

1ex

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : Génie Mécanique

PROJET DE FIN D'ETUDES

INGENIORAT D'ETAT EN GENIE MECANIQUE

SUJET

BANC D'ESSAI DE PORTANCE

AERODYNAMIQUE

1PLAN

Proposé par :

A. WERNER

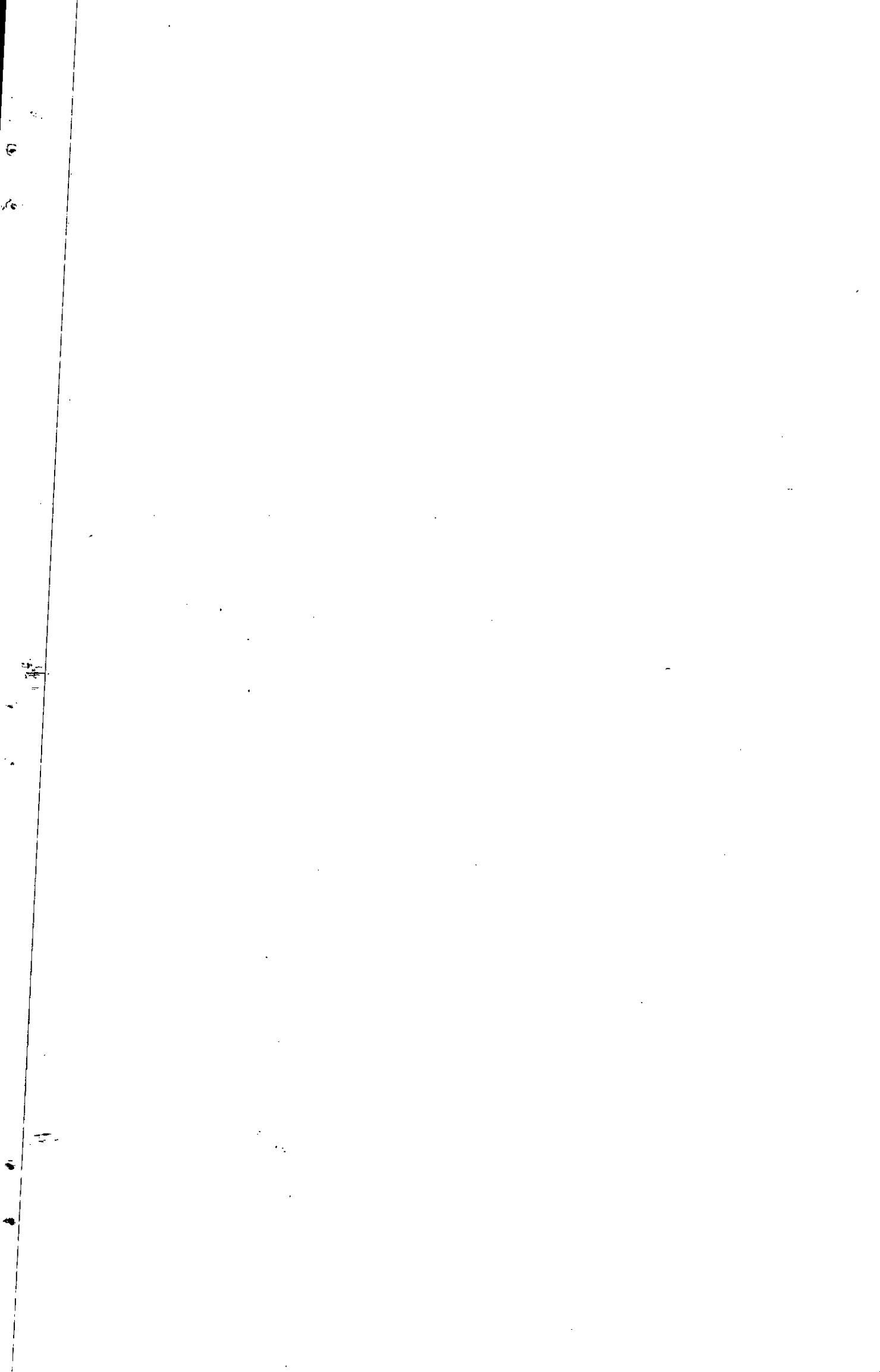
Etudié par :

DJOUADI Rafik

Dirigé par :



PROMOTION : Juin 1984



Je dédie ce modeste travail :

- à mes parents,

- à mes frères et soeurs,

- à Karima,

- à mes ami(e)s.

REMERCIEMENTS

Je remercie :

- Monsieur WERNER pour l'aide précieuse, et les conseils qu'il m'a prodigués.
- Tout le personnel de l'atelier des métaux, et en particulier, MM. OUABDESLAM et MOUTERFI , ainsi que Mr BELHADEF, Maître-assistant à l'ENPA pour m'avoir aidé dans la réalisation pratique.
- Mon ami Omar pour la frappe, et la mise en forme de ce Polycopé.

Nom et prénom : DIGUADI Rafik

Département : Génie-Mécanique

Promoteur : A. WERNER

Résumé : Ce sujet consiste à concevoir et réaliser une balance aérodynamique que l'on utilisera à des fins pédagogiques.

Cette balance est de type rigide, et contient un transmetteur de force qui fonctionne sans énergie auxiliaire.

Elle mesure la portance qui s'exerce sur une aile, en modèle réduit, placée dans la soufflerie du laboratoire d'énergétique.

Summary : This subject consists in a conception and realisation of an aerodynamic balance which will be used in an experimental work.

This balance is of the rigid type and contained a force transmitter which working without energy.

This balance, used in a wind tunnel of our laboratory, measures the lift of an airfoil.

ملخص
يتمثل هذا الموضوع في ابتكار واختيار ميزان كهوائي ديناميكي يستعمل لأغراض تربوية. إن هذا الميزان هو من النوع الجاسر، ويشتمل على هؤل قوة يستعمل بدون طاقة إضافية، ويقيس الميزان قوة الحمل التي تؤثر على الجناح وفق نموذج مصغر موضوع داخل نافذة هواء مختبر الطاقويات.

S O M M A I R E

	Page
Chap I : INTRODUCTION ET BUT DU PROJET.	I
I - 1 : Introduction.	I
I - 2 : But du projet.	I
Chap II : GENERALITES.	2
II - 1 : Introduction.	2
II - 2 : Historique.	2
II - 3 : Etude de la résistance de l'air.	3
II - 4 : Profils d'aile.	6
II - 5 : Etude des forces aérodynamiques s'exerçant sur une aile.	9
II - 6 : Moment résultant.	13
II - 7 : Centre de poussée.	15
Chap III: BALANCES AERODYNAMIQUES.	19
III - 1 : Introduction.	19
III - 2 : Mesure des efforts.	19
III - 3 : Classification des balances aérodynamiques.	19
Chap IV : TRANSMETTEUR DE FORCES.	26
IV - 1 : Méthode directe.	26
IV - 2 : Méthode indirecte.	30
Chap V : ETUDE ET CONCEPTION DE LA BALANCE.	35
V - 1 : Principe de fonctionnement.	36
V - 2 : Réalisation.	38
V - 3 : Modes de fixation de l'aile.	45
Chap VI : REALISATION PRATIQUE.	50
VI - 1 : Description de la balance.	50
VI - 2 : Utilisation de la balance.	51
VI - 3 : Pièces à réaliser.	51

	Page
Chap VII : TESTS ET RESULTATS.	56
CONCLUSION.	62
TABLE DES FIGURES.	63
BIBLIOGRAPHIE.	65

Chapitre I : INTRODUCTION ET BUT DU PROJET.

I - 1 : Introduction :

De tout temps, l'aérodynamicien s'est basé sur l'expérience pour connaître les phénomènes qui agissent sur un corps en mouvement relatif par rapport à l'air.

Le calcul, aidé par l'expérience des réalisations antérieures, suffit dans bien des cas. Cependant, il y-a beaucoup de problèmes qu'on ne peut traiter par le calcul.

La technique des essais sur modèle réduit permet d'en étudier un bon nombre, en remplaçant le calcul par une expérimentation relativement économique. Elle consiste en général, à représenter le corps à étudier à petite échelle en procédant de sorte que les divers types de grandeurs qui interviennent, agissent dans les mêmes proportions sur le prototype, et sur la maquette.

Les mesures peuvent être locales (pression, vitesse, turbulence, frottement, transfert de chaleur, température), ou globales (débit, force résultante, moment).

Pour mesurer les forces aérodynamiques s'exerçant sur une aile d'avion, nous utilisons cette méthode.

I - 2 : But du projet :

L'objet de notre projet est d'étudier l'action d'une des composantes de la force aérodynamique qui s'exerce sur une aile en modèle réduit disponible au laboratoire.

Pour ce faire, nous devons concevoir et réaliser une balance aérodynamique, qui permettra la mesure de la portance qui s'exerce sur cette maquette.

Chapitre II : GENERALITES

II-I Introduction :

Lorsqu'un corps est en mouvement par rapport à l'air, il est soumis à des forces élémentaires de pression et de frottement qui s'exercent sur chaque élément de surface en contact avec le milieu extérieur. La réduction de ces forces élémentaires effectuée par rapport à un point du corps, arbitrairement choisi, conduit à une force résultante et à un moment résultant, pour toute orientation du corps par rapport à la vitesse du mouvement. La détermination des composantes de ces deux grandeurs dans un trièdre approprié et celle des forces élémentaires font l'objet de l'aérodynamique.

II-2 Historique :

L'aérodynamique est une science relativement récente puisque les premiers travaux théoriques ont été édifiés au 18^e siècle par Bernoulli et Euler qui établirent les principaux théorèmes relatifs aux écoulements. Au 19^e siècle, on introduisit les contraintes intérieures du fluide, et on obtint des lois fondamentales fort complexes. Dans la deuxième partie de ce même siècle, on vit apparaître d'importants paramètres, à savoir: "le nombre de Reynolds", "le nombre de Mach", et les calculs de Hugoniot relatifs aux grandes vitesses.

Sur le plan des applications, l'aérodynamique des profils d'ailes a été prévue par Kutta (1902) sur des profils d'aile squelettes et par Joukowski (1905) sur des profils d'aile ayant une certaine épaisseur. Ce dernier édifia une théorie, en mouvement plan, dite théorie de l'aile d'envergure infinie ou d'allongement infini, ce qui marqua le début de l'aérodynamique moderne. La théorie de l'aile d'envergure limitée édiflée par Prandtl (1917-1918) donna un nouvel essor à l'aérodynamique moderne. Les théories de Prandtl et de

Joukowski furent les bases de nombreux travaux théoriques et pratiques.

II-3 Etude de la résistance de l'air :

II-3-I Action de l'air sur un corps quelconque (fig II-1)

L'air comme tous les fluides, s'oppose à tout déplacement d'un corps solide. Il donne naissance à une résistance appelée force aérodynamique.

En effet, lorsqu'un corps immobile se trouve dans l'air ou bien lorsqu'un corps se déplace dans de l'air immobile, on observe en amont une zone de pression (P), et en aval une zone de dépression (D). Sur les parois apparaissent des forces de frottement et une force F, dans le sens de l'écoulement, appelée force aérodynamique.

II-3-2 Action de l'air sur une surface plane disposée perpendiculairement à l'écoulement (fig II-2)

L'expérience montre que la pression (P) est 3 fois plus grande que la dépression (D), la résistance à l'avancement est très importante. La force aérodynamique F est déterminée par:

- sa direction qui est celle de la vitesse V
- son point d'application se confond avec le centre de gravité

- son sens est celui de l'écoulement

- son intensité est fonction de:

- = de la surface S mesurée en (m²)

- = de l'épaisseur du corps

- = de l'état de la surface (rugosité)

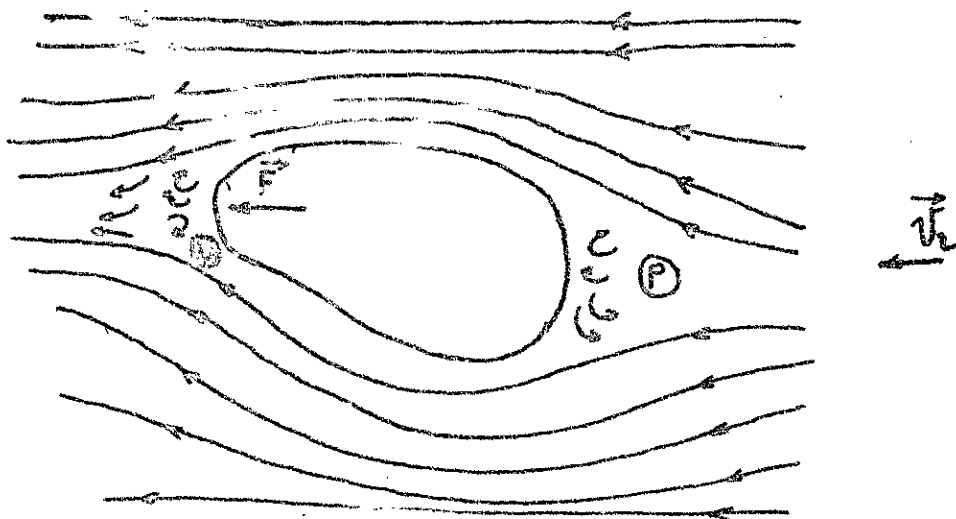
La force F est donnée par la relation :

$$F = \frac{1}{2} \rho C S V^2$$

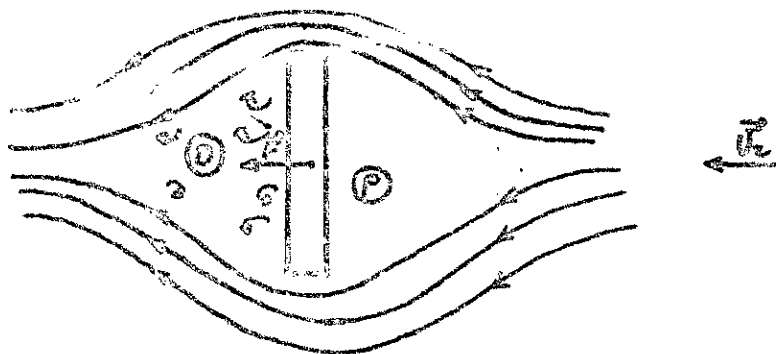
où ρ est la densité de l'air

C est un coefficient sans dimension.

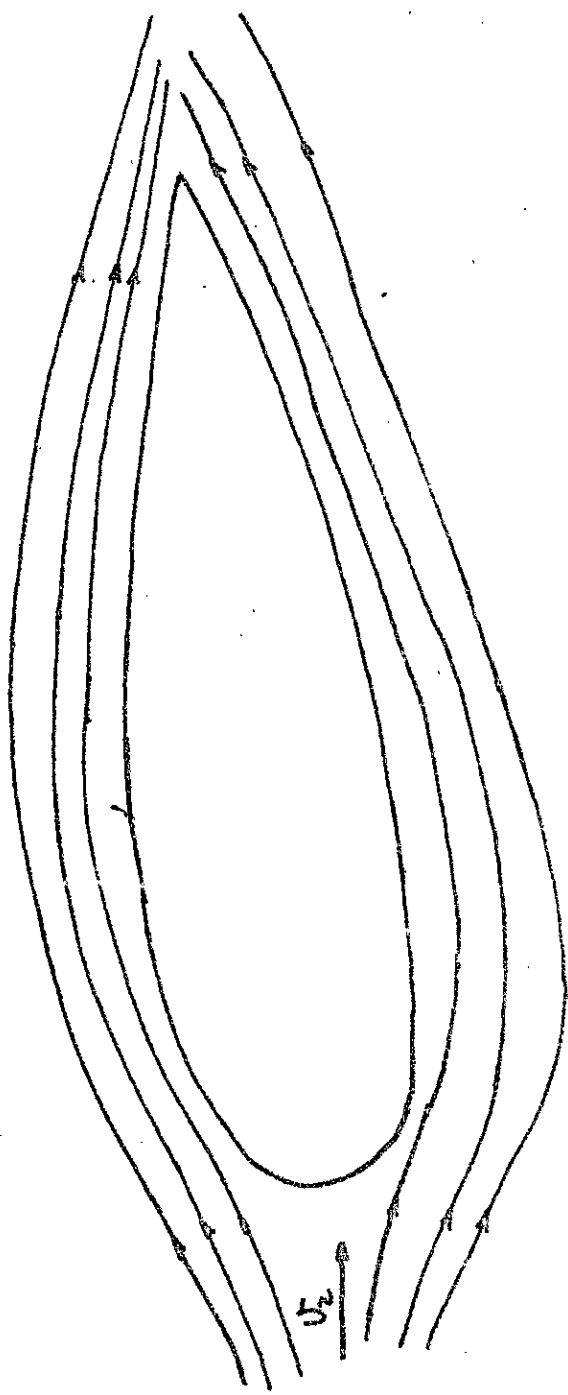
II-3-3 Action de l'air sur un corps fuselé (fig II-3)



(Fig II-1): Action de l'air sur un corps quelconque



(Fig II-2): Action de l'air sur une surface plane disposée perpendiculairement à l'écoulement



(Fig II-3) : Action de l'air sur un corps fuselé

Un corps fuselé est un corps dont la forme présente le minimum de résistance à l'avancement. Cette forme a l'avantage de répondre aux conditions qui suivent :

- en amont, le corps fuselé diminue le choc des filets d'air, c'est à dire qu'il les sépare progressivement pour les rejeter régulièrement de chaque côté.
- En aval, il diminue la dépression et permet aux filets de se rejoindre sans heurts ni chocs suivant une direction // à l'axe.

