

SÉRIE  
N° D'ORDRE :  
5

# THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES  
DE L'UNIVERSITÉ DE LILLE

POUR OBTENIR

LE TITRE D'INGÉNIEUR-DOCTEUR

PAR

**JEAN DEMONTIS**

LICENCIÉ ÈS SCIENCES — INGÉNIEUR I. D. N.

## 1<sup>re</sup> THÈSE

RECHERCHES SUR L'INFLUENCE DE L'ANGLE D'OUVERTURE  
D'UN AJUTAGE DIVERGENT SUR L'ÉCOULEMENT A DEUX DIMENSIONS  
DE L'AIR A TRAVERS CET AJUTAGE

## 2<sup>e</sup> THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

LES PHÉNOMÈNES DE RÉSONANCE EN MÉCANIQUE

Soutenues le *A* Mars 1936, devant la Commission d'Examen

Jury. { MM. KAMPÉ de FÉRIET } *Président.*  
          { MAZET }  
          { MARTINOT-LAGARDE } *Examineurs.*  
          { LAPRESLE }



RECHERCHES  
sur L'INFLUENCE de l'ANGLE d'OUVERTURE  
d'un AJUTAGE DIVERGENT  
sur l'écoulement à deux dimensions de l'air  
à travers cet ajutage

---



SÉRIE  
N° D'ORDRE :

5

# THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES  
DE L'UNIVERSITÉ DE LILLE

POUR OBTENIR

LE TITRE D'INGÉNIEUR-DOCTEUR

PAR

**JEAN DEMONTIS**

LICENCIÉ ÈS SCIENCES — INGÉNIEUR I. D. N.

## 1<sup>re</sup> THÈSE

RECHERCHES SUR L'INFLUENCE DE L'ANGLE D'OUVERTURE  
D'UN AJUTAGE DIVERGENT SUR L'ÉCOULEMENT A DEUX DIMENSIONS  
DE L'AIR A TRAVERS CET AJUTAGE

## 2<sup>e</sup> THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

LES PHÉNOMÈNES DE RÉSONANCE EN MÉCANIQUE

Soutenues le *A* Mars 1936, devant la Commission d'Examen

Jury. { MM. KAMPÉ de FÉRIET } *Président.*  
          { MAZET }  
          { MARTINOT-LAGARDE } *Examineurs.*  
          { LAPRESLE }

# FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE LILLE

---

MM.

*Doyen* : MAIGE, botanique générale et appliquée.

*Assesseur* : MALAQUIN, zoologie générale et appliquée.

*Professeurs honoraires* : HALLEZ, CHATELET, BARROIS, BRUHAT, FOSSE, PASCAL, PAUTHENIER, PAILLOT, BÉGHIN, CHAZY.

*Maître de Conférences honoraire* : QUINET.

	SWYNGEDAUF.....	Physique et électricité industrielles.
	GAMBIER.....	Calcul différentiel et intégral.
	BERTRAND.....	Paléobotanique.
	LERICHE.....	Géologie générale et géographie physique.
	DEHORNE.....	Histologie et embryologie comparées.
	PRUVOST.....	Géologie et minéralogie.
	JOUNIAUX.....	Chimie analytique et agricole.
<i>Professeurs</i> .....	CHAUDRON.....	Chimie appliquée à l'Industrie et à l'Agriculture.
	N.....	Physique générale.
	KAMPÉ DE FÉRIET..	Mécanique des fluides.
	CHAPELON.....	Mécanique rationnelle et calcul des probabilités.
	GALLISSOT.....	Mathématiques appliquées et Astronomie.
	CAU.....	Physique expérimentale.
	LAMBREY.....	Radiotélégraphie.
<i>Professeurs sans chaire</i> .....	DOLLÉ.....	Hydrogéologie.
	DUPARQUE.....	Pétrographie des roches combustibles.
	MAZET.....	Mécanique.
	LEFEBVRE.....	Chimie de la houille.
	DECARRIÈRE.....	Chimie générale.
<i>Maîtres de conférences et</i>	FRANÇOIS.....	Chimie générale.
<i>Chargés de cours</i> ....	HOCQUETTE.....	Botanique agricole.
	ROUELLE.....	Mécanique physique et électricité industrielle.
	DUTERTRE.....	Géologie générale et géographie physique.
	MARTINOT-LAGARDE.	Mécanique des fluides.
	PRÉVOST.....	Chimie générale.

*Chargé du Secrétariat de la Faculté des Sciences* : DONNART.

*Secrétaire honoraire* : LEBRUN.

A mon PÈRE

A ma MÈRE

A ma SŒUR

*en témoignage de mon affection*



A mes Maîtres

M. KAMPÉ de FÉRIET

M. MARTINOT-LAGARDE

*en témoignage de ma respectueuse gratitude*



# TABLE DES MATIÈRES

	PAGES
INTRODUCTION . . . . .	1
RÉSUMÉ . . . . .	3
<b>CHAPITRE PREMIER</b>	
<b>Analyse des principales recherches expérimentales sur l'écoulement dans les tuyaux divergents</b> . . . . .	7
<b>CHAPITRE II</b>	
<b>Description des souffleries</b> . . . . .	21
I. — Soufflerie par refoulement . . . . .	21
II. — Soufflerie par aspiration . . . . .	22
<b>CHAPITRE III</b>	
<b>Description des appareils de mesure</b> . . . . .	24
I. — Manomètres . . . . .	24
II. — Sondes aérodynamiques . . . . .	25
<b>CHAPITRE IV</b>	
<b>Visualisation de l'écoulement</b> . . . . .	27
I. — Obtention des spectres d'air chaud . . . . .	27
II. — Exemples de spectres . . . . .	28
III. — Observation des différents régimes d'écoulement . . . . .	31
<b>CHAPITRE V</b>	
<b>Distribution de la pression statique dans le divergent de la soufflerie par refoulement</b> . . . . .	34
<b>CHAPITRE VI</b>	
<b>Étude du champ aérodynamique</b> . . . . .	39
I. — Distribution des vitesses . . . . .	39
II. — Distribution de la pression statique . . . . .	47
III. — Distribution de la pression totale . . . . .	47
IV. — Étude de la turbulence. . . . .	49
<b>CHAPITRE VII</b>	
<b>Rendement</b> . . . . .	53
<b>CHAPITRE VIII</b>	
<b>Réalisation d'un écoulement très turbulent.</b> . . . . .	57
I. — Distribution de la pression totale, de la pression statique et des vitesses . . . . .	60
II. — Turbulence . . . . .	61
III. — Rendement. . . . .	63



## INTRODUCTION

---

Le sujet de ces recherches a été suggéré par M. l'Ingénieur en Chef LAPRESLE, Directeur de l'Etablissement d'Expériences Techniques de Chalais-Meudon.

L'ensemble de ce travail a été entièrement réalisé dans les laboratoires de l'Institut de Mécanique des Fluides de l'Université de Lille; du 1<sup>er</sup> décembre 1931 au 1<sup>er</sup> avril 1934 dans les locaux provisoires de la rue Gauthier-de-Châtillon; depuis cette date, dans un des laboratoires des nouveaux bâtiments du boulevard Paul-Painlevé.

C'est pour moi un devoir très agréable d'exprimer ma respectueuse gratitude à M. KAMPÉ DE FÉRIET, Directeur de l'Institut, pour le bienveillant appui qu'il m'a accordé pendant toute la durée de ces recherches, en mettant à ma disposition toutes les ressources expérimentales dont l'Institut pouvait disposer. A l'occasion de la rédaction de ses rapports au Service des Recherches pour la direction de mon étude, il m'a souvent amené à préciser mes idées et à faire l'étude critique des résultats d'expériences; je ne saurais trop le remercier du service qu'il m'a ainsi rendu.

Je tiens aussi à exprimer ma très profonde reconnaissance à M. MARTINOT-LAGARDE, Maître de Conférences à la Faculté des Sciences, dont les suggestions, les conseils et les critiques ont joué un rôle essentiel dans le développement de mes idées; sa haute compétence en aérodynamique expérimentale m'a été particulièrement précieuse.

J'ai réalisé un ajutage convergent-divergent, dont la paroi supérieure et la paroi inférieure (*fig. 4 et 5*) ont un profil de forme comparable au profil d'un extradós d'aile; j'ai, de cette manière, étudié l'écoulement à deux dimensions, entre ces deux surfaces d'extrados symétriques par rapport à l'axe longitudinal de l'ajutage.

Ce travail peut donc être envisagé comme une *avant-étude de l'allure de l'écoulement* sur l'extrados d'une aile d'avion et, en particulier, du décollement qui se produit aux grands angles d'incidence.

On sait en effet que, quand l'inclinaison d'une aile sur le vent augmente au delà d'un certain angle critique, l'air décolle sur l'extrados; le fluide placé au voisinage immédiat de l'extrados ne participe plus à l'écoulement proprement dit, il donne lieu à un courant de retour, ce courant étant lui-même animé de mouvements tourbillonnaires.

Au-dessus de l'angle critique de décollement la sustentation diminue rapidement, le phénomène de la perte de vitesse d'un avion qui en est une conséquence, se produit si l'on franchit cet angle critique.

Il est, par suite, important de connaître les circonstances qui favorisent ou empêchent le décollement; la connaissance de ces circonstances peut mettre sur la voie de dispositifs susceptibles d'améliorer l'écoulement sur l'extrados d'une aile; ces dispositifs, dits hypersustentateurs, doivent permettre d'augmenter la valeur de l'angle d'incidence à partir duquel le décollement se produit.

Enfin, les souffleries aérodynamiques modernes, établies d'après les principes de la soufflerie par aspiration du type Eiffel, comportent un ajutage divergent ou diffuseur.

Ce diffuseur procure une réduction du travail que doit effectuer l'hélice-ventilateur, placée dans sa section de sortie, grâce à la transformation en énergie potentielle d'une partie de l'énergie cinétique de l'air qui traverse la chambre d'expérience.

Pour augmenter l'action du diffuseur, on est conduit à prendre un rapport, entre les sections de sortie et d'entrée du diffuseur, le plus grand possible; il suffit pour cela d'augmenter soit l'angle d'ouverture du diffuseur, soit sa longueur ou les deux à la fois.

Mais, quand on dépasse un certain angle d'ouverture, la veine fluide décolle des parois divergentes et la perte d'énergie dans le diffuseur augmente considérablement.

Si on allonge trop le diffuseur, en dehors du plus grand encombrement qui s'ensuit, le frottement sur les parois devient excessif d'où accroissement des pertes d'énergie.

On voit donc combien est délicat le choix des caractéristiques d'un diffuseur de soufflerie aérodynamique si l'on veut que son rendement soit voisin du rendement maximum pratiquement réalisable.

Remarquons que le rendement de la transformation d'énergie dans un diffuseur donné, dépend de l'évolution du profil des vitesses.

Si à l'entrée du diffuseur la répartition des vitesses est uniforme, le long du diffuseur la vitesse est maximum au voisinage de l'axe et le rapport  $\frac{V_M}{V_m}$ , de la vitesse maximum  $V_M$  dans une section à la vitesse moyenne  $V_m$  dans la même section, devient de plus en plus grand. Cette déformation du profil des vitesses entraîne un accroissement de l'énergie cinétique aux dépens de l'énergie potentielle; la pression croît alors moins vite que dans un diffuseur parfait où, par un artifice déterminé, on maintiendrait la répartition uniforme des vitesses existant à l'entrée du diffuseur jusqu'à la sortie.

