le profil aérodynamique de l'aile, ces deux tôles sont soudées entres-eux et à la tige d'acier (axe de la balance), et nous avons renforcé la fixation de ces deux tôles à l'aile de plus de l'encastrement et le mode de fixation, par des vis de bois (l'aile est faite de bois) de diamètre 3 mm (Figure n° 4).

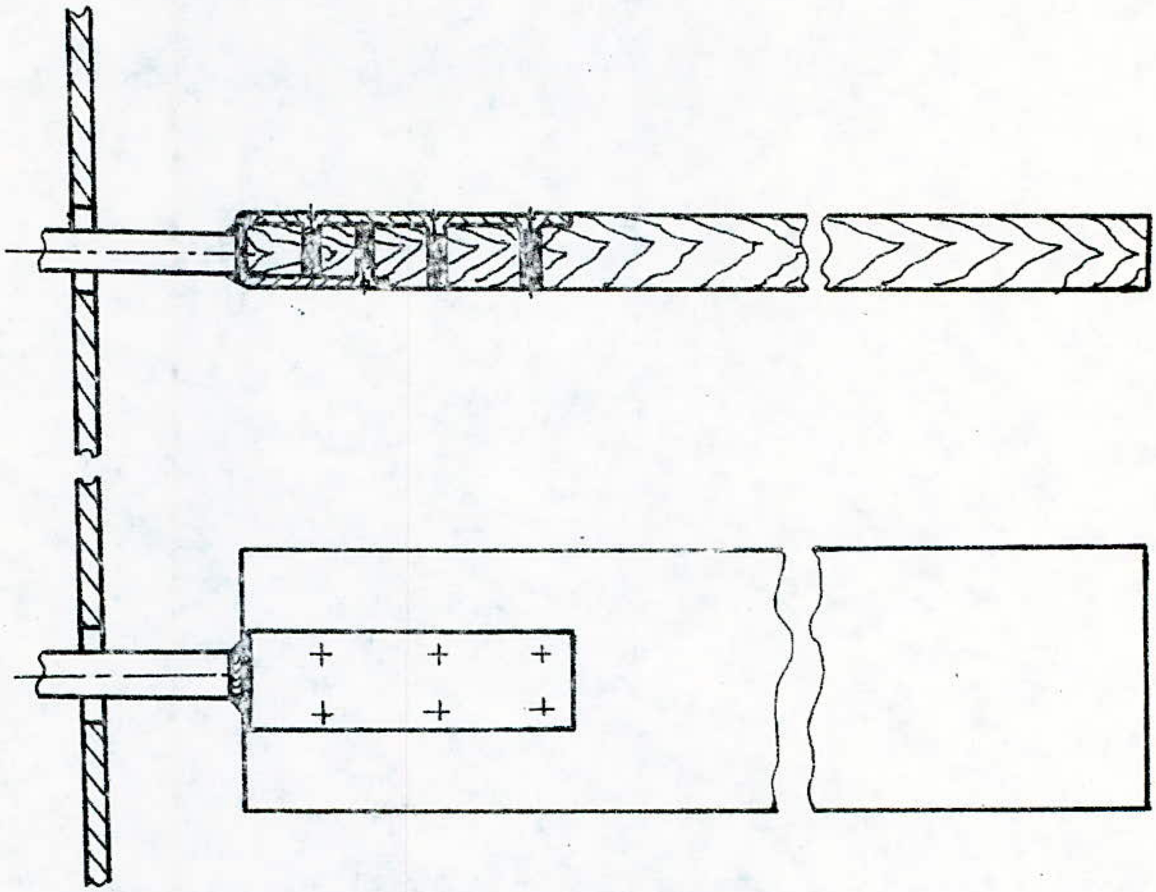


Figure n° 4   Fixation de l'aile.

i_ Dispositif d'orientation de l'aile

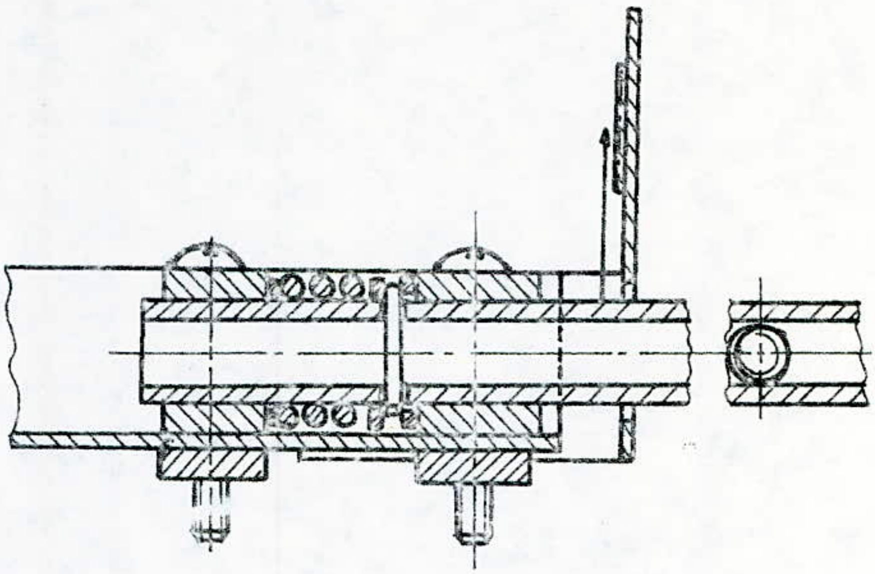
Pour pouvoir varier l'angle d'incidence de l'aile, car nous voulons par notre balance mesurer la portance de l'aile pour plusieurs angles d'incidence.

Pour ce faire nous avons adopté le montage suivant (figure n°5) la tige (axe portant l'aile) est fixé au levier de notre balance à l'aide de quatre brides, ces dernières sont liées entres-eux deux à deux pour assurer l'horizontabilité de l'axe de la balance.

Pour avoir une bonne fixation de cette tige car c'est nécessaire pour le bon fonctionnement du système, ces brides sont percées chacune de deux trous et à l'aide de 4 Boulons et deux pieces preparées avec 2 trous taraudés chacune, nous avons assuré la fixation de cette tige avec serrage des 4 boulons après chaque changement de l'angle d'incidence de l'aile.

Pour assurer seulement la rotation de la tige et eliminer toute translation de la tige lors de sa rotation, nous avons realisé un système fait d'un ressort et de rondelles et d'une goupille qui empêchera toute translation de la tige avec possibilité de rotation de celle-ci.

Avec un graissage de tout le système, l'angle d'incidence de l'aile est variable sans problemes.



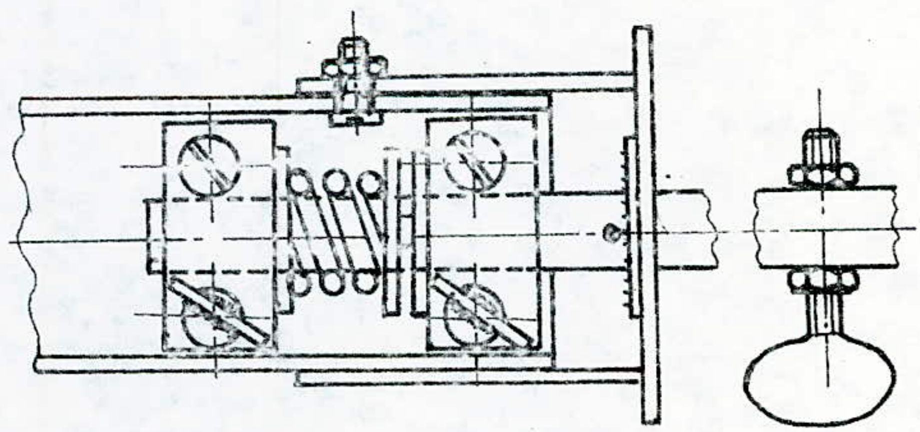


figure n° 5 . Dispositif d'orientation de l'aile.