II-4 Profils d'aile :

Les écoulements irrotationnels, en fluide parfait incompressible, sont régis par l'équation suivante:

$$\overrightarrow{\text{Rot } \vec{v}} = 0$$

où \vec{v} est le vecteur vitesse, $v = f(x, y, z)$

ce qui veut dire que le vecteur vitesse \vec{v} dérive d'un potentiel $\varphi(x, y, z)$

$$\text{d'où } \vec{v} = \overrightarrow{\text{grad } \varphi} = \frac{\partial \varphi}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \vec{k}$$

Ces équations permettent d'utiliser des méthodes analogiques, celles-ci substituent l'expérience aux laborieuses méthodes de calcul empirique.

La théorie de l'aile en fluide compressible se ramène à celle de l'aile en fluide incompressible en faisant quelques approximations. Nous obtenons ainsi ce que l'on appelle des "profils théoriques" par le procédé de "la transformation conforme" qui permet d'engendrer à partir d'un cercle, un profil de forme appropriée. C'est par le choix de la fonction de transformation qu'on obtient des profils de formes variés. Les premiers profils donnés par Joukowski sont obtenus par la fonction de transformation :

$$\begin{array}{l} \zeta \text{ -----} \zeta \\ z \text{ -----} \end{array} \quad z = \zeta + \frac{b^2}{\zeta}$$

où b est un nombre réel.

Les points $Z = \pm b$ sont des points singuliers de la transformation $-\frac{dz}{dZ} = 0$.

En faisant passer le cercle de base par l'un des points singuliers, on obtient un profil à bord d'attaque arrondi et à bord de fuite pointu avec un point de rebroussement.

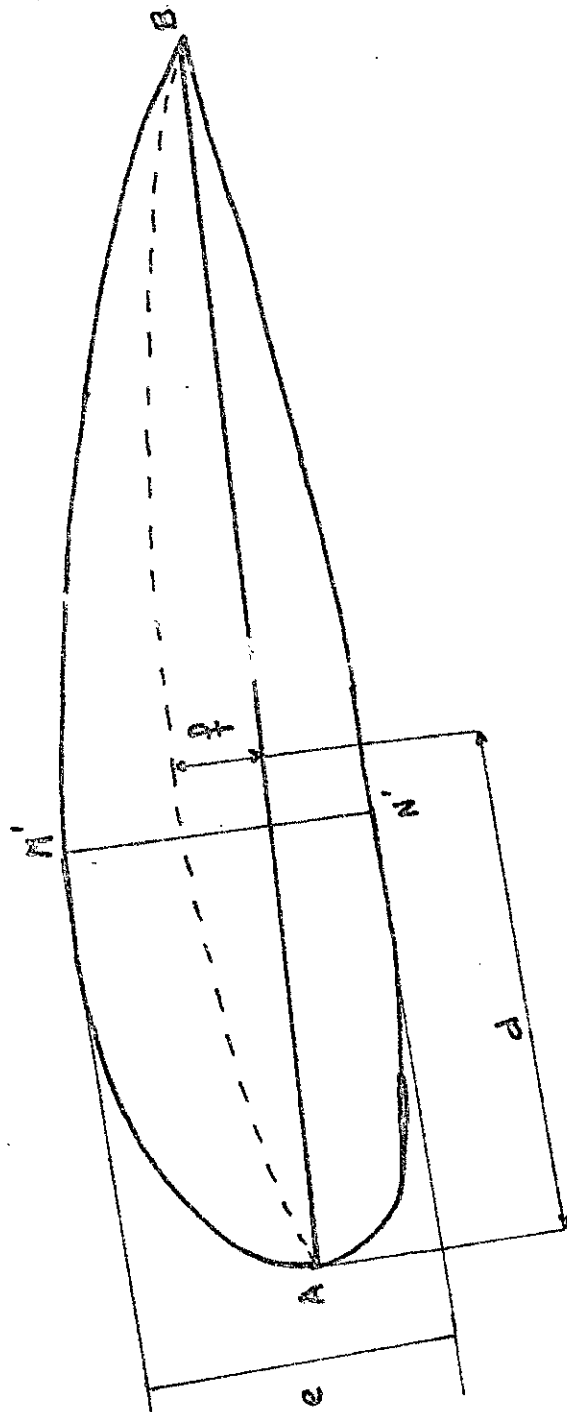
En définissant des profils d'aile, par des fonctions de transformation plus générales que celle de Joukowski, on a pu obtenir des profils variés qui répondent aux besoins de la technique.

Les profils les plus étudiés sont déterminés par une répartition de pression particulière pour une sustentation (ou portance) donnée.

II-4-I Définitions géométriques des profils d'aile (fig II-4)

On définit sur un profil d'aile :

- Le bord d'attaque : c'est le point de contact A du profil avec le cercle de centre B et de rayon maximum.
- Le bord de fuite : c'est la partie éfilée à l'arrière matérialisée par une pointe B.
- La corde ou profondeur : c'est la plus grande corde du profil (AB).
- L'extrados : c'est la surface dorsale de l'aile (AMB).
- L'intrados : c'est la surface ventrale de l'aile (ANB).
- Squelette ou ligne moyenne : Il est défini par le milieu des segments (M',N') perpendiculaires à la corde (AB).



(Fig II.4) : Caracteristiques geometri ques
de l'aile

- Flèche maximum : c'est la plus grande ordonnée (l_0) du squelette comptée perpendiculairement à AB.
- Epaisseur : le plus grand segment (M', N') définit l'épaisseur maximum (e) du profil.

II-4-2 Profils d'aile empirique

De nombreux profils ont été obtenus par des méthodes empiriques, une expérimentation extrêmement vaste a été entreprise aux Etats-Unis sur des profils N.A.C.A depuis 1932, elle a donné naissance à d'excellents profils classiques. Ces profils sont obtenus par une gération empirique que nous résumons :

- à partir d'une ligne moyenne linéaire, prise pour axe des (x), avec l'origine au bord d'attaque, on porte de part et d'autre de cette ligne une ordonnée $y = f(x)$. La loi $y = f(x)$ choisie correspond à la distribution moyenne de l'épaisseur sur de bons profils connus. L'épaisseur maximum est située à 30 % de la profondeur.
 - On passe de la ligne moyenne linéaire à une ligne moyenne dont on se donne l'équation.
 - On multiplie toutes les ordonnées (y) par un facteur constant pour faire varier l'épaisseur relative (e/l).
- = Numération N.A.C.A - Profils repérés par quatre chiffres
- Le premier chiffre est la courbure relative f/l du squelette en pourcentage de la corde.
 - Le second chiffre est le nombre de dizaines de l'abscisse relative d/l du point de flèche maximum en pourcentage de la corde.
 - Les troisième et quatrième chiffres désignent l'épaisseur relative e/l en pourcentage de la corde.

exemple : N.A.C.A 2412

- courbure relative : $f/l = 0,02 = 2 \%$
- nombre de dizaines
de l'abscisse relative : $d/l = 0,04 = 4 \%$
- épaisseur relative : $e/l = 0,12 = 12 \%$

II-5 Etude des forces aérodynamiques s'exerçants sur une aile :

On utilise essentiellement en aérodynamique et en mécanique du vol deux trièdres qui ont pour origine le centre de gravité de l'aile (fig II-5).

= Le trièdre (O, X, Y, Z) est défini comme suit :

- X axe longitudinal
- Y axe transversal
- Z axe normal

= Le trièdre aérodynamique (O, X_a, Y_a, Z_a) est défini comme suit :

- X_a portant le vecteur vitesse V de l'air
- Z_a axe dans le plan de symétrie de l'aile
- Y_a axe qui complète le trièdre direct.

On appelle angle d'incidence i , l'angle que fait la corde avec la direction du vecteur vitesse V_∞ . Il détermine aussi la position relative des deux trièdres.

II-5-I Forces aérodynamiques :

Pour définir la résultante des forces aérodynamiques qui agit sur une aile, on décompose celle-ci en la projetant sur les différents axes des systèmes (O, X, Z) et (O, X_a, Z_a) (fig II-6).

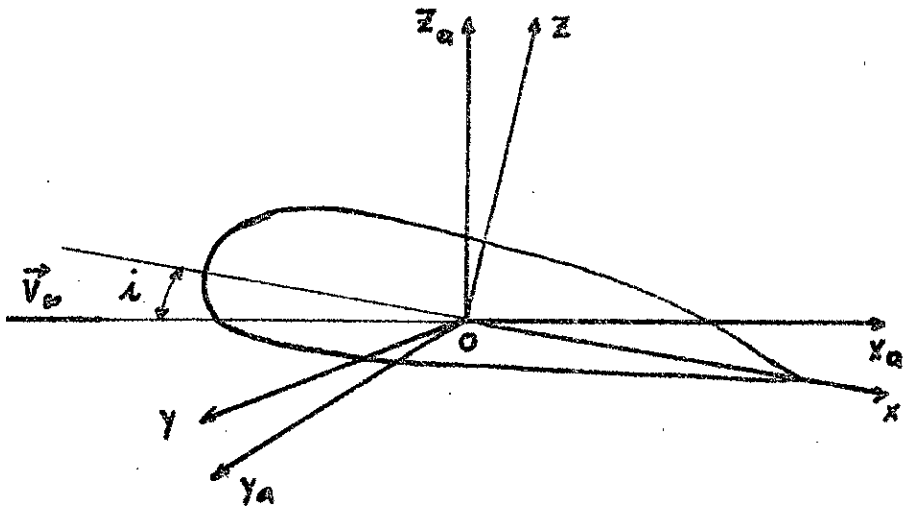
Ces composantes sont :

- Dans le plan (O, X_a, Z_a)

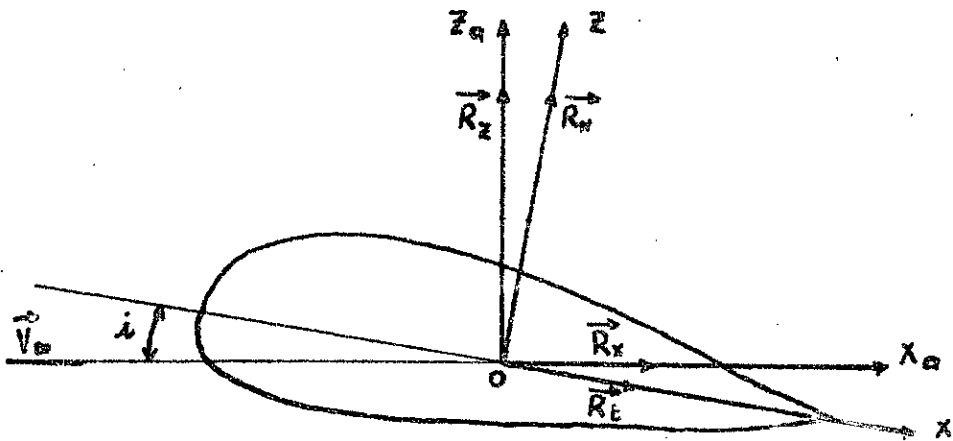
R_z : portance ou force de sustentation.

R_x : Traînée ou force de résistance.

R : Résultante des forces aérodynamiques.



(fig II-5) : Trièdres liés à l'aile



(fig II-6) : Forces aérodynamiques

- Dans le plan (O, X, Z)

R_N : force normale.

R_t : force tangentielle.

Les intensités de ces composantes sont données par les

$$\begin{aligned} \text{équations : } R_z &= \rho C_z S \frac{V_\infty^2}{2} & R_x &= \rho C_x S \frac{V_\infty^2}{2} \\ R_N &= \rho C_n S \frac{V_\infty^2}{2} & R_t &= \rho C_t S \frac{V_\infty^2}{2} \end{aligned}$$

$$R = \rho S C_r \frac{V_\infty^2}{2} \quad \text{avec } C_r = \sqrt{C_z^2 + C_x^2} = \sqrt{C_t^2 + C_n^2}$$

où : - Est la densité de l'air au point O.

- S est la surface en plan de l'aile.

- V_∞ est la vitesse d'écoulement autour du profil.

- C_z est le coefficient unitaire de portance.

- C_x est le coefficient unitaire de traînée.

- C_n, C_t, C_r des coefficients unitaires sans dimensions.

- Les équations qui lient R_x, R_z avec R_N et R_t sont :

$$R_t = R_x \cos i - R_z \sin i.$$

$$R_n = R_x \sin i + R_z \cos i.$$

- Les valeurs de C_x et C_z dépendent :

= de la forme du profil,

= de l'angle d'incidence,

= du nombre de Reynolds en écoulement incompressible,

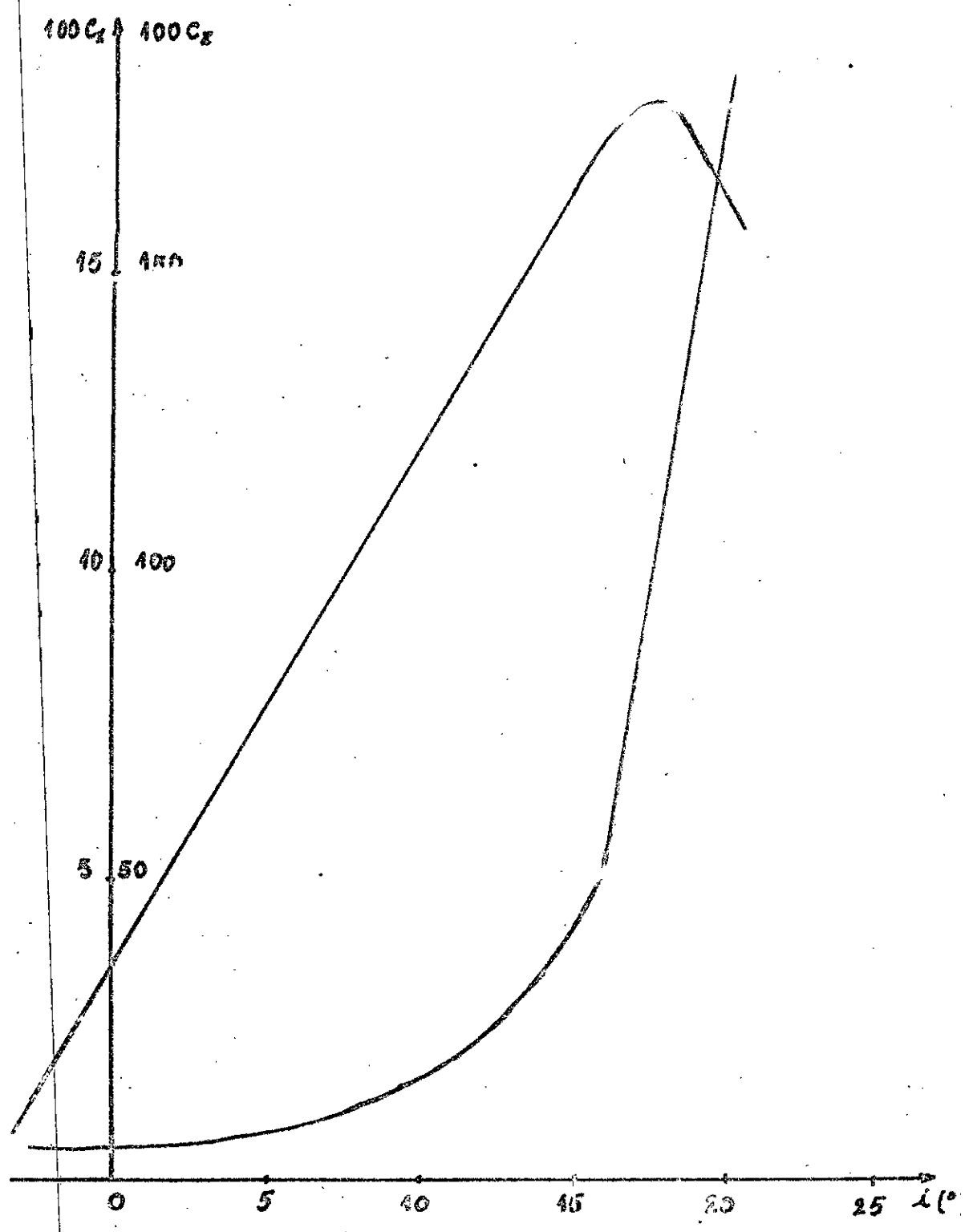
= du nombre de Mach en écoulement compressible.