Je me suis donc proposé d'étudier l'écoulement de l'air à travers un ajutage divergent plan, dont l'angle d'ouverture est réglable, en mesurant les distributions de vitesse et de pression le long du diffuseur.

Cette étude a été menée parallèlement avec la recherche de procédés propres à améliorer la distribution des vitesses dans la section de sortie du diffuseur et, par suite, susceptibles d'augmenter le rendement d'un diffuseur.

## RÉSUMÉ

---

1. — J'ai réussi à compléter l'étude de l'écoulement à travers un divergent plan, faite par la méthode des mesures de distribution de vitesse et de pression, en y ajoutant l'observation des spectres aérodynamiques.

Après de nombreux essais de visualisation par fumée de tabac et de tétrachlorure de titane, j'ai finalement adopté la méthode des lames d'air chaud qui convient bien à l'étude des écoulements turbulents de vitesse supérieure à 10 m/s.

Entre autres résultats, obtenus grâce aux spectres d'air chaud j'ai pu, pour les faibles vitesses, déterminer la position approximative du point de décollement et, d'une façon générale, m'assurer à partir de quel angle d'ouverture totale  $\alpha$  du divergent se produit un décollement.

L'angle d'ouverture correspondant au début du décollement est indépendant de la vitesse du courant d'air. Cependant, la position du point de décollement dépend de la vitesse : si la vitesse croît progressivement à partir de la plus petite vitesse réalisable, le point de décollement se déplace d'abord vers l'amont, puis devient très instable, si la vitesse continue à monter, le point de décollement semble ensuite se déplacer vers l'aval. .

J'ai considéré deux types de divergents, pour l'un le mouvement de l'air est obtenu par refoulement, le décollement se produit à partir de  $\alpha = 22^\circ$ , pour l'autre le mouvement de l'air est obtenu par aspiration, le décollement se produit à partir de  $\alpha = 19^\circ$ . Comme la turbulence avec le ventilateur en amont est plus grande que dans l'autre cas, on voit qu'un accroissement de turbulence peut empêcher la formation du courant de retour, c'est d'ailleurs là un résultat bien connu.

Les angles de décollement précédents —  $19$  et  $22^\circ$  — sont notablement supérieurs aux angles de décollement indiqués dans les travaux expérimentaux antérieurs se rapportant aussi à un divergent plan :

GIBSON : angle de décollement vers  $11^\circ$ .

KRONER : angle de décollement compris entre  $12$  et  $24^\circ$ .

VEDERNIKOFF : angle de décollement vers  $15^\circ$ .

MARGOULIS : il observe déjà un décollement dans un diffuseur de  $8^\circ$  d'ouverture.

Plusieurs expérimentateurs, KRONER, VEDERNIKOFF, NIKURADSE et MARGOULIS ont obtenu un décollement dissymétrique.

J'ai également observé un décollement dissymétrique : le décollement a toujours lieu sur le plan supérieur du divergent, sauf dans le cas bien déterminé où le mouvement de l'air est obtenu par aspiration et où l'ouverture  $\alpha$  est de  $25^\circ$ .

Dans ce cas seulement, où  $\alpha = 25^\circ$ , l'air peut décoller soit sur un plan, soit sur l'autre; il décolle sur le plan supérieur quand on établit le courant d'air progressivement et sur le plan inférieur si l'on établit brusquement le courant d'air. D'ailleurs, le régime avec décollement sur le plan inférieur est métastable, il disparaît si l'on crée un remous artificiel en amont de l'ajutage.

2. — J'ai mesuré, le long du plan supérieur du divergent, la distribution de la pression statique pour des angles d'ouverture variant de  $0$  à  $30^\circ$ ; les pressions sont mesurées simultanément en seize points où se trouvent de petites ouvertures pratiquées dans la paroi, et reliées à un manomètre multiple dont les niveaux sont enregistrés photographiquement.

Les niveaux deviennent instables pour un angle d'ouverture égal à l'angle de décollement; au surplus, à partir de cet angle, les dépressions statiques moyennes par rapport au temps diminuent.

Un manomètre enregistreur m'a permis d'étudier les variations relatives de l'amplitude des oscillations de pression statique dans la veine divergente; à un accroissement de la stabilité du courant de retour et du volume qu'il occupe, correspond une augmentation de l'amplitude des oscillations de la pression statique; dès qu'on donne à  $\alpha$  une valeur inférieure à l'angle de décollement, ces oscillations ne sont plus sensibles.

Les variations, en fonction de  $\alpha$ , de l'amplitude des oscillations de la pression statique mesurée le long des plans divergents et dans la veine même, sont donc en accord complet avec les résultats de la visualisation relatifs à l'angle de décollement.

3. — J'ai relevé le champ des vitesses dans la veine divergente. A l'entrée du divergent, quand l'angle d'ouverture croît, la courbure des filets d'air croît en même temps et le profil des vitesses dans cette section se déforme; il présente un minimum sur l'axe et un maximum près de chaque paroi divergente.

Le profil des vitesses à la sortie du diffuseur dépend de cette distribution particulière des vitesses à l'entrée : à la sortie, il n'existe plus qu'un maximum au voisinage de l'axe, mais la valeur du rapport  $\frac{V_M}{V_m}$  est inférieure à celle qu'il aurait si la vitesse était uniforme au col.

Enfin, les profils des vitesses confirment la position du point de décollement et l'épaisseur du courant de retour déterminées au moyen de la visualisation.

Dans le cas du décollement, j'ai obtenu une loi de distribution des vitesses pour le fluide adjacent au courant de retour; cette loi est représentée en coordonnées logarithmiques par une droite.

4. — J'ai aussi relevé les courbes de pression totale, avec une ouverture  $\alpha = 30^\circ$ , dans cinq sections situées le long du divergent.

Il existe dans le diffuseur un noyau d'air où la pression totale est constante dans chaque section, mais inférieure à la pression totale au col; à la sortie, la diminution de la pression totale à l'intérieur de ce noyau, par rapport à la pression totale au col, est de 7 % de la pression dynamique moyenne au col.

Les enregistrements de la pression totale, faits à l'aide du manomètre enregistreur, montrent que l'amplitude des oscillations de la pression totale, ne change pas quand, par suite d'une modification de l'angle d'ouverture, on passe du régime sans décollement au régime avec décollement; elle ne dépend que des conditions en amont de l'ajutage.

5. — J'appelle *rendement*, le rapport de l'accroissement de pression statique dans le diffuseur, à la pression dynamique au col (voir définition exacte du rendement au chapitre VII). Je l'ai calculé pour des angles d'ouverture allant de 0 à 30°.

Avec l'écoulement par refoulement, le rendement maximum de 55,4 % a lieu quand  $\alpha = 22^\circ$ ; avec l'écoulement par aspiration, le rendement maximum de 69 % a lieu quand  $\alpha = 19^\circ$ .

Il est à remarquer que l'angle de rendement maximum est égal à l'angle du début du décollement.

6. — J'ai modifié l'allure de l'écoulement dans le divergent avec aspiration, d'ouverture  $\alpha = 31^\circ$ , en posant des volets (*fig.* 30 et 31) en amont de l'ajutage.

Ces volets augmentent la turbulence dans le divergent. De plus, un volet supérieur peut supprimer le décollement sur le plan supérieur, toutefois le décollement s'établit aussitôt sur le plan inférieur; si l'on ajoute un volet inférieur, ce dernier décollement peut à son tour être supprimé. J'ai ainsi réalisé, grâce à un dispositif de deux volets, un écoulement sans aucun décollement dans le divergent d'ouverture :  $\alpha = 31^\circ$ .

Si je place seulement un volet supérieur, relativement petit, deux régimes sont possibles : un régime avec décollement sur le plan inférieur qui correspond au démarrage lent du ventilateur, un régime avec décollement sur le plan supérieur qui correspond au démarrage brusque.

Si le volet supérieur, seul en place, est assez grand, le décollement a toujours lieu sur le plan inférieur, mais le régime définitif ne s'établit pas directement, quand on met le ventilateur en route. Pendant le démarrage, on observe d'abord le long du plan supérieur un écoulement sans décollement, puis il se forme près de la sortie une zone de courant de retour qui disparaît ensuite.

Dans le divergent d'ouverture  $\alpha = 31^\circ$ , avec deux volets de façon qu'il n'y ait pas de décollement, le rendement est de 85,7 % à peine inférieur à celui de 88 % du diffuseur parfait.

---



## CHAPITRE PREMIER

---

# ANALYSE des PRINCIPALES RECHERCHES EXPÉRIMENTALES sur l'ÉCOULEMENT dans les TUYAUX DIVERGENTS

(Voir " Bibliographie " à la fin de ce chapitre)

---

Voici, dans l'ordre historique, quelques résultats essentiels obtenus à la suite des recherches, faites avant nous, sur l'écoulement de l'eau ou de l'air dans les tuyaux à parois divergentes.

KRONER, RIFFART, MARTINOT-LAGARDE, VEDERNIKOFF, DONCH, GRUSCHWITZ, MARGOULIS opèrent avec l'air, ANDRES, GIBSON, HOCHSCHILD et NIKURADSE avec l'eau.

ANDRES mesure l'augmentation de pression le long de l'axe d'un diffuseur, il déduit la variation du rendement défini par l'augmentation réelle de pression depuis le col jusqu'à la sortie rapportée à l'augmentation idéale donnée par l'équation de BERNOULLI pour l'écoulement sans perte de charge. Il mesure la perte par frottement en faisant passer l'eau en sens inverse, de façon à supprimer la perte par décollement.

En créant une perturbation à l'amont à l'aide d'un obstacle, on obtient un meilleur rendement, conformément aux travaux de PRANDTL, par suite de la production d'une couche limite turbulente.

GIBSON étudie l'influence de l'angle d'ouverture  $\alpha$  d'un tuyau divergent sur la perte de charge dans ce tuyau; il a expérimenté une série de tuyaux divergents à section circulaire, puis carrée et, enfin, rectangulaire, c'est-à-dire avec deux parois parallèles; les aires des sections d'entrée et de sortie de tous les divergents utilisés sont égales respectivement à celles des cercles de diamètres 45 et 90 centimètres.

Cet auteur exprime la perte de charge en pour cent de l'expression  $\frac{(V_1 - V_2)^2}{2g}$  dans laquelle  $V_1$  désigne la vitesse moyenne à l'entrée du divergent et  $V_2$  à la sortie. Les expériences sont faites dans le domaine des vitesses à l'entrée  $V_1$  de 1,5 m/s à 6,90 m/s, à l'intérieur duquel le pourcentage des pertes reste sensiblement constant. La *figure 1* représente les variations de la perte de charge en fonction de la longueur des différents divergents dont les aires des sections d'entrée sont égales, ainsi que les aires des sections de sortie.

A. — Les divergents à section circulaire ont des angles d'ouverture allant de  $3^\circ$  à  $180^\circ$ . L'auteur trouve un minimum de perte, égal à 13,5 % quand  $\alpha = 5^\circ 30'$ ; la perte croît rapidement avec  $\alpha$  jusqu'à un maximum de 121 % quand  $\alpha = 63^\circ$ ; la perte diminue ensuite, elle est de 101,7 % avec  $\alpha = 180^\circ$ , c'est-à-dire quand se produit un changement brusque de section.

