

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

9/86

وزارة التعليم والبحث العلمي

lex

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT (GENIE MECANIQUE)

## PROJET DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR D'ETAT

SUJET

MODIFICATION DE LA SOUFFLERIE  
POUR L'AUGMENTATION DE LA VITESSE  
D'ECOULEMENT

Proposé par :

Mr. I. GAD

Etudié par :

A. MOKRANI

Dirigé par :

Mr. I. GAD

PROMOTION : Janvier 1986

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم والبحث العلمي  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT (GENIE MECANIQUE)

## PROJET DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR D'ETAT

S U J E T

MODIFICATION DE LA SOUFFLERIE  
POUR L'AUGMENTATION DE LA VITESSE  
D'ECOULEMENT

Proposé par :

Mr. I. GAD

Etudié par :

A. MOKRANI

Dirigé par :

Mr. I. GAD

**PROMOTION : Janvier 1986**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

لَقَدْ أَرْسَلْنَا رُسُلَنَا بِالْبَيِّنَاتِ وَأَنْزَلْنَا  
مَعَهُمُ الْكِتَابَ وَالْمِيزَانَ لِيَقُومَ النَّاسُ بِالْقِسْطِ  
وَأَنْزَلْنَا الْحَدِيدَ فِيهِ بَأْسٌ شَدِيدٌ وَمَنَافِعُ  
لِلنَّاسِ وَلِيَعْلَمَ اللَّهُ مَن يَنْصُرُهُ وَرُسُلَهُ بِالْغَيْبِ  
إِنَّ اللَّهَ قَوِيٌّ عَزِيزٌ

سورة الحديد

اللَّهُمَّ تَقَبَّلْ مِنَّا زَعْمَانَا وَاجْعَلْهَا خَالِصَةً  
لِوَجْهِكَ الْكَرِيمِ وَوَقِّتْنَا لِلْعَمَلِ بِهَا فِي مَرْضَاتِكَ  
رَبِّهِ

**D E D I C A C E S**

---

**Je dédie ce modeste travail à :**

**- Mes parents ,**

**- Mes frères et sœurs,**

**-A tous ceux qui croient en Dieu, l'unique et**

**le miséricordieux ALLAH et en son envoyé MOHAMED**

## R E M E R C I E M E N T S

Je tiens à remercier tous les enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique qui ont contribué à ma formation d'ingénieur et en particulier, ceux du département de Génie Mécanique qui m'ont encouragé et aidé de leur mieux.

J'exprime ma vive reconnaissance aux agents et techniciens des Ateliers et de la Maintenance pour leur sympathique et confiante assistance technique et morale.

Je réitère mes remerciements à Mr; IBRAHIM GAD pour ses conseils et son suivi qu'il m'a prodigué tout au long de mon travail.

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

Introduction:.....	1
Chapitre I. : .....	3
Historique : .....	4
Classification des souffleries:.....	6
Description de la soufflerie du département :.....	8
Chapitre II	
I.1. Conditionnement de température :.....	12
Mesure de température :.....	12
II.2. Pression statique totale, dynamique:.....	17
a) - pression statique:.....	17
b) - pression totale: .....	17
c) - pression dynamique :.....	17
II.3. Appareils de mesure de vitesse :.....	20
6 - Tube de pitot double :.....	20
6 Multimanomètre :.....	22
II.4. Mesure de la vitesse :.....	22
Chapitre III .Installation d'une tuyère :.....	
III.1. Introduction:.....	28
III.2. Ecoulement dans les tuyères :.....	29
III.2.1. Hypothèses :.....	32
III.2.2. Equation de quantité de mouvement :.....	32
III.2.3. Equation de continuité:.....	32
III.2.4. RELATION DE HUGONIOT :.....	33
III.2.5. Equation de l'énergie :.....	33
III.2.6. Relation thermodynamique :.....	34
III.3. Dimensionnement de la tuyère:.....	35
III.4. Réalisation de la tuyère :.....	37
III.4.1. Hypothèses :.....	37
III.4.2. Chambre d'expérience :.....	38
III.4.3. Convergent: .....	38
III.4.4. Divergent :.....	42
Chapitre IV :.....INSTALLATION D'UN VENTILATEUR .....	
IV.1. Rôle du ventilateur dans un circuit :.....	43
IV.2. Etude de pertes de charge :.....	44
IV.2.1. Introduction:;;;;;.....	45
IV.2.2. Pertes de charge dans les conduites:.....	45
IV.2.3. CALCUL DES Pertes de charges /.....	46
IV.3. Choix du ventilateur:.....	47
Conclusion: ;.....	61
Conclusion: ;.....	63

LEGENDE DE SYMBOLES

- M** : Nombre de Mach.  
**a** : Vitesse de son.  
 **$\alpha$**  : Angle d'inclinaison.  
**t** : Temps en minutes.  
 **$\theta$**  : Température en degré Celsius  
 **$C_p$**  : Capacité calorifique.  
 **$T_t$**  : Température totale absolue en ° K.  
 **$T_s$**  : Température statique en ° K.  
**V** : Vitesse en m/ .  
 **$H_t$**  : Enthalpie totale en  
 **$H_s$**  : Enthalpie statique.  
 **$\rho$**  : Masse volumique.  
 **$P_t$**  : Pression totale en  $N/m^2$ .  
 **$P_s$**  : Pression statique en  $N/m^2$   
 **$P_a$**  : Pression dynamique.  
**F** : Force.  
 **$S_0$**  : Section d'entrée.  
 **$S_1$**  : Section de sortie.  
**H** : Perte de charge en hauteur.  
 **$\lambda$**  : Coefficient de perte de charge par frottement.  
**L** : Longueur de la conduite.  
 **$D_H$**  : Diamètre hydraulique.  
**g** : Accélération de la pesanteur.  
 **$\zeta_s$**  : Coefficient de perte de charge singulière.  
 **$R_e$**  : Nombre de Reynolds.  
 **$\nu$**  : Viscosité cinématique.  
 **$a_0, b_0$**  : Dimensions de la section d'entrée.  
 **$a_1, b_1$**  : Dimensions de la section de sortie.

$D_0$  : Diamètre d'entrée.

$D_1$  : Diamètre de sortie.

$r$  : Rayon de courbure.

$n$  : Nombre d'aubes.

$n_s$  : Nombre de tours spécifiques.

$N$  : Vitesse de rotation.



## I N T R O D U C T I O N

Actuellement, la méthode la plus employée pour résoudre les différents problèmes de l'aérodynamique et le principe de soufflerie, car pour rendre l'expérience plus facile, plus rapide et moins onéreuse, on transpose le problème initial. Ainsi pour étudier les efforts qui s'exercent sur un corps aérodynamique se déplaçant dans une atmosphère immobile, on soumet une maquette immobile de ce corps à échelle réduite à un courant d'air de vitesse convenable.

C'est ce qu'on réalise dans les souffleries.

Le département de mécanique en possède une qu'on va étudier.

D'après l'étude de la résistance d'un profil aérodynamique dans un projet de fin d'étude, on a constaté qu'il y a deux problèmes essentiels dans la soufflerie:

..Echauffement abondant de l'air y circulant, ce qui conduit au changement des caractéristiques de l'écoulement au cours d'une même expérience ou de l'une à une autre, et par conséquent, à des résultats non précis.

..Faible vitesse qu'on peut atteindre dans la chambre d'expérience ce qui implique une faible aptitude de l'appareil aux essais, ainsi que la limitation de son utilisation.

Le sujet de ce projet a été proposé pour résoudre ces deux problèmes.

Les solutions choisies sont comme suit:

..Le problème de l'échauffement a été solutionné en exécutant une ouverture dans le corps de la soufflerie pour permettre le renouvellement d'une

partie d'air, pour faciliter l'écoulement, on a installé des feuilles métalliques directives.

..Le problème des vitesses dans la chambre d'expérience est résolu de deux méthodes:

\*La première consiste en l'installation d'une tuyère convergente-divergente fabriquée dans notre atelier, dans la plus faible section de la soufflerie.

\*La deuxième par le changement du ventilateur par un autre qui fonctionne à des débits supérieurs, et par conséquent, à des vitesses supérieures. Cependant, cette solution est limitée par la résistance de la soufflerie. Dans les chapitres qui suivent, on va étudier ces étapes avec détail:

**C H A P I T R E   I**

**G E N E R A L I T E S**

**-HISTORIQUE**

**-CLASSIFICATION DES SOUFLERIES**

**-DESCRIPTION DE LA SOUFLERIE DU DEPARTEMENT**

## HISTORIQUE

Les premières mesures relatives à la résistance de l'air ont été effectuées sur des corps en chute libre dans l'air.

Ensuite, on utilisait :

- .Le vent naturel
- .Le manège aérodynamique
- ..La soufflerie
- .Le déplacement du corps sur chariot
- .Les essais en vol

Le principe de la soufflerie date de 1884 où apparaît un nouveau procédé d'étude qui consiste à soumettre le corps à étudier, à un courant d'air artificiel. Ce courant étant acheminé par une soufflerie. C'est actuellement, la seule méthode. Cependant, le chariot est encore utilisé en hydraulique pour des essais spéciaux à grande vitesse.

La première soufflerie est fabriquée par PHILIPS. Elle fonctionne par éjection d'air comprimé.

Dans les qui suivirent, on introduisit un ventilateur pour produire l'écoulement de l'air.

Dans le circuit de fonctionnement, le ventilateur a deux positions possibles. On distingue alors, les ventilateurs aspirants qui sont installés à l'aval d'un circuit qui débite dans l'atmosphère ou dans une enceinte (fig 1.1) et les ventilateurs refoulants qui prennent le fluide dans l'atmosphère ou dans une enceinte et le refoulent dans une conduite

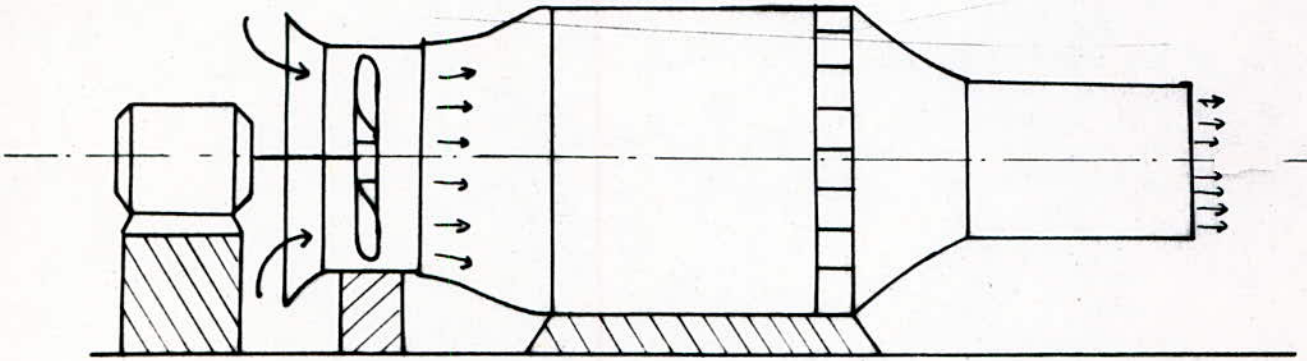


fig 1.1

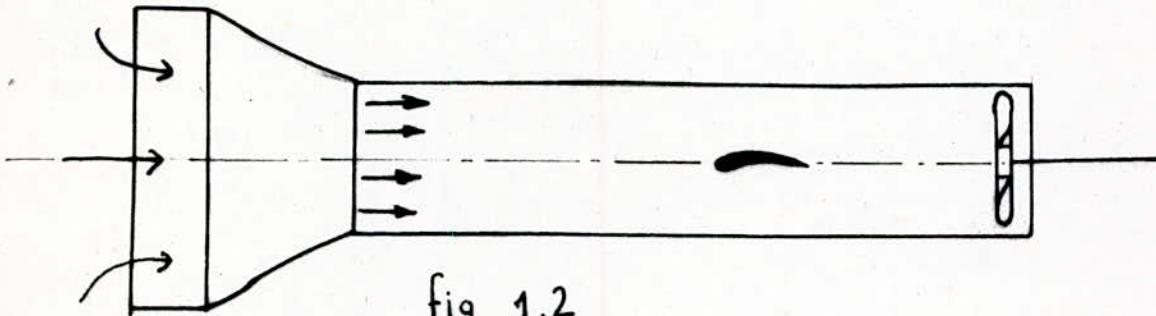


fig 1.2

ou un circuit (fig I.2)

En général, l'aspiration est préférable au soufflage. Ceci est dû à l'écoulement du fluide qui est plus régulier dans l'espace et le temps. Par contre, lorsque la veine est soufflée, elle est animée d'un mouvement tourbillonnaire.

#### CLASSIFICATION DES SOUFFLERIES

La classification des souffleries peut se faire selon plusieurs critères :

\* D'après la vitesse atteinte dans la zone d'expérience

1. Soufflerie à faible vitesse ( $M < 0,5$ ) où le fluide peut être considéré incompressible.

2. Souffleries à grande vitesse ( $M > 0,5$ ) parmi lesquelles on distingue :

a) - Les souffleries subsoniques et soniques ( $0,5 < M < 1$ )

b) - Les souffleries supersoniques ( $1 < M < 5$ )

c) - Les souffleries hypersoniques ( $M > 5$ )

Certaines souffleries sont spécialement adaptées à l'étude des phénomènes transsoniques. Elles ont un nombre de Mach variable de part et d'autre de l'unité

\* D'après le mode de fonctionnement

1. Souffleries à fonctionnement continu, dans lesquelles le courant d'air est engendré par un ventilateur,

2. Souffleries à fonctionnement discontinu

a) - Souffleries à détente d'air préalablement comprimé

b) - Souffleries à induction où l'air est entraîné par des éjecteurs placés à l'aval de la tuère et fonctionnant à l'air comprimé, à la vapeur ou à l'eau chaude pressurisée.

e)- Souffleries à succion, dans lesquelles la tuyère est intercalée entre l'atmosphère et un réservoir préalablement vidé.

\*D'après leur utilisation

- .Les souffleries aérodynamiques classiques pour essais de maquettes d'alles ou d'aïrens entiers
- .Les souffleries d'aubages, comportant un courant d'air vertical ascendant, utilisées pour l'étude de la vrille des maquettes en vol libre,
- .Les souffleries d'aubages, destinées à l'essai des grilles d'aubes,
- .Les souffleries chaudes, utilisées à l'étude des échanges thermiques,
- .Les souffleries de visualisation, destinées à l'observation des écoulements par filets de fumée,
- .Les souffleries à pression variable,
- .Les souffleries à gaz raréfié, destinée à reproduire les conditions aux altitudes de 60 à 100KLM et permettre l'étude de la transition entre l'aérodynamique des gaz continus et l'aérodynamique des écoulements moléculaires ou glissants.