Enfin pour connaître l'angle d'incidence de l'aile, nous avons réalisé un cadran muni d'une graduation angulaire, fixé au levier de la balance, une aiguille fixée à l'axe portant l'aile permet de nous donner l'angle d'incidence de l'aile sur le cadran fixe.

6_ Installation d'un thermométre à la soufflerie

Nous avons installé un thermomètre à la soufflerie afin de determiner la temperature du vent à l'intérieur de la soufflerie, car notre soufflerie est une soufflerie à circuit fermé, et l'air à l'intérieur en circulant s'échauffe considérablement c'est à dire la masse volumique change et nous voulons connaître cette masse volumique en connaissant la temperature statique et la pression statique (voir poste de mesure) de l'air circulant.

La temperature donnée par le thermomètre

$$T_t = T_s + \frac{1}{2}\frac{V^2}{Cp}.$$

Dans notre soufflerie on a la vitesse de l'air ne depasse pas 20 m/s.

$$Cp \text{ de l'air} = 1{,}0065 \cdot 10^3 \; J/°K \cdot kg$$

$$T_t = T_s + \frac{20^2}{2 \times 1{,}0065 \cdot 10^3}$$

$$T_S = T_S + 0,198\ °K.$$

$$T_t = T_S.$$

En conclusion, la température relevée sur le thermomètre de la soufflerie est la température statique de l'air circulant à l'intérieur de celle-ci.

De tous ces travaux, nous avons réalisé un banc d'essai de mesure de la portance de l'aile (Figure n°6).

7- Sondage de la veine

Pour faire le choix sur l'emplacement de l'aile, nous allons faire un sondage de la veine inférieure de la soufflerie où nous voulons placer l'aile.

Par ce sondage nous allons déterminer la région de la veine où la vitesse de l'air est maximale et la même en tous points de cette région.

Le sondage de la veine a donné le résultat (Tableau n° 1) qui va nous permettre de faire le choix, on remarque bien que la vitesse au milieu de la veine est maximale et pratiquement constante dans cette région

Nous avons installé l'aile dans cette région centrale.

figure n° 6 Croquis du banc d'essai

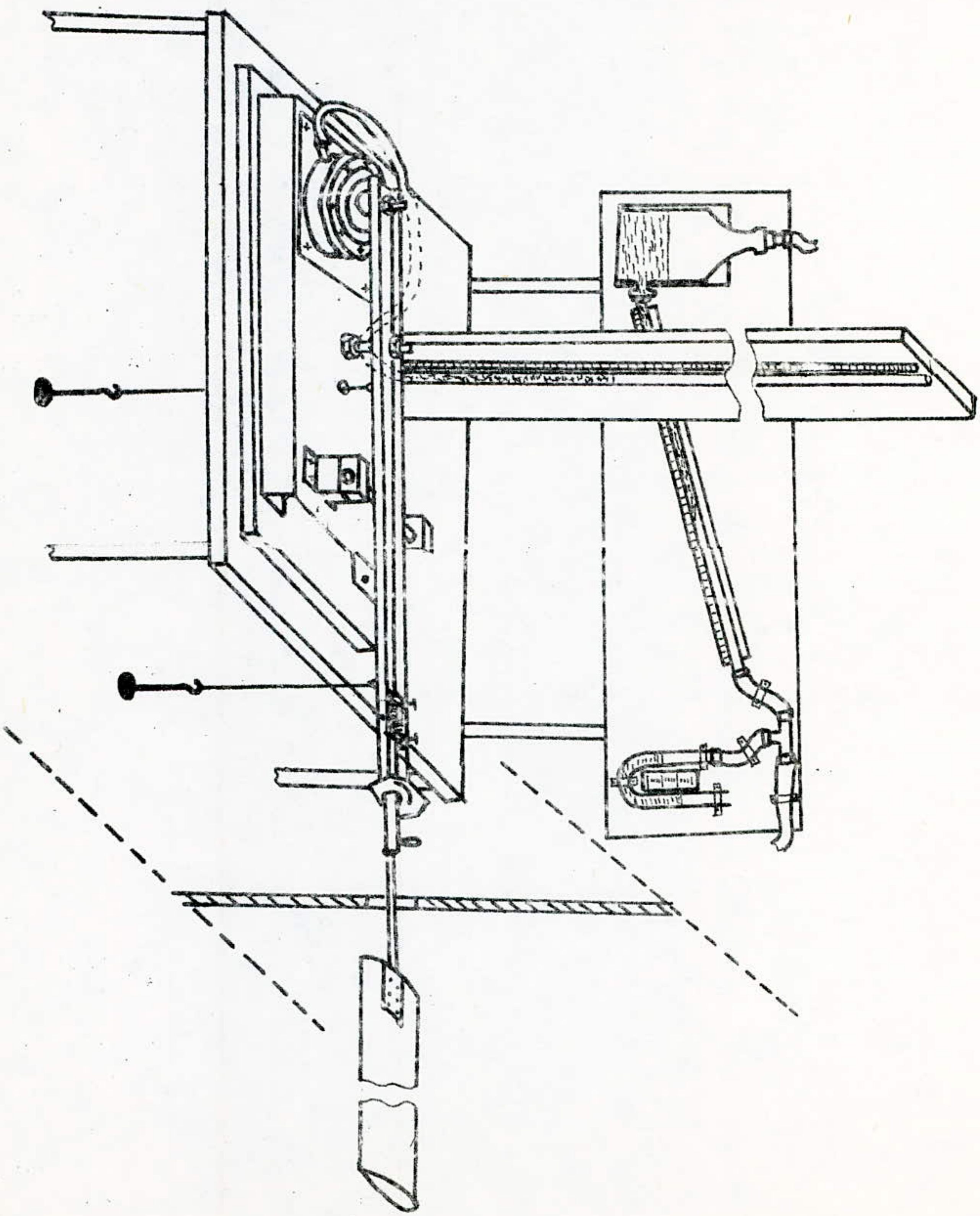


Tableau n°1.

Points de sondage et la veine.