Cet auteur a essayé un divergent de section circulaire en forme de trompette, la perte est de 23,5 % au lieu de 17,3 % dans le tuyau tronconique, de même longueur, ayant un angle d'ouverture de  $10^\circ$ .

B. — Les divergents carrés et rectangulaires ont des angles d'ouverture de 5, 10 et  $20^\circ$ .

La perte dans les tuyaux carrés est plus grande, au plus de 20 %, que dans les tuyaux tronconiques de même longueur (*fig. 1*). Le minimum de perte

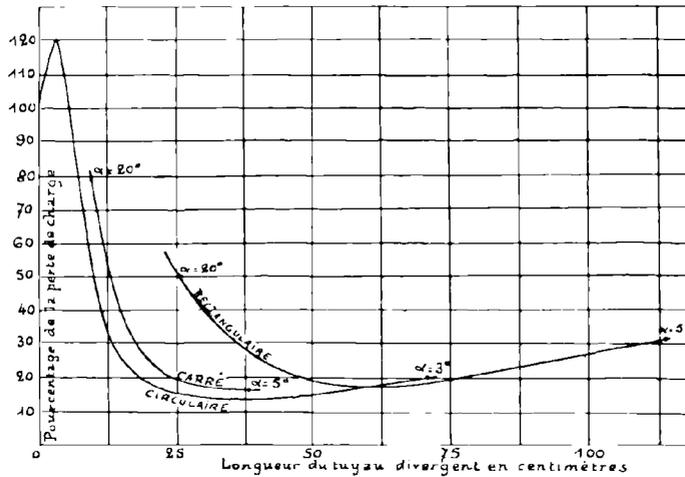


Fig. 1

est obtenu quand l'angle entre deux faces opposées du tuyau est approximativement  $4^\circ$ .

Cet auteur a expérimenté un tuyau possédant deux parois divergentes et deux parois convergentes; l'angle entre les parois divergentes est  $7^\circ 37'$  et l'angle entre les parois convergentes  $3^\circ 50'$ ; la section initiale est carrée et la section finale rectangulaire, l'aire des différentes sections le long du tuyau est constante. Il trouve une importante perte de charge égale à :  $0,484 \frac{V^2}{2g}$  soit 48,4 % de l'énergie cinétique dans ce tuyau.

C. — Quand un tuyau rectangulaire a une paire de parois parallèles l'autre paire étant divergente, la perte de charge est beaucoup plus grande que dans le tuyau circulaire de même longueur; son minimum se produit au voisinage de  $\alpha = 11^\circ$ .

On a comparé le tuyau rectangulaire d'ouverture 20° avec deux tuyaux rectangulaires ayant même longueur et mêmes sections aux extrémités, mais dont le profil des parois divergentes est calculé de façon à avoir pour l'un :

$$\frac{dV}{dt} = \text{constante le long du divergent et pour l'autre :}$$

$\frac{dV}{dx} = \text{constante}$ ; pour ce dernier, la variation de vitesse par unité de longueur doit être uniforme tout le long du divergent. La perte de charge dans ces deux tuyaux est réduite respectivement de 5,3 % et 12,1 %.

HOCHSCHILD étudie l'évolution de la pression mesurée par des ouvertures situées dans la paroi supérieure d'un canal divergent de hauteur constante. Il mesure également la répartition de l'énergie et de la vitesse dans différentes sections.

KRÖNER utilise une conduite de section carrée de 250 mm de côté, dans laquelle il intercale, à volonté, cinq ajutages de même hauteur, de même rapport entre la section d'entrée ou col, et la section de sortie du divergent. L'air est aspiré; la vitesse au col est d'environ 30 m/s. On mesure la vitesse avec un tube de Prandtl qu'on retourne de 180° pour mesurer les courants de retour. L'ajutage A a un élargissement brusque avec un rapport de sections de 3,62. Pour les autres ajutages où l'élargissement se fait avec deux parties droites symétriques, les caractéristiques sont (fig. 2) :

Ajutages	Largeur du col	Demi-angle d'ouverture	Rapport des sections
I	67,2 mm	45°	3,70
II	68,3 —	22°34'	3,64
III	67,7 —	12°	3,67
IV	67,4 —	5°53'	3,69

Cet auteur a mesuré la répartition des vitesses et des pressions; il trace les courbes de vitesses rapportées à la vitesse moyenne au col, dans différentes sections à des hauteurs de 10, 125, 240 mm. Il trace également les lignes d'égales vitesses dans les régions montrant de grandes inégalités de répartition de vitesse avec par exemple des courants de retour. Dans l'ajutage III, on observe encore des courants de retour qui disparaissent dans l'ajutage IV, l'angle de décollement est donc compris entre 12 et 24°

Dans le plan médian horizontal pour les ajutages A et IV, on a tracé les lignes d'égales pressions statiques (avec la pression à la paroi du col pour zéro) rapportées à la pression dynamique au col calculée à partir de la vitesse moyenne. Dans IV, ce quotient atteint 105 % et dans A seulement 50 %. Bien entendu, on doit observer au sujet des chiffres précédents que la vitesse moyenne au col donne une pression dynamique inférieure à celle qui résulterait d'une intégration des pressions dynamiques partielles dans la section du col, et que, d'autre part, les pressions statiques sont évaluées par excès, car la pression statique à la paroi du col est inférieur de 20 % (pour l'ajutage IV) à la pression statique au centre de la section du col.

Cet auteur a observé de grandes variations dans les valeurs des débits mesurés le long de la conduite; il met en évidence l'influence de la turbulence

sur les valeurs calculées pour le débit; la valeur obtenue à partir des moyennes des vitesses par rapport au temps, dans une section postérieure au col est toujours plus forte que dans une section en amont de l'ajutage (parfois de 10 %), ceci provient de ce que le manomètre indique la moyenne du carré de la vitesse qui est supérieure au carré de la vitesse moyenne.

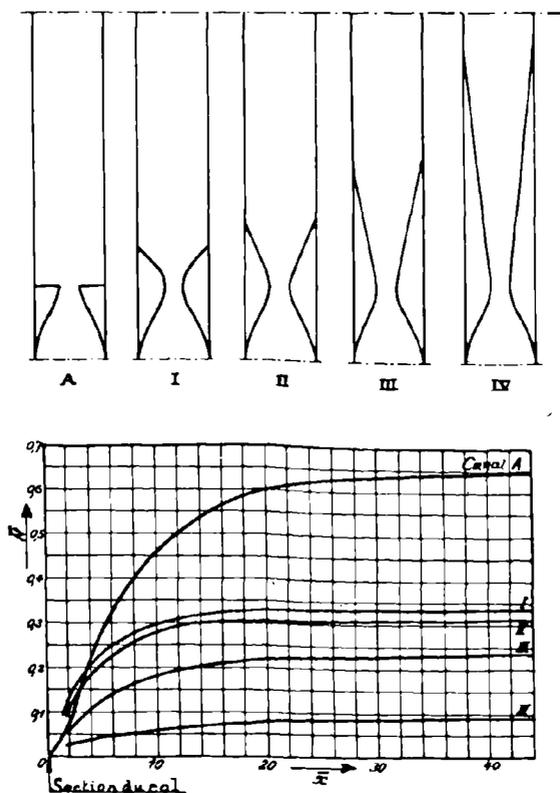


Fig. 2

Cet auteur détermine les pertes d'énergie, pour un régime donné, en mesurant l'énergie totale dans diverses sections après le col du divergent; il obtient cette énergie en mesurant les vitesses et les pressions totales dans chaque section. Dans une section donnée, à différentes hauteurs, on relève les profils des vitesses; en planimétrant les courbes obtenues, on a le débit; on opère de même avec les courbes de pression totale. On mesure l'angle du vecteur vitesse avec l'axe de la conduite, de façon à corriger les lectures de vitesses et de pressions totales, en utilisant les courbes d'étalonnage du tube Prandtl et du tube de pression totale en fonction de l'angle d'inclinaison du tube sur le courant.

ANDRES et HOCHSCHILD ont trouvé que les pertes étaient proportionnelles au carré du débit, KRÖNER trouve un exposant toujours un peu inférieur à 2.

Soit  $N$  la puissance perdue entre le col et la section d'abscisse  $x$ ;  $x$  est comptée à partir du col suivant l'axe du tuyau. L'auteur trace les courbes de puissance perdue  $\bar{N}$  sans dimension, rapportée à l'énergie cinétique au col

calculée d'après la vitesse moyenne, en fonction de l'abscisse sans dimension  $x$  rapportée à la largeur  $a$  du col (*fig. 2*).

Il trace aussi les courbes de variation du coefficient différentiel de la puissance perdue  $\frac{dN}{dx}$ , c'est-à-dire de la puissance perdue à l'unité de longueur, en fonction de l'abscisse  $\bar{x}$ .

Cet auteur étudie ensuite la variation d'un coefficient de résistance  $\beta$  défini en écrivant que la puissance perdue  $dN$  est proportionnelle à la pression dynamique :

$$dN = \beta \cdot \frac{Q}{a} \cdot \rho \frac{V^2}{2} \cdot dx$$

où  $Q$  est le débit.

HOCHSCHILD, dans ses expériences avec l'eau, utilisait un diffuseur semblable géométriquement au diffuseur IV de KRÖNER. Les nombres de Reynolds pour les diffuseurs avec l'eau et l'air étaient respectivement : 161400 et 125200.

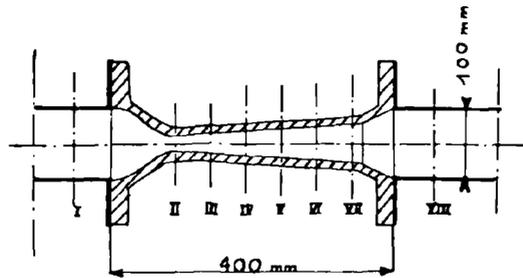


Fig. 3. — Diffuseur II

HOCHSCHILD a mesuré la courbe de variation de la pression statique le long de la paroi, KRÖNER compare cette courbe à celle qu'il obtient en prenant les pressions statiques à 10 mm de la paroi, dans quatre sections de son divergent; il obtient la même forme de courbe et les mêmes pertes. Pour des nombres de Reynolds voisins et quand la vitesse du fluide est inférieure à 30—40 m/s, les écoulements de l'air et de l'eau à travers un diffuseur sont donc identiques.

RIFFART a cherché les moyens d'augmenter le rendement de la transformation, dans les diffuseurs coniques, de l'énergie cinétique en énergie potentielle.

Cet auteur a expérimenté deux diffuseurs coniques I et II, d'angles d'ouverture  $10^{\circ}45'$  et  $7^{\circ}4'$ , qu'il pouvait intercaler dans une conduite cylindrique communiquant avec un réservoir à air comprimé que l'on maintenait à une pression d'environ 0,5 atmosphère.

Avec le diffuseur I, on obtient au col une vitesse maximum de 25 m/s; pour le diffuseur II, la section du col est telle que la vitesse maximum atteint 100 m/s.

Le diffuseur II (*fig. 3*) n'est pas entièrement conique, sa section s'élargissant vers la fin pour se raccorder avec celle du tuyau.

L'auteur définit le rendement du diffuseur par le rapport :

$$\eta = \frac{\text{augmentation réelle de la pression statique}}{\text{augmentation théorique de la pression statique}}$$

en prenant la pression statique au col pour zéro.