\*D'après le circuit

- .Les souffleries à circuit ouvert,
- .Les souffleries à circuit fermé.

Dans ces dernières, des aubages guident la veine fluide dans les changements de direction à angle droit. Malgré la plus grande surface de frottement et les pertes dans les coudes, la puissance nécessaire est plus faible que dans les souffleries à circuit ouvert car on récupère l'énergie cinétique.

Les pertes sont transformées en chaleur incorporée au fluide. Les souffleries à grande vitesse doivent être munies d'un système de refroidissement.

#### DESCRIPTION DE LA SOUFFLERIE DU DEPARTEMENT

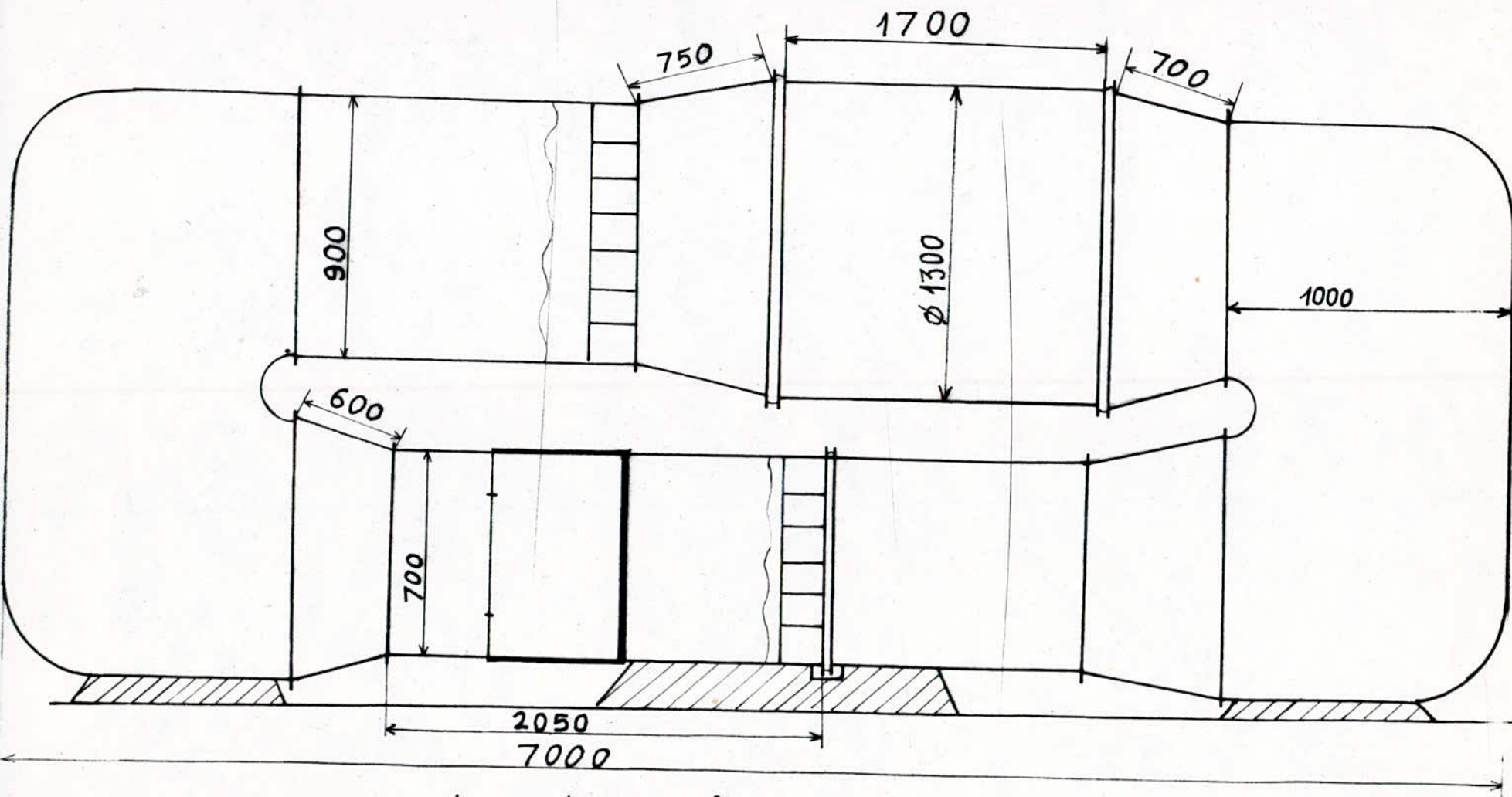
La soufflerie est à circuit fermé. Elle se compose essentiellement de deux chambres d'expériences de longueur 1,4 m chacune. Comme le montre le schéma (fig I 3), l'une inférieure de section  $0,35\text{m}^2$ , où la vitesse de l'air atteint sa valeur maximale, l'autre supérieure de section  $0,63\text{m}^2$ . Sur les deux chambres se trouve une portière vitrée afin de faciliter le montage, et la surveillance des maquettes. Leurs sections d'entrées comprennent des filtres en nids d'abeilles destinés à supprimer lors du fonctionnement de la soufflerie, les tourbillonnaires de l'air.

Le moteur et le ventilateur sont placés dans la partie supérieure cylindrique de diamètre 1,3 m, suivie d'un convergent passant de la section circulaire à la section rectangulaire.

Le ventilateur est une hélice de 1,3 m de diamètre, constitué par 6 pales, il est calé en bout d'arbre sur le moteur électrique qui l'entraîne. Il est suivi d'un redresseur à aubages fixes supprimant la rotation tourbillonnaire de l'air.

Il y a deux diffuseurs l'un assure le passage de la plus faible section qui est la chambre d'expérience inférieure à la section qui comprend la chambre d'expérience supérieure. L'autre est placé devant la partie cylindrique où se trouve le ventilateur et le moteur qui l'entraîne.





Schema de la soufflerie du departement mecanique

La connexion de la partie cylindrique avec le circuit est assurée à l'aide de toiles de bache pour éviter la transmission possible des vibrations des parties tournantes à la chambre d'expérience.

La soufflerie est à retour, des aubages guident la veine fluide dans le changement de direction à angle droit.

L'installation électrique est commune pour toutes les machines qui existent au laboratoire d'énergétique.

On a seulement un interrupteur constitué de deux boutons poussoirs, pour l'alimentation du moteur qui entraîne le ventilateur, et un rhéostat à l'aide duquel on fait varier la vitesse de rotation du moteur.

**CHAPITRE II**

**-CONDITIONNEMENT DE TEMPERATURE**

**-MESURE DE PRESSION**

**-MESURES DE VITESSE**

## CONDITIONNEMENT DE TEMPERATURE

Tout l'énergie dépensée dans la soufflerie est transformée en chaleur .  
Il faut donc refroidir l'air du circuit pour en maintenir la température à une valeur convenable.

L'air peut être refroidi par

- .Les parois du circuit avec circulation de liquide réfrigérant,
- .Des radiateurs disposés dans une section droite où la vitesse est faible, ou parallèlement à la vitesse dans le cas du fonctionnement à densité variable.

Pour ces deux procédés de refroidissement on doit installer à côté de la soufflerie une usine frigorifique.

..Si la pression du circuit est très voisine de la pression atmosphérique, on pourra adopter une solution économique en admettant de l'air froid et évacuant corrélativement de l'air chaud. La fraction d'air renouvelé doit être réglable pour maintenir dans les différents cas de fonctionnement une température convenable.

Dans tous les cas, l'air chaud doit être évacué à faible vitesse pour réduire la perte d'énergie cinétique.

### Mesure de la température

Un thermomètre ordinaire, plongé dans un fluide de vitesse notable donne lieu à des phénomènes thermiques. La température mesurée n'est donc pas celle du fluide.

pour mesurer la température statique du fluide, il faudrait que la sonde

thermométrie se déplace à la vitesse du fluide. Une telle antenne doit fonctionner dans des conditions aérodynamique bien définies, telles que sa forme et son orientation; pour que l'écart entre la température mesurée et la température d'arrêt soit lui même bien défini et puisse être déterminé par tarrage.

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

$$T_t = T_s + \left(\frac{1}{2} C_p\right) v^2$$

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

Dans notre cas, on a utilisé un thermomètre ordinaire, car la soufflerie est à circuit fermé et l'air en circulant s'échauffe considérablement, c'est à dire, la masse volumique de l'air varie. Cette variation est due à l'augmentation de la température avec le temps, et bien sûr les résultat des expériences ne erent pas précis.

La température donnée par la thermomètre :

Dans notre soufflerie, la vitesse de l'air ne dépasse 17m/s

$$C_p \text{ de l'air} = 1,0065 \cdot 10^3 \text{ J/Kg}^\circ\text{K}$$

$$T_t = T_s + \frac{18^2}{2 \cdot 1,0065 \cdot 10^3}$$

$$T_t = T_s + 0,161^\circ\text{K} \longrightarrow T_s \approx T_t$$

Alors, la température relevée sur le thermomètre est la température statique de l'air, circulant dans la soufflerie .

On a fait deux mesures de température.

.La première correspond au circuit fermé , les résultats sont dans les tableaux II 1

.La deuxième est faite avec lumière ouverte *tableau II.2*

D'après les résultats des deux expériences on a constaté que la température atteint une valeur un peu élevée et influe toujours sur les caractéristiques de l'écoulement.

Alors, la soufflerie nécessite un système de refroidissement

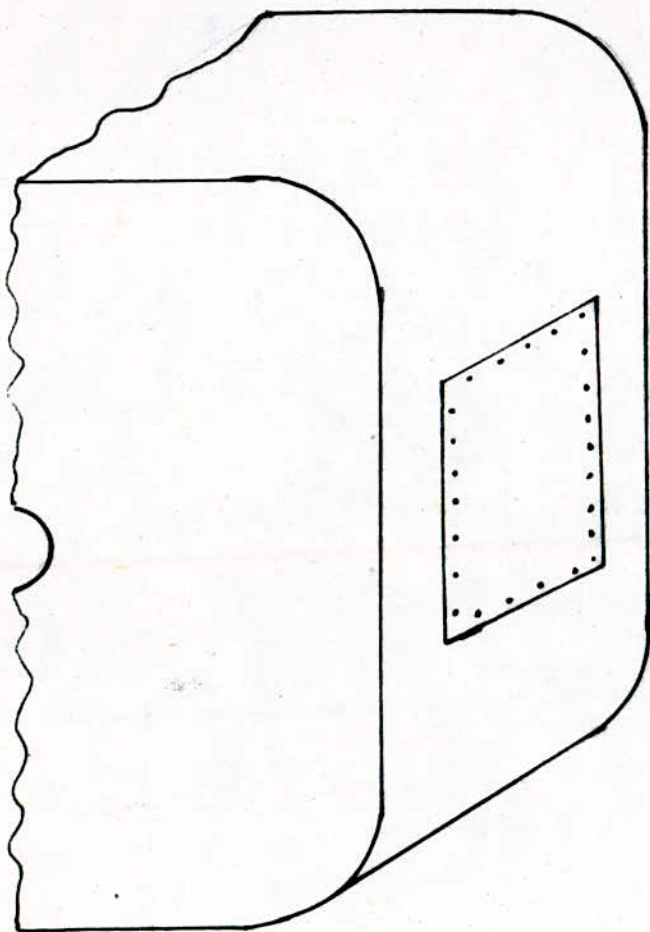
Pour cela, on a adopté la méthode la plus économique qui consiste en l'évacuation de l'air chaud et l'admission de l'air froid. Ceci peut être réalisé par deux méthodes :

- 1) Supprimer l'utilisation de la partie inférieure en ouvrant les deux lumières et la soufflerie fonctionne comme si elle est à circuit ouvert.
- 2) Ouverture de la lumière qui se trouve dans la partie de l'aval du ventilateur et installer des feuilles métalliques directives pour faciliter le changement de l'air

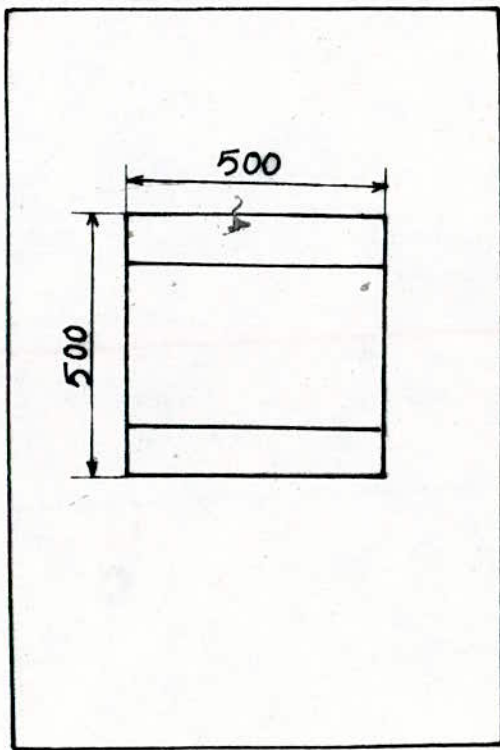
Schéma d'installation (fig des pages suivantes)

Après cette installation, on a relevé les mesures de température dans le temps , tableaux II 3 et 4