II - 5 - 2 : Portance ou forme de sustentation :

- Variation de C_z en fonction de l'angle d'incidence i

(fig II -7) :

Pour chaque profil, le coefficient C_z présente une évolution rectiligne dans une gamme d'incidence comprise entre -10° et 15° . Cette évolution se présente sous une forme régie par l'équation : $C_z = ai + b$ $b = 0$ pour les profils symétriques



(Fig II. 7) : Variations de C_z et de C_x en fonction de i

Toutefois cette forme est conservée jusqu'à une certaine valeur de i , au delà de cette valeur, C_z croît plus lentement, atteint un maximum pour $i = i_{cr}$ (i_{cr} = incidence critique ou angle de décharge), et lorsque i continue à croître, C_z amorce une chute.

La valeur de C_z correspondant à i_{cr} est $C_{z_{max}}$. Cette valeur joue un rôle important quant à la construction de l'aile, en effet la vitesse minimale pour laquelle le corps reste en sustentation est déterminée par $C_{z_{max}}$.

Pour $i > i_{cr}$, on a une diminution brusque de C_z qui s'accompagne d'une croissance sensible de C_x , et par conséquent d'une baisse brusque de la qualité $-\frac{C_z}{C_x}$. Ceci s'explique par l'apparition du décollement de la couche limite sur l'extrados. Cette zone de décollement devient de plus en plus importante avec l'incidence; ce qui entraîne une chute des dépressions sur l'intrados, d'où perturbation de l'écoulement régulier autour de l'extrados et apparition d'un sillage tourbillonnaire à l'arrière de l'aile. C_x est minimum au voisinage de i_0 (point de sustentation nulle), et croît lentement puis rapidement au voisinage du point où se produit le décollement de la couche limite.

II - 6 : Moment résultant : (fig II - 8)

Déterminons le moment de R par rapport à l'axe des Y , donc par rapport au bord d'attaque du profil.

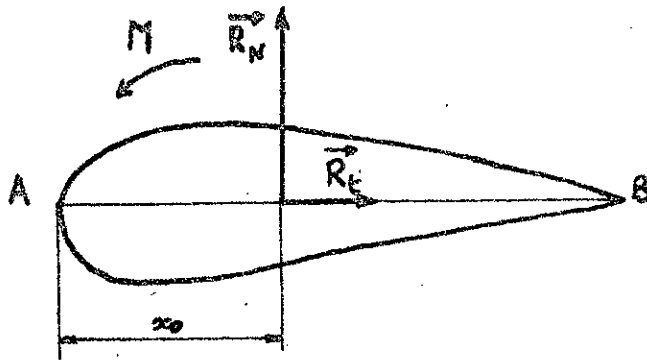
On a la relation suivante :

$$M = R_n \cdot x_0$$

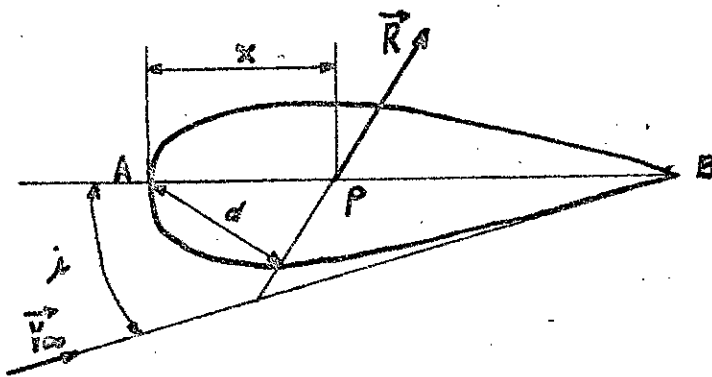
où : R_n est la composante normale

$x_0 = OA$ distance du point d'application de R
au bord d'attaque A .

D'après les formules générales de la théorie de similitude, on a la relation: $M = C_m \cdot \rho \cdot S \cdot l \cdot \frac{v^2}{2}$



(Fig II-8) : Moment résultant



(Fig II-9) : Centre de poussée

où : C_m est le coefficient sans dimension du moment :

l est la corde du profil.

Si l'on prend comme point de réduction, un point du profil le moment de R par rapport à A est tel que :

$$M_A = \rho C_{m_A} S l \frac{V_\infty^2}{2}$$

Le coefficient C_{m_A} dépend :

- de la forme du profil,
 - de l'angle d'incidence,
 - du nombre de Reynolds dans le cas du fluide incompressible,
 - du nombre de Mach dans le cas du fluide compressible.
- L'expérience montre qu'en général, on peut écrire :

$$C_{m_A} = C_{m_0} - k C_z$$

après avoir fait l'approximation $\alpha \approx C_z$

Pour $C_z = 0$, on a $i = i_0$ et $C_{m_A} = C_{m_0}$

Ce point est appelé point de sustentation nulle.

- La cambrure du profil et la forme du squelette ont une influence sur la valeur de C_{m_0} :

$C_{m_0} = 0$ pour des profils symétriques.

$C_{m_0} < 0$ pour des profils à simple courbure.

$C_{m_0} > 0$ pour des profils à double courbure.

II - 7 : Centre de poussée :

On appelle centre de poussée, le point de rencontre P de la résultante R avec la corde AB du profil (fig II - 9).

Le moment résultant par rapport au bord d'attaque A est lié au coefficient C_m ou C_r ou C_n par les relations :

$$C_{m_A} \rho S l \frac{V_\infty^2}{2} = - C_r \rho S \frac{V_\infty^2}{2} d = - x \rho C_n S \frac{V_\infty^2}{2}$$

ce qui implique $l C_{m_A} = - C_r d = - x C_n$

$$\text{d'où } \frac{x}{I} = -\frac{Cm_A}{Cn} \quad (1)$$

$$\text{or } Cm_A = Cm_0 - k Cz$$

Et en insérant cette équation dans (1), on obtient la relation :

$$\frac{x}{I} = -\frac{Cm_0}{Cn} + k \frac{Cz}{Cn} \quad (2)$$

d'autre part on a la relation :

$$Cn = Cx \sin i + Cz \cos i \quad (3)$$

si on admet que pour de faibles incidences :

$$\sin i \simeq i \quad \text{et} \quad \cos i \simeq 1$$

alors la relation (3) se réduit à :

$$Cn = i Cx + Cz$$

comme Cx est très petit devant Cz , on peut négliger alors le produit $i \cdot Cx$ devant Cz , d'où l'approximation suivante :

$$Cn \simeq Cz \quad (4)$$

En insérant l'égalité (4) dans la relation (2), on obtient la relation (5) :

$$\frac{x}{I} = -\frac{Cm_0}{Cz} + k \quad (5)$$

Ainsi on déduit les variations de $\frac{x}{I}$.

Le déplacement du centre de poussée est lié au signe de Cm_0 .

- Discussion :

Pour $Cm_0 = 0$, $\frac{x}{I} = k$ le centre de poussée est fixe

Pour $Cm_0 < 0$ - quand Cz tend vers 0 par valeurs

positives, $\frac{x}{I}$ tend vers $+\infty$.

- quand Cz tend vers 0 par valeurs

négatives, $\frac{x}{I}$ tend vers $-\infty$.

- quand C_z croît par valeurs positives, $-\frac{x}{I}$ diminue et reste inférieur à k alors le centre de poussée avance.
 - quand C_z est négatif et croît en valeur absolue, $-\frac{x}{I}$ croît mais reste inférieur à k ; alors le centre de poussée recule.
- Pour $C_{m_0} > 0$
- quand C_z tend vers 0 par valeurs positives, $-\frac{x}{I}$ tend vers $- \infty$.
 - quand C_z tend vers 0 par valeurs négatives, $-\frac{x}{I}$ tend vers $+\infty$.
 - quand C_z croît par valeurs positives, $-\frac{x}{I}$ croît mais reste inférieur à k alors le centre de poussée recule.
 - quand C_z est négatif et croît en valeur absolue, $-\frac{x}{I}$ croît mais reste supérieur à k , alors le centre de poussée recule.

II - 8 : choix du profil d'aile :

Le profil d'aile qui a été choisi par Mr Diffallah, (vo projet de fin d'études "Balance aérodynamique" - Promotion Janvier 1983), est le profil NACA 4409.

- Le squelette de ce profil est constitué par deux arcs de parabole se raccordant au point de flèche maximum.
- La courbure relative f/l du squelette est repérée par le premier chiffre (4).
- Le nombre de dizaines de l'abscisse relative d/l au point de flèche maximum est repéré par le deuxième chiffre (4).
- L'épaisseur relative e/l de la corde est repérée par les deux derniers chiffres (0) et (9).

Le tracé de ce profil est donné par une fonction $y = f(x)$.
L'ordonnée y est portée de part et d'autre d'une ligne moyenne
linéaire prise pour axe des X .

Le tableau des valeurs ci-dessous nous donne ce tracé:

X	0	1,25	2,5	5	7,5	10	15	20
Y_1	0	1,81	2,61	3,74	4,64	5,37	6,52	7,23
$-Y_2$	0	1,05	1,37	1,64	1,74	1,73	1,55	1,30
X	25	30	40	50	60	70	80	90
Y_1	7,9	8,25	8,35	7,87	7,00	5,76	4,21	2,33
$-Y_2$	1,02	0,76	0,35	0,07	0,14	0,26	0,26	0,14
X	95	100						
Y_1	1,26	0						
$-Y_2$	0,63	0						

Notre aile étant déterminée et disponible, notre travail
consiste à concevoir et à réaliser une balance aérodynamique
permettant de faire les essais en soufflerie, pour mesurer les
forces aérodynamiques auxquelles cette aile est assujettie.

Chapitre III : BALANCES AERODYNAMIQUES.

III - I : Introduction :

Pour déterminer la résultante aérodynamique et le moment résultant sur un corps en essai, on utilise un ensemble plus ou moins complexe appelé "balance aérodynamique". La balance doit mesurer une ou plusieurs composantes (6 au maximum) de la résultante générale et du moment résultant.

III - 2 : Mesure des efforts :

La maquette est fixée à un support relié à la balance. Cette dernière mesure, pour les balances les plus performantes, les 6 composantes du moment résultant et de la résultante générale, qui sont :

Rx : traînée.

Rz : portance où $R = R_x \vec{i} + R_y \vec{j} + R_z \vec{k}$.

Ry : dérive.

Mx : moment de roulis.

My : moment de tangage où $M = M_x \vec{i} + M_y \vec{j} + M_z \vec{k}$.

Mz : moment de lacet.

III - 3 : Classification des balances aérodynamiques :

On distingue trois sortes de balances aérodynamiques :

- Balances rigides :

Ce sont des balances dans lesquelles le modèle est lié rigidement aux dispositifs de mesure.

- Balances à fils :

Dans ces balances le modèle est suspendu par des fils.

- Balances mixtes :

Ce sont des balances qui font intervenir les deux constructions.

III - 3 - I : Balances rigides :

Les balances rigides, peu utilisées autrefois, se sont imposées dans les grandes souffleries essentiellement pour les raisons suivantes :

- Elles présentent des facilités pour la mesure des moments au centre de gravité. Les supports rigides situés à l'extrados des ailes, créent des interactions aérodynamiques plus faibles et mieux définies que les fils.
- Elles présentent une résistance propre moins élevée.

La

La balance doit assurer la décomposition des efforts de telle façon que les différentes composantes de R et de M soient analysées et mesurées directement.

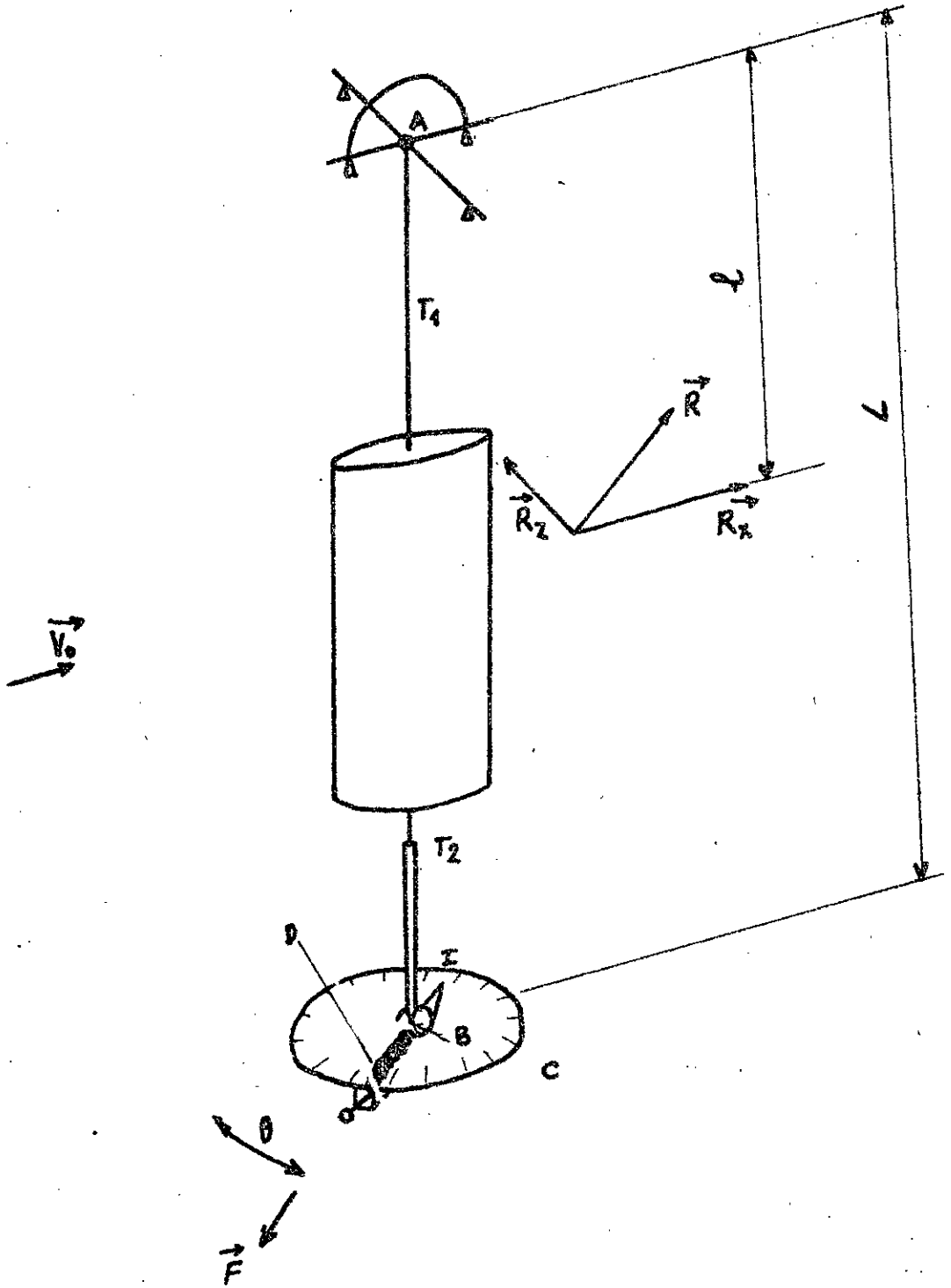
Cette analyse vectorielle est faite par la disposition des différents organes de la balance.

On mesure finalement les réactions qui équilibrent les composantes. Ces réactions sont introduites par des transmetteurs de forces ou tout autre système de mesure de force (voir chapitre IV).

La balance aérodynamique rigide peut se réduire à un bati-support, permettant d'imposer une incidence et une dérive appropriées. Et comportant, aux points d'attache de la maquette, des ensembles dynamométriques qui assurent l'analyse vectorielle des efforts de leur mesure.

Exemple : Balance LAFFAY.