Pour déterminer  $\eta$ , l'auteur obtient la pression statique réelle en mesurant, la pression à la paroi par des trous de 1 mm de diamètre, et la pression à l'intérieur de la veine, en des points déterminés, avec un tube de Pitot; il calcule ensuite la pression statique moyenne dans une section de mesure.

La pression statique théorique est calculée d'après la formule de Bernouilli.

On mesure le rendement avec courant libre, puis étranglé à la sortie. Pour l'écoulement libre, on a obtenu les rendements moyens suivants :

Sections	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Diffuseur I	100 %	89,88 %	88,18 %	86,55 %	84,70 %	84,01 %	84,30 %
Diffuseur II	100 %	87,25 %	85,45 %	83,45 %	81,0 %		

Les expériences de RIFFART ont confirmé que le rendement avec courant libre est indépendant du débit et de la pression en amont de l'ajutage comme l'a observé ANDRES avec l'eau.

Si pour rendre comparable la buse II à la buse I, on supprime l'élargissement de la buse II en prolongeant son cône jusqu'au raccordement avec le tuyau, on obtient dans la section VIII :  $\eta = 87,5 \%$ , donc supérieur de plus de 3 % au rendement de la buse I dans la même section.

On a expérimenté un ajutage divergent, d'ouverture  $10^\circ$ , non précédé d'un convergent, mais avec, en amont, un long tube cylindrique. Le rendement est faible :  $67,5 \%$ , inférieur de  $16,8 \%$  au rendement de la buse I. Ceci met en évidence l'utilité d'un convergent permettant d'avoir une couche limite de faible épaisseur à l'entrée du divergent.

On a placé dans le divergent, immédiatement après le col, des filtres répartiteurs de formes variées : troncs de cônes avec nervures, surfaces hélicoïdales, tamis, on espérait ainsi empêcher le décollement et, par conséquent, augmenter le rendement. On obtient le meilleur résultat avec une pièce de laiton conique de 50 mm de longueur, dans laquelle des trous sont percés longitudinalement, mais dans l'ensemble les résultats sont mauvais.

En augmentant l'étranglement à la sortie, c'est-à-dire la contre pression, le rendement croît lentement. L'auteur définit un coefficient d'étranglement par le quotient :

$$\frac{\text{pression statique dans la section I avec étranglement}}{\text{pression statique dans la section I sans étranglement}}$$

Pour un coefficient de 10,62, on atteint un rendement de 95 %.

L'auteur sépare les pertes par frottement et décollement; il calcule les premières en appliquant la formule de Fritzsche établie pour les tuyaux; il

trouve que les pertes maxima par frottement se produisent entre les sections II et III : 40,6 % de la perte totale par frottement. Sur la perte totale de 16,2 %, il y a 15,8 % produit par le décollement, donc grande perte surtout par décollement.

L'auteur calcule la perte d'énergie totale dans le diffuseur I en faisant dans plusieurs sections l'intégration de l'énergie totale, il rapporte cette perte à l'énergie cinétique au col, on obtient ainsi une perte de 9,3 %, d'où un rendement de 90,7 % dans la section de sortie.

Les courbes de vitesse et de pression totale, relevées dans le plan vertical passant par l'axe du diffuseur, conduisent l'auteur à distinguer deux zones : zone centrale où la vitesse est uniforme dans chaque section et la pression totale constante, et une zone périphérique où la vitesse décroît vers la paroi ainsi que la pression totale, cette dernière zone étant très turbulente. Quand on augmente l'étranglement à la sortie, la région centrale augmente ainsi que le montrent les courbes de pression totale obtenues dans le cas de l'étranglement.

Les courbes de pression statique dans la section II montrent une dépression beaucoup plus forte à la paroi qu'au centre (au contraire, près de la sortie du diffuseur, la pression augmente vers les parois), ce qui entraîne une augmentation de la vitesse vers la paroi dans la section du col, ceci est une cause d'erreur dans le calcul du rendement. L'auteur a alors intercalé entre le convergent et le divergent un tuyau cylindrique de 50 mm de longueur : il obtient ainsi une distribution de pression statique uniforme dans la section II, mais la couche limite se forme plus vite et le rendement tombe à 75 %.

En traçant, pour les diffuseurs I et II, la courbe de la différence entre la pression statique mesurée à la paroi et la pression statique mesurée sur l'axe du diffuseur en fonction de l'abscisse le long de l'axe, on obtient une courbe ressemblant à celle d'une oscillation fortement amortie sur laquelle on peut mesurer une longueur d'onde et un rapport d'amortissement.

MARTINOT-LAGARDE utilise une buse convergente-cylindrique-divergente, la partie tronconique divergente a 8° d'ouverture, le rapport entre les sections extrêmes de cette partie de la buse est environ 4.

Cet auteur trace la courbe expérimentale des variations de la dépression statique moyenne le long du diffuseur.

Il considère un élément de la paroi du diffuseur compris entre deux sections droites voisines ; il suppose que pour cet élément la force de frottement est proportionnelle à la surface de l'élément et à l'énergie cinétique, moyenne par unité de volume, de l'air compris entre les deux sections droites ; il suppose, en outre, que cette force de frottement dépend de l'angle d'ouverture du diffuseur.

Moyennant ces hypothèses, il obtient une équation représentant bien la courbe expérimentale des variations de la dépression statique moyenne le long du diffuseur.

Soit  $H$  la dépression, en un point déterminé de la paroi de la partie cylindrique, par rapport à la pression à l'extérieur de la buse. A l'entrée du

divergent, l'énergie cinétique moyenne est 0,98 H, entre l'entrée et la sortie du divergent, l'énergie potentielle croît de 0,76 H, le rendement du diffuseur, défini par l'augmentation d'énergie potentielle rapportée à l'énergie cinétique à l'entrée, est donc :

$$\eta = 100 \frac{0,76}{0,98} = 77,5 \%$$

soit une perte dans le diffuseur de 16 %.

L'auteur a observé l'existence, dans le diffuseur, d'une région centrale où la pression totale reste constante, cette région s'étend dans le diffuseur sur une longueur d'environ quatre diamètres du cylindre.

L'auteur étudie la turbulence à l'aide de capsules de Marey; il a observé, qu'à vitesse constante du ventilateur, le rapport des dépressions statiques oscillantes en deux points de la région centrale, ne varie pas avec le temps.

VEDERNIKOFF a expérimenté un divergent compris entre deux plans parallèles, l'angle d'ouverture  $\alpha$  des deux parois latérales mobiles pouvant varier entre 0 et 28°; le col a une section carrée de 100 mm  $\times$  100 mm, la longueur du diffuseur est de 1 mètre. L'air est aspiré à la pression atmosphérique  $p$ ; les vitesses au col vont de 10 m/s à 30 m/s.

On obtient le spectre de l'écoulement en observant des petites girouettes. Pour les angles de 0 à 12°, elles restent orientées dans le sens de l'écoulement et sont immobiles; le courant est encore stable jusqu'à 14°, au delà des tourbillons se produisent dont les axes sont tantôt disposés le long de l'une des parois mobiles, tantôt le long de l'autre. Pour  $\alpha = 15^\circ$ , un courant de retour se produit près de la sortie, tandis que la zone tourbillonnaire se rapproche du col, les tourbillons les plus intenses se trouvent alors près du col; au-dessus de 15°, mêmes phénomènes intensifiés et grande instabilité du courant.

#### VARIATIONS DU RENDEMENT EN FONCTION DE L'ANGLE D'OUVERTURE

$\alpha^\circ$	$\eta$	$\alpha^\circ$	$\eta$
0	0,825	16	3,65
2	1,23	18	3,14
4	1,85	20	2,78
6	2,48	22	2,42
8	3,10	24	1,94
10	3,57	26	1,78
12	3,94	28	1,61
14	4,13		

L'auteur mesure les pertes dans le diffuseur et le rendement.

Soient  $h_1$  et  $h_2$  les dépressions statiques au col et à la sortie du diffuseur comptées à partir de  $p$ .

L'auteur définit le rendement par le quotient :

$$\eta = \frac{h_1}{h_2},$$

la dépression  $h_1$  n'étant pas uniforme sur toute la largeur du col, on la mesure en trois points, on a alors :

$$\eta = \frac{h'_1 + h''_1 + h'''_1}{3} : h_2.$$

Le rendement augmente jusqu'à une certaine valeur de  $\alpha$  qui correspond à la formation des tourbillons, le maximum est :  $\eta = 4,13$  pour  $\alpha = 14^\circ$ .

L'auteur néglige les pertes dans le convergent et considère l'inverse du rendement :

$$\frac{1}{\eta} = \frac{h_2}{h_1},$$

qui représente la somme des pertes (perte d'énergie totale dans le diffuseur plus perte d'énergie cinétique à la sortie) rapportée à l'énergie cinétique au col.

Il calcule les pertes par frottement en appliquant la formule :

$$\Delta T = k_f \times \Delta F \times V^3,$$

$k_f$  = coefficient de frottement = 0,0002;  $V$  = vitesse;  
 $\Delta F$  = aire de l'élément de surface latérale du diffuseur.

Il détermine le rapport :

$$\xi = \frac{T}{W_1}$$

du travail dépensé en frottement à l'énergie cinétique au col.

Il trace les courbes  $\xi$ ,  $\frac{1}{\eta}$  et la courbe représentative du rapport :

$$\frac{\text{énergie cinétique à la sortie}}{\text{énergie cinétique au col}} = \frac{W_2}{W_1}$$

en fonction de  $\alpha$  de 0 à 14°.

En retranchant des ordonnées  $\frac{1}{\eta}$  la somme des ordonnées correspondantes pour  $\xi$  et  $\frac{W_2}{W_1}$ , la différence obtenue caractérise toutes les autres pertes; en portant cette différence en ordonnées en fonction de  $\alpha$ , on a un minimum pour  $\alpha = 8^\circ$ .

DÖNCH et NIKURADSE, sur des divergents de section droite rectangulaire, opèrent avec de petits angles d'ouverture, ils réalisent respectivement une ouverture maximum de 3° et de 8° (NIKURADSE obtient un décollement à partir de 5°).

Leurs essais ont été faits dans le cas particulier où l'écoulement sans décollement, à travers le diffuseur, atteint le régime pour lequel l'évolution du profil des vitesses est terminée.

Leurs résultats se rapportent à cette partie du diffuseur où un régime permanent s'est établi, ce cas est tout à fait différent de celui étudié par nous.

GRUSCHWITZ a étudié le problème de la répartition des vitesses dans la couche limite. Il utilise une veine d'air limitée latéralement par deux plans parallèles, la paroi supérieure horizontale porte, dans sa partie antérieure, une fente permettant d'évacuer la couche limite, la paroi inférieure peut être déplacée, afin de modifier la variation de pression le long de la paroi supérieure. Les distributions de vitesse sont relevées dans la couche limite longeant la paroi supérieure (voir le résumé des résultats obtenus par GRUSCHWITZ dans les « Notes complémentaires » faisant suite au mémoire de MARGOULIS).