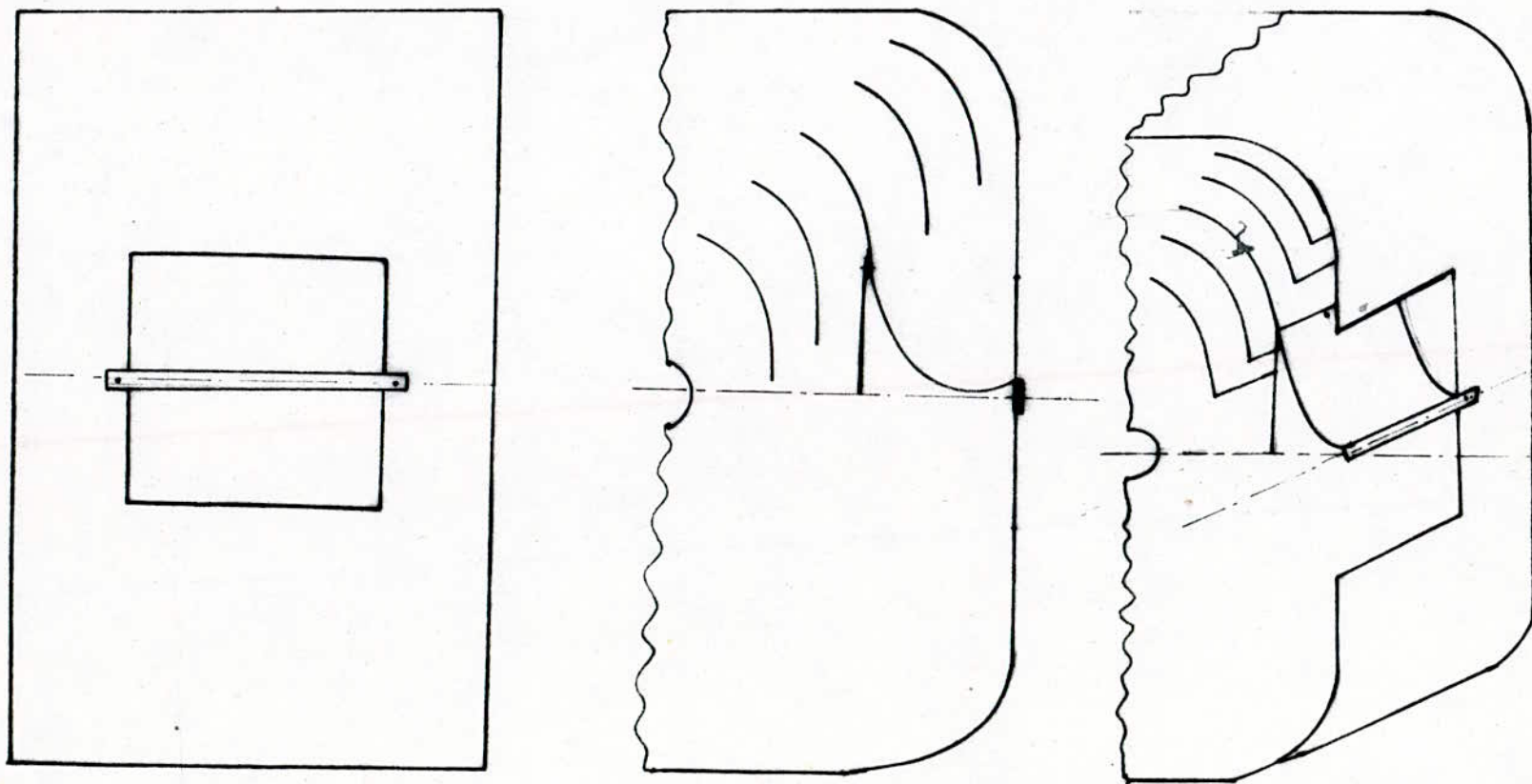
DE ces tableaux on a tracé les 4 courbes correspondantes . Il est clair dans les courbes II 3 et 4 que la température se stabilise après une



Lumière fermée



Lumière ouverte



Installation de feuilles directives



augmentation de 13°C

Alors, il suffit de connaître la température ambiante et lui ajouter 13°C après avoir fait fonctionner la soufflerie pendant une demi heure environ.

### PRESSION STATIQUE TOTALE ET DYNAMIQUE

#### a) .Pressions statique

La pression statique est celle que subit une particule qui suit strictement le mouvement du fluide.

Néanmoins, une prise de pression statique peut être réalisée à la paroi d'une canalisation ou sur la paroi d'un corps immergé dans la veine fluide

#### b).pression totale

La prise de pression totale ou d'arrêt s'effectue en plaçant dans le fluide un tube dont le plan de l'orifice est perpendiculaire aux lignes de courant.

En appliquant le théorème de BERNOULLI entre un point situé en amont de l'orifice et le centre de l'orifice où la vitesse est nulle, on trouve en effet:

$$\rho \frac{v^2}{2} + P = 0 + P_m \quad (\text{pression mesurée})$$

La somme  $\rho \frac{v^2}{2} + P$  représente bien la pression totale

#### c).Pression dynamique

C'est la pression due à la vitesse du fluide dans la conduite. Elle représente la différence entre la pression totale et la pression statique.

$$P_d = P_t - P_s = \rho \frac{v^2}{2}$$

$t_{mm}$	0	5	10	20	25	30	35	40	45	50	55
$0^{\circ}C$	22	33	38	44	48	52	55	56	58	61	63

Tableau II 1

$t_{mm}$	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$0^{\circ}C$	20	28	33	36	38	40	42	43	44	45	45

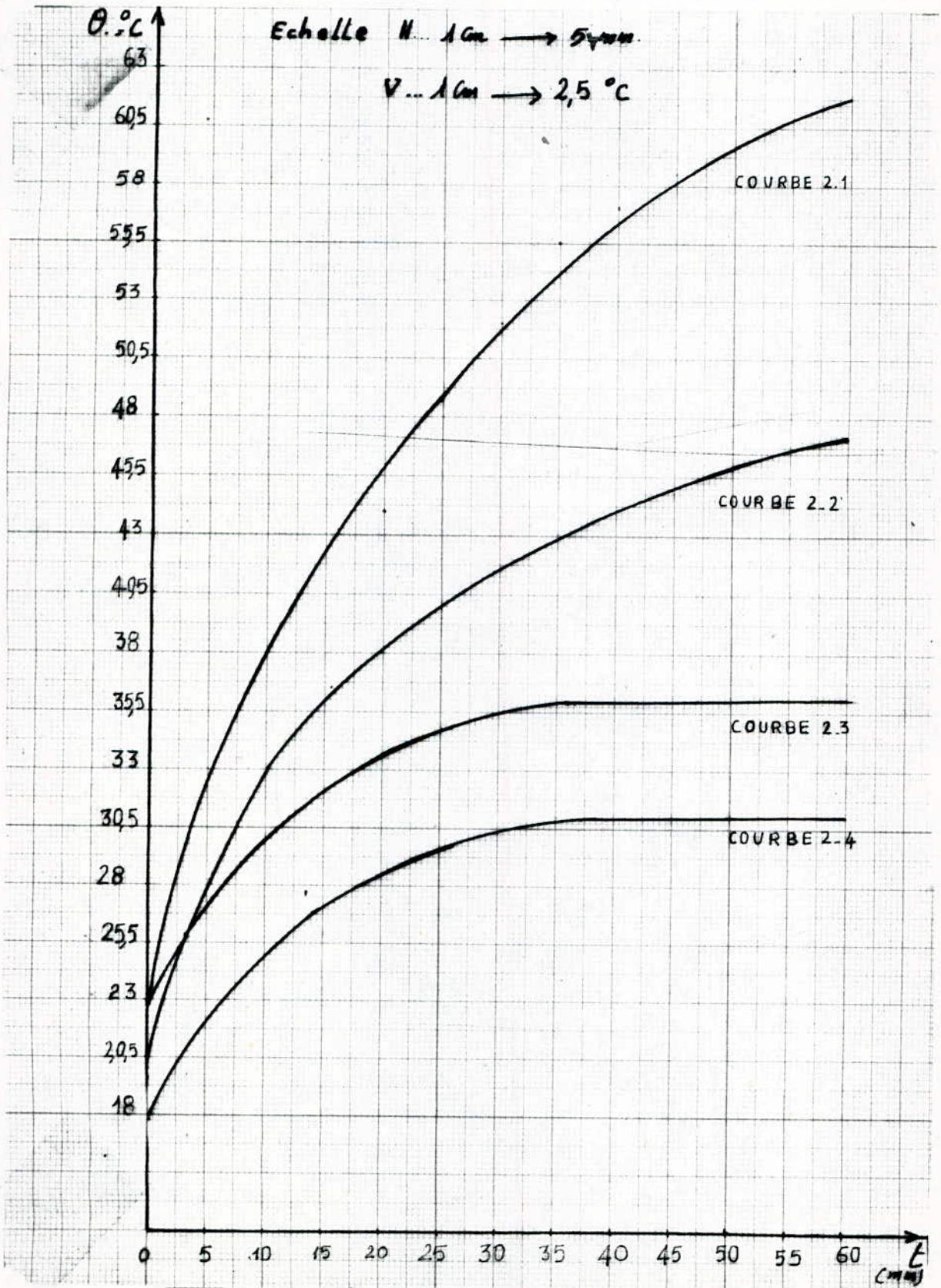
Tableau II 2

$t_{mm}$	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$0^{\circ}C$	22	28	30	32	34	35	36	36	36	36	36

Tableau II 3

$t_{mm}$	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$0^{\circ}C$	18	23	26	28	29	30	31	31	31	31	31

Tableau II 4



## MESURE DE LA VITESSE

Si on dispose d'un moyen qui peut nous mesurer à la fois, la pression statique et totale, on pourra facilement obtenir la vitesse du fluide en appliquant la relation donnant la pression dynamique

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

## \*Appareils de mesure de la vitesse

Il existe plusieurs appareils qui servent pour cette mesure .

Les plus récents sont les antennes du type pitot double.

## .Tube de pitot double

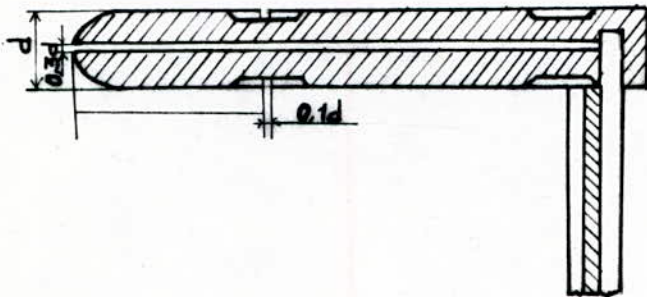
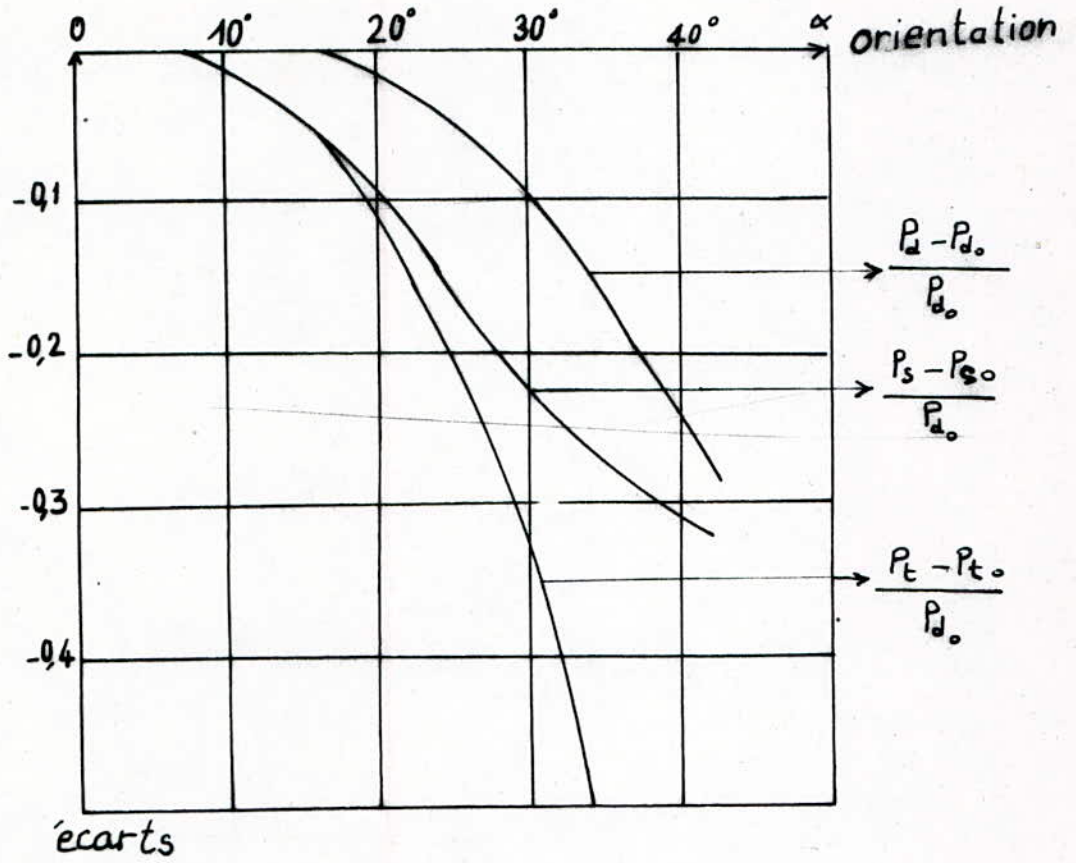
Il comporte deux prises de pression en deux points rapprochés, l'une pour la pression totale, l'autre pour la pression statique fig II 1

Si le tube a son axe de révolution parallèle à la vitesse, on aura une différence de pression différente que s'il est incliné d'un angle  $\alpha$

Le tube de Prandtl est nettement meilleur aux nombres de Mach modérés  $M < 0,8$  grâce à une compensation des écarts sur les pressions statique et totale. Il est exacte jusqu'à  $\alpha = 15^\circ$  ; comme appareil mesurant la vitesse qui est en général, déterminée à 0,5% près.

L'inconvénient que présente le tube de pitot double, est qu'il se bouche facilement soit par la poussière, soit par les gouttes d'eau qui se givrent si la température de mesure est faible.

Ce genre d'appareil doit être lié à un manomètre différentiel pour pouvoir lire la différence de pressions ,total et statique.



Tube de Prandtl

### Multimanomètre

Le multimanomètre est constitué en une série de huit tubes en parallèles sur un même réservoir. Les tubes sont montés sur parallélogramme déformable dans un plan vertical.

Ce multimanomètre peut être utilisé comme manomètre différentiel.

Ce multimanomètre, maintenu dans sa position verticale, la lecture de mesure de pression est faible (vu que l'on est dans le domaine de faibles pressions). Pour cela, nous sommes amenés à l'incliner, par rapport à sa position verticale, pour avoir une plus grande plage de lecture.