- a) Principe : Le principe de la mesure est illustré sur la figure (III-I). La maquette est fixée rigidement à deux tiges T_1 et T_2 . L'ensemble est articulé autour du point A par l'intermédiaire de deux lignes de couteaux à 90° , ce



(fig III. 1) : Balance LAFFAY

qui rend impossible toute rotation autour de l'axe T_1T_2 . En l'absence de vent, la pointe effilée de la tige T_2 est réglée de façon à se trouver au centre B d'un cadran gradué perpendiculaire à l'axe T_1T_2 . Lorsque la soufflerie fonctionne, la résultante des forces aérodynamiques incline perpendiculairement l'ensemble T_1T_2 autour du point A. On ramène au zéro la pointe effilée en exerçant une force F sur la tige T_2 , au moyen d'un dynamomètre D monté sur une alidade prolongée par un index I, dont on lit l'orientation θ sur le cadran C.

La direction de la résultante R est donnée par l'angle θ , son intensité est donnée par la relation :

$$R \cdot l = F \cdot L$$

où l : distance du point d'articulation A au plan de symétrie de la maquette.

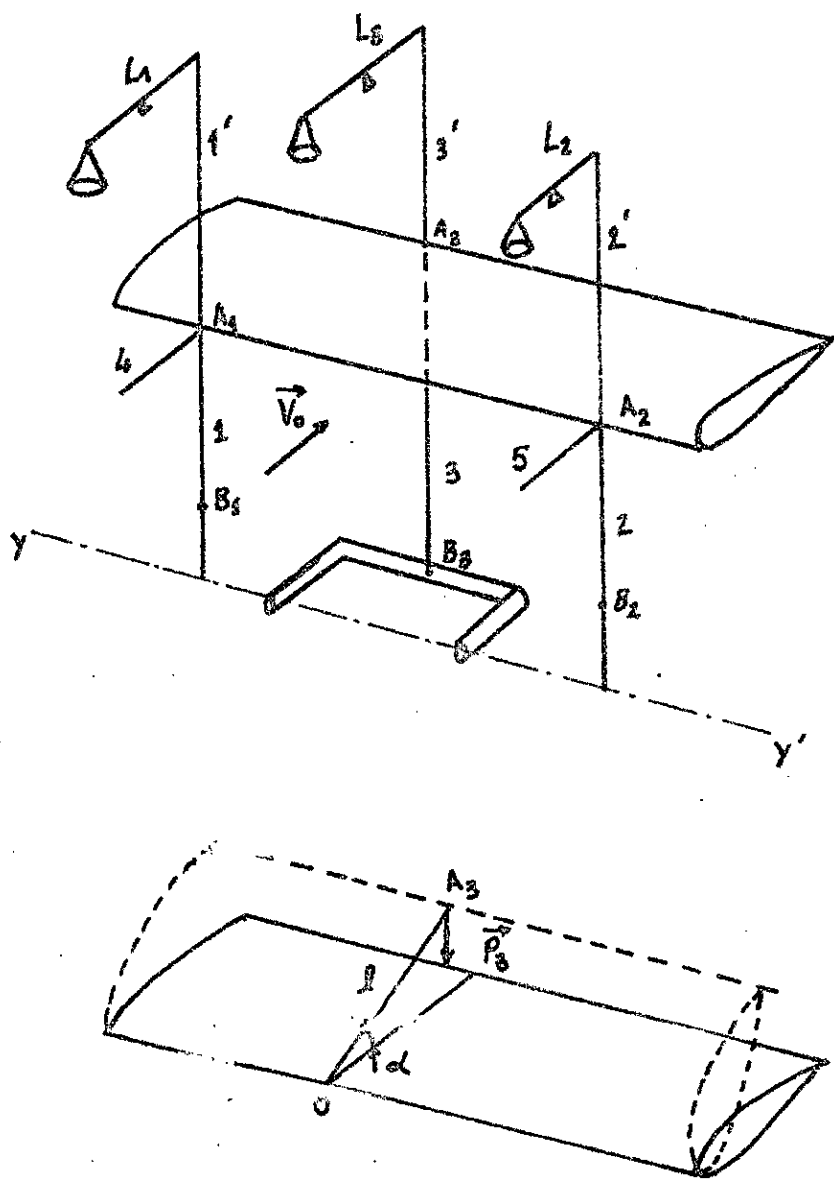
L : distance du point d'articulation A à l'attache du dynamomètre.

Nous pouvons alors décomposer la résultante R sur deux axes et ainsi obtenir la portance et la traînée.

Par rotation des deux lignes de couteaux, l'incidence peut être réglée.

III - 3 - 2 : Balances à fils :

La maquette est liée à un ensemble de fils verticaux et horizontaux initialement tendus. La résultante aérodynamique et le moment résultant des forces élémentaires appliquées à la maquette déterminent, sur certains fils des variations de tension qu'on mesure au moyen de balances ou de dynamomètres. Les suspensions sont plus ou moins complexes selon qu'elles permettent la mesure de trois ou six composantes.



(fig III.2) : Balance à fils

- Variation d'incidence : (fig III - 3).

Les trois points d'attache A_1, A_2, A_3 déterminent un plan qui, par réglage, est parallèle à un cadre C et à un levier L_3 . Les axes de rotation de C et de L_3 sont dans le plan vertical contenant A_1 et A_2 .

Les fils verticaux (1, 1') et (2, 2') sont attachés respectivement en B_1 et B_2 ; ils sont tendus par des leviers L_1 et L_2 . Le fil arrière 3 est fixé sur le cadre en B_3 . L'ensemble constitue un parallélogramme déformable. L'incidence i de l'aile est obtenue par rotation d'un angle α du cadre; le fil 3 reste vertical et est soumis à une tension constante.

- Mesure des composantes :

- Portance :

Les variations de tension P_1, P_2, P_3 qui prennent naissance dans 1, 2, 3 quand la soufflerie est en marche sont dûes à la sustentation $-R_z$.

Nous avons la relation :

$$P_1 + P_2 + P_3 = - R_z$$

- Trainée :

Les fils horizontaux 4 et 5 éprouvent des variations de tension T_1 et T_2 dûes à la trainée $-R_x$.

Nous avons la relation :

$$T_1 + T_2 = - R_x$$

- Mesure du moment M :

La réduction des forces étant faite au point O dans le plan de symétrie de la maquette sur l'axe A_1A_2 . On voit que :

$$P_3 l \cos \alpha \mp M$$

l : distance OA_3 . α : angle d'incidence.

M : moment de tangage.

: angle d'incidence.

P_3 : tension du fil 3-3'.

III - 3 - 3 : Balances mixtes :

Les balances mixtes font intervenir les deux types de construction; c'est à dire une suspension à fils et un support rigide comme dans le cas de la balance Girerd-Seince.

Ce genre de balance permet d'avoir une mesure de la portance et de la traînée avec une erreur absolue pratiquement constante, quelque soient les efforts aérodynamiques.

Cette disposition présente, en outre l'interêt de limiter les déformations de la suspension.

Remarque 1 : Les balances que nous venons de citer présentent certains inconvénients à mentionner:

- Dans le cas des balances rigides, il existe une interaction du support sur la maquette, celle-ci peut donner lieu à des erreurs sur la mesure de la traînée.
- Dans le cas des balances à fils, les fils horizontaux qui mesurent la traînée, en s'allongeant, déforment les verticaux, ce qui cause une faible précision de la traînée.

Remarque 2 : On constate que pour la mesure des efforts, on utilise des dynamomètres ou des extensomètres. Ce genre d'appareil est appelé de façon plus générale "transmetteurs de force".

Chapitre IV : REVUE DES TRANSMETTEURS DE FORCE.

Un transmetteur de force est un dispositif constituant la partie principale ou unique d'un appareil de mesure destiné à mesurer une force.

L'utilisation de ces transmetteurs dépend du fait que la mesure s'effectue de façon directe ou indirecte.

IV - I : Méthode directe :

Les forces peuvent être mesurées directement lorsque le transmetteur constitue la partie unique de l'instrument.

Pour une mesure directe, on utilise généralement des transmetteurs appelés dynamomètres.

On distingue deux types de dynamomètres :

- Le dynamomètre à opposition.
- Le dynamomètre à déplacement.

a - Le dynamomètre à opposition :

Le principe est d'opposer à la force à mesurer, une force connue de façon à établir un équilibre. Cette méthode est appelée "méthode de zéro".

Le dynamomètre le plus commun dans cette catégorie est la balance à poids.

- Dynamomètre à poids : (Exemple : Balance de Roberval).

Il se présente comme suit : (fig IV - I).

= Principe :

Le moment par rapport au point O, de la force F qui s'exerce en A est équilibré par le moment par rapport à O, du poids des masses M connues qui s'exerce en B. Nous avons ainsi la relation :

$$F \cdot OA = P \cdot OB$$

d'où la valeur de la force F :

$$F = P \cdot \frac{OB}{OA}$$

b - Le dynamomètre à déplacement :

Dans ce type d'appareils, le principe est de mesurer un déplacement linéaire ou angulaire, produit par l'action de la force à mesurer.

- Pesons :

Les pesons constituent des systèmes oscillants qui, par leur inclinaison, déterminent la masse des charges auxquelles, on les soumet. Ce sont des instruments à libre suspension.

Les pesons se classent en trois grands groupes :

- = Les pesons à tangente.
- = Les pesons à sinus.
- = Les pesons différentiels.

- . I Peson à tangente : (fig IV - 2).

Soit à mesurer une charge X , celle-ci étant placée à l'extrémité du bras OA d'un levier AOB oscillant autour du point O , le contre-poids de masse ρ placé à l'extrémité B tend à ramener le système vers une position d'équilibre.

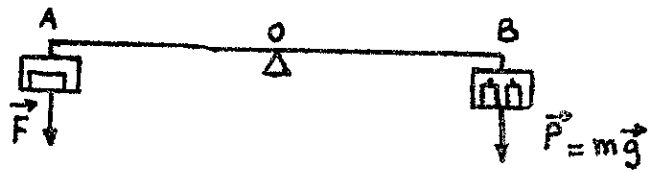
Sous l'action d'une charge X , le bras OA s'incline d'un angle α entraînant la même inclinaison du bras OB .

Le peson prend une position d'équilibre telle que :

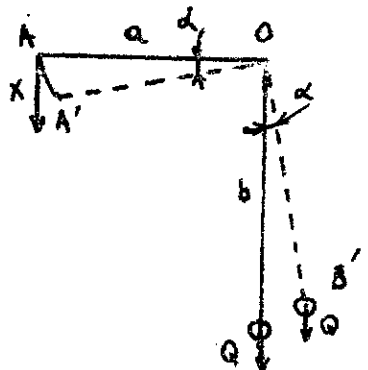
$$X \cdot a \cdot \cos \alpha = \rho \cdot b \cdot \sin \alpha$$

d'où la valeur de X :

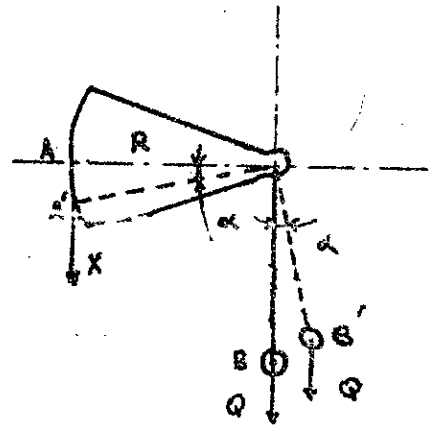
$$X = \rho \cdot \frac{b}{a} \cdot \operatorname{tg} \alpha = K \operatorname{tg} \alpha \quad \text{avec } K = \rho \cdot \frac{b}{a}$$



(Fig IV.1) : Dynamomètre à poids



(Fig IV.2) : Peson à tangente



(Fig IV.3) : Peson à sinus

Ce système est utilisé comme appareil de contrôle dans les tissages, fabricues de papiers etc...

Vu sa précision, il est toléré comme pèse-lettres jusqu'à 350 g de portée.

- . 2 Peson à sinus : (fig IV - 3).

La charge X agit à l'extrémité d'un ruban s'enroulant sur un secteur circulaire de rayon $OA = R$.

Un contrepoids de masse Q , solidaire du secteur s'écarte de la verticale sous l'action de charges établissant ainsi un état d'équilibre.

A l'équilibre on a la relation suivante :

$$XR = Q b \sin \alpha$$

d'où la valeur de X :

$$X = Q \cdot \frac{b}{R} \sin \alpha$$

- . 3 Peson différentiel :

Dans ce genre de peson, on utilise deux secteurs circulaires de centre commun, sur lesquels viennent s'enrouler deux rubans. Le premier ruban s'enroule sur le secteur ayant le plus grand rayon, sous l'action d'une charge X. Le deuxième ruban, en s'enroulant sur le deuxième secteur, soulève ce dernier d'une hauteur h, proportionnelle à l'angle d'inclinaison provoquée par l'effet de la charge X. Un contrepoids Q tend à ramener le système vers une position d'équilibre

et on a une relation de la forme :

$$X = K' + K \sin \alpha$$

- Ressort à boudin : (fig IV - 4).

La force à mesurer est exercée au point S du ressort, sous l'effet de celle-ci le ressort se déforme et son extrémité S se déplace d'une distance Δl .

Sur la règle graduée on lit la valeur de Δl , qui est proportionnelle à la force F.

D'après la relation $k \cdot \Delta l = F$, ($k = \text{const de raideur du ressort}$), on déduit la valeur de F.

- Ressort à lame : (fig IV - 5).

Le principe de fonctionnement est le même que le précédent, mais dans ce cas la déformation se traduit par un déplacement angulaire.

IV - 2 : Méthode indirecte :

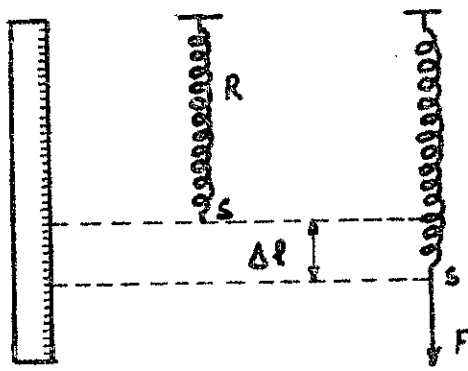
On utilise cette méthode dans le cas d'une mesure à distance. Lorsqu'une certaine distance sépare un appareil de mesure de la grandeur à mesurer, il se présente des difficultés quant à la transmission de la mesure.

Pour palier à cet inconvénient, on utilise différents transmetteurs destinés à reproduire aussi fidèlement que possible l'action de la force à mesurer.

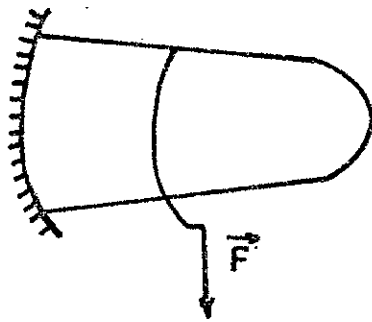
- Transmetteur à fil résistant - Extensomètre (fig IV - 6).

Bien qu'utilisés principalement sous forme de dynamomètres ou de pesons pour la mesure des déformations de matériaux, les extensomètres ou jauges à fil résistant sont également utilisés pour la mesure et la transmission à distance.

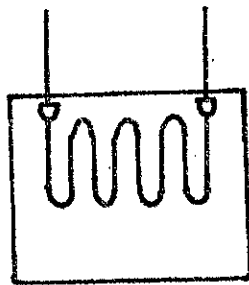
Un extensomètre se compose d'un support phénolique ou papier, sur lequel est disposé un fil résistant de quelques



(Fig IV -4) : Ressort à Boudin



Fig(IV-5) : Ressort à lame



(Fig IV -6) : Extensomètre

centièmes de millimètres, replié plusieurs fois sur lui même pour présenter une longueur importante sur une petite surface.

L'extrémité de chacune des boucles est fixée au support par un rivet. Le fil résistant utilisé est généralement du constantan. Collé au moyen d'une colle spéciale sur l'objet à contrôler, par exemple la membrane d'un pressiomètre. L'extensomètre, après séchage, forme un tout mécanique avec la surface de l'objet et en subit toutes les déformations.

Ces déformations modifient la résistance ohmique de l'extensomètre, et dans certaines limites, il y a proportionnalité entre l'allongement relatif $\frac{\Delta L}{L}$ et la résistance relative $\frac{\Delta R}{R}$.

Le rapport entre ces deux grandeurs est le facteur de sensibilité k , qui est d'environ 2 pour le constantan,

$$\text{d'où : } \frac{\Delta R}{R} = k \frac{\Delta L}{L}$$

traduisant en variation de résistance électrique, toute déformation du matériau sur lequel il est collé, on comprend dès lors que si l'on colle un ou plusieurs extensomètres sur un tube ou une membrane se déformant sous l'action de la pression d'un fluide, on pourra mesurer électriquement cette pression.

Remarque 1 : Ce transmetteur présente l'inconvénient d'exiger un appareillage sophistiqué pour détecter les faibles variations de la résistance ohmique.