MARGOULIS s'est surtout attaché à la recherche de l'influence de l'aspiration de la couche limite sur le rendement d'un diffuseur de section droite rectangulaire (ACKERET avait déjà, sur ce point, fait de semblables recherches dans le cas de l'eau). Les diffuseurs sont placés dans le circuit d'une soufflerie par refoulement. Pour évacuer facilement la couche limite, sans dépense d'énergie supplémentaire, MARGOULIS place à la sortie du divergent un diaphragme donnant dans la veine divergente une pression statique supérieure à la pression de l'air ambiant; ce diaphragme joue aussi le rôle d'orifice en paroi mince pour mesurer commodément le débit.

1° Cet auteur a d'abord fait ses expériences sur deux diffuseurs rectangulaires de grande ouverture :  $\alpha = 25^\circ$  et  $\alpha = 30^\circ$ , le rapport  $n$ , entre les sections de sortie et d'entrée, est pour ces deux diffuseurs voisin de 2. Des fentes transversales étaient judicieusement placées sur les deux parois divergentes. Le courant décolle des parois quand les fentes sont fermées, mais dès qu'on les ouvre, le courant suit les parois jusque dans la section de sortie et la répartition des vitesses dans cette section devient presque parfaite : vitesse constante au centre et couche limite de faible épaisseur.

Sans évacuation de la couche limite, on a le rendement égal au rapport de l'accroissement de pression statique à la pression dynamique au col dans le cas de  $\alpha = 25^\circ$  :  $\eta = 0,55$ , qui serait avec un diffuseur parfait :  $\eta' = 0,75$ , d'où une perte de 20 %. En évacuant à travers les fentes un débit d'air, de 5 % du débit total, la perte descend à 7 % en comptant, d'ailleurs dans les pertes, l'énergie nécessaire pour refouler l'air évacué dans le circuit.

En ajoutant dans le circuit de l'air en amont du diffuseur un grillage métallique à fines mailles, l'écoulement avec évacuation de la couche limite est modifié : il y a augmentation de l'épaisseur de la couche limite. Si les fentes sont fermées, le grillage n'a aucune influence sur l'écoulement.

2° MARGOULIS a ensuite expérimenté deux diffuseurs de faible ouverture :  $\alpha = 8^\circ$ . Il a cherché à se rapprocher, le plus possible, de l'écoulement à deux dimensions en prenant un rapport 5 entre les côtés de la section du col et en aspirant la couche limite qui se forme sur les parois parallèles du diffuseur, à travers des fentes transversales situées sur ces parois.

Cet auteur a, en outre dans ce cas, pratiqué dans une même section droite une fente sur chacune des parois de la partie rectiligne de la conduite située en amont du diffuseur. En évacuant la couche limite à travers ces fentes,

il est possible de régler à volonté les caractéristiques du champ aérodynamique à l'entrée du diffuseur (les parois divergentes du diffuseur ne portent aucune fente).

Dans un diffuseur court de  $8^\circ$  ( $n=1,44$ ) l'écoulement se fait sans décollement, mais dans un diffuseur long de  $8^\circ$  ( $n=2,91$ ), on observe un décollement.

MARGOULIS dans le diffuseur long a relevé les profils des vitesses au col et dans le diffuseur même; il trace ces profils en coordonnées logarithmiques et constate que près des parois la répartition des vitesses suit la loi de l'exposant  $1/7$ .

Si l'on compare le rendement du diffuseur long, mesuré dans le cas du diaphragme à la sortie et fentes ouvertes, avec le rendement du même diffuseur mesuré quand l'écoulement étant libre à la sortie, on aspire la couche limite avec un petit aspirateur, on voit que dans ce dernier cas le rendement est plus petit. Comme la différence entre les profils des vitesses au col n'est pas suffisante pour expliquer cet écart, MARGOULIS l'attribue au diaphragme à la sortie qui, en augmentant la résistance du circuit, augmente en même temps la stabilité de l'écoulement et fait déplacer les points de décollement vers la sortie.

Enfin, MARGOULIS a constaté que dans un col de diffuseur, deux sortes de variations de pressions peuvent exister : d'une part, des pulsations de pressions statique et dynamique (la pression totale restant constante) dues au décollement dans le diffuseur et, d'autre part, des variations de pressions totale, statique et dynamique dues à la turbulence du courant d'air. Les pulsations dues au décollement diminuent quand on place un diaphragme à la sortie du diffuseur ou quand on cloisonne le diffuseur en disposant des parois passant par son axe.

A la suite de ces essais, MARGOULIS préconise l'emploi, dans les souffleries, de diffuseurs courts de grand angle d'ouverture avec aspiration de la couche limite.

3<sup>o</sup> MARGOULIS a établi une théorie de l'écoulement, sans décollement, dans les diffuseurs, basée sur l'évolution du profil des vitesses dans le cas d'un diffuseur de faible ouverture.

Il suppose que le fluide suit la loi de Bernouilli dans une région centrale à vitesse constante (la pression totale est constante dans cette région, comme l'a observé MARGOULIS dans tous ses diffuseurs) et que dans la région périphérique, ou couche limite, la répartition des vitesses suit la loi de l'exposant  $1/7$ . Il admet que dans la section du col la vitesse et la pression statique sont constantes, l'épaisseur de la couche limite étant nulle et, enfin, que l'effort de frottement sur la paroi est donné par la loi de Blasius.

Ses calculs lui ont permis de tracer les courbes donnant l'évolution de l'épaisseur relative de la couche limite en fonction du rapport  $n$  et du paramètre :  $\text{tg } \frac{\alpha}{2} \cdot \mathfrak{R}^{\frac{1}{4}}$  où  $\mathfrak{R}$  est le nombre de Reynolds de la section d'entrée.

Il est ensuite facile de connaître le rendement, exprimé en fonction de l'épaisseur de la couche limite et du rapport  $n$ , d'après les valeurs relevées sur le diagramme de l'évolution de la couche limite.

**BIBLIOGRAPHIE**

---

- K. ANDRES. — *Versuche über die Umsetzung von Wassergeschwindigkeit in Druck.* *Forsch. Arb. d., VDI.* 76, 1909.
- A.H. GIBSON. — *On the flow of water through pipes and passages having converging or diverging boundaries.* *Proceedings of the Royal Society of London. Séries A. Vol. LXXXIII,* p. 366, 1910.
- H. HOCHSCHILD. — *Versuche über die Strömungsvorgänge in erweiterten und verengten Kanälen.* *Forsch. Arb. d., VDI.* 114, 1912.
- R. KRONER. — *Versuche über Strömungen in stark erweiterten Kanälen* *Forsch. Arb. d., VDI.* 222, 1920.
- A. RIFFART. — *Über Versuche mit Verdichtungsdüsen (diffusoren)* *Forsch. Arb. d., VDI.* 257, 1922.
- A. MARTINOT-LAGARDE. — *Recherches expérimentales sur la distribution des vitesses dans un courant gazeux.* Mémoire présenté à la Faculté des Sciences de Paris n° 246, 1924.
- A.N. VEDERNIKOFF. — *Etude expérimentale du mouvement de l'air dans un divergent.* Bulletin n° 21 de l'Institut aéro-hydrodynamique « Zagi » de Moscou, 1926.
- F. DÖNCH. — *Divergente und konvergente turbulente Strömungen mit kleinen Öffnungswinkeln.* *Forsch. Arb. d., VDI.* 282, 1926.
- J. NIKURADSE. — *Untersuchungen über die Strömungen des Wassers in konvergenten und divergenten Kanälen.* *Forsch. Arb. d., VDI.* 289, 1929.
- E. GRUSCHWITZ. — *Die turbulente Reibungsschicht in ebener Strömung bei Druckabfall und Druckanstieg.* *Ingenieur. Archiv.* Sept. 1931.
- W. MARGOULIS. — *Recherches sur les diffuseurs et l'aspiration de la couche limite.* *Technique Aéronautique,* nouvelle série n° 132, 1934.
-

NOTATIONS

$V_1$  = vitesse en un point de l'axe vertical médian  $ee'$  de la section d'entrée du divergent (nous dirons aussi section du col); hauteur de cet axe  $a_1$ .

$u_1$  est la projection sur l'axe  $XX'$  (voir *figure 4*) de la vitesse  $V_1$ .

$V_2$  = vitesse en un point de l'axe vertical médian  $ss'$  de la section de sortie du divergent; hauteur de cet axe  $a_2$ .

$u_2$  est la projection sur l'axe  $XX'$  de la vitesse  $V_2$ .

$(V_1)_m$  est la vitesse moyenne au col.

$(V_2)_m$  est la vitesse maximum sur le segment  $ss'$ .

On aura souvent à considérer l'énergie cinétique moyenne dans une section droite de surface  $S$ , dans laquelle  $u$  est la composante suivant l'axe  $XX'$  de la vitesse  $V$ ; soit  $V_m$  la vitesse moyenne dans la section  $S$  et soit  $\rho$  la masse spécifique de l'air.

L'énergie cinétique moyenne par unité de surface est égale à :

$$\frac{1}{S} \int_s \frac{\rho V^2}{2} \cdot ds.$$

L'énergie cinétique moyenne par unité de débit est égale à :

$$\frac{1}{S \cdot V_m} \int_s \frac{\rho V^2}{2} \cdot u \cdot ds.$$

Enfin, dans la plupart des cas, on prend la valeur de l'énergie cinétique de la vitesse moyenne :

$$\frac{\rho}{2} \cdot V_m^2$$

qui au col est égale à :

$$H = \frac{\rho}{2} \cdot (V_1)_m^2.$$

Nous appelons *vitesse efficace* la racine carrée de la moyenne, par rapport au temps, du carré de la vitesse.

$\eta$  désigne le *rendement du divergent*, défini par l'augmentation d'énergie potentielle, entre le col et la sortie du divergent, rapportée à l'énergie cinétique de la vitesse moyenne au col.

Si  $n$  est le *rapport des surfaces* des sections de sortie et d'entrée du divergent, l'expression :

$$\eta' = 1 - \frac{1}{n^2}$$

est égale au *rendement du diffuseur parfait*.

Nous avons considéré trois types de divergents :

Un *divergent Re* placé dans le circuit d'une soufflerie par refoulement; un *divergent As* placé dans le circuit d'une soufflerie par aspiration, et un *divergent D* muni de volets.

Dans les divergents *Re* et *As* nous distinguons :

*Régime I* : quand l'écoulement se fait avec décollement sur le plan *supérieur*.

*Régime II* : quand l'écoulement se fait avec décollement sur le plan *inférieur*.

Dans le divergent avec volets nous distinguons :

*Régime I'* : quand l'écoulement se fait avec décollement sur le plan *supérieur*.

*Régime II'* : quand l'écoulement se fait avec décollement sur le plan *inférieur*.

Nous prendrons pour *nombre de Reynolds* constant tout le long du divergent :

$$\mathcal{R} = \frac{(V_1)_m \cdot a_1}{\nu}$$

( $\nu$  est la viscosité cinématique).

---

## CHAPITRE II

### DESCRIPTION des SOUFFLERIES

#### I. — Soufflerie par refoulement.

Nous avons établi un premier appareil dont la *figure 4* donne schématiquement la description. Cet appareil constitue une petite soufflerie à refoulement; on utilise un ventilateur Coupard, l'hélice V, de 40 cm de diamètre, à trois pales; cette hélice est actionnée par un moteur électrique de 1/6 ch.