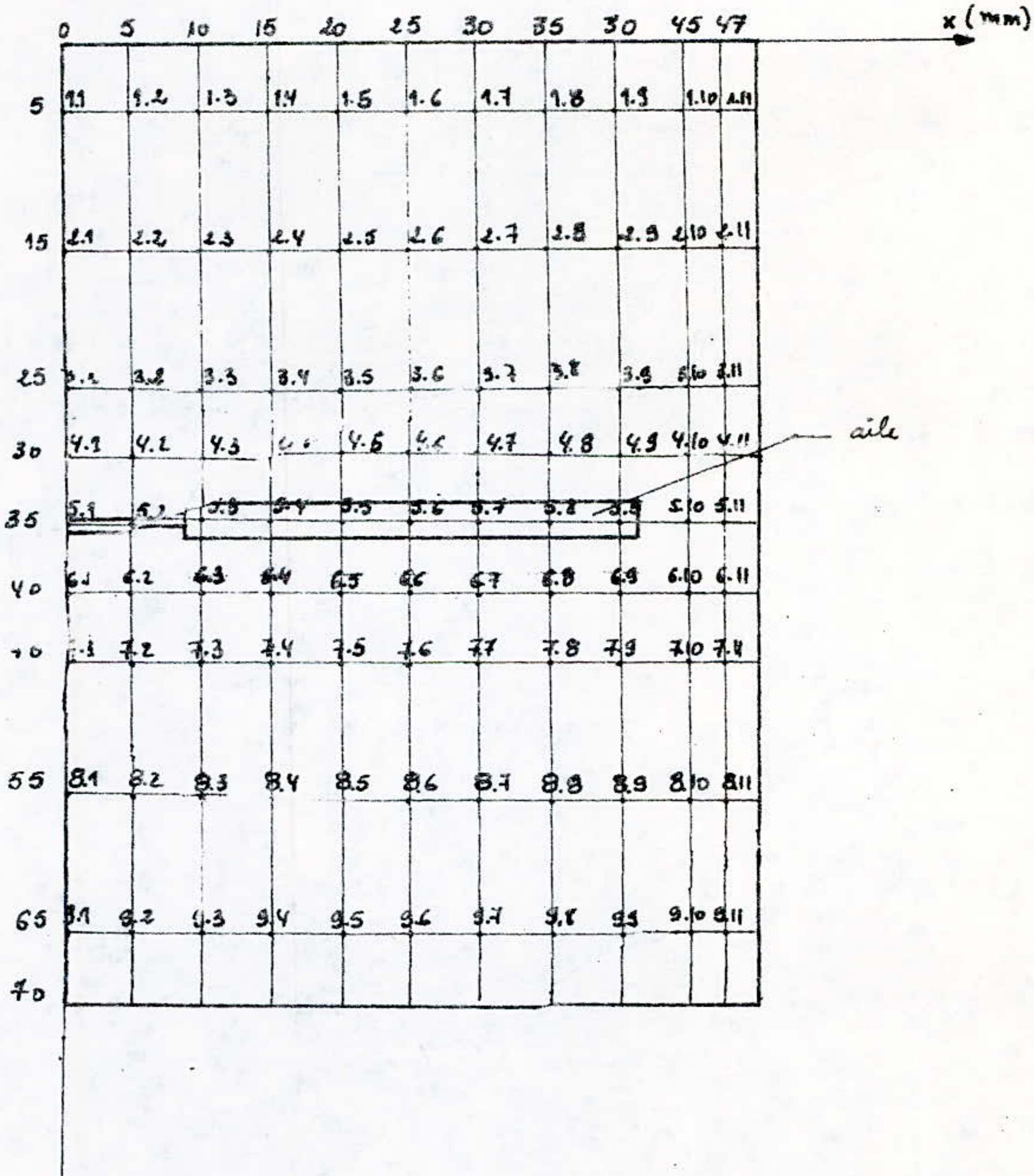


Tableau de mesures.

V_{air} est donné en m/s.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	13,35	15,5	15,74	15,81	15,6	14,86	15,1	15,1	12,3	12,01	10,8
2	13,4	15,3	15,8	15,85	16,02	16,35	16,56	16,7	16,9	15,7	15,3
3	11,86	14,3	14,9	14,8	15,6	15,74	15,8	15,9	16,3	14,3	13,01
4	12,16	15,1	15,8	15,9	15,96	15,62	16,2	15,62	15,9	13,7	13,01
5	10,76	14,9	15,1	15,85	15,96	15,8	15,96	15,8	16,18	15,4	13,3
6	11,2	15,04	15,8	15,8	16,2	15,96	16,07	15,2	15,3	13,4	12,9
7	11,2	14,71	15,45	15,51	16,13	16,2	16,2	15,4	14,4	13,6	13,5
8	12,2	14,9	15,85	16,07	16,6	16,7	16,8	16,2	15,5	15,2	14,9
9	13,7	15,3	15,6	14,9	15,04	13,74	15	15,7	16,1	13,7	12,6

Avec $T_s = 322°K$; $P_s = P_{at} + \rho_{eau} g h_s$.

la pression atmosphérique = 757,4 mm de Hg qui correspond à 100 978 Pa

h_s = 11 mm de C.E d'où

$$P_s = 100978 + 10^3 \times 9,81 \times 11.10^{-3}$$

$$P_s = 101096 \text{ Pa}.$$

la masse volumique de l'air $\rho_{air} = \dfrac{P_s}{r T_s}$ avec $r = 287$ J/kg°K

$$\Rightarrow \rho_{air} = 1,1007 \text{ kg/m}^3$$

$V_{air} = \sqrt{\dfrac{2 P_d}{\rho_{air}}}$, nous mesurons P_d pour connaître V_{air}

PRINCIPE DE FONCTIONNEMT DU BANC D'ESSAI

1- Balance aerodynamique

Pour determiner la resultante aerodynamique et le moment résultant sur un corps en essai, on utilise un ensemble plus ou moins complexe appelé " balance aerodynamique ". La balance doit mesurer une ou plusieurs composantes de la résultante générale et du moment résultant 6 au maximum pour les balances les plus performantes.

Les 6 efforts que peuvent être mesurable. (Figure n° 7)

Soit un repère orthonormé (O, x, y, z) lié à l'aile.

R_x : trainée
R_z : portance
R_y : derive

$$\vec{R} = R_x\vec{i} + R_y\vec{j} + R_z\vec{k}.$$

M_x moment de roulis
M_y moment de tangage
M_z moment de lacet

$$\vec{M} = M_x\vec{i} + M_y\vec{y} + M_z\cdot\vec{k}.$$

Le choix du type de la balance, ainsi que sa realisation a été faites par Mr. Djouadi (voir Polycopié de Mr. Djouadi).

La balance de notre banc d'essai permet de mesurer la portance R_z exercée sur l'aile fixé au levier de celle-ci.

Cette balance est conçue à des fins pédagogiques, alors tous le

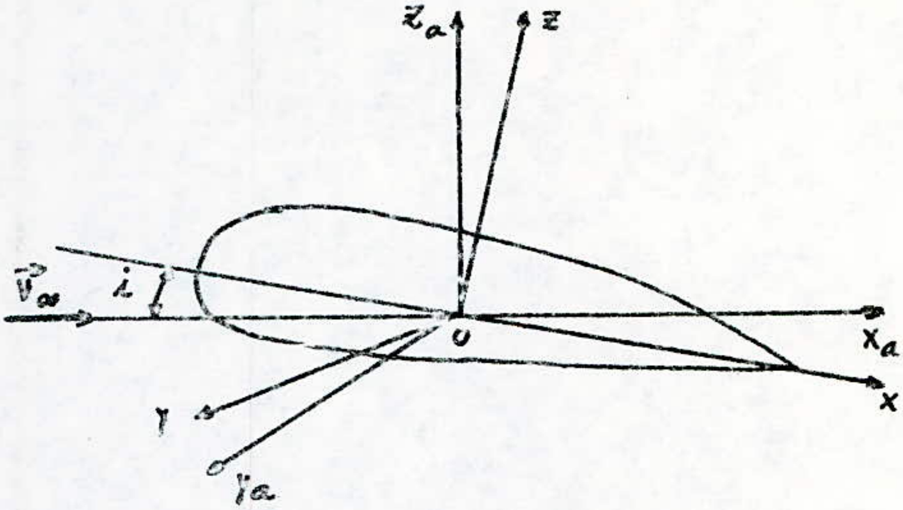


figure n° 7 Trièdres liés à l'aile

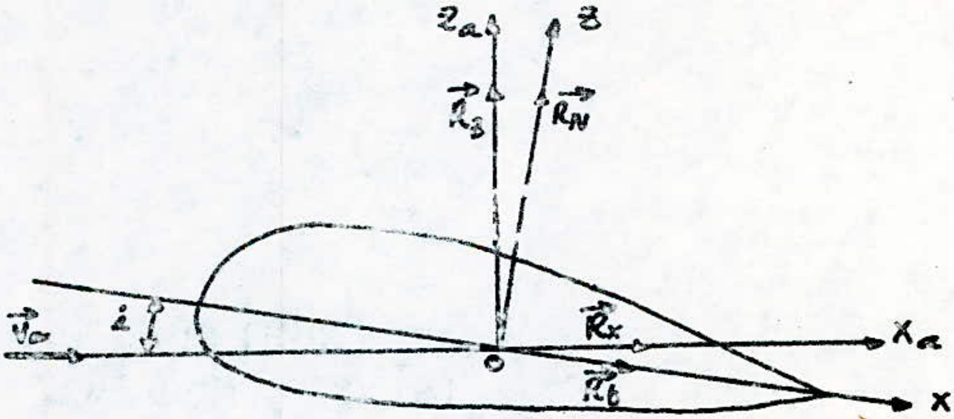


figure n° 7 forces aérodynamiques.

travail qui été fait était dans le but d'avoir une balance qui présentera les caractéristiques suivantes :

- une bonne maniabilité,
- une lecture aisée
- une robustesse importante
- une bonne fidélité
- une bonne précision
- une sensibilité acceptable.