Remarque 2 : Son avantage est la grande facilité avec laquelle on peut le monter sur l'objet à étudier, en outre il présente une grande sensibilité.

Remarque 3 : Ce transmetteur est utilisé pour mesurer le poids d'un avion, lors du décollage. Il est aussi utilisé dans la balance aérodynamique "à Dard".

- Transmetteur à pression de fluide :

L'appareil module une pression d'air comprimé proportionnelle à la force F qui lui est appliquée et qui peut être produite par une pression.

Comme le montre la figure (IV - 7), il s'agit d'une balance de forces dont l'équilibre est réalisé lorsque :

$$F \cdot X = D \cdot Y$$

Pour que la pression P , transmise à distance, soit rigoureusement proportionnelle à la force F , la balance est alimentée en air comprimé à pression et débits constants, par un ajutage calibré A . En aval de cet ajutage, une buse à faible orifice B débouche en face d'une palette portée par le fléau E , de telle sorte qu'il y a continuellement une fuite d'air par l'orifice B . Le débit de fuite varie selon que la palette est plus ou moins rapprochée de la buse B . Il en résulte des variations de pression P telles que :

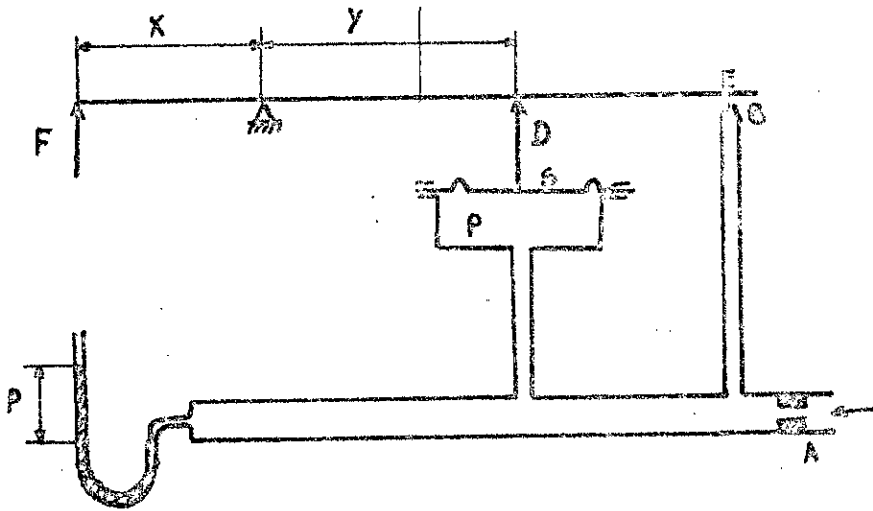
$$PS = D \quad (S \text{ étant la section de la membrane}).$$

Il résulte aussi que :

$$DY = FX$$

Cet état d'équilibre étant acquis, P est proportionnelle à F .

Remarque : L'inconvénient de cet appareil est la nécessité d'utiliser une énergie auxiliaire pour son fonctionnement, mais cette énergie lui procure l'avantage d'être précis.



(Fig IV-7) : Transmetteur à pression de fluide

Chapitre V : ETUDE ET CONCEPTION DE LA BALANCE.

- La balance que l'on doit réaliser est destinée à mesurer la portance qui s'exerce sur une aile à modèle réduit disponible au laboratoire.

Cette aile est à profil N.A.C.A 4409, avec $\lambda = 3$ (voir chap II).

- Cette balance sera utilisée en banc d'essai de portance aérodynamique. Sa fonction sera donc principalement pédagogique.

- Les conditions que cette balance doit remplir sont déterminées par :

1 - La fonction à laquelle elle est vouée.

2 - Les exigences du laboratoire.

= Etant destinée à des manipulations en travaux pratiques, elle doit présenter :

- + une bonne maniabilité,
- + une lecture aisée,
- + une robustesse importante,
- + une bonne stabilité,
- + une fidélité adéquate,
- + une bonne sensibilité.

= Disposant d'une soufflerie bien définie et ne devant mesurer que la portance, cette balance doit être :

- + insensible aux autres forces aérodynamiques : dérive et traînée, et insensible au point d'application de la portance.
- + Capable de mesurer les portances maximales et minimales produisibles en laboratoire.

Pour ces différentes raisons, nous avons opté pour la balance rigide, celle-ci répondant aux critères de robustesse et de maniabilité.

Nous avons choisi un transmetteur de force à méthode indirecte,

Le transmetteur à pression de fluide fonctionne sans énergie auxiliaire, celui-ci permet une lecture précise et une bonne sensibilité. Comme construit.

V - I : Principe de fonctionnement (fig V - I).

Sous l'action de la portance R_z , le levier subit une inclinaison par rapport au point O.

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 C se comprime, et en vertu du principe des vases communicants, un volume de fluide proportionnel à F est chassé dans le tube T.

Une graduation sur le tube permet de lire la hauteur h de fluide chassée.

Sachant que :

$$F = R_z \cdot \frac{lI}{I^2}$$

d'autre part, la pression qui s'exerce sur la membrane est telle que :

$$P = \frac{F}{S_{eff}} \quad \text{où } S_{eff} \text{ est la surface effective de la membrane.}$$

La pression au point B étant égale à la pression au point B'.

$$P_B = P_{B'}$$

où B est un point de contact de la membrane sous pression, avec la surface du fluide, et B' un point du tube tel que BB' est une droite horizontale.

$$\text{Sachant que } P_{B'} = \rho g (h + \Delta h)$$

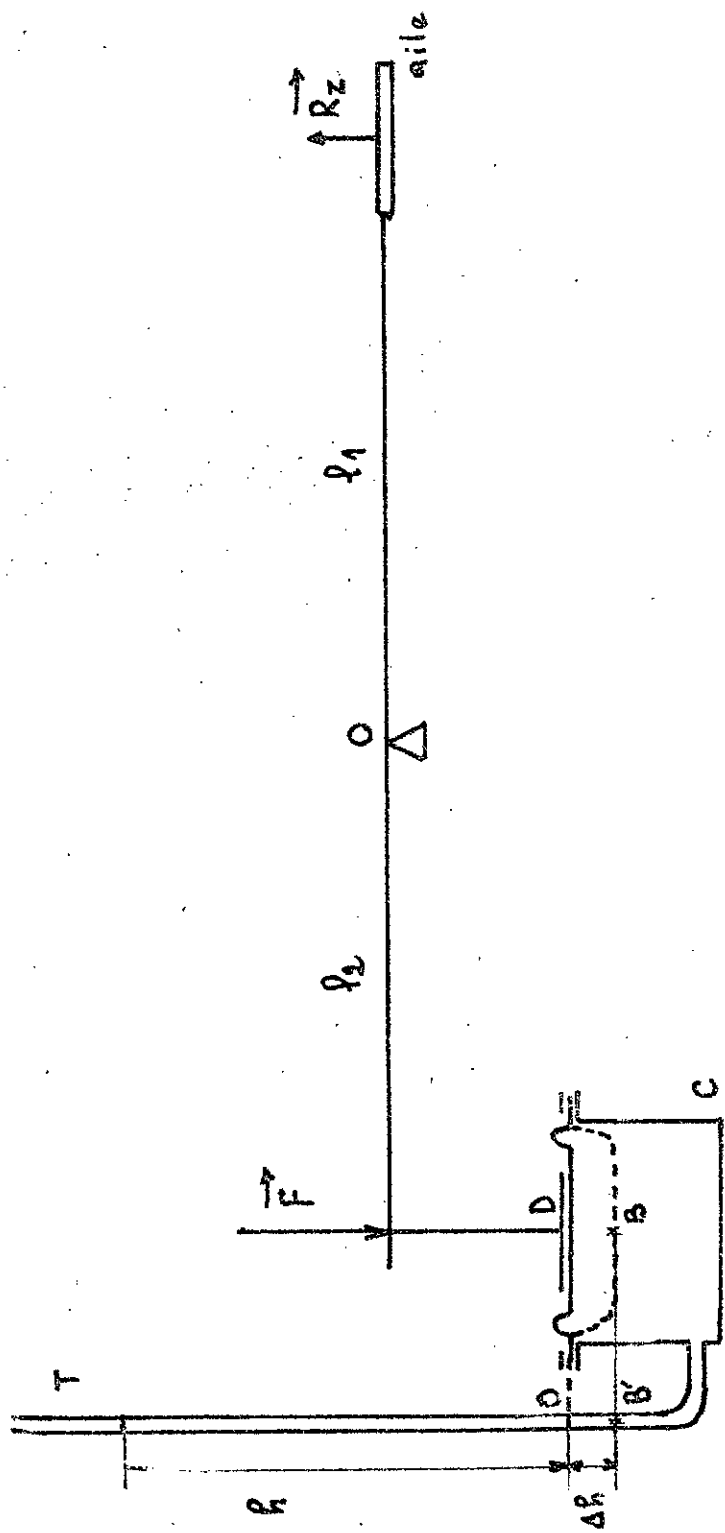
où : ρ est la masse volumique du fluide.

g l'accélération de la pesanteur.

h la hauteur de fluide chassé.

Δh la distance du point B' au point O.

Le point O étant l'origine de la graduation du tube où le niveau de fluide à l'état initial.



(Fig V-1) : Principe de fonctionnement

Le point O étant sur l'horizontale qui passe par le niveau de la membrane à l'état initial. Le segment OB' est donc égal au déplacement X de la membrane sous l'effet de la force F.

$$\text{On a donc : } \Delta h = X$$

Dans ce type de dispositif, on considère X petit donc Δh petit.

On en déduit alors :

$$P_{B'} = \rho g h$$

$$\text{or } P_B = \frac{F}{S} \quad \text{comme } P_{B'} = P_B$$

$$\text{donc : } h = \frac{F}{S \rho g}$$

$$\text{Comme } F = R_z \cdot \frac{l_1}{l_2}$$

alors

$$h = R_z \cdot \frac{l_1}{l_2} \cdot \frac{1}{S \rho g}$$

De cette relation, on peut déduire la transmittance du système qui fait correspondre une hauteur h à chaque portance R_z.

$$\text{En posant : } \frac{l_1}{l_2} \cdot \frac{1}{S \rho g} = \frac{1}{k}$$

On a alors :

$$R_z = kh$$

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

V - 2 : Réalisation :

I°/ - Transmetteur de force :

Il est composé par la membrane, le récipient et le tube.

a/ - La membrane :

Les portances que l'on doit mesurer sont comprises dans une gamme déterminée par la soufflerie utilisée.

Cette gamme a pour limite supérieure $R_{z_{\max}} = 20 \text{ N}$.

- Calculons la force F_{\max} qui s'exerce sur la membrane :

$$F_{\max} = \frac{l_1}{l_2} \cdot R_{z_{\max}}$$

Nous avons choisi les bras de levier de la balance

tels que :

$$l_1 = 550 \text{ mm} \quad \text{et} \quad l_2 = 300 \text{ mm}$$

$$\text{donc } F_{\max} = 36,66 \text{ N}$$

Détermination de la surface effective de la membrane :
 La membrane étant fixée sur le récipient, lorsqu'une force F agit sur elle, seule une certaine section S_{eff} est en contact avec le fluide.

Cette surface effective peut être calculée à partir de la relation : (voir fig V - 2)

$$P = \frac{F}{S_{\text{eff}}} \quad \text{d'où} \quad S_{\text{eff}} = \frac{F}{P}$$

Pour supporter la portance maximale (Rz_{max}), S_{eff} doit être égale à :

$$S_{\text{eff}} = \frac{F_{\text{max}}}{P_{\text{max}}}$$

$$\text{Comme } P_{\text{max}} = \rho g h_{\text{max}}$$

Sachant que $h_{\text{max}} = 1 \text{ m}$ (hauteur du tube disponible).

Le fluide utilisé étant de l'eau, on a $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$

On trouve donc $S_{\text{eff}} = 3,73 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$

On déduit de cette valeur le diamètre effectif de la membrane, sachant que :

$$d_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{4 S_{\text{eff}}}{\pi}}$$

$$\text{d'où } d_{\text{eff}} = 70 \text{ mm.}$$

On prendra un diamètre total de la membrane tel que $d_m = 100 \text{ mm}$

Ce qui correspond au diamètre extérieur du récipient utilisé.

Pour satisfaire aux critères de sensibilité, nous devons avoir une épaisseur de membrane assez faible mais résistante.

Nous avons utilisé une membrane d'épaisseur $e = 2 \text{ mm}$.

b/ - Le récipient :

Son diamètre doit évidemment correspondre au diamètre total de la membrane.

Le récipient a pour :

- diamètre intérieur $d_i = 75 \text{ mm}$,
- diamètre extérieur $d_e = 100 \text{ mm}$.

La seule contrainte que l'on peut avoir sur la hauteur du récipient est :

le volume d'eau contenu dans le récipient doit être supérieur au volume d'eau chassé dans le tube sous l'effet de la portance maximale, ou autrement dit, l'organe qui lie la membrane au levier ne doit en aucun cas buter contre le fond du récipient.

Cette hauteur a été choisie telle que :

$$H = 15 \text{ mm}$$

c/ - Le tube :

Pour pouvoir écrire :

$$P_{B'} = \rho g h \quad \text{au lieu de} \quad P_B = \rho g (h + \Delta h)$$

nous avons considéré X donc Δh petit :

En effet;

sous l'action de la force F , le volume d'eau chassé dans le tube est tel que :

$$\Delta V = X \cdot S = h \cdot s \quad \text{où :} \quad \begin{array}{l} S : \text{ surface du récipient} \\ s : \text{ section du tube.} \end{array}$$

donc :

$$X = h \cdot \frac{s}{S}$$

En choisissant un tube de diamètre $d_t = 3 \text{ mm}$; donc de section $s = 7,07 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$,

on a $\frac{X}{h} = 1,83 \cdot 10^{-3}$ donc $X (h$

(On rappelle que $S = 3,73 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$).

- Ecrivons le bilan des forces qui s'exercent sur la membrane sous l'effet de R_z :

$$F = P \cdot S + KX$$

où F est la force qui équilibre la portance.

PS la force de pression due à l'action de F .

KX la force de réaction de la membrane.

K représente la raideur de la membrane et des autres éléments liés à son déplacement. Cette valeur n'est pas constante, elle est fonction du déplacement de la membrane.

Donc

Pour pouvoir écrire l'expression :

$$F = P \cdot S$$

il faut que $K \cdot X$ soit relativement petit devant $P \cdot S$

- Montrons que : $K \cdot X \ll P \cdot S$

Pour le déplacement maximal, ce qui représente le cas le plus défavorable, nous devons choisir :

$$K \cdot X_{\max} \ll P_{\max} \cdot S$$

$$\text{or } P_{\max} = \rho g (h_{\max} + X_{\max})$$

$$\text{donc } KX_{\max} \ll (\rho g (h_{\max} + X_{\max})) \cdot S$$

$$K \ll \rho g S \left(1 + \frac{h_{\max}}{X_{\max}} \right)$$

$$K \ll \rho g S \left(1 + \frac{h_{\max}}{X_{\max}} \right)$$

Sachant que :

$$X_{\max} = h_{\max} \frac{s}{S}$$

$$\text{on a } K \ll \rho g S \left(1 + \frac{s}{S} \right)$$

K doit être tel que :

$$K \ll 19958 \text{ N/m} \approx 20.000 \text{ N/m}$$

Ce qui est physiquement bien vérifié, de plus pour les petits déplacements, K peut être considérée comme une constante de petite valeur, puisque dans ce cas la membrane est plus souple.

- Stabilisation de la lecture:

Sous l'effet des fluctuations engendrées par le vent, la lecture n'est pas stable, et donc pas aisée. Pour palier à cela nous avons prévu entre le tube et le récipient un embout qui joue le rôle de capillaire; ce capillaire ayant une résistance R .

En régime transitoire, il se produit entre ses deux extrémités, une perte de charges ΔP telle que :

$$\Delta P = \dot{m} \cdot R \quad \dot{m} : \text{débit volumique.}$$

Soient A et A' deux points pris aux extrémités du capillaire, sachant qu'une extrémité est dans le récipient et l'autre dans le tube.