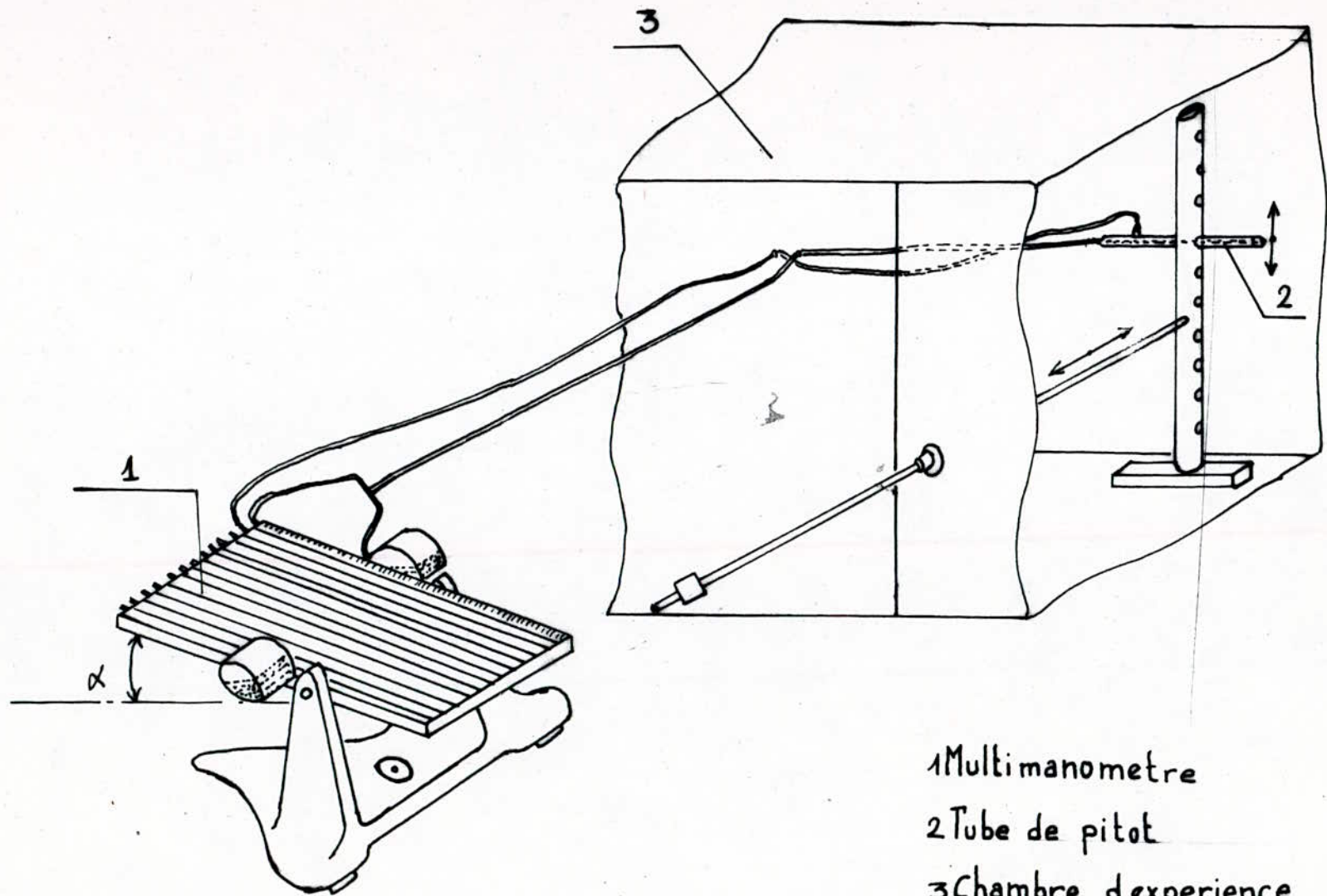
En ce qui nous concerne, pour la mesure de la vitesse dans la soufflerie, on a réalisé le système de la page en se servant du multimanomètre incliné à  $20^\circ$  et d'un certain matériel existant à l'atelier du département. Puisque le but de notre projet est d'augmenter la vitesse de la soufflerie on a fait tourner le ventilateur à sa vitesse de rotation la plus élevée.

### Tableaux de mesure

Les résultats de mesure sont donnés dans les tableaux II 5 pour le cas sans système de refroidissement avec la température de  $46^\circ$  en début d'expérience, et 63 à la fin.

Avec système de refroidissement on a eu les courbes II 5.6

D'après les résultats obtenus, la vitesse est faible et non constante dans la section, alors pour l'augmenter, on a choisi deux solutions, l'une consiste en l'installation d'une tuyère convergente-divergente à la plus faible section, l'autre, en l'installation d'un ventilateur qui travaille à des débits supérieurs et par conséquent, à des vitesses élevées. Ces deux solutions sont détaillées dans les deux chapitres suivants:



Installation de mesure de la vitesse

Y mm	X mm	H mm	H sin 20 mm	V m/s
370	10	28	9,58	12,53
370	60	44	15,05	15,70
370	110	50	17,10	16,74
370	160	52	17,78	17,07
370	210	54	18,47	17,40
370	260	53	18,12	17,24
370	310	53	18,12	17,24
370	360	53	18,12	17,24
370	410	52	17,78	17,07
370	490	20	6,84	10,59

Y mm	X mm	H mm	H sin 20 mm	V m/s
420	10	31	10,60	13,18
420	60	45	15,39	15,88
420	110	52	17,78	17,07
420	160	55	18,81	17,56
420	210	56	19,15	17,72
420	260	54	18,47	17,40
420	310	54	18,47	17,40
420	360	53	18,12	17,24
420	410	52	17,78	17,07
420	490	29	9,92	12,75

Y mm	X mm	H mm	H sin 20 mm	V m/s
470	10	34	11,63	13,80
470	60	54	18,47	17,40
470	110	58	19,83	18,03
470	160	55	18,81	18,03
470	210	56	19,15	17,72
470	260	56	19,15	17,72
470	310	55	18,81	17,56
470	360	54	18,47	17,40
470	410	53	18,12	17,07
470	490	30	10,26	12,97

Y mm	X mm	H mm	H sin 20 mm	V m/s
520	10	45	15,39	15,88
520	60	59	20,18	18,19
520	110	62	21,20	18,64
520	160	60	20,52	18,34
520	210	59	20,18	18,19
520	260	56	19,15	17,72
520	310	56	19,15	17,72
520	360	54	18,47	17,40
520	410	53	18,12	17,07
520	490	23	7,87	11,36

Y mm	X mm	H mm	H sin 20 mm	V m/s
570	10	42	15,39	15,88
570	60	60	20,52	18,34
570	110	62	21,20	18,34
570	160	60	20,52	18,34
570	210	62	21,20	18,64
570	260	61	20,86	18,50
570	310	59	20,28	18,19
570	360	58	19,83	18,03
570	410	56	19,14	17,72
570	490	29	9,93	12,75

Y mm	X mm	H mm	H sin 20 mm	V m/s
620	10	42	14,36	15,35
620	60	30	10,26	12,97
620	110	37	12,65	14,40
620	160	35	11,97	14,01
620	210	44	15,05	15,70
620	260	42	14,36	15,53
620	310	43	14,71	15,53
620	360	44	15,05	15,70
620	410	42	14,36	15,35
620	490	30	10,26	12,97

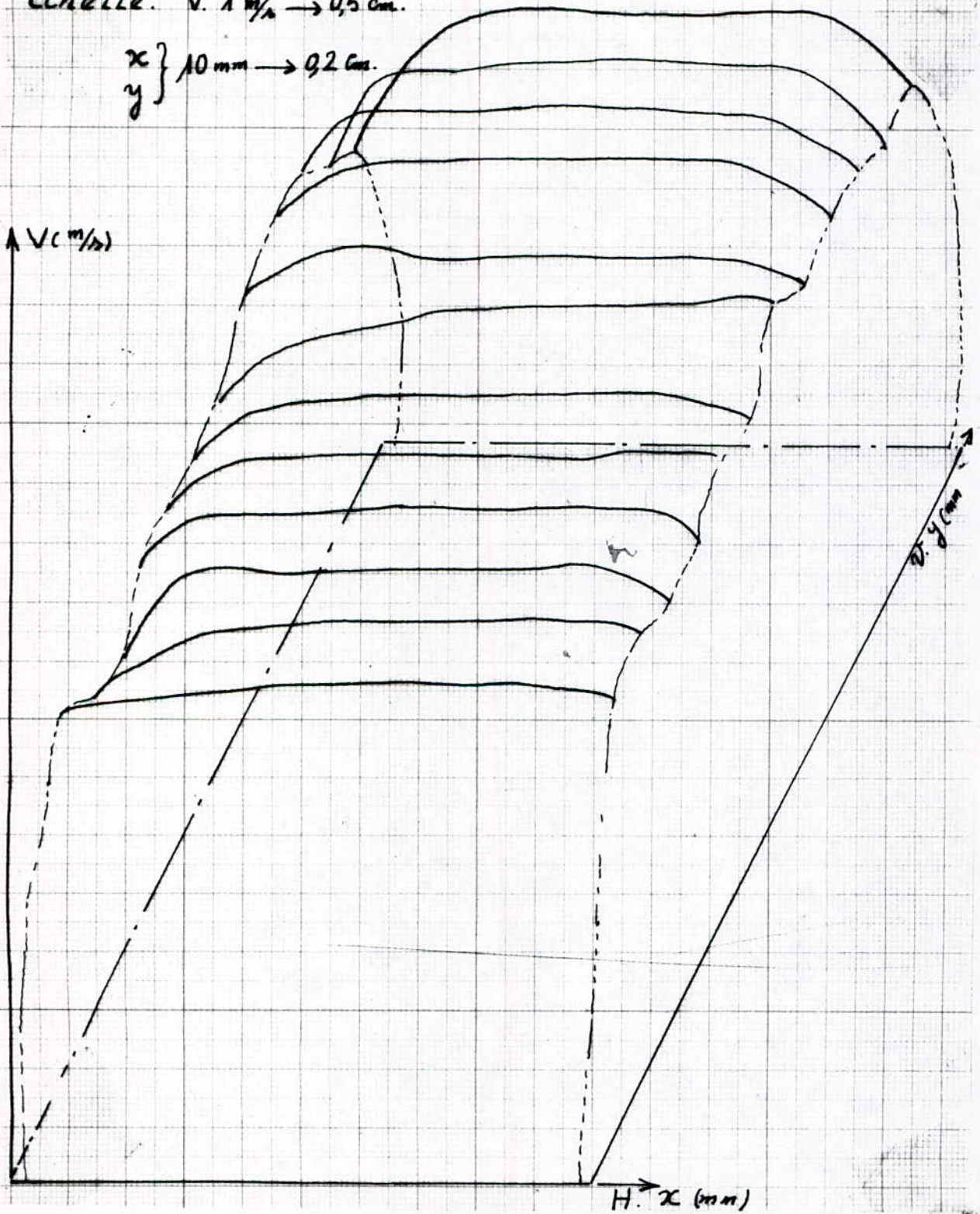


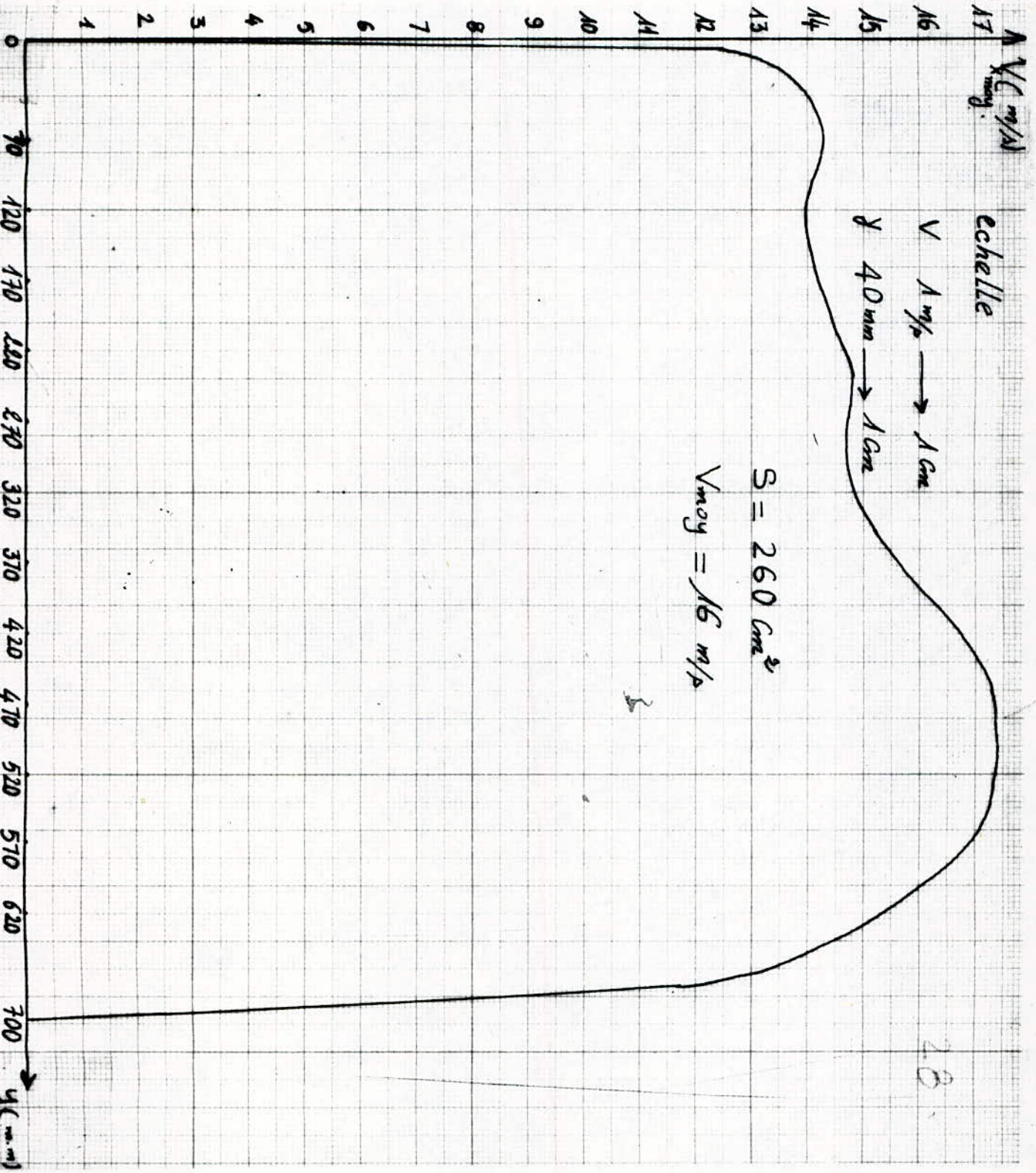
Y mm	X mm	H mm	Hsin20 mm	V m/s	Y mm	X mm	H mm	Hsin20 mm	V m/s
70	10	28	9,58	13,56	120	10	25	8,55	11,84
70	60	34	11,63	13,81	120	60	35	11,97	11,01
70	110	35	11,97	14,01	120	110	36	12,31	14,21
70	160	36	12,31	14,21	120	160	37	12,65	14,40
70	210	38	13,00	14,60	120	210	38	13,00	14,60
70	260	39	13,34	14,79	120	260	38	13,00	14,60
70	310	40	13,68	14,98	120	310	39	13,34	14,79
70	360	40	13,68	14,98	120	360	39	13,34	14,79
70	410	40	13,68	14,98	120	410	39	13,34	14,79
70	490	38	13,00	14,60	120	490	39	13,34	14,79
Y mm	X mm	H mm	Hsin20 mm	V m/s	Y mm	X mm	H mm	Hsin20 mm	V m/s
170	10	20	6,84	10,59	220	10	31	10,60	13,18
170	60	36	12,31	14,21	220	60	38	13,00	14,60
170	110	38	13,00	14,60	220	110	39	13,34	14,79
170	160	37	12,65	14,40	220	160	39	13,34	14,79
170	210	38	13,00	14,60	220	210	40	13,60	14,93
170	260	38	13,00	14,60	220	260	40	13,60	14,93
170	310	39	13,34	14,79	220	310	40	13,60	14,93
170	360	39	13,34	14,79	220	360	40	13,60	14,93
170	410	40	13,60	14,79	220	410	40	13,60	14,93
170	490	39	13,34	14,79	220	490	39	13,34	14,79
Y mm	X mm	H mm	Hsin20 mm	V m/s	Y mm	X mm	H mm	Hsin20 mm	V m/s
270	10	31	10,60	13,18	320	10	30	10,26	12,97
270	60	39	13,34	14,79	320	60	38	13,00	14,60
270	110	40	13,60	14,93	320	110	40	13,60	14,60
270	160	40	13,60	14,93	320	160	40	13,60	14,60
270	210	40	13,60	14,93	320	210	41	14,02	15,16
270	260	40	13,60	14,93	320	260	40	13,60	14,60
270	310	40	13,60	15,93	320	310	41	14,02	15,16
270	360	40	13,60	15,93	320	360	41	14,02	15,16
270	410	41	14,02	15,16	320	410	41	14,02	15,16
270	490	40	13,60	14,93	320	490	37	12,65	14,40

Tableau 2-2

Echelle. V. 1 m/s  $\rightarrow$  0,5 cm.

x } 10 mm  $\rightarrow$  0,2 cm.  
y }





### CHAPITRE III

#### INSTALLATION D'UNE TUYERE

- ..Introduction
- ..Ecoulement dans les tuyères
- ..Dimensionnement de la tuyère
- ..Réalisation

### III.1. INTRODUCTION

La conception des tuyères s'appuie sur les propriétés fondamentales des écoulements monodimensionnels exprimés principalement par les lois de détente isentropique et par la relation d'Hugoniot qui relie la variation de la vitesse du fluide à celle de la section qu'il occupe.