2 _ Fonctionnement de la balance

Sous l'action de la portance R_z, le levier subit une inclinaison par rapport au pt o (Figure n° 8)

une force F de sens opposé et d'intensité proportionnelle à celle de R_z s'exerce au point D sous l'action de la force F, le fluide contenu dans le récipient est soumis à une pression et le fluide est chassé dans le tube à une hauteur proportionnelle à l'effort exercé sur la membrane du transmetteur.

une graduation sur le tube permet de lire la hauteur h du fluide chassé.

sachant que : $F = R_z \cdot \frac{l_1}{l_2}$.

D'autre part la pression qui compense la force agissante sur la membrane est telle que :

$$P = \frac{F}{S_{eff}}$$

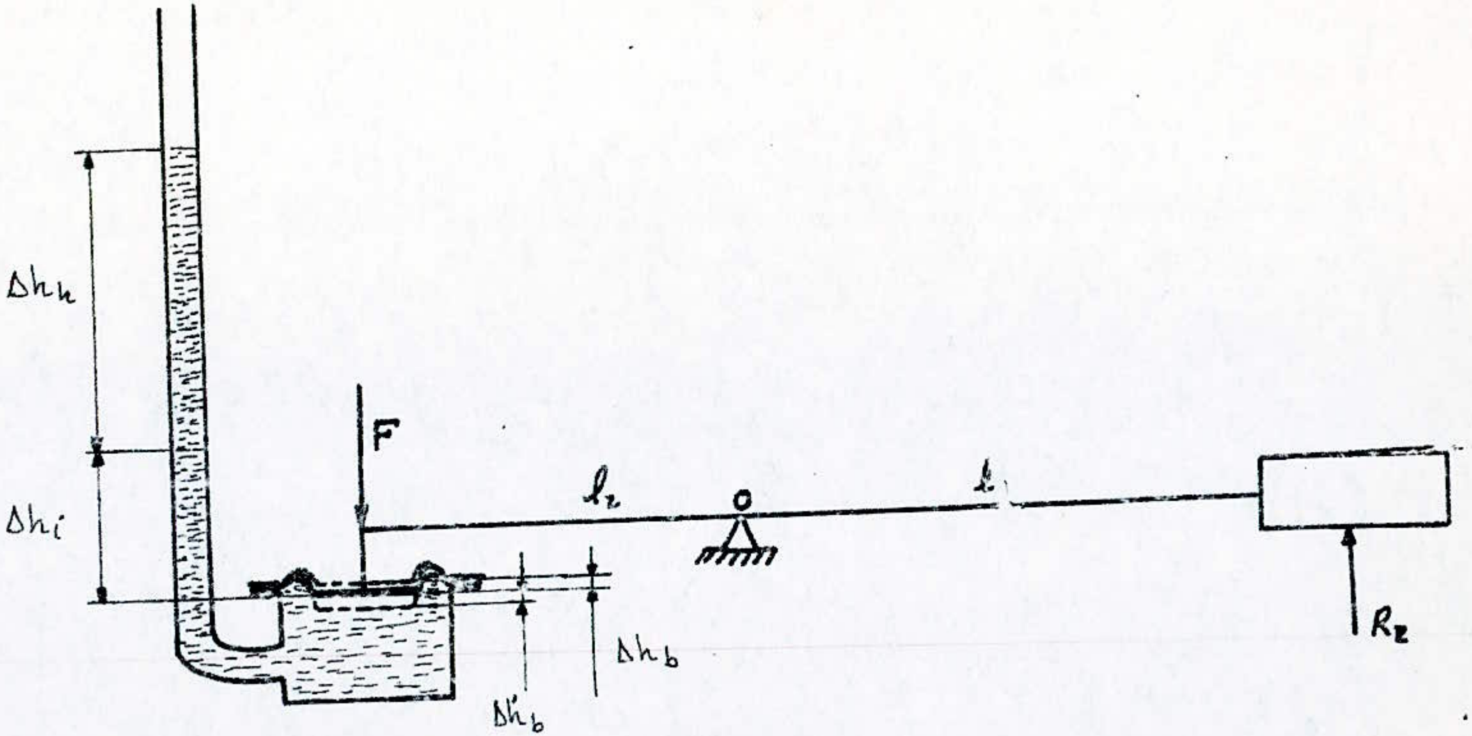


figure n° 8 Principe de fonctionnement de la balance.

où S_{eff} est la surface effective de la membrane.
On applique à la membrane un deplacement Δh_b qui se suit par un deplacement de Δh_i sur le tube gradué d'après le principe de vases communicants et ceci pour être sûr que notre transmetteur de force fonctionne sans défauts.
C'est à dire on a une hauteur Δh_i sur le tube avec la portance exercée sur l'aile nulle, en outre Δh_i caractérise l'état initial de toute mesure, c'est le zéro de la graduation.
Maintenant si on a un effort F appliqué sur la membrane, c'est-à-dire un effort de portance sur l'aile, on a un déplacement $\Delta h'_b$ du disque et un déplacement Δh_n d'après toujours le principe de vases communicants.
La pression dans ce cas exercée sur la membrane

$$P = \rho g \cdot (\Delta h_n + \Delta h'_b).$$

$\Delta h'_b$ est negligeable devant Δh_n car on a deux vases communicant dont l'un d'eux (récipient) a un diametre >> à celui de l'autre (tube gradué).

$\Delta h'_b$ est de l'ordre de 2 mm.

Δh_n est de l'ordre de 400 mm

d'où

$$P = \rho g \Delta h_n$$

ρ: masse volumique du fluide (eau)

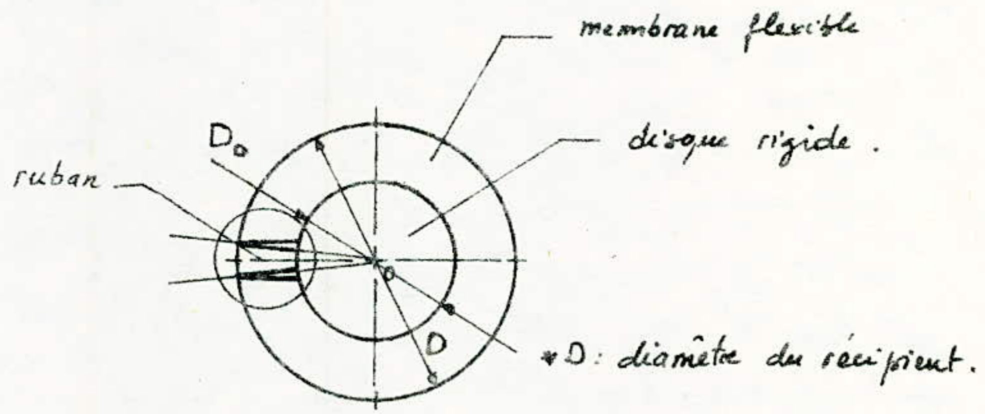
g: accélération de la pesanteur.

d'autre part on a $P = \frac{F}{S_{eff}}$

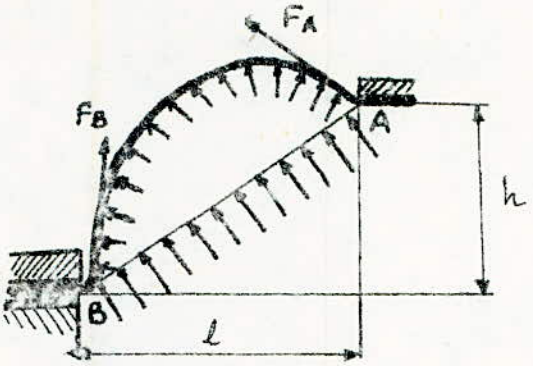
Où S_{eff} est la surface effective qui travaille, cette surface est composé d'une partie rigide, un disque de diametre D_D d'Aluminium et d'une partie flexible, une membrane de caoutchou. Maintenant si on applique un effort F sur le système disque-membrane par le levier de la balance, cet effort est compensé par un effort de pression (P) exercé sur le disque et la membrane, et nous allons calculer cet effort de compensation qui est composé de deux efforts.