On a :

$$P_A - P_{A'} = \dot{m} R$$

$$\text{or, } P_A = F/S + \rho g h \quad \text{et} \quad P_{A'} = \rho g h + \rho g H$$

H : hauteur du récipient ou distance du point A' à l'origine O .

$$\text{donc : } F/S - \rho g h = \dot{m} R$$

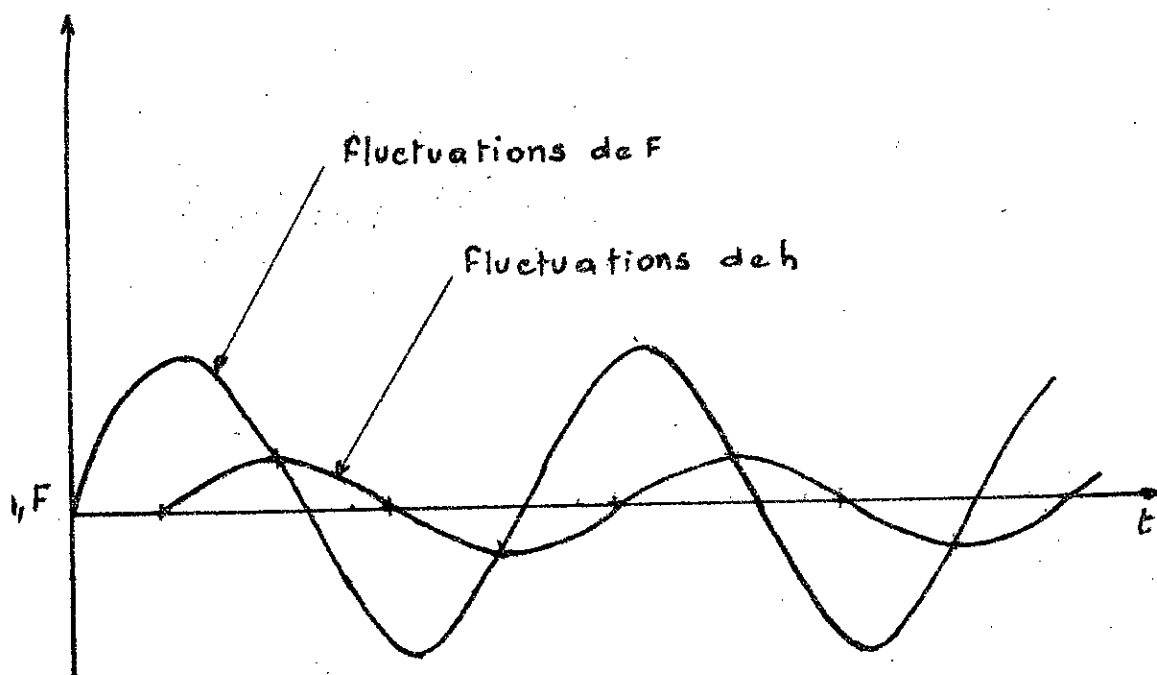
$$\text{comme } \dot{m} = -\frac{dh}{dt} \cdot s$$

$$\text{alors : } F/S - \rho g h = -\frac{dh}{dt} \cdot s \cdot R$$

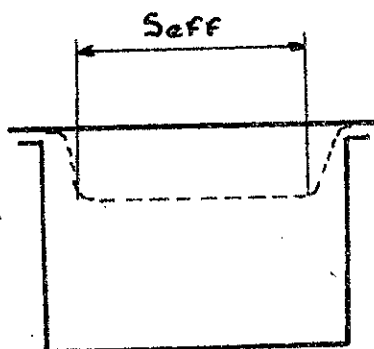
$$\text{posons } \rho g = \bar{\omega}$$

$$F/S - \bar{\omega} h = -\frac{dh}{dt} \cdot s \cdot R$$

$$F/S\bar{\omega} - h = -\frac{dh}{dt} \cdot \frac{s \cdot R}{\bar{\omega}}$$



(Fig V-3) : Stabilisation de la lecture



(Fig V.2) : Surface effective de la membrane

$$\text{d'où } \frac{dh}{dt} + \frac{sR}{L} h = \frac{F}{S \omega} \quad (I)$$

$$\text{posons } \frac{sR}{L} = \zeta$$

ζ : constante de temps.

$$\text{Posons : } \frac{F}{S \omega} = K$$

L'équation (I) devient :

$$h(t) \cdot \zeta + h(t) = K F(t) \quad \zeta$$

Nous remarquons d'après cette équation l'existence d'un élément à capacité qui amortira les fluctuations dues au vent (voir fig V - 3).

V - 3 : Modes de fixation de l'aile :

Trois modes de fixation de l'aile sur le levier sont possibles .

1) - Bord d'attaque à l'extérieur (voir fig V - 4) :

L'aile est initialement fixée au levier avec un angle d'incidence $i = i_{00}$.

En présence du vent, le levier s'incline d'un angle α autour du point O. L'angle d'incidence de l'aile devient $i = i_{00} + \alpha$. Comme l'incidence augmente, la portance R_z et la traînée R_x augmentent entraînant une augmentation supplémentaire de l'angle α et indéfiniment dans le cas où il n'y-a pas de raideur sur l'autre extrémité du levier, la portance R_z devient incontrôlable.

Pour limiter les déviations intempestives du levier, on devrait utiliser un transmetteur de raideur adéquate et donc assez importante, ce qui entraîne une mesure peu précise.

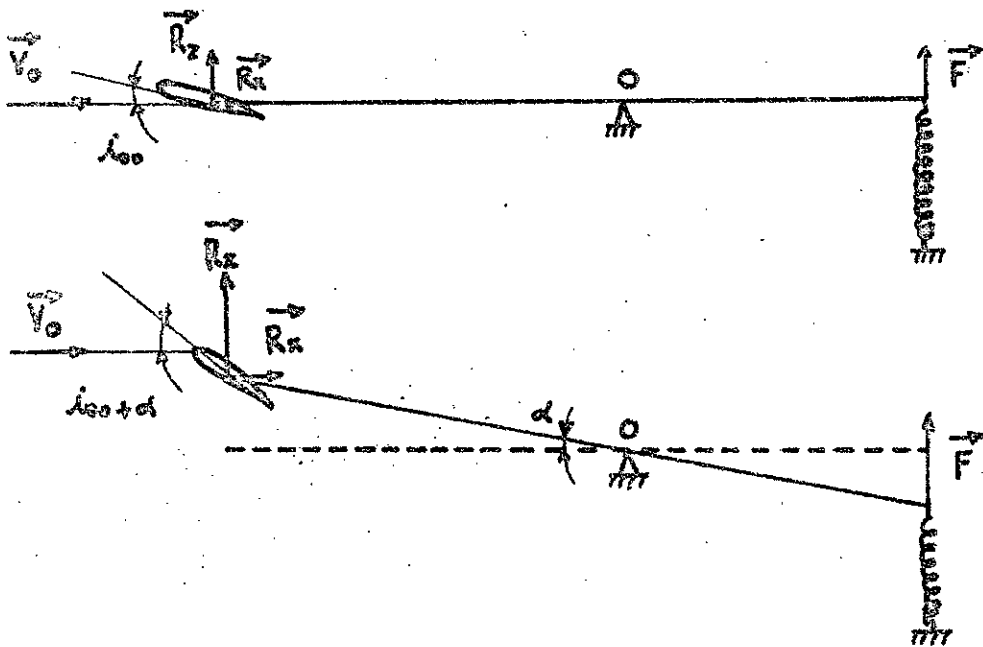
Cette fixation de l'aile est donc à éliminer.

2) - Bord de fuite à l'extérieur (voir fig V - 5) :

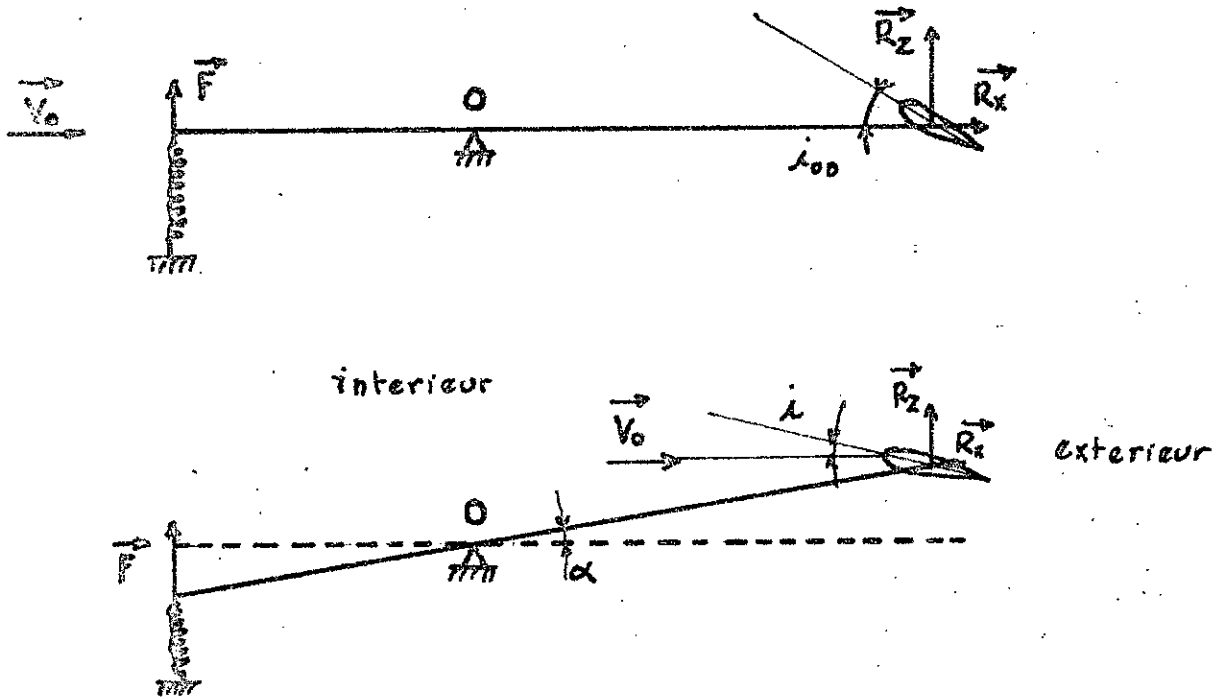
Dans ce cas, sous l'effet du vent le levier s'incline d'un angle α entraînant une diminution de l'angle d'incidence, ce qui cause une diminution de la portance. Le levier tend à revenir à sa position initiale, il est donc possible d'effectuer la mesure.

Par contre ce mode de fixation donne lieu à des erreurs quand on mesure la portance. En effet, comme le point d'application de celle-ci est variable, le bras de levier du moment par rapport au point O est donc variable.

Nous mesurons donc des portances différentes, correspondant



(Fig V.4) : Bord d'attaque vers l'exterieur



(Fig V.5) : Bord de fuite à l'exterieur

à des points d'application différents pour une incidence donnée.

Ce mode de fixation de l'aile est donc à éliminer.

3) - Profil perpendiculaire au levier (voir fig V - 6) :

Dans ce mode de fixation, l'effet de la portance R_z n'influe pas sur l'angle d'incidence.

En effet, l'angle de déviation α provoqué par R_z se trouve dans un plan perpendiculaire à celui de l'angle d'incidence i . La balance se trouve dans un état d'équilibre indifférent. Elle présente donc une bonne stabilité.

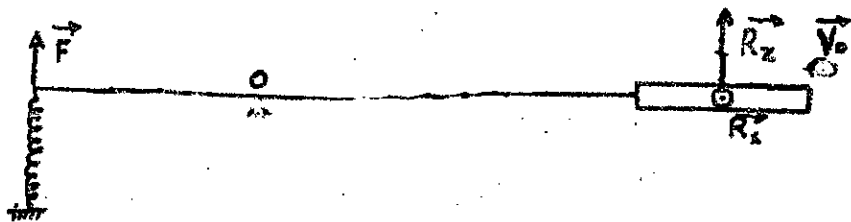
L'effet de la traînée tend à faire tourner le levier autour d'un axe vertical passant par O.

Pour parer à cet inconvénient, nous avons prévu des paliers placés aux extrémités du support qui bloquent la rotation autour de cet axe vertical. De plus ces paliers équilibrent la traînée R_x , comme le montre la figure V - 5 :

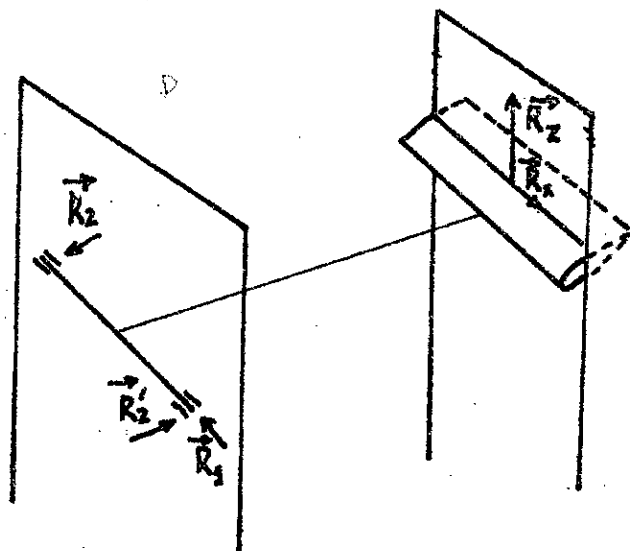
R_1 équilibre R_x

Les deux réactions R_2 et R_2' , exercées par les paliers déterminent un couple qui équilibre le moment par rapport à O dû à R_x .

- L'aile présente une symétrie par rapport à son plan transversal. La résultante des forces aérodynamiques s'exerce dans ce plan de symétrie. Le levier étant placé perpendiculairement à ce plan, la distance du centre de gravité de l'aile au support de la balance est invariable, puisqu'il ne dépend ni de l'incidence ni de l'angle de déviation. La mesure de la portance ne dépend donc pas du point d'application de cette



(fig V-6) : Profil perpendiculaire au levier



(fig V-7) : Rôle des paliers

dernière.

A cause de ces différents avantages, ce mode de fixation de l'aile est celui que l'on utilisera.

Chapitre VI : REALISATION PRATIQUE.

La réalisation pratique de notre balance aérodynamique a été effectuée à l'atelier. Plusieurs contraintes imposées par l'indisponibilité du matériel nous ont conduits à des choix de montage de qualité inférieure à celle qui aurait été souhaitable.

Un dessin d'ensemble de notre réalisation, représente tous les organes constitutifs de notre balance.

VI - I : Description de la balance :

Le montage permettant la fixation de l'aile au levier ne faisant pas partie de ce projet, seul l'axe permettant la liaison entre le levier et l'aile a été réalisée.

Cet axe (21) a été fixé au levier au moyen de quatre brides (20) et de quatre boulons (19), assurant ainsi le serrage et la coaxialité des deux ensembles.

Pour permettre la déviation verticale du levier sous l'effet de la force à mesurer, nous avons réalisé un arbre (17) sur lequel est usiné un méplat permettant une liaison rigide (soudure) du levier avec l'arbre.

Deux roulements à billes, logés dans deux cages (16), montés sur l'arbre interdisent toute déviation horizontale du levier (compensation de la traînée - Voir chap V).

Les cages de roulements sont soudées au support (22), qui assurent le positionnement du levier. Ces supports sont rivetés au bâti (II).

Une butée composée, d'une vis (12), de deux écrous (14) et de deux contre écrous (13), limite les fortes déviations, empêche le contact du levier avec les boulons (5), et le contact du boulon (8) avec le fond du récipient (I).

Cette butée limite donc le déplacement de la membrane.

Le récipient (I) est fixé au bâti (II) à l'aide des quatre boulons (5).

La membrane (3) entreposée entre le récipient et l'anneau (2) est fixée au récipient au moyen de quatre vis (4). Elle est liée au levier par l'intermédiaire du boulon (8).

Deux plaques circulaires en aluminium (6), sont serrées sur chaque face de la membrane au moyen du même boulon (8). Ceci pour rigidifier la membrane.

Une entretoise (9) est placée entre la membrane et le levier au moyen du boulon (8), pour assurer le positionnement du levier.

Un joint en caoutchouc (10) assure l'étanchéité.

Deux contrepoids (15) disposés de part et d'autre de l'arbre (17) équilibrent le dispositif, et décalent la plage de mesures.

VI - 2 : Utilisation de la balance :

Avant toute manipulation, le dispositif doit être rigoureusement remis en équilibre. Ceci se fait par chargement ou déchargement des contrepoids.

Après avoir fixé l'aile à la balance avec un certain angle d'incidence, on met en marche la soufflerie. Les lectures seront effectuées directement sur le tube gradué avec l'utilisation d'une courbe ou d'un tableau d'étalonnage.