Les circuits des souffleries subsoniques et supersoniques à retour ont beaucoup de ressemblance, ils diffèrent cependant, fondamentalement en amont et en aval de la veine d'essai, partiellement, où sont placées les maquettes.

Dans les souffleries subsoniques, la section du circuit est minimale au niveau de la veine d'essai. Celle-ci est précédée d'un collecteur, partie convergente, où l'écoulement s'accélère depuis la vitesse lente qu'il a dans le circuit de retour, jusqu'à la vitesse d'essai qui reste inférieure à la vitesse du son; elle est suivie d'un diffuseur, partie divergente où l'écoulement est ralenti avant d'effectuer le cycle de retour -fig III-1

Dans les souffleries supersoniques, au contraire, la veine d'essai est précédée d'une tuyère convergente-divergente, dont le col constitue la section minimale du circuit. La vitesse d'écoulement augmente; elle atteint la vitesse du son au niveau du col de la tuyère. L'accélération de l'écoulement peut alors se poursuivre en supersonique dans les sections qui s'élargissent jusqu'à la dimension de la veine d'essai. À l'aval la veine d'essai, l'écoulement est partiellement recomprimé en supersonique jusqu'à un second col. fig III.2.

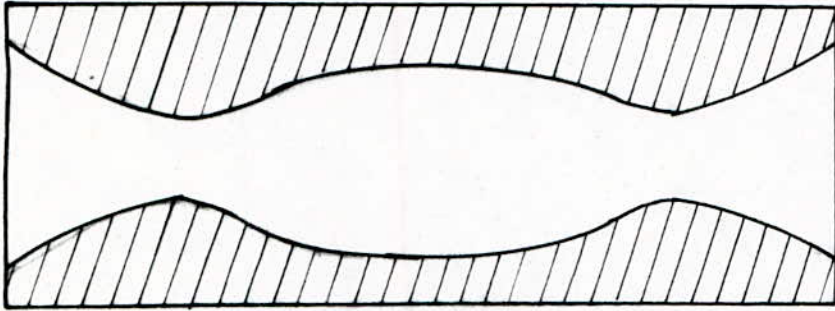


fig III 2

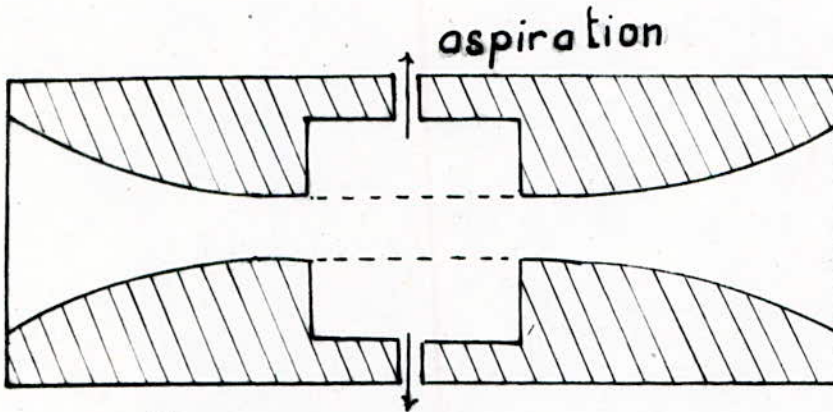


fig III .3

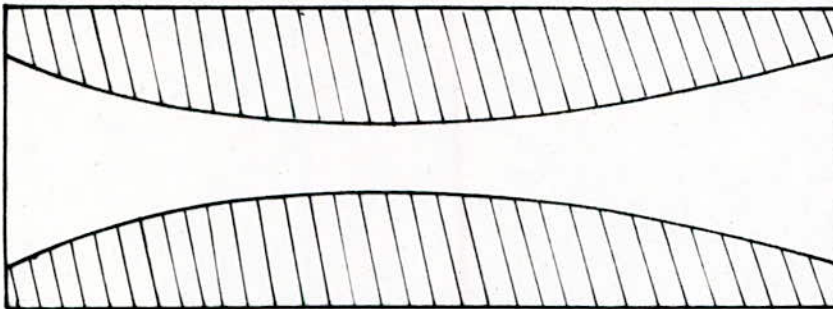


fig III .1

Il y a les souffleries transoniques qui fonctionnent au voisinage de la vitesse du son .

Dans ces souffleries se posent des problèmes par suite des phénomènes suivants :

.le blocage de l'écoulement qui se fait par la présence d'une maquette dans la veine guidée. Alors elle provoque une diminution locale de section , créant ainsi un col qui devient sonique dès que la vitesse ament atteint un certain niveau. Toute tentative d'augmenter le nombre de Mach à l'ament devient inutile.

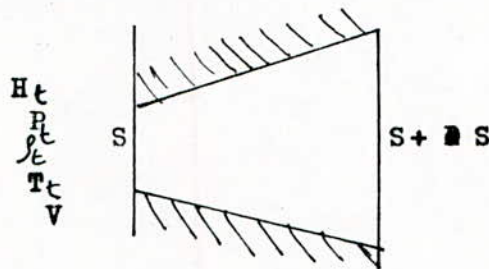
.La réflexion des ondes sur les parois.

Une onde de choc engendrée par la maquette et réfléchié par la paroi revient vers celle-ci . Pour éviter cela , on est amené à limiter la longueur des maquettes ; au voisinage de Mach 1, où les perturbations se propagent quasi perpendiculairement à l'écoulement, cela conduit à des dimensions de maquettes beaucoup trop petites fig III 3

### III.2. ÉCOULEMENT DANS LES TUYÈRES

#### III.2.1. Hypothèses

- \*Écoulement monodimensionnel à partir de l'entrée de la tuyère .
- \*Écoulement isentropique se faisant par tranche
- \*Vitesse de l'écoulement parallèle à l'axe de canalisation.



#### III.2.2. Équation de quantité de mouvement

$$\sum \vec{F} = m \vec{a}$$

$$= (s + \frac{ds}{2}) dx \rho \frac{dv}{dt} = P_s - (P + dP_x)(s + \frac{ds}{2})$$

on néglige  $\frac{ds}{2}$  devant  $s$

D'où

$$s dx \rho \frac{dv}{dt} = s (P - P - dP_x)$$

$$dx \cdot \rho \cdot \frac{dv}{dt} = -s dP_x$$

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

Alors on a

$$dx \rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} \cdot v \right) = -s dP_x$$

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

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



pour un écoulement permanent  $\frac{V}{t} = 0$

Alors on a finalement l'équation de mouvement d'un fluide en écoulement permanent

$$VdV + \frac{dP}{\rho} = 0$$

### III.2.3 Equation de continuité

L'équation de continuité est basée sur le principe de la conservation de la masse

$$\rho v S = \text{Constante}$$

en différentiant cette équation, on aura

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dV}{V} + \frac{dS}{S} = 0$$

### III.2.4. Relation d'Hugoniot

Si  $a$  est la célérité du son donnée par

$$a^2 = \frac{\partial P}{\partial \rho}$$

En transformant les expressions des équations de mouvement et de continuité on aura

$$\frac{dS}{S} = \frac{dV}{V} \left( 1 - \frac{V^2}{a^2} \right) = 0$$

appelée relation d'Hugoniot.

Alors de cette relation on en déduit immédiatement une loi de l'écoulement monodimensionnel:

- .Écoulement subsonique:  $M < 1$  La vitesse inversement proportionnelle à la section
- .Écoulement supersonique:  $M > 1$  La vitesse est proportionnelle à la section
- .Écoulement sonique  $M = 1$  La section correspondante est minimale, c'est le col

### III.2.5 Equation de l'énergie

Soit un fluide compressible en mouvement. Le premier principe de la thermodynamique appliqué à ce fluide nous donne:

$$P_1 V_1 + g z_1 + U_1 + \frac{1}{2} V_1^2 = P_2 V_2 + g z_2 + \frac{1}{2} V_2^2 + U_2$$

Pour un gaz compressible adiabatique

$$U = PV + \frac{1}{2} V^2 = \text{cte}$$

Le facteur  $g z$  est négligeable.

En faisant apparaître  $H$ , on écrit

$$H_s + \frac{1}{2} V^2 = \text{cte}$$

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

### III.2.6 Relations thermodynamiques

On a

$$H = C_p T$$

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

D'autre part,

$$C_p = \frac{\gamma}{\gamma - 1} r \Rightarrow H_t = \frac{\gamma}{\gamma - 1} r T + \frac{1}{2} V^2$$

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

Alors l'application de cette équation entre deux sections 1 et 2 nous donne:

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

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

$$\text{or } \frac{P_1}{\rho_1^\gamma} = \frac{P_2}{\rho_2^\gamma} \longrightarrow \rho_2 = \rho_1 \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{1/\gamma}$$

En utilisant ceci, on aura

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

Finalement

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

Cette équation permet de calculer la vitesse du fluide en écoulement dans n'importe quelle section en connaissant la pression dans celle-ci, ainsi que la pression et la vitesse à l'entrée de la tuyère.

### III.3. DIMENSIONNEMENT DE LA TUYÈRE

Le dimensionnement de la tuyère se base sur l'équation de continuité qui s'écrit entre deux points 1 et 2

$$\rho_1 V_1 S_1 = \rho_2 V_2 S_2$$

avec  $\rho_1, \rho_2$  les masses volumiques respectivement aux points 1 et 2

$V_1, V_2$  Les vitesses

$S_1, S_2$  les sections de passage du fluide

En utilisant les relations thermodynamiques pour l'écoulement isentropique

$$\frac{P}{\rho^\gamma} = \text{Constante}, \quad \frac{P}{\rho} = r T$$

On aura

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{\rho_2 V_2}{\rho_1 V_1} = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \frac{V_2}{V_1}$$

$$\text{ou} \quad \frac{S_1}{S_2} = \frac{V_2}{V_1} \frac{1}{\rho_1} \left( \frac{P_2}{r T_2} \right)$$

avec

$P_2, T_2$  respectivement la pression et la température aux points 1 et 2

Alors si on connaît  $\rho_1, V_1, \rho_1, P_2, T_2$  on pourra déterminer facilement  $S_2$  en fixant  $V_2$  à une valeur choisie.

$$S_2 = \rho_1 V_1 S_1 \cdot \frac{1}{\rho_2 V_2}$$

Autrement si l'écoulement est incompressible, alors la masse volumique restera invariable et S se déduira de la formule suivante:

$$S_2 = S_1 \frac{V_1}{V_2}$$

Conservation du débit volumique pour un écoulement incompressible.

Si le fluide circulant est de l'air, l'écoulement sera considéré incompressible tant que la vitesse reste inférieure à 80m/se et on peut s'en passer de la compressibilité de l'air à ce niveau, car elle est très faible.

Dans le cas de notre soufflerie, elle est à faible vitesse, car cette dernière ne peut dépasser 20m/s dans la section la plus faible du circuit - la vitesse mesurée est de 16m/s.

-La vitesse qu'on veut atteindre est de 60m/s.

-Le circuit de fonctionnement impose une tuyère convergent-divergente.

D'après l'équation de BERNOULLI, on doit diminuer la section pour augmenter la vitesse.

De ce fait on place un convergent afin que la vitesse augmente jusqu'à ce qu'elle atteigne la valeur voulue dans la chambre d'expérience.

Cette dernière, doit être suivie d'un divergent pour revenir à la vitesse d'écoulement dans le circuit d'une part et minimiser les pertes de charge d'une autre.

La section <sup>minimale</sup> correspond à la chambre d'expérience ; A cet effet, elle doit être suffisante pour y placer à l'intérieur les maquettes de corps aérodynamiques.

Aussi, on ne peut pas augmenter la vitesse d'autant plus que la chambre d'expérience ne soit pas utilisable et ce, par raison de faible section. En se basant sur ça, on a fixé la vitesse maximale à 60m/s, afin d'avoir une section de mesure suffisante pour nos essais.

Calculons  $S_2$ , section correspondante à la chambre nouvelle d'expérience:

$$S_2 = S_1 \frac{V_1}{V_2}$$

avec

$$S = (0,7 \cdot 0,5) = 0,35 \text{ m}^2$$

$$V = 16 \text{ m/s}$$

$$V = 60 \text{ m/s}$$

$$S = 0,35 \cdot \frac{16}{60} = 0,0933 \text{ m}^2 \approx 0,1 \text{ m}^2$$

Calculons la nouvelle vitesse correspondante

$$V_2 = \frac{S_1 V_1}{S_2} = \frac{0,35 \cdot 16}{0,1} = 56 \text{ m/s}$$

Alors la vitesse théorique qu'on peut atteindre est de 56m/s

#### III.4 REALISATION DE LA TUYERE

##### III.4.1 Hypothèses:

\*\* Longueur de la tuyère 1,4m

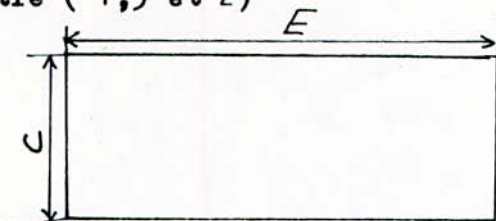
\*\* Section d'entrée 0,35 m<sup>2</sup>

\*\* Section de mesure 0,1 m<sup>2</sup>

\*\* forme (convergente-divergente) de section prismatique.