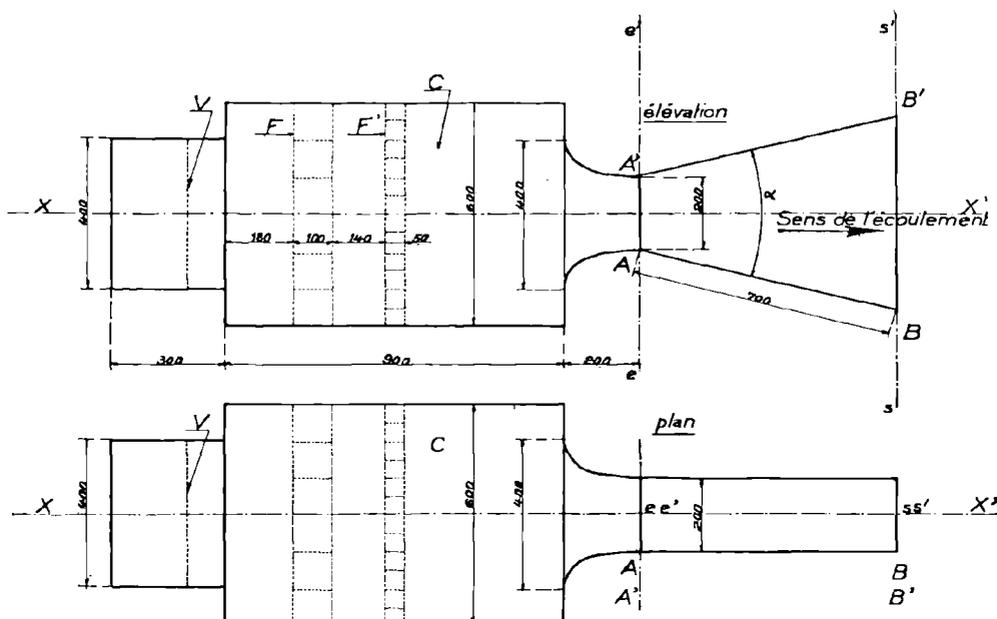


Fig. 4. — Soufflerie par refoulement

L'air aspiré par l'hélice passe dans une chambre C de section carrée, contenant deux filtres en nid d'abeilles F et F', l'air sort ensuite par un ajutage convergent-divergent.

Le divergent est constitué par deux plaques planes AB, A'B', en ébonite, mobiles respectivement autour des deux axes horizontaux A et A'; latéralement, la veine est limitée par deux glaces transparentes verticales, permettant de visualiser le mouvement de l'air. On peut réaliser une ouverture totale  $\alpha$  maximum de  $31^\circ$ .

La pression à l'intérieur du diffuseur étant inférieure à la pression atmosphérique, si le divergent n'est pas étanche, des rentrées d'air à faible vitesse produiront une augmentation de l'épaisseur de la couche limite; pour obtenir l'étanchéité désirée, nous glissons de la cire molle le long des lignes de raccord entre les plans mobiles et les glaces.

L'hélice est placée en amont; or, on sait que dans ce cas la turbulence du courant est très grande; pour réduire cette turbulence, nous avons posé dans la chambre C les filtres F et F', en tôle de 1 mm d'épaisseur, dont les cellules ont pour dimensions respectives 100 mm × 100 mm et 50 mm × 50 mm; le filtre à grandes cellules est placé en amont. La position optimum des filtres a été déterminée d'après des mesures de turbulence au col faites avec un anémomètre Huguenard à deux fils chauds.

## II. — Soufflerie par aspiration.

L'ensemble des résultats obtenus avec la soufflerie par refoulement montre l'influence certaine de la turbulence. Pour obtenir une diminution notable de la turbulence dans le diffuseur, nous avons transformé le dispositif primitif de manière à opérer par aspiration selon le schéma ci-contre (fig. 5).

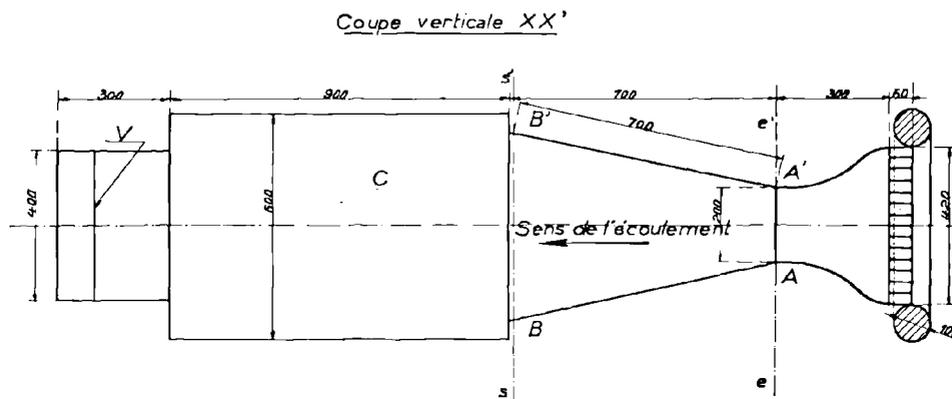


Fig. 5. — Soufflerie par aspiration

L'ensemble du diffuseur, la chambre C et le ventilateur sont ceux de la soufflerie par refoulement. L'air pénètre dans le diffuseur à l'entrée duquel on a disposé un bourrelet arrondi et un filtre en nid d'abeilles, dont les cellules ont 30 mm × 30 mm; le ventilateur Coupard a été simplement retourné.

L'ouverture  $\alpha$  maximum réalisable est encore égale à 31°.

Pour comparer la turbulence des souffleries par refoulement et par aspiration, nous avons enregistré la pression totale au centre de la section du col, pour un même angle d'ouverture et une même vitesse; la turbulence au col dans la soufflerie par aspiration (fig. 28, enregistrement 1) est nettement inférieure à celle de la soufflerie par refoulement (enregistrement 1'). On obtient

encore une bonne vérification de ce résultat en comparant les longueurs des filets d'air chaud (voir la méthode d'obtention des filets d'air chaud au chapitre IV « Visualisation de l'écoulement ») produits en différents points des divergents  $Re$  et  $As$ .

Au col et dans le plan de sortie des divergents  $Re$  et  $As$ , la variation de la vitesse, le long d'une ligne horizontale, ne dépasse pas dans aucun cas, 2 %

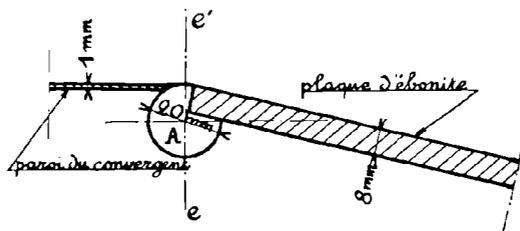


Fig. 6. — Détail de l'articulation de l'un des plans mobiles du divergent

de la vitesse moyenne dans chacune de ces sections. Transversalement, la distribution des vitesses est donc suffisamment uniforme pour qu'on puisse considérer que l'écoulement, à travers le divergent, est à deux dimensions.

Dans nos mesures, nous utilisons trois vitesses de rotation du ventilateur.

$$R_1 = 3\,600 \text{ t/mn}, R_2 = 4\,300 \text{ t/mn}, R_3 = 4\,500 \text{ t/mn}.$$

On obtient ainsi, en faisant en outre varier l'angle  $\alpha$  de 0 à 31°, des vitesses moyennes au col comprises entre 8 et 16,5 m/s; les nombres de Reynolds  $R$  correspondants sont 110 000 et 228 000.

### CHAPITRE III

## DESCRIPTION des APPAREILS de MESURE

### I. — Manomètres.

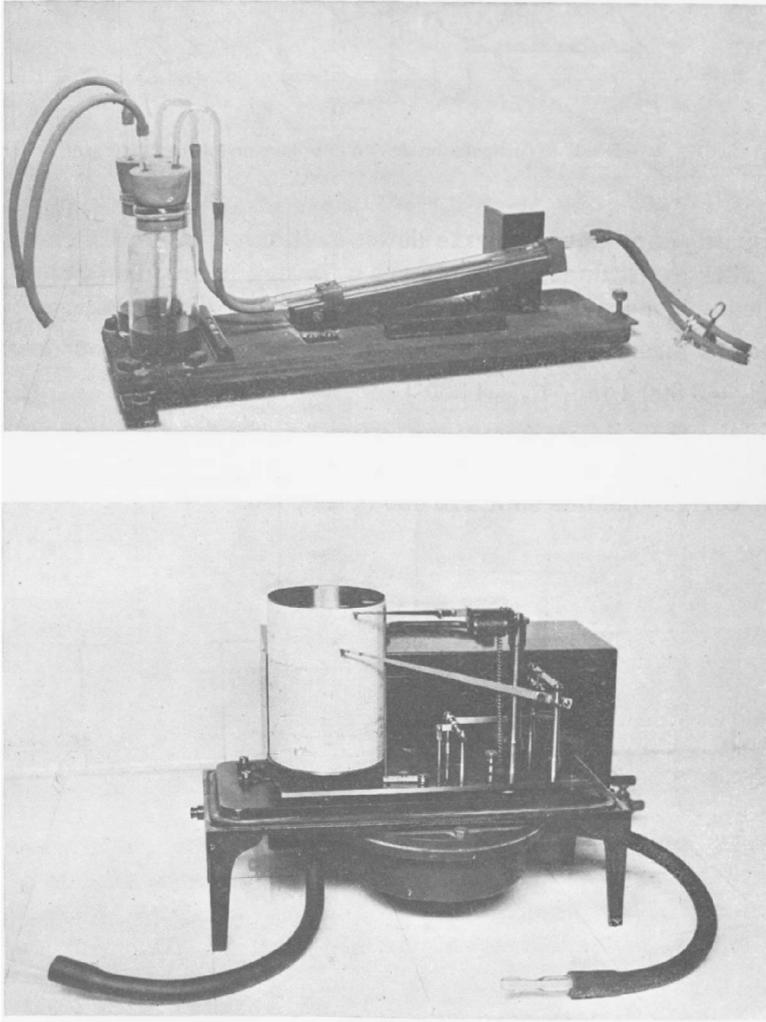


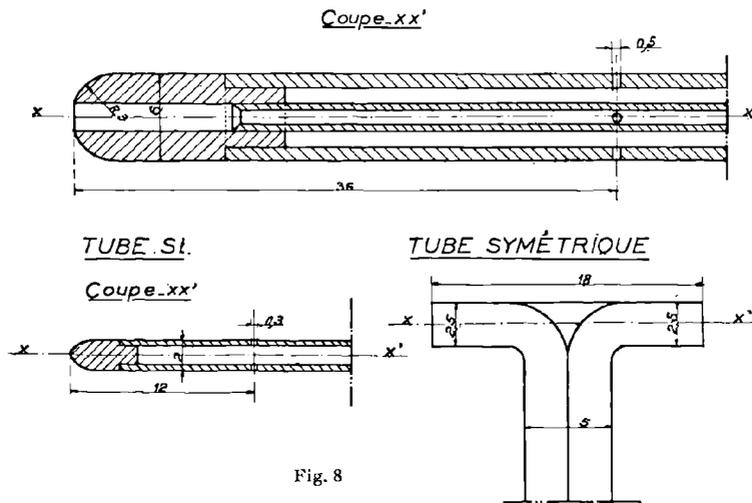
Fig. 7. — Manomètre à alcool et manomètre enregistreur

Certaines pressions sont mesurées à l'aide d'un manomètre à alcool, le tube incliné donne l'amplification 10, c'est-à-dire qu'un millimètre de la graduation représente  $1/10$  mm d'eau (fig. 7).