- Un effort sur le disque rigide $F_1 = \pi \frac{D_D^2}{2} . P$.
- un effort sur la membrane que nous allons le calculer.

Pour calculer cet effort nous allons fairé certaines simplifications dans le calcul.



Au lieu de prendre un élément de la membrane de variation angulaire on prend un élement ou encore un ruban de largeur l'unité et de longueur l avec $l = \frac{D - D_D}{2}$ (voir schema).

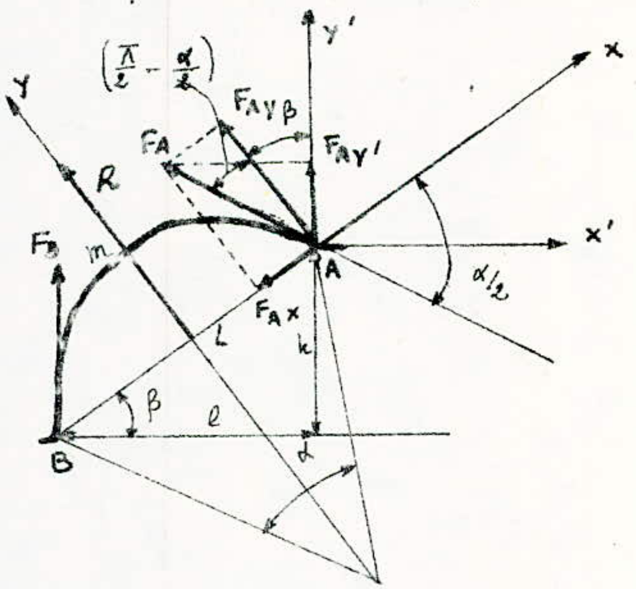


. Nous allons faire d'un seul côté à cause de la symetrie.
On remplace la pression exercée sur le ruban, par une pression equivalente repartie le long d'une trave de longueur L avec

$$L = \sqrt{h^2 + l^2}$$

Le ruban est supposé idealement flexible, R_A est tangente au ruban considérant l'aspect statique du système.

. h etant le déplacement du disque suivant la verticale.



ΣF suivant ox $\quad F_{Ax} - F_{Bx} = 0 \quad \longrightarrow F_{Ax} = F_{Bx}$.

$$\left.\begin{array}{ll}\Sigma F \text{ suivant } oy & F_{Ay} + F_{By} + R = 0 \\ \Sigma M \text{ /au point B} & F_{Ay} L + R \cdot \frac{L}{2} = 0\end{array}\right\} \quad F_{Ay} = F_{By} = \frac{R}{2}$$

avec $\quad R = P \cdot L \cdot 1$

$$= P \cdot \sqrt{h^2 + l^2} \quad \longrightarrow \quad F_{Ay} = P \cdot \frac{\sqrt{h^2+l^2}}{2}.$$

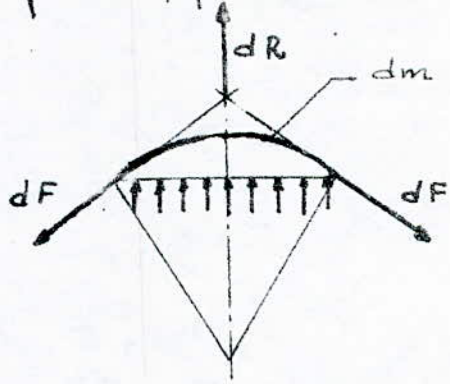
alors

$$F_A = \frac{F_{AY}}{\cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2}\right)} \qquad F_A = P \cdot \frac{\sqrt{h^2+l^2} \cdot 1}{2 \sin \frac{\alpha}{2}}.$$

Calcul de l'angle α.

La forme du ruban sous pression est un arc de cercle.

Notre ruban est flexible, prenons un élément de ce ruban dm

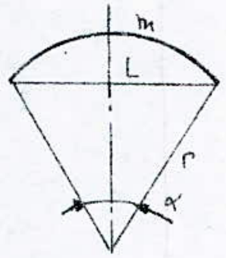


Le ruban est en equilibre statique, c'est à dire chaque élément de ce ruban est en équilibre, en outre le système de force de chaque élément se présente de la manière ci-dessus et si nous juxtoposons les n éléments de ce ruban, nous trouverons un arc de cercle.

Pour cette raison on a pour $h = 0$ la forme du ruban un demi-cercle de diametre l, alors la longueur de notre ruban

$$m = \frac{\pi \ell}{2}.$$

Dans le cas général c'est à dire $h \neq 0$ on a la forme suivante.



$$m = r.\alpha$$

$$L = 2r \sin \alpha/_2 \rightarrow r = \frac{\sqrt{h^2+\ell^2}}{2} \cdot 1/\sin \alpha/_2$$

$$\pi \frac{\ell}{2} = \frac{\sqrt{h^2+\ell^2}}{2} \cdot \frac{1}{\sin \alpha/_2}.$$

$$\alpha . \frac{\sqrt{h^2+\ell^2}}{\pi . \ell} = \sin \frac{\alpha}{2}.$$

Avec ceci nous pouvons calculer α.

Ce qui nous interesse de tout ce calcul c'est la composante verticale alors :

$$F_{Ay'} = F_A \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2} + \beta\right).$$

En conclusion on a

$$F_{Ay'} = \frac{P.\sqrt{h^2+\ell^2}}{\ell} \cdot \frac{1}{\sin \alpha/_2} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2} + \beta\right) \quad (1)$$

avec $\mathrm{tg}\, \beta = \frac{h}{\ell} \rightarrow \beta = \mathrm{artg} \frac{h}{\ell}$. (2)

et $\alpha . \frac{\sqrt{h^2+\ell^2}}{\pi . \ell} = \sin \frac{\alpha}{2}$. (3)

La force résultante sur la membrane.

$$F_2 = F_{AY'} \cdot 2\pi \cdot \left(\frac{l}{2} + \frac{D_D}{2}\right).$$

calculons l'effort total sur le système disque - membrane pour $h = 0; 1; 2; 3$ mm avec $l = 7$ mm et $D_D = 61$ mm

$D = 75$ mm.