### III.4.2. Chambre d'expérience

D'après la référence 4, le rapport entre les dimensions de la section recommandé varie entre ( 1,5 et 2 )



$\frac{E}{C} = (1,5 ; 2)$  pour une section rectangulaire ou elliptique

Par raison de construction on, a pris :

$$E = 0,4 \text{ m.}$$

$$C = 0,25 \text{ m.}$$

Car, il faut des dimensions un peu importantes, pour considérer que les parois de la chambre sont des lignes de courant.

La chambre qui a été réalisée a pour dimensions :

$$\left. \begin{array}{l} S = 0,4 \cdot 0,25 = 0,1 \text{ m}^2 \\ L = 0,4 \text{ m} \end{array} \right\} \text{ avec } \left\{ \begin{array}{l} S \text{ section de travail} \\ L \text{ longueur de la chambre} \end{array} \right.$$

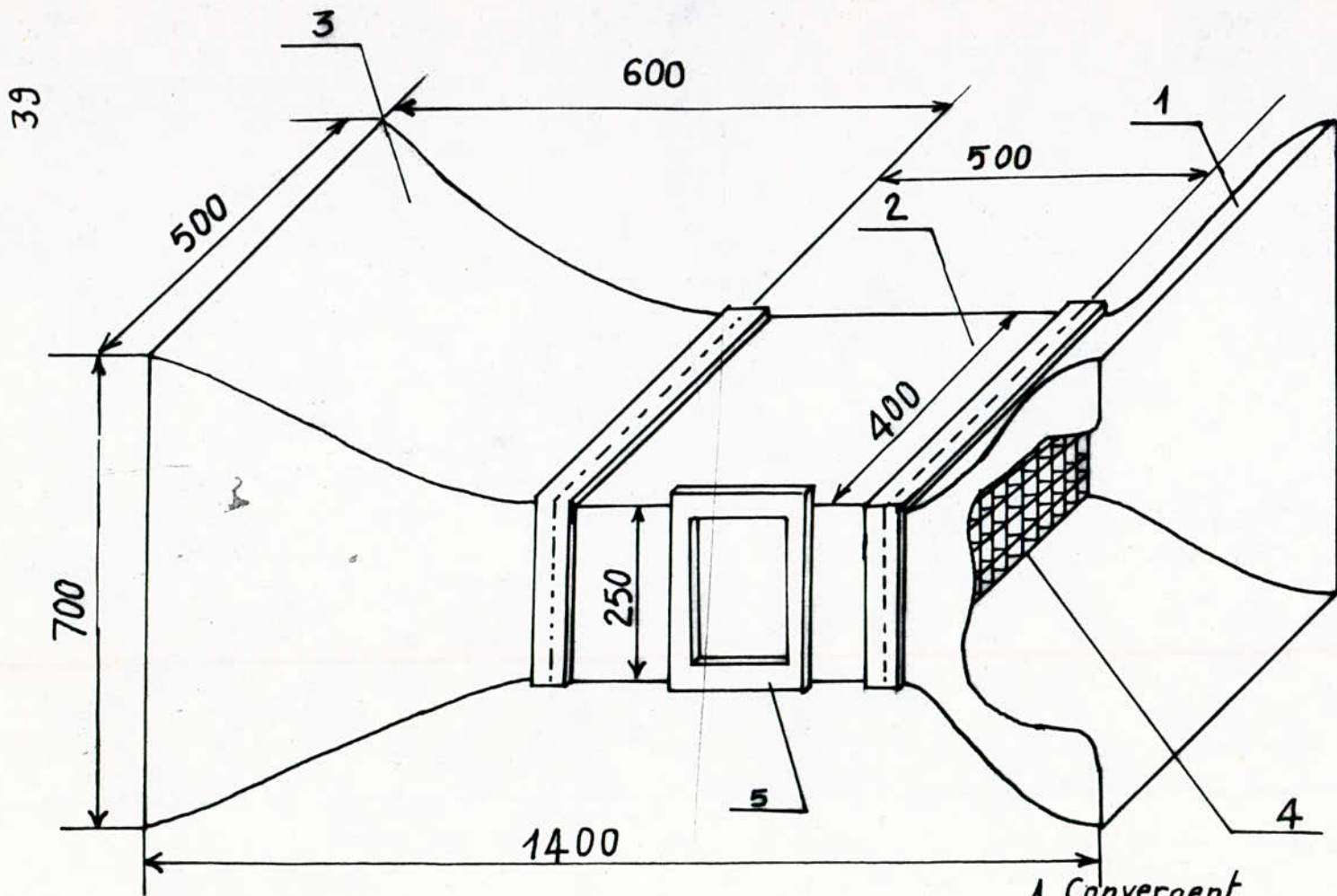
pièce 2. fig III.1.

Ainsi en pratique, une pertière pour le montage et le contrôle des maquettes en essai. pièce 3 fig III 1

### III.4.3. Convergent

Le convergent assure le passage de la section d'entrée à celle d'expérience, en accélérant l'écoulement pour atteindre la vitesse voulue, qui se trouve régularisée à la sortie de ce premier.

On a réalisé un convergent curviligne de sections d'entrée et de sortie



tuyère convergente-divergente réalisée  
à l'atelier du département mécanique

- 1 Convergent
- 2 Chambre d'expérience
- 3 Divergent
- 4 Grille

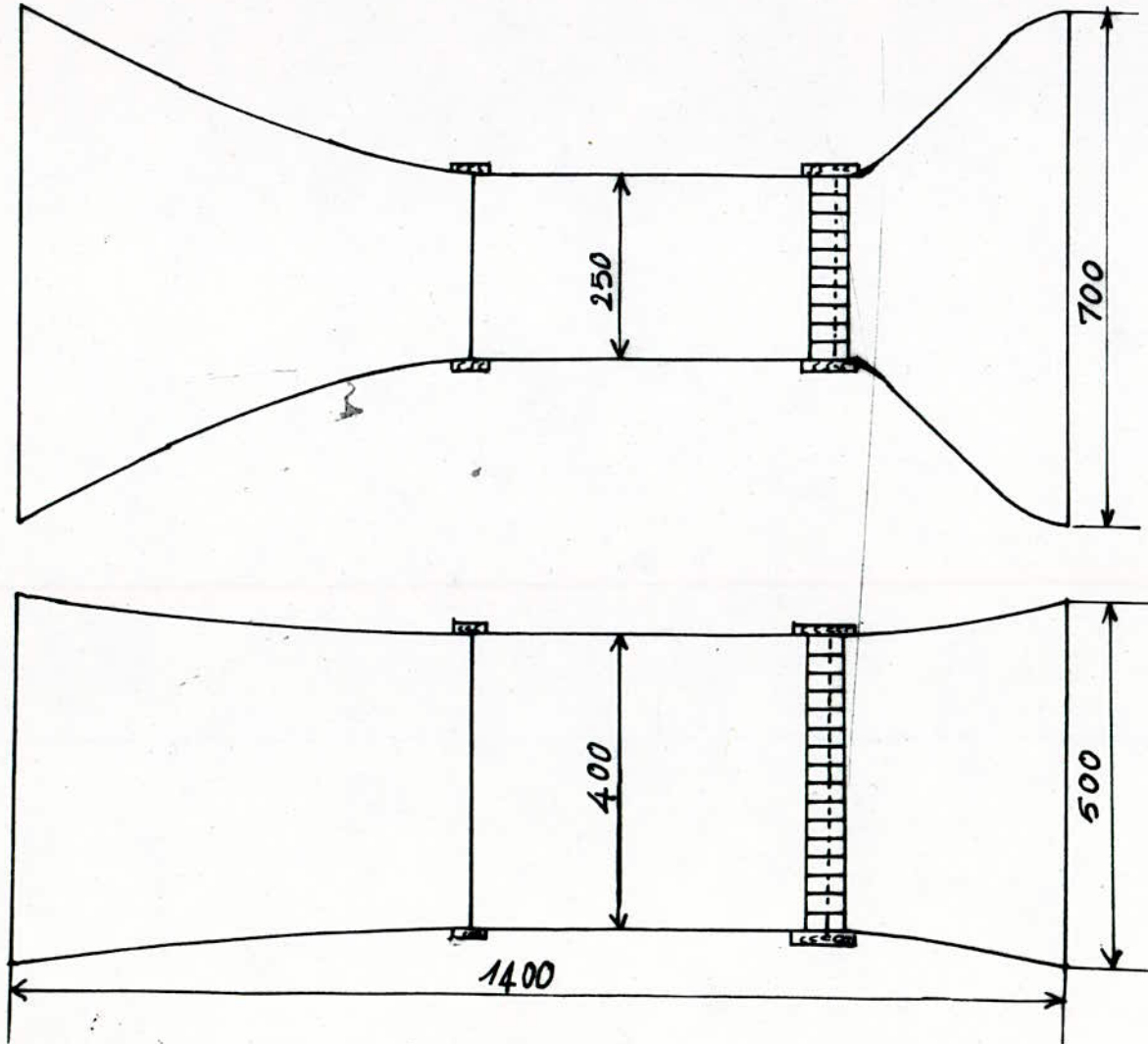
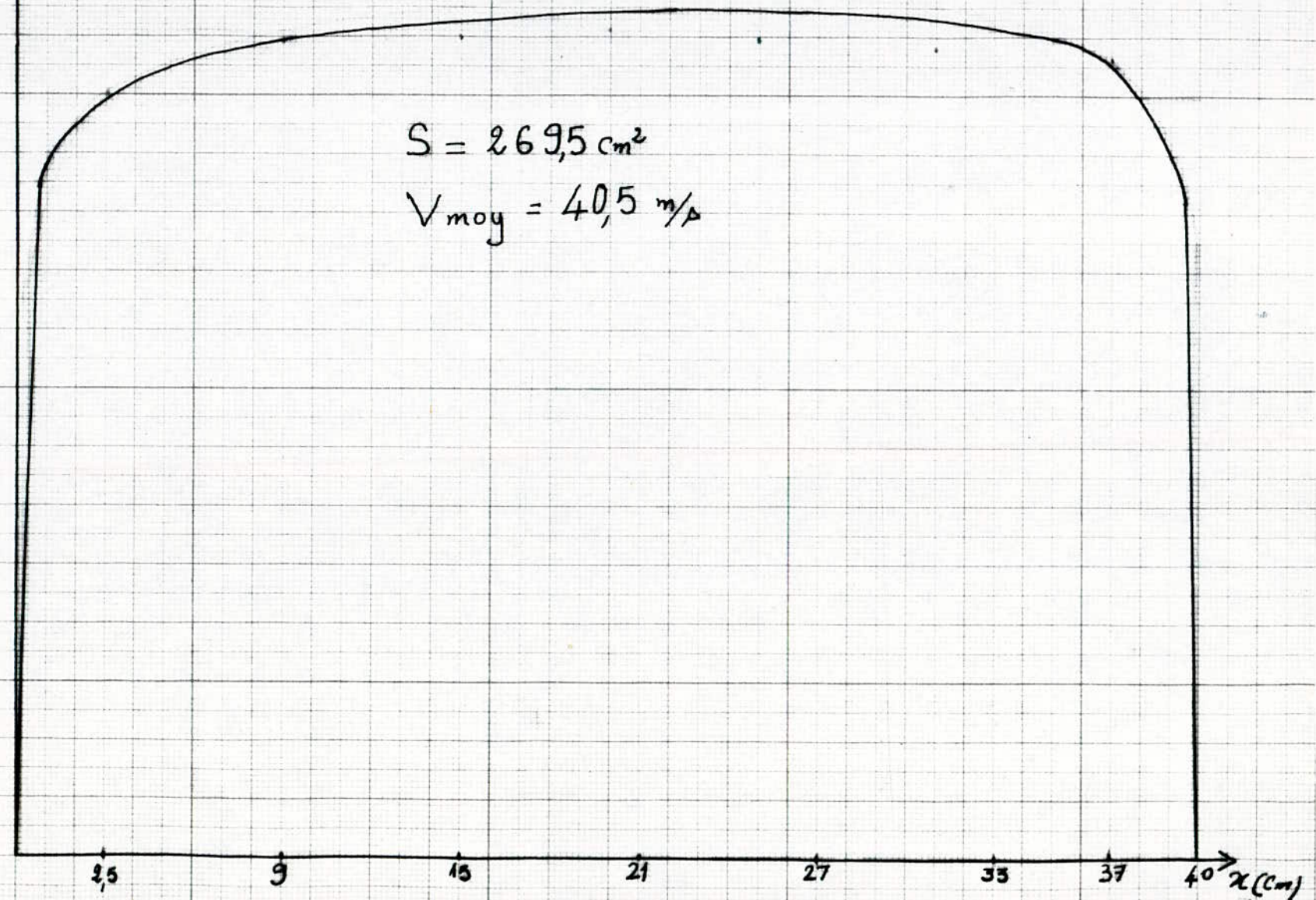


fig III. 2



Echelle  $v$ : 1 cm  $\rightarrow$  3 m/s.

$v_{moy}$   $x$ : 1 cm  $\rightarrow$  2 cm.



Courbe expérimentale de la vitesse dans la chambre d'expérience

respectivement ( 0,35 , 0,31 m) et dont la longueur est de 0,33 m. pièce 1  
fig III.1. 42

Afin d'éviter le décollement à l'entrée de la chambre d'expérience, une grille en nid d'abeilles , de section d'écoulement (2,5.2,5 ) cm et de longueur de 5 cm, a été pratiquée à la sortie du convergent ; pièce 4 fig III.1.

#### III.4.4 Divergent

Le divergent, assure un ralentissement de l'écoulement jusqu'à ce qu'il atteigne la vitesse du circuit de retour, mais il présente quelques inconvénients; tels que, décollement, longueur importante...etc.

Dans le cas le divergent réalisé est curviligne et de longueur 0,6 m

\*\*\*La réalisation est purement pratique car les calculs théoriques sont très compliqués.

Après avoir installé la tuyère dans la soufflette on a mesuré la vitesse dont la courbe est représentée dans la page

\* La vitesse moyenne réelle dans la chambre d'expérience est de 40m/s, elle est inférieure à la vitesse calculée ceci est dû aux fuites dans le circuit et à la forme de la tuyère.