La plupart des mesures sont faites en régime très turbulent, dans ce cas la lecture d'un manomètre à colonne liquide devient difficile; on s'est alors servi d'un manomètre enregistreur Richard (*fig. 7*) possédant une graduation dont 1 mm correspond à 0,25 mm d'eau. Le mouvement de rotation du cylindre enregistreur est tel qu'une division de la graduation horizontale, égale à 2,75 mm, correspond à 7,5 secondes. La période propre d'oscillation de ce manomètre est de l'ordre de la seconde, trop grande pour obtenir des données précises sur la turbulence; la fréquence des oscillations de pression étant en général supérieure à la fréquence propre du manomètre, l'amplitude et la fréquence des oscillations de pression seront diminuées.

## II. — Sondes aérodynamiques.

Les pressions dynamiques sont mesurées avec un tube de Pitot double (*fig. 8*), dont l'extrémité ouverte face au vent présente une forme hémisphérique; la pression statique s'exerce par quatre orifices de 0,5 mm de diamètre;



ce tube de Pitot est soudé à un ensemble de tubes de diamètres croissants soudés entre eux bout à bout, le dernier tube a un diamètre de 13 mm, il coulisse dans un support profilé monté sur une tige crémaillère verticale qui porte une graduation.

La *figure 9* (voir tableau I) donne les variations des pressions mesurées, quand varie l'angle  $\theta$  que fait l'axe du Pitot double avec la direction générale du courant d'air. Dans nos mesures, le tube de Pitot reste horizontal, l'inclinaison  $\theta$  maximum peut donc être égale à  $15^\circ$  quand l'angle d'ouverture du divergent est  $30^\circ$ . Avec ce Pitot, nous mesurons uniquement des pressions dynamiques et statiques qui, comme le montrent les courbes d'étalonnage, peuvent être prises sans correction quand  $\theta$  varie de  $0$  à  $15^\circ$ ; la pression statique transmise est, en effet, constante à moins de 4 % près de la pression

dynamique, lorsque  $\theta$  varie de 0 à 15°; quant à la pression dynamique, sa valeur est remarquablement constante jusqu'à  $\theta = 16^\circ$ .

TABLEAU I

Variations respectives  $\frac{\Delta q}{\rho \frac{V^2}{2}}$ ,  $\frac{\Delta p}{\rho \frac{V^2}{2}}$ ,  $\frac{\Delta p + \Delta q}{\rho \frac{V^2}{2}}$  des pressions dynamique, statique et totale, transmises par le tube de Pitot double, quand l'inclinaison  $\theta$  varie de 0 à 20°.

Toutes ces variations sont rapportées à la pression dynamique mesurée à  $\theta = 0^\circ$ .

$\theta^\circ$	10°	15°	20°
$\Delta q : \rho \frac{V^2}{2}$	0	0	0,033
$\Delta p : \rho \frac{V^2}{2}$	0,01	0,04	0,08
$(\Delta p + \Delta q) : \rho \frac{V^2}{2}$	0,01	0,04	0,113

On s'est également servi d'un tube de pression statique (tube St, fig. 8) en laiton, de diamètres intérieur et extérieur 1,5 mm et 2 mm, avec quatre ouvertures latérales de 0,3 mm de diamètre, et de deux tubes de pression totale

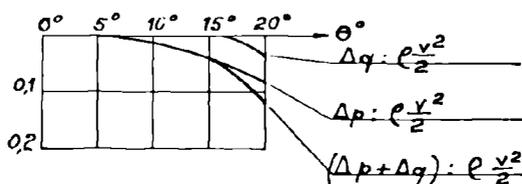


Fig. 9. — Courbes d'étalonnage du Pitot double

(tubes  $T_1$  et  $T_2$ ), l'un de diamètres intérieur et extérieur 1 mm et 1,5 mm; l'autre 2 mm et 2,5 mm; ces deux tubes donnent des indications sans erreur appréciable jusqu'à  $\theta = 20^\circ$ .

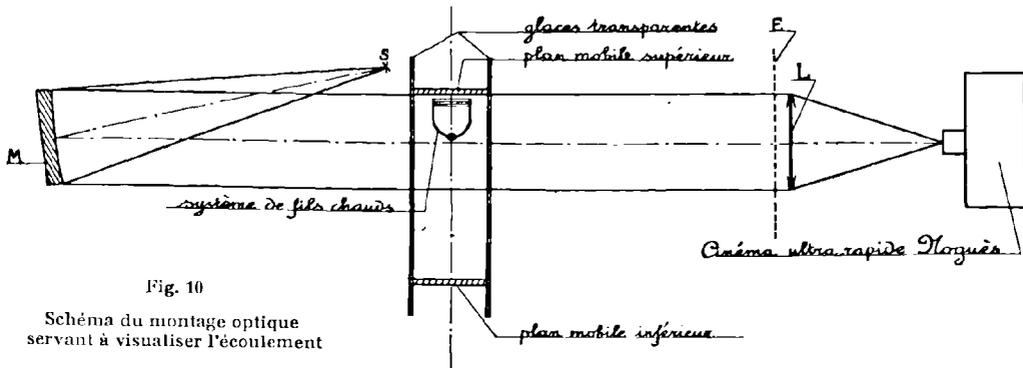
Dans la région du décollement, pour connaître la distribution de la vitesse du courant de retour, nous mesurons la pression dynamique à l'aide d'un tube symétrique (fig. 8) possédant une ouverture faisant face au courant et une autre opposée au courant. L'étalonnage de cette sonde montre que la différence de pression mesurée est égale à la pression dynamique multipliée par un coefficient  $k = 1,10$ . Ce coefficient a été déterminé pour le domaine de vitesses de 0 à 4 m/s; il ne change pas quand l'axe  $xx'$  de la sonde est incliné de 5° sur la direction du vent. Dans la région du décollement, la sonde est placée avec son axe  $xx'$  parallèle au plan le long duquel on observe un courant de retour. ...

VISUALISATION de l'ÉCOULEMENT

L'exploration de la veine divergente, pour des angles d'ouverture croissants, est d'abord faite à l'aide de fils de soie. Quand un décollement se produit, pour visualiser en particulier les filets fluides du courant de retour, nous employons la méthode des lames d'air chaud analogue à celle qu'utilise M. MARTINOT-LAGARDE dans ses recherches (1). Cette méthode permet une étude approfondie de l'allure de l'écoulement.

I. — Obtention des spectres d'air chaud.

Une source lumineuse S pratiquement ponctuelle, fournie par une petite ampoule électrique spécialement établie, est placée au foyer d'un miroir



concave M; on envoie normalement aux glaces transparentes le faisceau parallèle ainsi produit (fig. 10).

Dans toute la veine divergente, on peut déplacer un système de quatre fils (fig. 11) en nichrome de 0,2 mm de diamètre, chauffés électriquement et tendus parallèlement au faisceau lumineux.

(1) A. MARTINOT-LAGARDE. — C. R. 188, p. 1596, 1929.

Une lame d'air chaud donne sur un écran E une ombre bordée de lumière; le spectre aérodynamique, en un point donné, est d'abord observé visuellement; si une circonstance intéressante est remarquée en ce point, on procède à l'enregistrement cinématographique avec un appareil ultra-rapide Noguès; dans ce cas, l'image est réduite en remplaçant l'écran par une lentille convergente L, l'objectif de l'appareil cinématographique est mis en coïncidence avec l'image de la source lumineuse donnée par la lentille convergente.

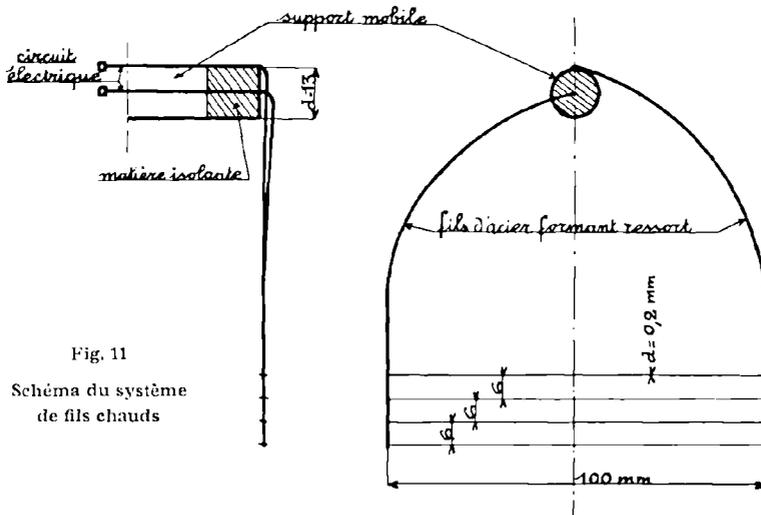


Fig. 11  
Schéma du système  
de fils chauds

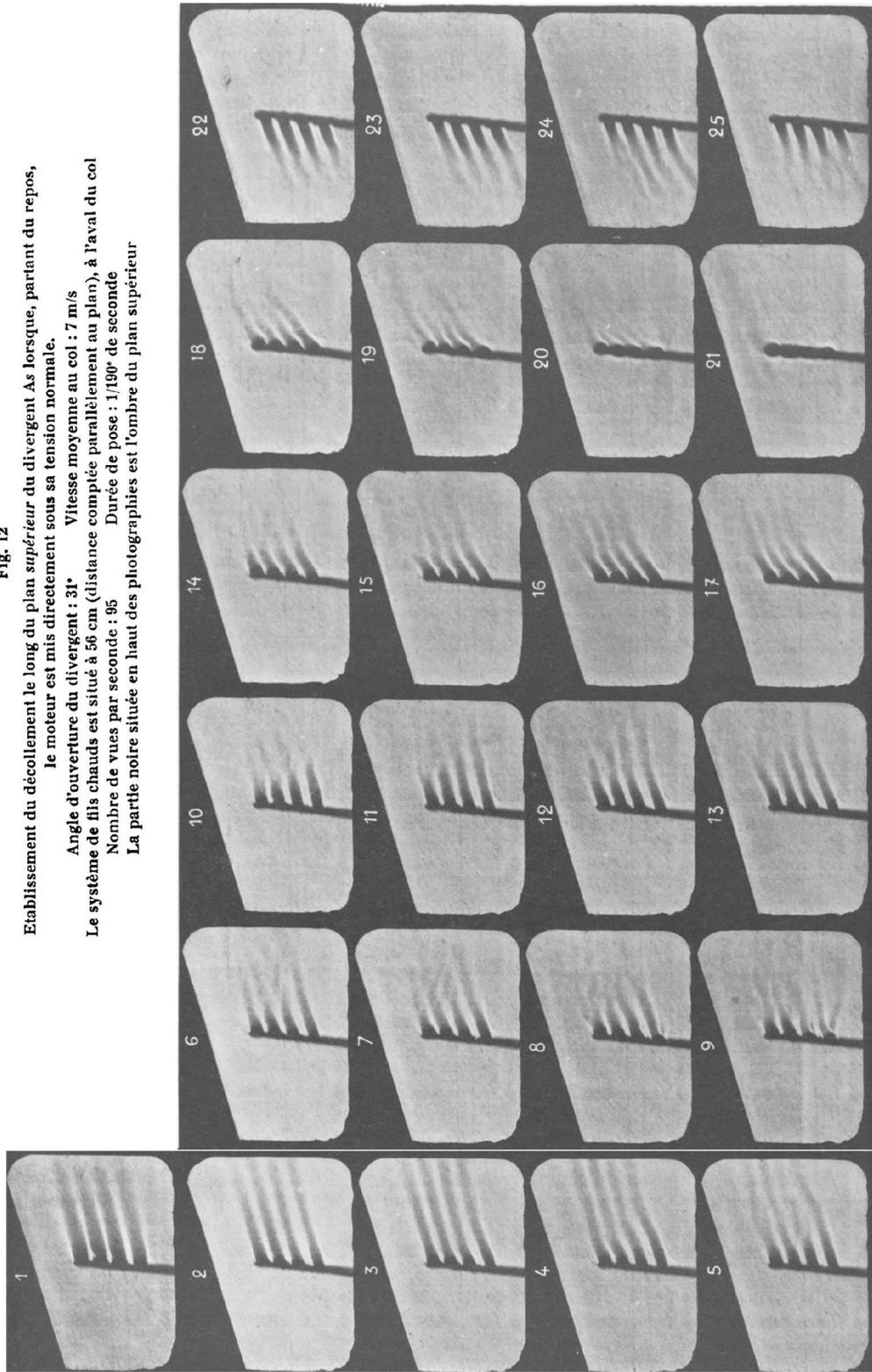
## II. — Exemples de spectres.