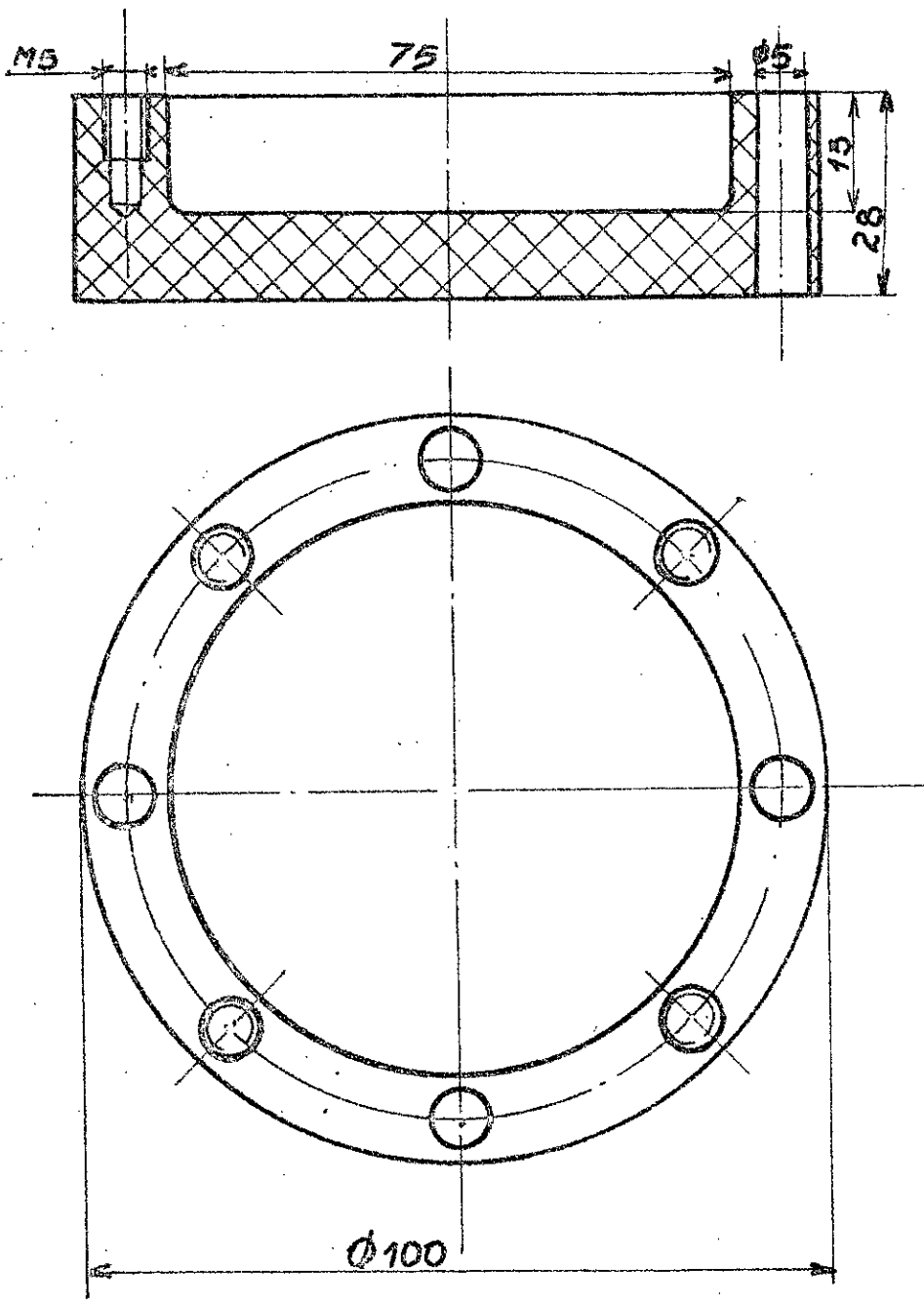
Après avoir effectué la mesure pour une première incidence, on donne une deuxième incidence à l'aile, et on effectue la deuxième mesure. On procède de cette manière jusqu'à couvrir toute la plage de mesures.

VI - 3 : Pièces réalisées :

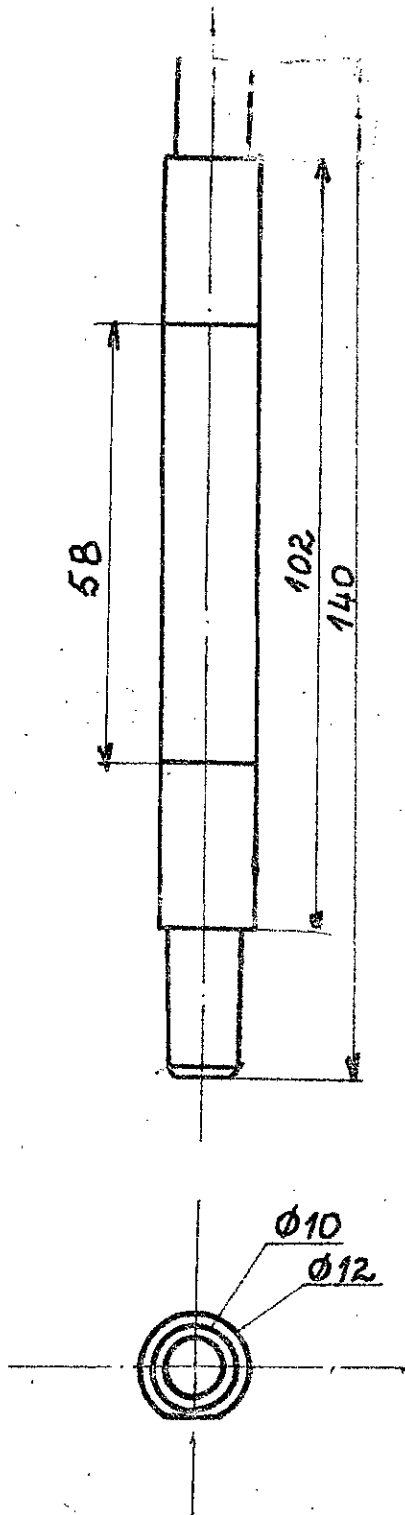
Pour réaliser notre balance, nous avons usiné les pièces qui la constituent. Nous donnons la gamme d'usinage de quelques

pièces.

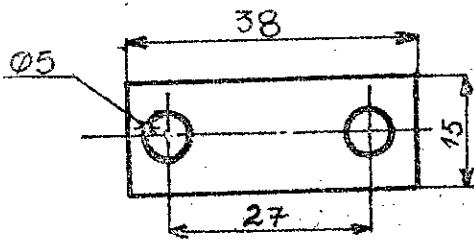
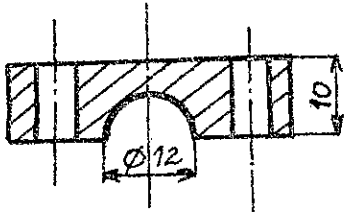
- Le récipient (I) a été réalisé en tournage :
 - I° phase : - Chariotage sur un diamètre de 100.
 - Dressage sur une longueur de 28.
 - 2° phase : - Alésage d'un diamètre de 75.
- L'arbre (I7) a été usiné en tournage et en fraisage :
 - Tournage : - Chariotage sur un diamètre de 12.
 - Dressage sur une longueur de 10.
 - Fraisage : - Usinage du méplat sur une longueur de 58.
- Les brides (20) ont été usinées en fraisage :
 - I° phase : - Longueur de 28.
 - Largeur de 15.
 - Epaisseur de 10.
 - 2° phase : - Perçage d'un trou d'un diamètre de 12.
 - Perçage de deux trous d'un diamètre de 5.
- L'entretoise (9) a été usinée en tournage :
 - I° phase : - Chariotage sur un diamètre de 18.
 - Dressage sur une longueur de 12.
 - 2° phase : - Perçage d'un trou de diamètre de 9.
- Les supports (22), le bati (II), et le levier (7) ont été obtenus par pliage, et les trous ont été percés par la perceuse.



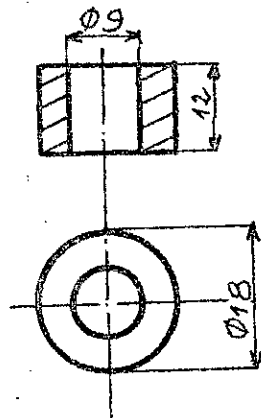
(fig VI-1): RECIPIENT



(Fig VI - 2): ARBRE



(Fig VI-3): Bride



(Fig VI-4): Entretoise

Chapitre VII : TESTS ET RESULTATS.

La balance étant réalisée, nous avons procédé à des essais permettant de contrôler son bon fonctionnement.

La fixation de l'aile ne faisant pas partie de notre projet, les essais n'ont pu être effectués dans la soufflerie.

Pour simuler la portance qui s'exerce sur la maquette, nous avons matérialisé celle-ci par des poids obtenus à partir de différents volumes d'eau. Le poids étant dirigé dans le sens contraire de la portance que l'on à à mesurer, tous les effets que l'on pourrait obtenir par cette méthode sont inversés. Pour tester le fonctionnement de la balance tel qu'il est étudié, nous avons imposé à la membrane une certaine pression initiale P_0 . Cette pression est obtenue par l'utilisation d'un contrepoids placé sur la membrane. Sous l'effet du contrepoids un volume V_0 est chassé dans le tube, ce qui entraîne une déviation d'eau d'une hauteur h_0 .

Sous l'action d'un poids connu, placé au point d'application de la portance, la force due au contrepoids tend à être équilibrée entraînant ainsi une diminution de hauteur h dans le tube.

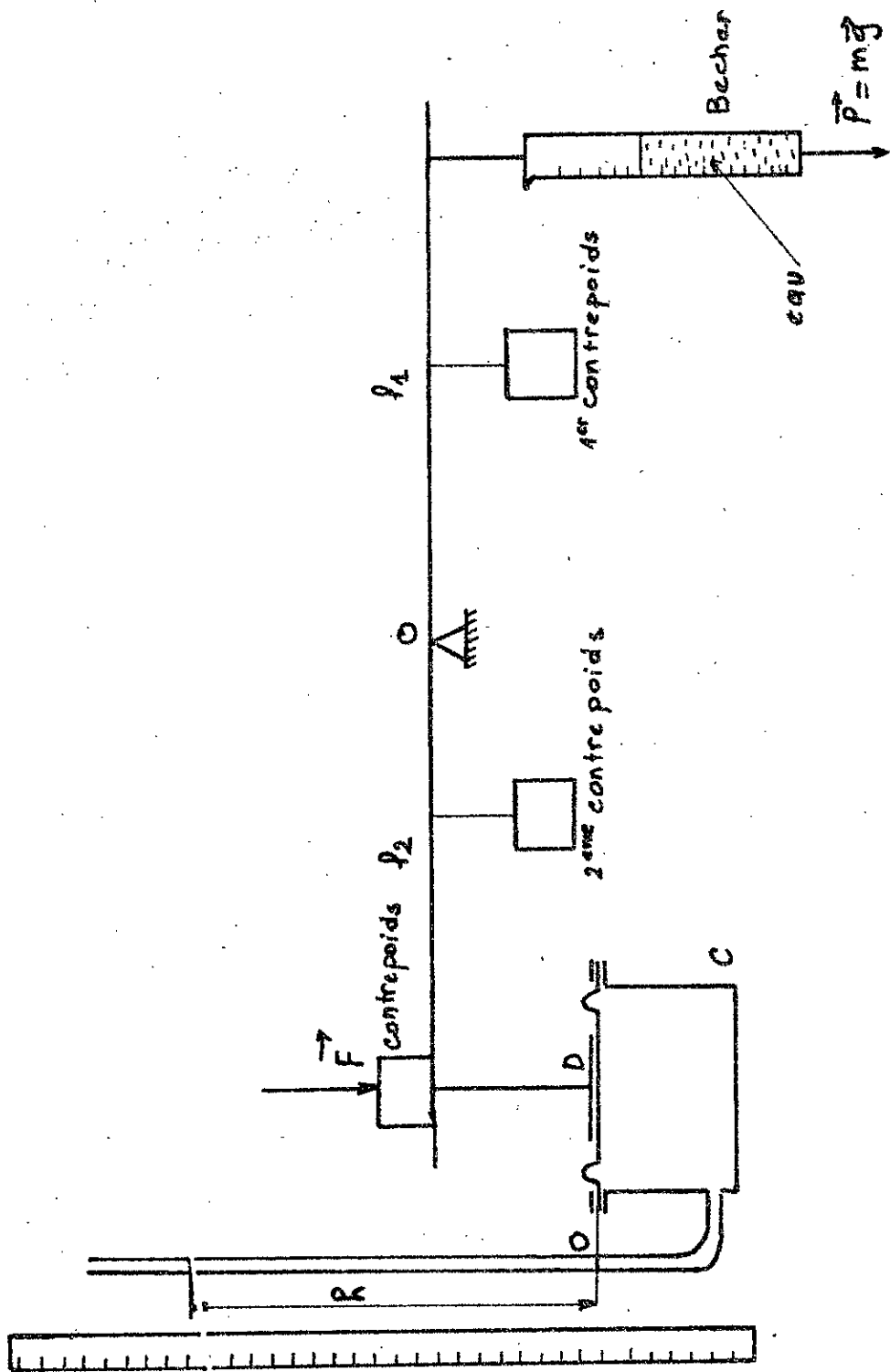
La différence $h_0 - h$ doit être proportionnelle au poids appliqué .

Pour pouvoir tester plusieurs poids, nous avons utilisé un becher dans lequel nous avons versé des quantités d'eau variant de 50g en 50g.

Pour chaque essai, nous avons relevé la valeur $h_0 - h$ correspondante.

Le test a 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 variant de 50g en 50g.



(Fig VII-1) : Schéma de principe pour les tests

Les résultats obtenus pour les deux sens sont cohérents, une courbe représentative traduit ces résultats.

- Exploitation des résultats :

Les courbes obtenues peuvent être, aux erreurs de manipulation et de lecture près, assimilées à des droites d'équation $y = K \cdot x$.

Nous avons vu dans le chapitre V, la relation fondamentale liant la hauteur h et la portance R_z :

$$R_z = K \cdot h \quad \text{avec} \quad K = g S \frac{l_1^2}{l_1}$$

Pour notre réalisation, nous avons $K = 20 \text{ N/m}$.

Pour les essais, l'aile n'étant pas encore fixée, la longueur l_1 utilisée était de : $l_1 = 340 \text{ mm}$.

Ce qui entraîne une valeur de $K = 32,28 \text{ N/m}$.

En calculant la pente de la droite obtenue par les tests, nous trouvons :

$$K = \frac{I}{K_T} = \frac{R_z}{h} \quad K = 33,52 \text{ N/m}$$

On évalue ainsi l'erreur relative sur K à 4 %.

- Conclusion :

Nous remarquons que l'erreur relative est faible, et nous concluons que nous travaillons dans de bonnes conditions.

- Remarque I :

La droite obtenue pour l'essai des poids croissants n'est pas confondue avec celle obtenue pour l'essai des poids décroissants, comme cela devrait être théoriquement. Cela est dû en partie à la raideur de la membrane qui n'est pas rigoureusement constante.