## C H A P I T R E   I V

### INSTALLATION D'UN VENTILATEUR

- Rôle du ventilateur dans un circuit
- Etude de s pertes de charge
- Choix du ventilateur

Pour mettre en mouvement un fluide dans un circuit, il faut lui communiquer une charge correspondante à l'aide d'un générateur tel que, pompe, compresseur, ventilateur et aspirateur.

Cette charge est généralement employée pour :

1. Compenser la différence des pressions dans les espaces d'aspiration et de refoulement.

.. Surmonter la charge excédentaire due à la pesanteur, c'est à dire à élever le fluide qui est plus lourd que l'air atmosphérique à une hauteur.

.. Créer une pression dynamique à la sortie du réseau si le circuit est ouvert.

Dans le rôle du ventilateur dans un circuit est de surmonter les pertes de charge dans ce dernier.

Alors, on peut fixer une vitesse dans la chambre d'expérience et calculer en fonction d'elle, la perte de charge totale, sur laquelle on se base pour le choix du ventilateur.

## IV.2. ETUDE DE PERTE DE CHARGE :

### IV.2.1. INTRODUCTION :

Il n'y a pratiquement pas une seule branche de la technique qui ne soit plus au moins intéressée par la nécessité du déplacement des liquides et des gaz dans des conduites, des canaux et divers appareils.

Le degré de complexité des réseaux hydrauliques ou de transport de fluide, peut être donc le plus divers.

Souvent, tout le réseau dans lequel se déplace le fluide forme un seul groupe, exemple, chaudière, échangeur de chaleur, souffleries aérodynamiques, etc...

- .. Dans notre cas, on dispose d'une soufflerie aérodynamique déjà décrite ci-dessus, dont on veut calculer la perte de charge.
- .. Puisque la soufflerie est à faible vitesse, on peut négliger la variation de la pression et de la température le long du circuit dans le calcul hydraulique. C'est pourquoi, il est commode d'utiliser ici, la méthode de sommation des coefficients réduits de pertes de charge des divers éléments du réseau.

#### IV.2.2. Perte de charge dans les conduite.

La perte de charge dans les mouvement d'un fluide en régime laminaire est déterminée par la force de frottement interne, apparaissant quand une couche de celui-ci se déplace par rapport à une autre. Ces forces sont directement proportionnelles à la vitesse de l'écoulement. Pour cette raison, si elle n'est pas grande; la rugosité des parois n'a aucun effet sur la grandeur de la perte de charge par frottement dans ce régime dépend toujours du nombre de Reynolds,  $Re$ .

Quand  $Re$  augmente les forces d'inertie proportionnelles au carré de la vitesse commençant à prédominer; alors apparaît le mouvement turbulent.

En régime turbulent, la perte de charge due au mouvement conditionné par le transfert de quantité de mouvement des masses du fluide qui se déplace d'une manière désordonnée, est de plusieurs fois plus grande qu'en régime laminaire.

Dans le cas des parois rugueuses, le coefficient de perte de charge dépend non seulement de  $Re$ , mais aussi de la rugosité relative.

Pratiquement, les conduites peuvent être à parois lisses ou rugueuses.

Il y a deux sortes de pertes de charge :

..la perte de charge par friction due au frottement du fluide contre les parois de la conduite (conséquence de la couche limite)

;; La perte de charge singulière, liée soit à la forme de la conduite soit à l'obstacle qu'on intercale dans les conduites pour des raisons pratiques et de mesure.

Dans les deux cas, il faut remarquer que l'état de la surface a une importance capitale.

On rappelle que, d'après la référence 2 :

..la perte de charge par frottement a pour expression;

$$\Delta H = \lambda \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

..La perte de charge singulière a pour expression

$$\Delta H = \xi \frac{V^2}{2g}$$

#### IV.2.3. Calcul de perte de charge

##### IV.2.3.1. Hypothèses

\*Conduites à parois lisses du point de vue industriel.

\*Écoulement incompressible.

\*Vitesse dans la chambre d'expérience fixée à 80 m/s

##### IV.2.3.2 Conduites rectangulaires

La perte de charge dans une conduite à section droite rectangulaire est réduite aux pertes par friction.

Alors, la perte de charge, ici, dépend seulement du régime de l'écoulement.

## IV.2.3.2.1 Calcul du nombre de Reynolds Re

Le nombre de Reynolds est un nombre sans dimensionné par:

$$Re = \frac{V D_H}{\nu}$$

Réf.(2)  $\nu = 15,110 \text{ m}^2/\text{s}$

$$D_H = 2 \frac{a \cdot b}{a+b}$$

- Conduite 1

$$D_{H1} = 2 \frac{0,5 \cdot 0,7}{0,5 + 0,7} = 0,584 \text{ m.}$$

$$Re = \frac{80 \cdot 0,584}{15,1 \cdot 10^{-6}} = 3,1 \cdot 10^6$$

- Conduite 2

$$D_{H2} = 2 \frac{0,7 \cdot 0,9}{0,7 + 0,9} = 0,7875 \text{ m}; \quad V_2 = \frac{S_1 V_1}{S_2} = \frac{0,35 \cdot 80}{0,63}$$

$$Re = \frac{44,5 \cdot 0,7875}{15,1 \cdot 10^{-6}} = 2,32 \cdot 10^6 \quad V_2 = 44,5 \text{ m/s}$$

IV.2.3.2.2 Détermination de  $\lambda$ 

Le coefficient de perte de charge par frottement pour des conduites à parois lisses du point de vue industriel pour  $Re > 4000$  (régime turbulent), est calculé d'après la formule de FILONENKO-AL'TSUL. :

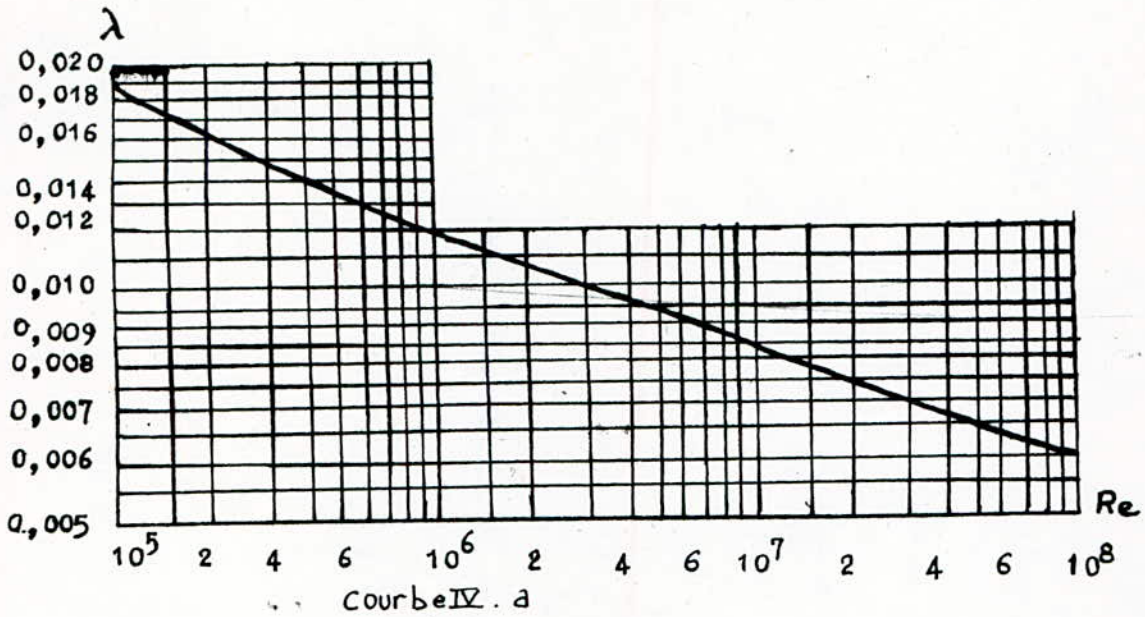
$$\lambda = \frac{1}{(1,8 \log Re - 1,64)^2}$$

Donc

$$\lambda_1 = 0,010$$

$$\lambda_2 = 0,0103$$





Re	$2 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3$	$10^4$
$\lambda$	0,052	0,046	0,045	0,041	0,038	0,036	0,033	0,032
Re	$1,5 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^4$	$10^5$
$\lambda$	0,028	0,026	0,024	0,022	0,021	0,020	0,019	0,018
Re	$1,5 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^5$	$10^6$
$\lambda$	0,017	0,016	0,014	0,013	0,013	0,013	0,012	0,012
Re	$1,5 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^6$	$8 \cdot 10^6$	$10^7$
$\lambda$	0,011	0,011	0,010	0,010	0,009	0,008	0,008	0,008
Re	$2 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^7$	$6 \cdot 10^7$	$10^8$				
$\lambda$	0,008	0,007	0,007	0,006				

Tableau IV.

$$\Delta H_1 = \lambda_1 \frac{L_1}{D_{H1}} \cdot \frac{V_1^2}{2g}$$

$$= 0,010 \cdot \frac{34}{0,584} \cdot \frac{80^2}{20} = 18,63 \text{ m de colonne d'air.}$$

$$\Delta H_2 = \lambda_2 \frac{L_2}{D_{H2}} \cdot \frac{V_2^2}{2g}$$

$$= 0,0103 \cdot \frac{1,9}{0,7875} \cdot \frac{(44,5)^2}{20} = 2,46 \text{ de colonne d'air}$$

#### IV.3.3 Convergent (3.4)

A la sortie du convergent la répartition des vitesses est presque uniforme, alors, il tend à égaliser les vitesses.

Si le rétrécissement de la section est parfaitement régulier, quand l'angle de rétrécissement est très faible, ou la partie qui se rétrécit est suffisamment longue, ainsi que lorsque cette partie a une génératrice curviligne très allongée, le courant ne décollera pas et les pertes se réduisent aux pertes par friction.

D'après la référence 2, le coefficient de perte de charge par frottement d'un convergent est donné par:

$$\xi = \frac{\lambda}{4 \sin \frac{\alpha}{2}} \left[ \frac{a_0}{b_0} \left( 1 - \frac{S_1}{S_0} \right) + 0,5 \left\{ 1 - \left( \frac{S_1}{S_0} \right)^2 \right\} \right]$$

$\lambda$  doit être déterminé des diagrammes 2.2 à 2.5 Référence 2, mais on peut prendre la valeur moyenne, entre  $S_1$  et  $S_0$  car on sait que  $\lambda$  passe de 0,0103 à 0,010

Convergent 3

$$\lambda_3 = \frac{0,0103 + 0,010}{2} = 0,0102$$

$$S_0 = 0,63 \text{ m}^2$$

$$S_1 = 0,35 \text{ m}^2$$

$$a_0 = 0,7 \text{ m}$$

$$b_0 = 0,9 \text{ m}$$

$$\frac{\alpha}{2} = 7^\circ$$

$$L_c = 0,7 \text{ m}$$

$$f_3 = \frac{0,0102}{4 \sin 7} \left[ \frac{0,7}{0,9} \left( 1 - \frac{0,35}{0,63} \right) + 0,5 \left\{ 1 - \left( \frac{0,35}{0,63} \right)^2 \right\} \right]$$

$$f_3 = 0,0163$$

$$\Delta H_3 = f_3 \frac{V_0^2}{2g} = 0,0163 \cdot \frac{44,5^2}{20} = 1,61 \text{ m}$$

$$\Delta H_3 = 1,63 \text{ m de colonne d'air}$$

Convergent 4) assure le passage de la section circulaire à la section rectangulaire.

$$S_0 = \frac{\pi D^2}{4} \text{ avec } D_1 = 1,3 \text{ m}$$

$$S = 1,33 \text{ m}^2$$

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{2 \sqrt{D_0 - \frac{a_1 b_1}{\pi}}}{2 \cdot L_c}$$

Référence 2.

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{2 \sqrt{1,3 - \frac{0,7 \cdot 0,9}{\pi}}}{2 \cdot 0,7} = 1,27$$

$$\frac{\alpha}{2} = 52 \text{ angle équivalent.}$$

Détermination de  $\lambda$

Re correspondant à la section circulaire

$$V_0 = 21,1 \text{ m/s } D_H = 1,3 \text{ m}$$

$$Re = \frac{V_0 D_H}{\nu} = 1,82 \cdot 10^6$$

$$\lambda = 0,011, \text{ graphe IV a}$$

Donc moyenne

$$\lambda_{\text{moy}} = \frac{0,011 + 0,011}{2} = 0,011.$$

$$\xi_4 = \frac{0,011}{48 \sin 52} \left[ \left( 1 - \frac{0,63}{1,33} \right) + 0,5 \left\{ 1 - \left( \frac{0,63}{1,33} \right)^2 \right\} \right] = 3,2 \cdot 10^{-3}$$

$$\Delta H_4 = \xi_4 \frac{V_0^2}{2g} \quad \text{avec} \quad V_0 = 21,1 \text{ m/p.}$$

$$\Delta H_4 = 3,2 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{21,1^2}{20} = 0,71 \text{ m de colonne d'air}$$

$$\Delta H_4 = 0,71 \text{ m de colonne d'air}$$

#### IV .3.4. Divergents ( 5.6)

Un divergent modifie beaucoup la repartition des vitesses dans la section. Cette répartition présente un maximum situé sur l'axe et de plus en plus poitu si on s'éloigne de l'entrée du divergent.

La perte de charge globale dans un divergent est considérée comme se composant de deux termes

..Perte de charge par frottement

..perte de charge singulière provenant de l'élargissement du courant

Alors le coefficient de perte de charge globale est donné comme la somme des deux pertes.

$$\xi_{\text{glbal}} = \xi_{\text{elarg}} + \xi_{\text{frott}}$$

D'après la référence 2  $\xi$  elarg s'exprime à l'aide du coefficient d'intensité du choc sous la forme

$$\xi_{\text{elarg}} = \xi_{\text{elarg}} \left(1 - \frac{S_0}{S_1}\right)^2$$

Si l'angle d'ouverture est compris entre  $0^\circ$  et  $40^\circ$

$$\xi = k \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \sqrt[4]{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}$$

K Coefficient caractérisant la forme de la section du divergent.