$h = 0 \qquad \beta = 0 \qquad \alpha = \pi.$

$$F_{AY'} = P \cdot \frac{l}{2} \cdot 1.$$

$$F_2 = P \cdot \frac{l}{2} \cdot 2\pi \left(\frac{l}{2} + \frac{D_D}{2}\right).$$

$$F = F_1 + F_2$$

$$= P \cdot \pi \frac{D_D^2}{4} + P \cdot \frac{l}{2} \cdot 2\pi \left(\frac{l}{2} + \frac{D_D}{2}\right)$$

$$= P\pi \cdot \left[\frac{D_D^2}{4} + l\left(\frac{l}{2} + \frac{D_D}{2}\right)\right.$$

$$F = P \cdot \pi \, (1168{,}25).$$

$$F = P \cdot \pi \, \frac{68{,}35^2}{4}. \quad \text{avec } D_{eff} \, [mm].$$

La surface effective dans ce cas $S_{eff} = \pi \cdot \frac{68{,}35^2}{4}.$

Le calcul est le même pour $h = 1$ mm; 2; 3 mm seulement l'angle α est calculable par itérations successives, on trouve pour

$h = 1$ mm $\qquad S_{eff} = \pi \cdot \frac{(68{,}33)^2}{4}$

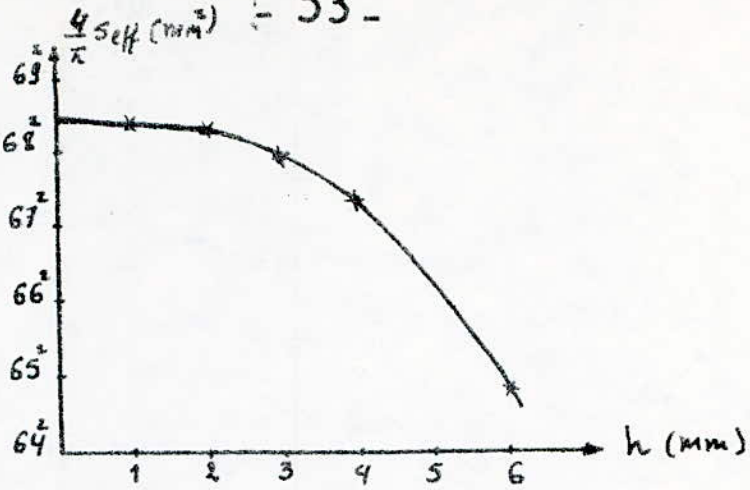
$h = 2$ mm $\qquad S_{eff} = \pi \cdot \frac{68{,}23^2}{4}$

$h = 3$ mm $\qquad S_{eff} = \pi \cdot \frac{(67{,}93)^2}{4}$

$h = 4$ mm $\qquad S_{eff} = \pi \cdot \frac{[illegible]^2}{4}$

$h = 6$ mm $\qquad S_{eff} = \pi \cdot \frac{(64{,}75)^2}{4}$

Graphique de cette fonction $S_{eff}(h)$.



Calculons, cette surface effective à partir des résultats expérimentaux.

La raideur de la membrane à partir du test de la membrane c'est la pente de la droite obtenue.

$$k_1 = 0{,}0326 \, m \, N^{-1}$$

d'autre part $\Delta h_n = k_1 . F$ et $\frac{F}{S_{eff}} = \rho_{eau} \, g \, \Delta h_n$.

$$\rightarrow k_1 = \frac{1}{\rho_{eau} \, g \, S_{eff}}$$

$$\rightarrow S_{eff} = \frac{1}{k_1 \, \rho_{eau} \, g}$$

$$= \frac{1}{0{,}0326 . 9{,}81 . 10^3}$$

$$S_{eff} = 3126{,}89 . 10^{-6} \, m^2$$

$$S_{eff} = \pi . \frac{63{,}07^2}{4} \, mm^2 \quad D_{eff} \, (mm).$$

On remarque sur le graphique de $S_{eff}(h)$ de l'étude théorique approximative que la surface effective est pratiquement constante pour une faible variation de h, ce qui est le cas pour notre balance, la variation de h est de 2 mm, dans notre calcul ultérieur on prend $S_{eff} = \pi \frac{63{,}07^2}{4} mm^2$ car c'est une valeur expérimentale.

On a $\rho_{eau}\, g\, \Delta h_h = \frac{F}{S_{eff}} \longrightarrow \Delta h_h = \frac{F}{\rho_{eau}\, g\, S_{eff}}$

comme $F = R_z \cdot \frac{l_1}{l_2}$.

alors $\Delta h_h = R_z \cdot \frac{l_1}{l_2} \frac{1}{\rho_{eau}\, g\, S_{eff}}$.

On deduit la transmettance du système qui fait correspondre une hauteur Δh_h à chaque portance R_z, en posant

$$\frac{1}{k_2} = \frac{l_1}{l_2} \cdot \frac{1}{\rho_{eau} \cdot g \cdot S_{eff}}$$

On a alors $R_z = K_2 \cdot \Delta h_h$

$$k_2 = \frac{300 \times 10^3 \times 9{,}81 \times 3124{,}17 \cdot 10^{-6}}{615} \qquad K_2 = 14{,}95\ N \cdot m^{-1}.$$

Ainsi pour mesurer la portance R_z, il suffit de lire sur le tube gradué la hauteur Δh_h et de la multiplier par la constante k_2.

$R_z = 14{,}95 . \Delta h_h$ avec Δh_h en metre de C.E.

avec . R_z portance de l'aile [N]

. Δh_h hauteur de colonne d'eau

3_ Mesure de la vitesse locale

Notre dispositif de mesure de la vitesse locale permet de donner la pression dynamique et la pression statique dans la soufflerie.

Le tube de Pitot que nous avons installé à la soufflerie permet de donner la pression totale en plusieurs points suivant l'axe de symetrie horizontal de la section de la veine au nous avons installé notre aile.

La pression dynamique est mesurée sur le tube en U à branche inclinée comme étant la pression différentielle entre la pression totale et la pression statique obtenue à l'aide d'un trou de 2 mm de diamètre fait sur la paroi de la soufflerie.

La température de l'air circulant dans la soufflerie est donnée par un thermomètre installé sur la soufflerie.

La mesure de la pression statique de la soufflerie se fait sur un tube en U vertical (poste de mesure).

Connaissant la pression statique dans la soufflerie et la température de l'air circulant dans celle-ci, nous permettent de connaître avec exactitude la masse volumique de cet air. D'autre part, à partir de la pression dynamique et la masse volumique de l'air dans la soufflerie, on peut déduire la vitesse de l'air dans celle-ci.

En résumé notre banc d'essai permet de mesurer :

- La portance de l'aile
- La vitesse de l'air circulant dans la soufflerie
- La masse volumique de l'air circulant.

La force aérodynamique F_z de portance est définie par :

$$F_z = \frac{1}{2} \rho C_z . S . V^2 .$$

avec ρ : masse volumique du fluide (air) kg/m^3

C_z : coefficient de portance (sans dimensions)

S : surface de l'aile (m^2)

V : vitesse de l'air (m/s).

La force F_z depend de l'angle d'incidence (i).

alors $F_z(i) = k . C_z(i)$.

avec $k_3 = \frac{1}{2} \rho S V^2$ k est une constante.

$\longrightarrow$ $C_z(i) = \frac{F_z(i)}{k_3}$.

Connaissant la fonction $F_z(i)$, ce qui va nous permettre de connaitre la fonction $C_z(i)$.

$C_z(i)$ etant la caracteristique de l'aile.

En conclusion si on fait varier l'angle d'incidence (i) et on releve l'effort $F_z(i)$, ceci va nous permettre de passer au tracé de la caracteristique de l'aile, bien-sûr en connaissant la constante k.

TESTS ET RESULTATS

I_Manipulations

Notre banc d'essai est conçu, nous le rappelons encore à des fins pédagogiques, les differentes mesure que les étudiants peuvent les faire, et nous allons les faire afin de verifier le bon fonctionnement de notre banc d'essai sont :

- Mesure de la portance de l'aile.
- Mesure de la pression dynamique dans la soufflerie.
- Mesure de la pression statique dans la soufflerie.
- Mesure de la température de l'air circulant dans la soufflerie

Mais avant de faire toute mesure, c'est à dire avant de mettre la soufflerie en marche, il faut marquer le zéro de chaque graduation de mesure.

Alors il faut marquer le zéro de la graduation donnant la hauteur Δh_p causé par l'effort de portance de l'aile, ce zéro de la graduation correspend à une hauteur Δh_0 sur le tube gradué pour un effort de portance de l'aile nul (ceci avec soufflerie à l'arrêt).