Cette conclusion a été tirée du fait que les tests sur la

avec les poids croissant

250

— droite passant par le point maximum

-- droite passant par le point minimum

200

150

100

50

100

200

300

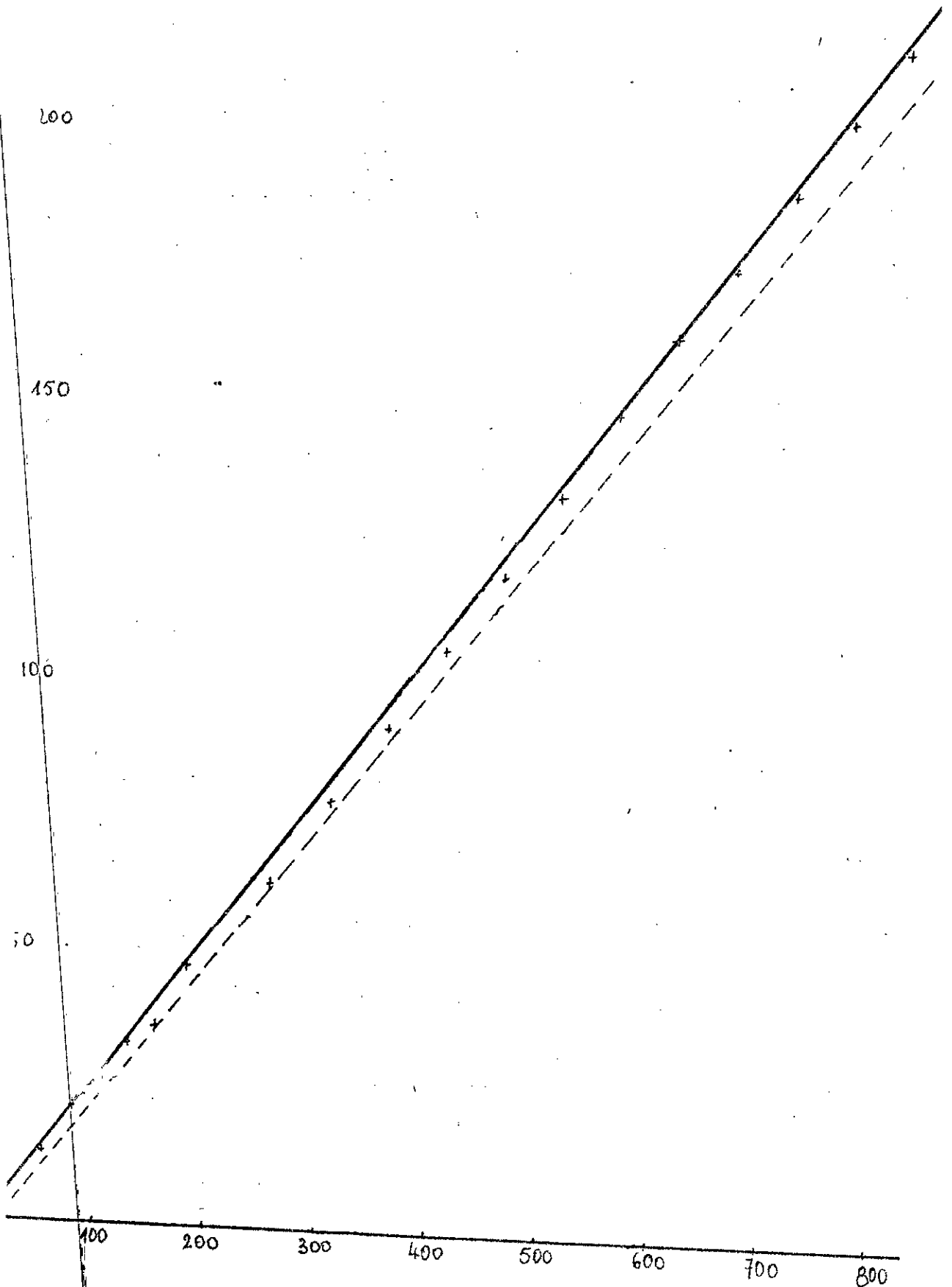
400

500

600

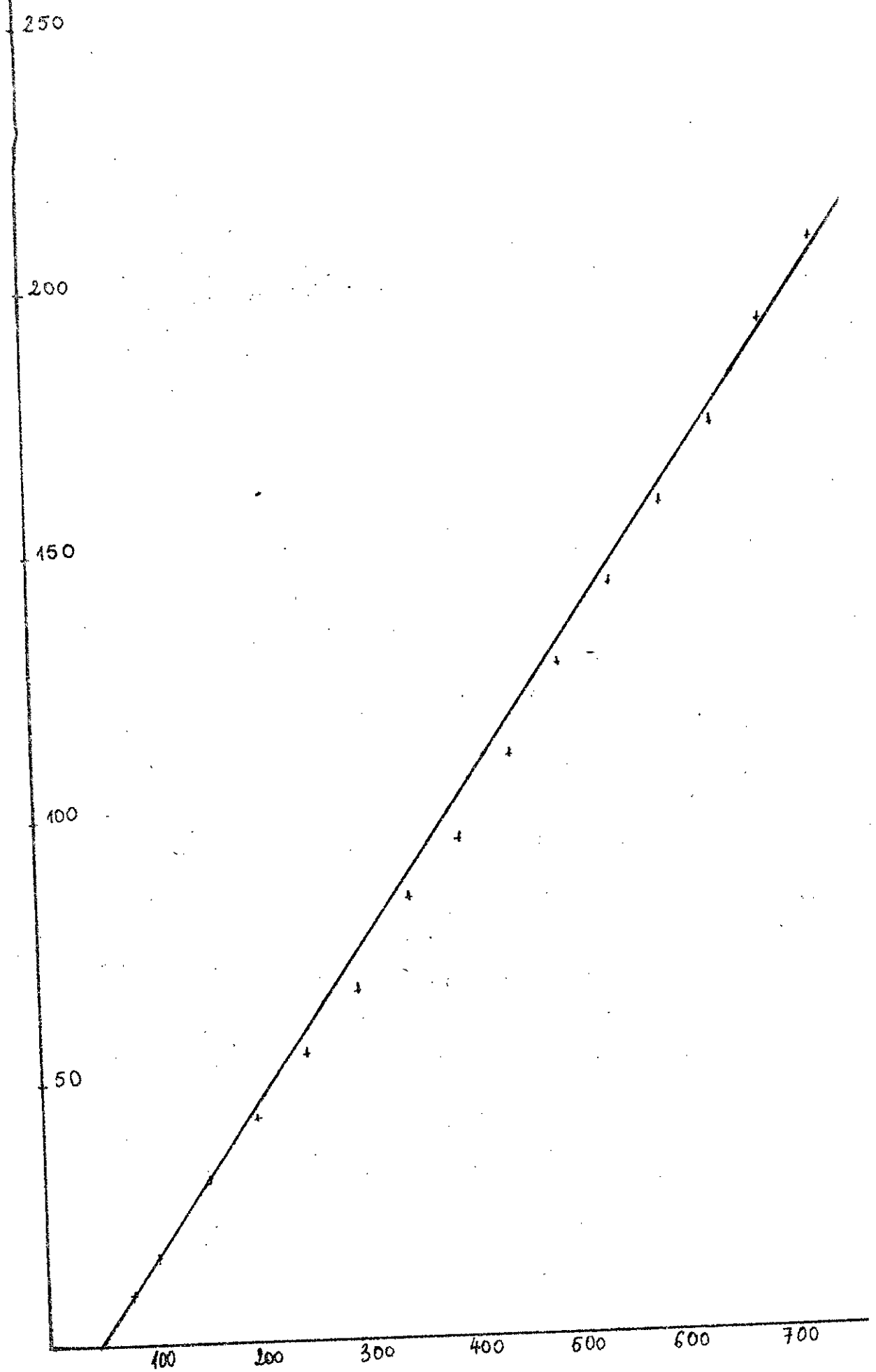
700

800



f (Cm)

(Fig III-3): Courbe moyenne des essais pour les poids décroissants



partie rigide du dispositif seul, ont donné des résultats proches de la théorie.

Nous avons constaté qu'après une mesure effectuée pour le niveau de l'eau, dans le tube, ne revenait pas à sa position initiale. Ceci est dû au fait que la membrane ne reprend pas tout à fait sa forme et sa position initiales. Il en résulte une erreur sur la surface effective, et sur la pression qui s'exerce sur elle.

Remarque 2 :

Le fait que les courbes obtenues ne soient pas exactement des droites est dû, à la raideur de la membrane, aux erreurs de lectures, et aux erreurs faites sur les volumes; donc les poids d'eau utilisés.

C O N C L U S I O N :

La balance aérodynamique que nous avons réalisé a donné les résultats escomptés. La linéarité liant l'entrée (portance) et la sortie (hauteur lue), a été vérifiée. En effet, le facteur de proportionnalité ou transmittance du dispositif, est égal à 4 % de précision près au facteur théorique.

Les mesures de la portance sont par ailleurs obtenues avec une précision qui est de l'ordre de 5 %.

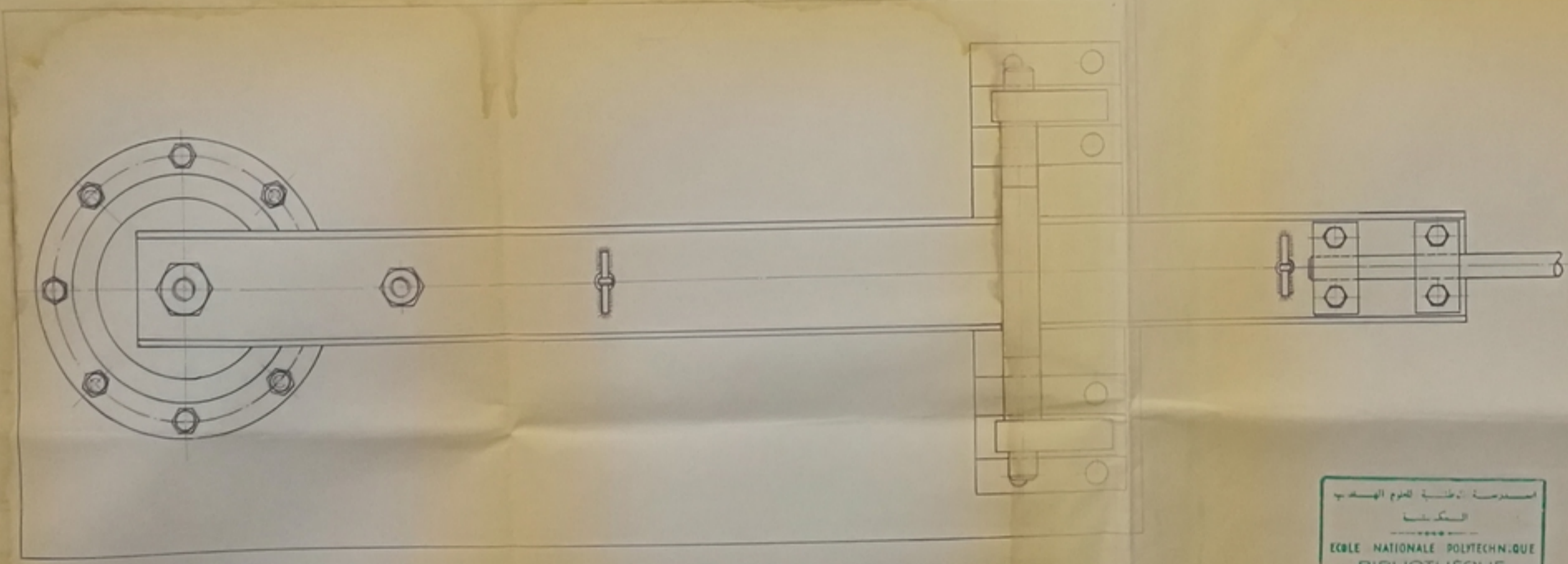
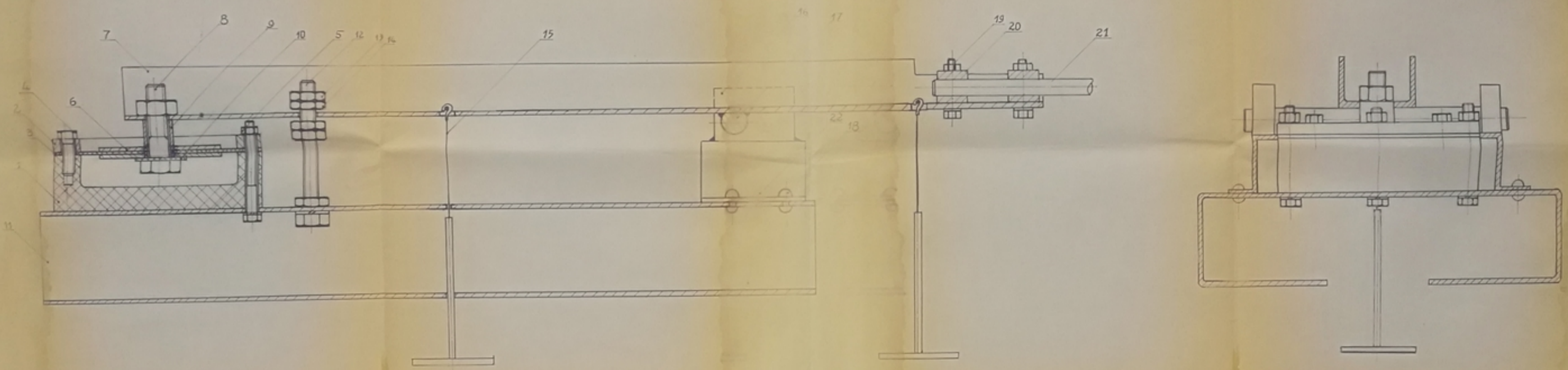
Le dispositif a été conçu de manière à pouvoir être démonté et modifié, cette flexibilité de notre balance comporte l'avantage d'une adaptation aux utilisations ultérieures, comme la mesure de la traînée par exemple.

Le système à contrepoids permet par ailleurs un réglage du zéro, et un décalage de la plage de mesures.

- Perspectives :

L'emploi d'une membrane moins épaisse que celle utilisée, et avec une raideur plus faible, permettrait une meilleure sensibilité de l'appareil, et une précision plus importante.

L'utilisation d'un tube de plus grand diamètre causerait un déplacement plus important de la membrane, et donc un effet de la raideur plus important, néanmoins il permettrait la libre circulation du fluide, et donc une lecture exacte.



مستعمدة الخلية علوم الهندسة
 المكتبة
 ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
 BIBLIOTHEQUE

avant p. 63
 PM 01884

Rp	N°dessin	Designation	Nb	Mat	Observations
22	R00	Support	2	XC1B	
21	"	Axe	1		
20	"	Bride	4	XC20	
19	"	Boulon	4	XC1B	
18	"	Rivet	8	AU4G	
17	"	Anbre	1	XC1B	
16	"	Cage de roulement	2	30NC11	Préposé
15	"	Contrepoids	2	F ₆ 1B	
14	"	Contre-ecrou	3	XC1B	
13	"	Ecrou	2	XC1B	
12	"	Vis	1	XC1B	
11	"	Bâti	1	XC1B	
10	"	Joint	1	Gaoucheur	Préposé
9	"	Entretoise	1	UE5	
8	"	Boulon	1	XC1B	
7	"	Levier	1	XC1B	
6	"	Plaque circulaire	2	AU4G	
5	"	Boulon	4	XC1B	
4	"	Vis	4	XC1B	
3	"	Membrane	1	Gaoucheur	
2	"	Annau	1	AU4G	
1	R00	Recipient	1	Plexi	

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE				
Echelle	Masse	Logo	Designation	Mat
1:1		ENP	BALANCE AERO-DYNAMIQUE	
Étudiant	RJOURAI			
Promoteur	M. WEINER			
Chef dept				
Prés jury				
			Prom. Juin 84	R00

T A B L E D E S F I G U R E S	Page
- Figure II - 1 : Action de l'air sur un corps quelconque.	4
- Figure II - 2 : Action de l'air sur une surface disposée perpendiculairement à l'écoulement.	4
- Figure II - 3 : Action de l'air sur un corps fuselé.	5
- Figure II - 4 : Caractéristiques géométriques de l'aile.	8
- Figure II - 5 : Trièdres liés à l'aile.	10
- Figure II - 6 : Forces aérodynamiques.	10
- Figure II - 7 : Variations de C_z et de C_x en fonction de α	12
- Figure II - 8 : Moment résultant.	14
- Figure II - 9 : Centre de poussée.	14
- Figure III - 1 : Balance LAFFAY.	21
- Figure III - 2 : Balance à fils.	23
- Figure IV - 1 : Dynamomètre à poids.	28
- Figure IV - 2 : Peson à tangente.	28
- Figure IV - 3 : Peson à sinus.	28
- Figure IV - 4 : Ressort à boudin.	31
- Figure IV - 5 : Ressort à lame.	31
- Figure IV - 6 : Extensomètre.	31
* Figure IV - 7 : Transmetteur à pression de fluide.	34
- Figure V - 1 : Principe de fonctionnement.	37
- Figure V - 2 : Surface effective de la membrane.	43
- Figure V - 3 : Stabilisation de la lecture.	43
- Figure V - 4 : Bord d'attaque à l'extérieur.	46
- Figure V - 5 : Bord de fuite à l'extérieur.	46
- Figure V - 6 : Profil perpendiculaire au levier.	48
- Figure V - 7 : Rôle des paliers.	48

- Figure VI - 1 : Récipient.	53
- Figure VI - 2 : Arbre.	54
- Figure VI - 3 : Bride.	55
- Figure VI - 4 : Entretoise.	55
- Figure VII - 1 : Schéma de principe pour les tests.	57
- Figure VII - 2 : Courbe des essais pour les poids croissants.	59
- Figure VII - 3 : Courbe moyenne des essais pour les poids décroissants.	60

B I B L I O G R A P H I E :

- BURTON (J) : Technique de la mesure et du contrôle dans l'industrie. (Tome III)
- REBUFFET (P) : Aérodynamique expérimentale.
Editions Beranger -1968
- DIFFALLAH : Balance aérodynamique.
Projet de fin d'études - Promotion Janv 1983
- ENCYCLOPEDIE QUILLET : Mécanique application - Transports.
(Tome II) - Ed Quillet - 1974.
- TECHNIQUE DE L'INGENIEUR : Mesures et contrôle.