Pour des divergents pyramideaux avec élargissement sur deux plans, tant qu'on n'a pas de données expérimentales précises, il est proposé:

$$K \approx 4$$

$\xi_f$  Coefficient de perte de charge par frottement pour un divergent à section rectangulaire, dont les angles aux sommet sont identiques dans les deux plans, se calcule d'après la formule:

$$\xi_f = \frac{\lambda}{8 \sin \frac{\alpha}{2}} \cdot \left(1 - \frac{S_0}{S_1}\right)^2$$

Alors pour le coefficient de perte de charge global

$$\xi_{\text{global}} = \left( k \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \sqrt[4]{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} + \frac{\lambda}{8 \sin \frac{\alpha}{2}} \right) \left(1 - \frac{S_0}{S_1}\right)^2$$

Si le divergent est intercalé entre deux section géométriquement différentes on aura un angle d'élargissement équivalent donné par la formule suivante, pour le passage d'un rectangle à un cercle:

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{D_1 - 2 \sqrt{\frac{a_1 b_0}{x}}}{2 \cdot L_1}$$

Divergent 5

$$\xi_{\text{global}} = \left( k \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \sqrt[4]{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} + \frac{\lambda}{8 \sin \frac{\alpha}{2}} \right) \left(1 - \frac{S_0}{S_1}\right)^2$$

$$K = 4$$

$$\lambda = 0,011$$

$$S_0 = 0,35 \text{ m}^2$$

$$S_1 = 0,63 \text{ m}^2$$

$$\frac{\alpha}{2} = 10^\circ$$

$$\xi_{\text{global}} = \left( 4 \operatorname{tg} 10 \sqrt{\operatorname{tg} 10} + \frac{0,011}{8 \sin 10} \right) \left( 1 - \frac{0,35}{0,63} \right)^2$$

$$\xi_{\text{global}} = 0,092$$

$$\Delta H_5 = \xi_{\text{global}} \frac{V_0^2}{2g} \quad \text{avec. } V_0 = 80 \text{ m/s}$$

$$\Delta H_5 = 0,092 \cdot \frac{80^2}{20} = 29,44 \text{ m}$$

$$\Delta H_5 = 29,44 \text{ m de colonne d'air}$$

#### Divergent 6

Le divergent 6 assure le passage de la section rectangulaire à la section circulaire.

$\alpha$  équivalente est donné par

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{D_1 - 2 \sqrt{\frac{a_0 b_0}{\pi}}}{2 \cdot 0,75}$$

$$L_d = 0,75 \text{ m}$$

$$D_1 = 1,3 \text{ m}$$

$$a_0 = 0,7 \text{ m}$$

$$b_0 = 0,9 \text{ m}$$

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{1,3 - 2 \sqrt{\frac{0,7 \cdot 0,9}{\pi}}}{2 \cdot 0,75} = 0,26958$$

$$\frac{\alpha}{2} = 15^\circ$$

$$\lambda = 0,011$$

$$\xi_{\text{global}} = \left( 4 \operatorname{tg} 15 \sqrt[4]{\operatorname{tg} 15} + \frac{0,011}{8 \sin 15} \right) \left( 1 - \frac{0,63}{1,33} \right)^2$$

$$\xi_{\text{global}} = 0,41$$

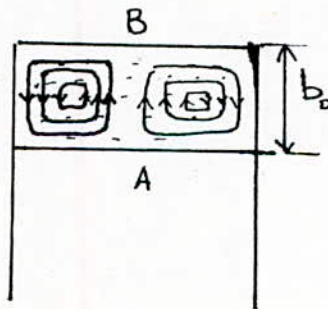
$$\Delta H_6 = \xi_6 \cdot \frac{V_0^2}{2g} = 0,41 \cdot \frac{44,5^2}{20} = 40,6 \text{ m.}$$

$$\Delta H_6 = 40,6 \text{ m de colonne d'air}$$

#### IV .3.5. Coude

En supposant que l'air est un fluide parfait, on aura un gradient de pression radial donné par l'expression

Le coude qu'en va étudier est à section rectangulaire : R étant le rayon de courbure d'une ligne de courant compté positivement à partir du centre de courbure.



La pression en B est supérieure à celle en A. Mais si, on se déplace de B vers A tout en restant dans le voisinage de la paroi, la vitesse restera toujours faible de sorte, que la variation de pression ne peut être équilibrée par une variation correspondante d'énergie cinétique.

Il s'ensuit que le fluide a tendance à couler de B vers A en suivant les parois.

Alors il se produit une perte de charge importante .

Une grille d'aubes directives installée dans un coude à parois paralleles fait dévier l'ecoulement vers la paroi intérieure par suite des farces aérodynamiques qui s'y développent. Par unchoix correct des dimensions des aubes, de leur nombre et de leur installation; cette déviation de l'écoulement prévient le décollement de la veine des parois et la formation de tourbillons, par la suite, la répartition des vitesses dans la section en aval d ucoude est meilleure, et la perte de charge diminue.

Alors, la perte de charge d'un coude est donnée par:

$$\Delta H = \xi_c \frac{V_0^2}{2g} \text{ avec } \xi_c = \xi_s + \xi_f$$

§ Coefficient de perte de charge singulière déterminé du tableau IV.2. en fonction de  $\frac{r}{b_0}$  référence 2

Avec n nombre d'aubes dans le coude, d'après la référence 2

- $n_1 = 2,13 \left(\frac{r}{b_0}\right)^{-1} - 1$  nombre d'aubes normal
- $n_2 = 1,4 \left(\frac{r}{b_0}\right)^{-1}$  nombre réduit le plus avantageux.
- $n_3 = 0,9 \left(\frac{r}{b_0}\right)^{-1}$  nombre minimal d'aubes

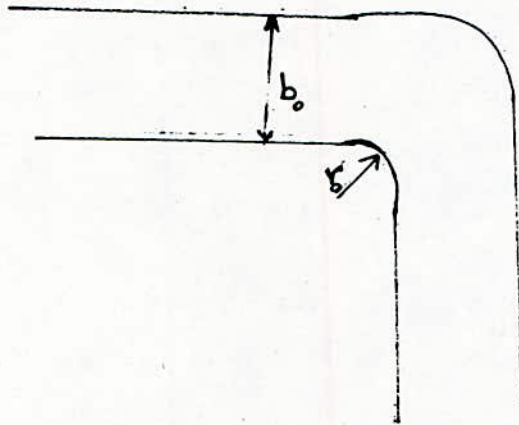
Le coefficient de perte de charge par frottement  $\xi_f$  est donné par la formule

$$\xi_f = \left(1 + 1,57 \frac{r}{b_0}\right) \lambda \text{ reference 2}$$

où peut être déterminé de la courbe IV a et le tableau IV 1



b	$\xi_s$		
	n <sub>1</sub> Normals	n <sub>2</sub> avantagoux	n <sub>3</sub> minimum
0	0,42	0,42	0,57
0,05	0,35	0,35	0,48
0,10	0,30	0,30	0,43
0,15	0,26	0,24	0,39
0,20	0,23	0,20	0,35
0,25	0,21	0,17	0,31
0,35	0,20	0,14	0,28



On dispose de quatre coudes avec

$$r = 0,1 \text{ m}$$

$$b = 0,9 \text{ m}$$

$$Re = \frac{V \cdot D_H}{\nu} = \frac{44,5 \cdot 0,7875}{15,1 \cdot 10^{-6}} = 2,32 \cdot 10^5.$$

$$D_H = 0,7875 \text{ m.}$$

$$\lambda = 0,0103$$

$n = 5$  aubes correspond à un nombre minimum.

Alors on peut trouver facilement  $\xi_s$  et  $\xi_f$

$$\xi_s = 0,42$$

$$\xi_f = 0,0121$$

donc  $\xi_g = \xi_s + \xi_f$   
 $= 0,42 + 0,0121 = 0,4321$

La perte de charge par coude est

$$\begin{aligned} \Delta H_c &= \xi_g \rho \frac{V_0^2}{2g} \\ &= 0,4321 \frac{44,5^2}{20} = 42,8 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\Delta H_c = 42,8 \text{ m de colonne d'air}$$

et enfin la perte de charge dans les quatre coudes est

$$\Delta H_t = \Delta H_c \times 4$$

$$\Delta H_t = 42,8 \times 4 = 171,2 \text{ m de colonne d'air}$$

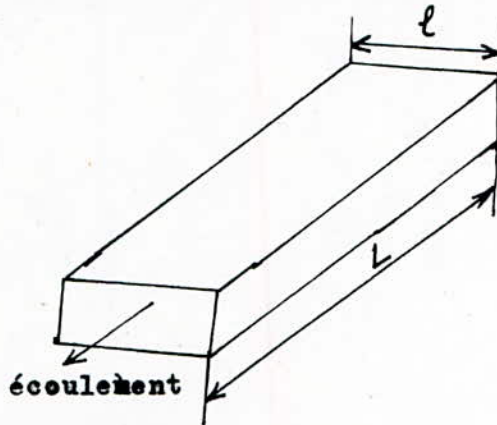
## IV.3.6. Grille en nid d'abeille

La grille en nid d'abeille régularise l'écoulement en provoquant des pertes de charge. Pour avoir un profil de vitesse uniforme dans la conduite.

D'après la référence 1 l'expression empirique donnant cette perte est:

$$\Delta H = 4 C_x \frac{V^2}{2g}$$

$C_x$  étant le coefficient de frottement qui est fonction du nombre de Reynolds  $Re$



$$C_x = \frac{0,074}{Re^{1/5}}$$

On obtient

Référence 1.

$$\Delta H = 4 C_x \frac{V^2}{2g} \beta$$

$\beta$  étant ici, le rapport entre la section d'une plaque et la section d'écoulement.

Dans la soufflerie il y a trois grilles, deux dans la partie supérieure et une dans la partie inférieure.

Grilles 2

$$Re_2 = \frac{VL}{\nu} \quad \text{avec } l = 0,15 \text{ m} \\ V = 44,5 \text{ m/s}$$

$$Re_2 = \frac{44,5 \cdot 0,15}{15,1 \cdot 10^{-6}} = 4,42 \cdot 10^5$$

$$C_x = \frac{0,074}{(4,42 \cdot 10^5)^{1/5}} = 0,0055$$

$$\beta = \frac{L \cdot l}{l^2} = \frac{L}{l} \quad \begin{array}{l} L = 0,15 \\ l = 0,1 \end{array}$$

$$\beta = \frac{0,15}{0,10} = 1,5$$

$$\Delta H_2 = 2 \left( 4 \cdot 0,0055 \cdot \frac{44,5^2}{20} \cdot 1,5 \right) = 6,53 \text{ m}$$

$$\Delta H_2 = 6,53 \text{ m de colonne d'air}$$

Grille 1

$$Re = \frac{80 \cdot 0,15}{15,1 \cdot 10^{-6}} = 8 \cdot 10^5$$

$$c_x = \frac{0,074}{(8 \cdot 10^5)^{1/5}} = 0,0049$$

$$\Delta H_1 = 4 \cdot 0,0049 \cdot \frac{80^2}{20} \cdot 1,5 = 9,41 \text{ m de colonne d'air.}$$

Alors

$$\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2$$

$$\Delta H = 9,41 \text{ m} + 6,53 \text{ m} = 16,02 \text{ M de colonne d'air}$$

On résume les résultats sur un tableau récapitulatif pour une meilleure comparaison des hauteurs en mètre de colonne d'air.

conduites rectangulaires	convergents	divergents	coudes	grilles
18,63 2,46	1,61 0,71	29,44 40,60	42,80 4	(3,265) · 2 9,41

En faisant la somme des pertes de charge, on trouve au total

$$\Delta H_E = 282 \text{ m de colonne d'air}$$

La correspondance en hauteur de colonne d'eau cette hauteur s'obtient en écrivant

$$\rho_{\text{air}} g \Delta H_E = \rho_{\text{eau}} g \Delta H'$$

$$\Delta H' = \frac{\rho_{\text{air}} \Delta H_E}{\rho_{\text{eau}}}$$

$$\Delta H' = \frac{1,22.282}{10^3} = 0,344 \text{ m de colonne d'eau}$$

avec  $\rho_{\text{air}} = 1,22 \text{ kg/m}^3$

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

Alors la différence de pression que doit assurer le ventilateur est donnée par

$$\Delta P = \rho_{\text{eau}} g \Delta H'$$

$$\Delta P = 10^3 \cdot 10 \cdot 0,344 = 0,344 \cdot 10^4 \text{ N/m}$$

$$\Delta = 0,0344 \cdot 10^5 \text{ N/m}$$

Cette valeur est dans le domaine de l'utilisation des ventilateurs, Car ces dernier créent des surpressions de l'ordre de :

$$\Delta P = 10^4 \text{ N/m}$$

#### IV.3. CHOIX DU VENTILATEUR

Le choix du ventilateur se fait selon les caractéristiques suivantes :

- Le débit en volume.
- La hauteur manométrique.
- La vitesse de rotation.

Ainsi, le genre de construction du réseau.

D'après la construction qu'on possède, le ventilateur qu'on doit utiliser est axial. Ce genre de ventilateur, assure un débit important avec une charge un peu faible.

D'après la référence 5, on peut choisir un nombre de tours spécifiques qui varie entre 160 et 280 t/mn et on calcule la vitesse du ventilateur.

$$n_s = \frac{\sqrt{Q_v}}{H^{3/4}}$$

$$Q_v = S.V = 0,35.80 = 28 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$H = 282 \text{ m de colonne d'air.}$$

D'après la plage de  $\Delta p_g$ , on peut utiliser un ventilateur dont la vitesse de rotation varie entre 2000 t/mn et 3640 t/mn.

Etant donné que ce dernier est entraîné par un moteur électrique, on ne peut dépasser 3000 t/mn qu'il est possible d'atteindre avec la fréquence de 50 Hz.

Il est donc recommandé d'utiliser un moteur asynchrone de 2 paires de pôles, tournant à 3000 t/mn et qui est disponible sur le marché.

Ainsi le nombre de tours spécifique maximal du ventilateur utilisé est de :

$$n_s = \frac{3000 \cdot 28}{282 \cdot 0,75} = 230 \text{ tr/mn}$$

Le but de ce travail est atteint. La réalisation d'une sorte de tuyère convergente - divergente démontable de section de mesure pratiquement valable au essais aérodynamiques et la méthode très simple de refroidissement du système nous ont donné un travail rentable. On peut même dire que nous avons réalisé une nouvelle soufflerie de vitesse de 40 M/S.

La deuxième solution prévue est l'installation d'un ventilateur qui a pour rôle de surmonter les pertes de charge dans le circuit. Alors on a calculer les pertes de charge dans ce dernier après avoir fixé la vitesse d'écoulement dans la chambre de mesure à 80 M/S.

Ce calcul nous a conduit au choix d'un ventilateur dont la gamme de vitesse de rotation est dans l'intervalle (  $2080 \frac{0}{8}$  3000 Tr/Mn ). Ce qui facilite le choix du moteur électrique.

## BIBLIOGRAPHIE

- Réf. 1. Mécanique Expérimentale des Fluides -- Tomes 1 et 2 -  
( R. CONOLET ).
- Réf. 2. Mémento des Pertes de Charge ( I.E. IDEL'CIK ).
- Réf. 3. Mécanique des Fluides appliquée ( R. OUZIAUX et J. PERRIER ).
- Réf. 4. Aérodynamique Expérimentale ( R. REBUFET ).
- Réf. 5. Machine Transformatrice d'Energie ( R. BASQUIN ).