Il faut marquer aussi le zéro de la graduation sur le cadran donnant l'angle d'incidence de l'aile, et ceci en assurant l'horizontabilité de l'aile à l'aide de deux traits horizontals l'un est porté sur l'aile et l'autre sur la fênetre à la soufflerie.

enfin il faut aussi marquer le zéro de la graduation donnant la pression dynamique en mm de C.E., ceci est obtenu bien sûr avec la vitesse du fluide nulle (soufflerie à l'arrêt)

Aprés avoir finir avec le repérage des mesures, on fait en marche la soufflerie pendant 10 à 15 minutes à vitesse maximale, pour un régime etablit dans celle-ci car la température de l'air circulant dans la soufflerie augmente considérablement (de 15° à 50°c), pour cette même raison, ces mesures ne peuvent être faites séparément afin de travailler avec une température relativement constante.

Pour faire les mesures on procède de la manière suivante:
On fait varier l'angle d'incidence i de l'aile de 0° à 25° et ceci de 2° à 2° et en notant à chaque fois la hauteur h correspondant à chaque effort de portance pour ces angles, ensuite en retranchant la hauteur Δh_i de h pour determiner

la hauteur exacte Δh_p causé par l'effort de portance de l'aile.

La mesure de la pression statique ou encore la lecture se fait sur le tube vertical (poste de mesure) gradué en mm.

La mesure de la température est obtenu par le thermomètre placé sur la soufflerie.

La mesure de la pression dynamique se fait sur le tube en U à branche inclinée (poste de mesure), nous pouvons faire cette mesure en plusieurs points de la veine où nous avons placé notre aile, ces points sont séparés de 10 mm entre eux et ceci est réalisable avec notre tube de Pitot gradué, [illegible] trouver une vitesse moyenne de l'air où l'aile est placé qui a [illegible] envergure de 330 mm.

2_ Mesures des tests

zéro de la graduation donnant la portance de l'aile

$$\Delta h_p = 150 \text{ mm.}$$

zéro de la graduation donnant l'angle d'incidence

$$i = 87°$$

Zéro de la graduation donnant la pression dynamique

$$P_{d_0} = 9{,}3 \text{ mm de CE.}$$

h_s étant la pression différentielle ($P_s - P_{atm}$) avec P_s pression statique dans la soufflerie.

Tableaux de mesures après correction :

i	0°	2°	4°	6°	8°	10°	12°	14°	16°	18°	20°
Δh_h mm CE	112	166	220	252	295	340	375	410	430	420	400
T_s °K	313	314	314	315	315	315	316	316	317	317	317
h_s mm CE	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11

Mesure de la pression dynamique :

distance x mm	50	100	150	200	250	300	350	400	450
P_d mm CE	12,4	14,2	13,7	14,5	14,2	14,5	14,2	14,9	13,5

Nota : La distance x est reperé à partir de la paroi de la soufflerie et ceci suivant de symetrie horizontal de la section de la veine.

3 - Exploitation de ces mesures

a - Calcul de la masse volumique de l'air dans la soufflerie :

$$\rho_{air} = \frac{P_s}{r T_s}.$$

- Pression statique : on a $h_s = (P_s - P_{atm})_{mm\,CE}$

$$\rightarrow P_{s\,mm\,CE} = (h_s + P_{atm})_{mm\,CE}.$$

ou encore $P_s = \rho_{eau}\, g\, h_s + P_{atm}$

P_s, P_{atm} (en Pascals).

La Pression atmosphérique (P_{atm}) = 760,3 mm de Hg qui correspond à 101378 Pa.

$h_s = 11.10^{-3}$ m.CE.

$\rho_{eau} = 10^3$ kg/m^3.

$g = 9{,}81$ m/s^2.

$$P_s = 10^3 \times 9{,}81 \times 11.10^{-3} + 101378$$

$$P_s = 101485{,}91 \text{ Pa}$$

la température statique T_s varie de 313 à 317°k on peut prendre une valeur moyenne $T_s = 315$°k.

d'où la masse volumique de l'air

$$\rho_{air} = \frac{P}{rT}$$

avec $r = 287$ J/kg °k.

$$\rho_{air} = \frac{101485{,}91}{287 \times 315}$$

$$\rho_{air} = 1{,}122 \text{ kg/m}^3.$$

b - Calcul de la vitesse de l'air dans les differents points de la veine.

$$P_d = \frac{1}{2}\rho_{air} V_{air}^2 \rightarrow V_{air} = \sqrt{\frac{2 \times P_d}{\rho_{air}}}$$

$P_d = \rho_{eau} \cdot g \cdot h$

$P_d = 10^{+3} \times 9{,}81 \cdot 10^{-3} h_d$ avec h_d (en mm de CE)

P_d (en Pascals)

distance x mm	50	100	150	200	250	300	350	400	450
P_d (en Pa)	129,64	139,30	134,40	142,24	139,30	142,24	139,30	146,16	132,40
V_{air} m/s	14,72	15,60	15,48	15,92	15,76	15,92	15,76	16,14	15,36

Calculons la vitesse moyenne de cette marge où notre aile est placée

$$V_{moy} = 15{,}63 \text{ m/s}.$$

C- Calcul de la portance.

$$F_z = \frac{1}{2} C_z \rho_{air} . S . V_{air}^2$$

$$F_z = K_3 \, C_z .$$

avec $k_3 = \frac{1}{2} \rho_{air} S V_{air}^2$.

$\cdot \rho_{air} = 1{,}122 \text{ kg/m}^3$

$\cdot S_{aile} = 0{,}0369 \text{ m}^2$ (polocopie de Mr. Diffallah)

$\cdot V_{air} = 15{,}63$ m/s.

$k_3 = 5{,}059$ N.

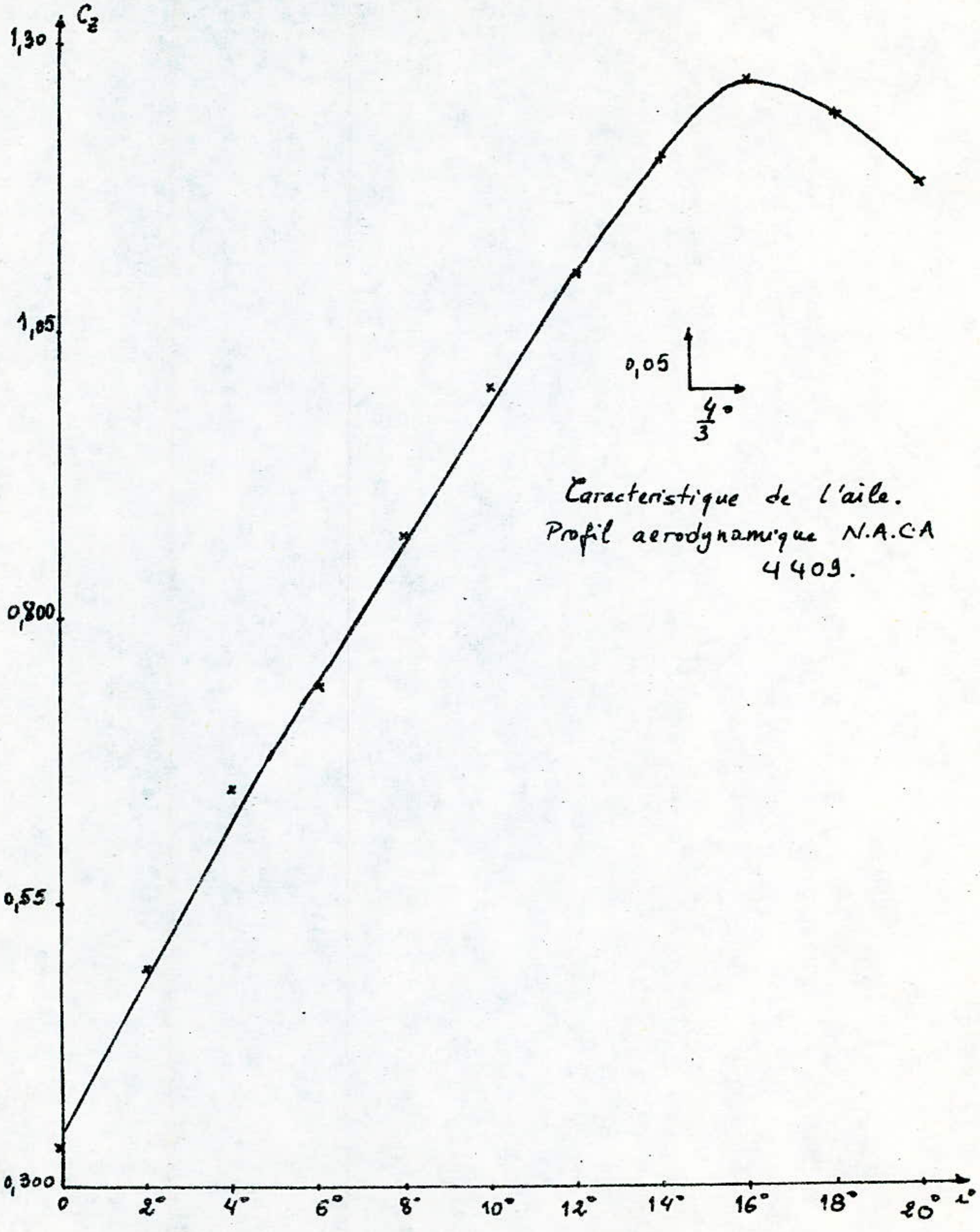
D'autre part on a $F_z = k_2 \cdot \Delta h_n$

avec $k_2 = 14{,}95 \text{ N m}^{-1}$.

La caractéristique de notre aile $C_z(i) = \dfrac{F_z(i)}{K_3}$.

i °	0°	2°	4°	6°	8°	10°	12°	14°	16°	18°	20°
$\Delta h_n .10^{-3}$ m CE	112	166	220	252	295	340	375	410	430	420	400
F_z N	1,67	2,48	3,29	3,77	4,41	5,08	5,60	6,13	6,43	6,28	5,98
C_z	0,33	0,49	0,65	0,74	0,87	1,00	1,11	1,21	1,27	1,24	1,18

Tracé de la caractéristique $C_z(i)$.



Caracteristique de l'aile.
Profil aerodynamique N.A.C.A 4409.

CONCLUSION

Toute les esperances ont été satisfaites, le banc a été mis en marche, prés à fonctionner, enrichissant ainsi notre laboratoire d'un TP d'energitique, trés util.
C'est en faite un appareillage unique en son genre et inestimable que les etudiants découvriront lors de la mani--pulation, complétant ainsi leur connaissance dans le domaine de la mecanique des fluides ainsi que de l'aerodynamique.
J'ai acquis une experience abondante en contact des gens du metier, et au cours des differents travaux d'atelier que j'ai effectués. Et je presume que c'est une pédagogie pour completer les connaissances de l'etudiant, et ceci en donnant des sujets de réalisation.
En colaboration étroite avec les differents ateliers de l'Ecole, avec de la volonté et de simple moyen, la mise en marche d'équipem-ent de laboratoire est trés possible, un effort est à faire dans ce sens dans les projets futurs.

BIBLIOGRAPHIE

- BURTON (J) : Technique de la mesure et du contrôle dans l'Industrie. (Tome I, II)
- REBUFFET (P) : Aérodynamique expérimentale. Editions Beranger - 1960.
- DIFFALLAH : Balance aérodynamique. Projet de fin d'études - Promotion janv. 1983.
- DJOUADI : Banc d'essai de portance aerodynamique. Projet de fin d'etudes - Promotion juin 1984
- PISSARENKO (G) : Aide-memoire de resistance des
  YAKOVLEV (A) matériaux E.M.
  MATVÉEV (V) Editions de Moscou.

Legende des symboles

v : vitesse du fluide

P : pression du fluide

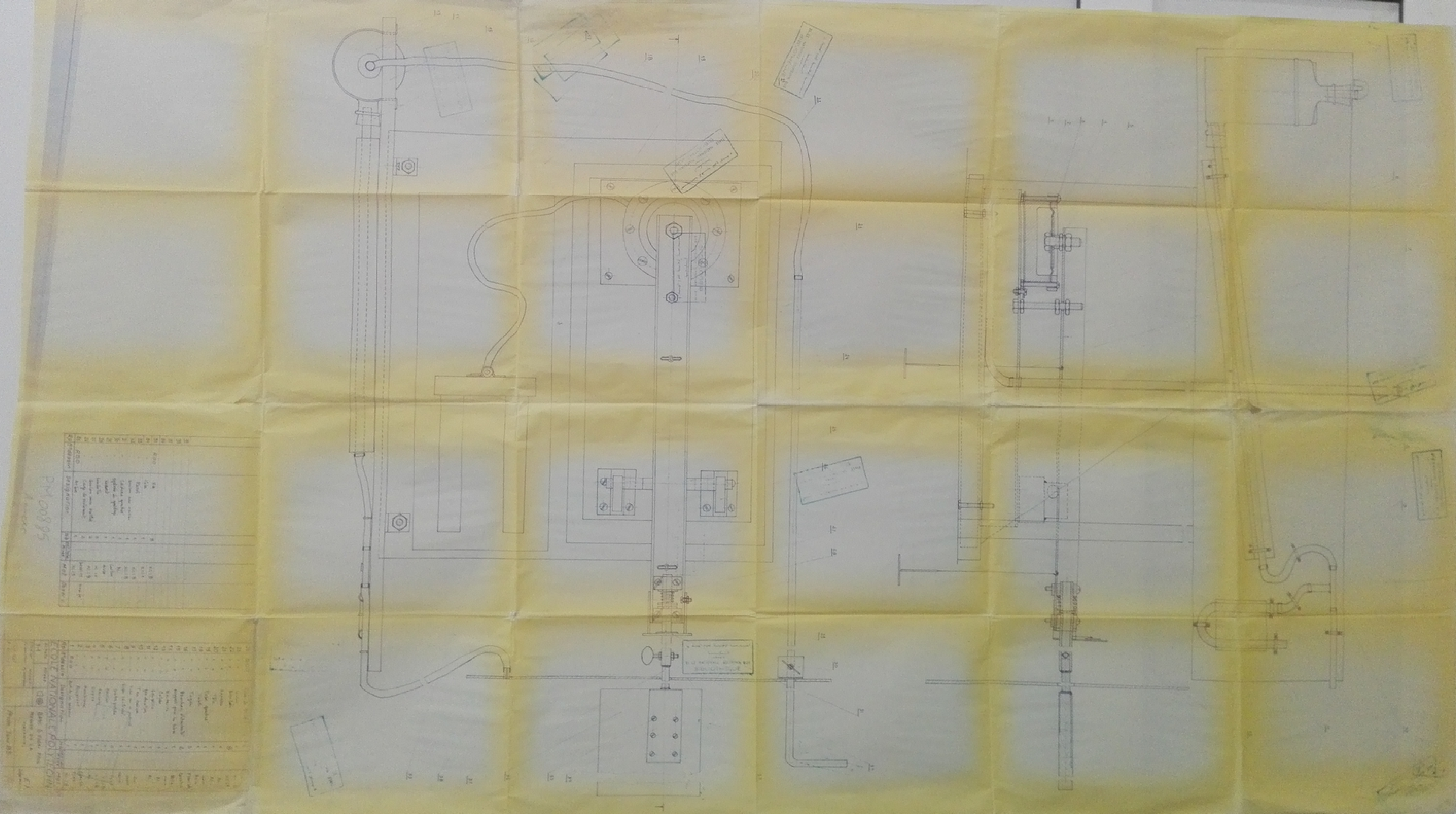
C_p : chaleur specifique de l'air.

ρ : masse volumique du fluide

F_z : portance de l'aile

C_z : coefficient de portance

C E : colonne d'eau.


ECOLE NATIONALE POLYTECHN
PM 00895