Sur les films obtenus, en un point déterminé, l'étude des variations de direction des filets d'air chaud en fonction du temps et la mesure de la longueur de ces filets à un instant donné, fournissent des renseignements intéressants sur la turbulence en ce point.

Les figures 12 et 13 donnent quelques photographies extraites de films obtenus par la méthode que l'on vient d'exposer.

REMARQUE. — L'observation directe sur un écran des spectres donnés par les lames d'air chaud, renseigne déjà mieux sur l'allure de l'écoulement que l'observation des fils de soie.

On observe, par exemple, des changements instructifs dans la direction des filets d'air chaud quand on se place dans la région du courant principal et au voisinage de la surface de séparation entre cette dernière région et la région du courant de retour qui peut se produire éventuellement le long d'un plan mobile; si, partant du repos, on établit l'écoulement avec décollement, la direction moyenne des filets d'air chaud, au début parallèle au plan, devient voisine de l'horizontale; les filets subissent de semblables modifications de direction quand on passe du régime sans décollement au régime avec décollement.



**Fig. 12**

**Etablissement du décollement le long du plan supérieur du divergent As lorsque, partant du repos, le moteur est mis directement sous sa tension normale.**

**Angle d'ouverture du divergent : 31° Vitesse moyenne au col : 7 m/s**

**Le système de fils chauds est situé à 56 cm (distance comptée parallèlement au plan), à l'aval du col**

**Nombre de vues par seconde : 95**

**Durée de pose : 1/190<sup>e</sup> de seconde**

**La partie noire située en haut des photographies est l'ombre du plan supérieur**

LÉGENDE DE LA FIGURE 12

- Photo n° 1* (n° 1 du film). — Les filets d'air chaud sont parallèles au plan.
- Photo n° 2* (n° 70 du film). — La vitesse du courant augmente, les filets d'air chaud *s'allongent* et deviennent plus effilés.
- Photos n° 3, 4* (n° 71, 72 du film). — La vitesse continue à augmenter et des *sinuosités* apparaissent.
- Photo n° 5* (n° 73 du film). — Les filets se *raccourcissent* considérablement, leur contour devient flou.
- Photos n° 6, 7 et 8* (n° 74, 75, 76 du film). — Les filets continuent à se raccourcir, signe de l'augmentation progressive de la turbulence.
- Photo n° 9* (n° 77 du film). — Forte turbulence, on voit notamment les battements dus à la turbulence dans l'intervalle d'une pose.
- Photos n° 10, 11, 12, 13* (n° 89, 90, 91, 92 du film). — Les filets *s'allongent*, la turbulence diminue.
- Photo n° 14* (n° 99 du film). — Les filets se *raccourcissent*, la turbulence est redevenue grande.
- Photos n° 15, 16, 17* (n° 100, 101, 102 du film). — Les filets *s'allongent* en même temps leur direction moyenne commence à s'incliner vers le haut, signe de l'établissement du courant de retour.
- Photos n° 18, 19* (n° 103, 104 du film). — Continuation de la rotation des filets. Le tourbillon qui donne naissance au courant de retour tourne dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.
- Photos n° 20, 21* (n° 105, 106 du film). — Augmentation de la turbulence.
- Photos n° 22, 23, 24, 25* (n° 186, 187, 188, 189 du film). — La rotation est achevée, le courant de retour est établi; il est extrêmement turbulent, les filets sont très courts et battent fortement. Remarquez la courbure des filets sur la photographie n° 24. Sur la photographie n° 25, la turbulence du courant de retour augmente.
- En un point déterminé, dans la zone du décollement, les filets reviennent pour de très courts intervalles de temps dans le sens direct, mais le sens de retour se rétablit aussitôt. Un tel film montre avec évidence, l'instabilité du régime d'écoulement dans la couche limite.

LÉGENDE DE LA FIGURE 13

Dans cette photographie le système de fils chauds est placé au voisinage immédiat de la ligne de décollement qui se trouve à 13 cm en aval du col du diffuseur A<sub>s</sub>, le long du plan supérieur.

Le gros point noir, donné par le fil chaud placé près du plan, indique un point où la vitesse est nulle ou normale au plan de la figure.

Les trois filets visibles présentent un changement brusque de direction avec un point anguleux.

Ce spectre caractérise particulièrement bien l'écoulement au voisinage de la ligne de décollement, il montre l'importance de la méthode des lames d'air chaud pour déterminer la position de la ligne de décollement.

Un fil de soie, placé au même endroit que le système de fils chauds, s'agite sans cesse en n'indiquant jamais une direction précise; aucune différence sensible ne peut donc apparaître dans la direction de ce fil de soie quand l'écoulement se fait avec ou sans décollement.

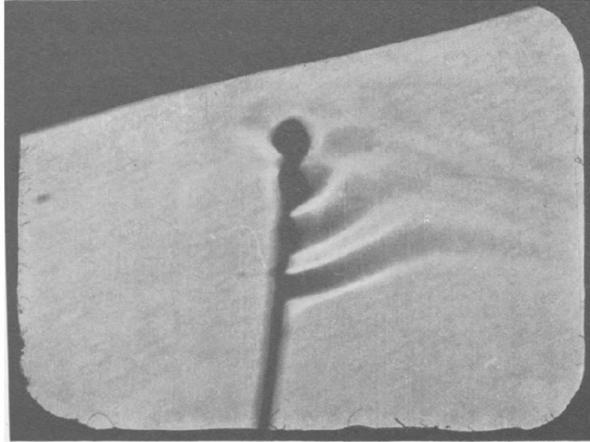


Fig 1

Angle d'ouverture du divergent :  $31^\circ$   
Vitesse moyenne au col : 3 m/s  
Nombre de vues par seconde : 8  
Durée de pose :  $1/200^e$  de seconde

### III. — Observation des différents régimes d'écoulement.

Dans le divergent  $Re$ , avec la vitesse de rotation du ventilateur  $R_s$ , un courant de retour très instable se produit à partir de  $\alpha = 22^\circ$ , toujours le long du plan supérieur.

Dans le divergent  $As$ , avec la vitesse de rotation  $R_s$ , le courant de retour est plus stable que dans le divergent  $Re$ ; il se produit à partir de  $\alpha = 19^\circ$  environ, toujours le long du plan supérieur, sauf dans le cas de  $\alpha = 25^\circ$  (valeur déterminée à  $\pm 0^e5$  près) où l'on observe alors deux régimes différents.

Un régime I avec décollement sur le plan *supérieur* qui s'établit lorsqu'on fait démarrer lentement le ventilateur jusqu'à sa vitesse maximum.

Un régime II avec décollement sur le plan *inférieur* qui s'établit lorsqu'on pousse brusquement le ventilateur à sa vitesse maximum.

L'un des deux régimes I ou II étant établi, il persiste indéfiniment si on ne change rien aux conditions; mais, pour le régime II, si on introduit une turbulence supplémentaire, en brassant artificiellement l'air à l'entrée du diffuseur, l'écoulement change brusquement et l'on passe du régime II au régime I; au contraire, pour le régime I une modification de la turbulence demeure sans aucun effet.

Lorsque le régime II s'est établi, on peut ultérieurement faire descendre la vitesse du ventilateur, puis la faire remonter progressivement jusqu'à sa valeur maximum, on reste toujours dans le régime II.

Par raison d'analogie, avec les deux régimes d'écoulement distincts, observés par M. A. MARTINOT-LAGARDE dans l'écoulement de l'air autour d'une maquette d'aile d'avion (1), nous dirons que le régime I est stable et que le régime II est métastable.

Pensant que ces deux régimes I et II, s'établissant d'après le mode de mise en route du ventilateur, sont dus à une différence de rugosité des parois ou à la présence d'un léger ressaut sur l'une des parois, nous avons placé dans la section du col un fil d'acier de 0,5 mm, puis de 1 mm de diamètre et de 200 mm de longueur, ce fil fut appliqué d'abord contre la paroi supérieure, ensuite contre la paroi inférieure; dans tous les cas, nous n'avons pas observé de perturbation apportée aux caractéristiques des régimes I et II.

Dans le divergent As d'ouverture 31°, quand le ventilateur est mis en rotation avec la plus petite vitesse possible, le point de décollement se trouve à environ 30 cm du col le long du plan supérieur; si on augmente très peu la vitesse, le point de décollement se déplace vers l'amont, il se rapproche du col jusqu'à une distance de 10 cm environ; si la vitesse continue à augmenter, le point de décollement devient très instable et semble se déplacer vers l'aval.

Pour tous les régimes où la vitesse de rotation du ventilateur est maximum, il est impossible étant donné l'instabilité du courant de retour, de déterminer la position approximative du point de décollement.

Le film de la *figure 12* montre l'établissement du décollement, le long du plan supérieur du divergent As, lorsque partant du repos, le moteur est mis directement sous sa tension normale : la turbulence se manifeste à partir de la 71<sup>e</sup> vue, ceci quand le système de fils chauds est situé à 56 cm (distance comptée parallèlement au plan) à l'aval du col.

Nous avons également enregistré l'établissement du décollement, le long du plan supérieur du divergent As, avec le système de fils chauds situé à 22 cm à l'aval du col, quand partant du repos, le moteur est mis directement sous sa tension normale; les conditions d'expérience sont celles du film de la *figure 12*:

Angle d'ouverture :  $\alpha = 31^\circ$ .

Vitesse moyenne au col : 7 m/s.

Nombre de vues par seconde : 95.

Durée de pose : 1/190 de seconde.

Dans cette dernière expérience (fils chauds à 22 cm du col), la turbulence se manifeste à partir de la 88<sup>e</sup> vue, soit environ 1/5 de seconde plus tard que dans le premier film; la vitesse de propagation de la turbulence est donc environ de 1,70 m/s de l'aval vers l'amont. Cette expérience indique que le courant de retour, le long du plan supérieur, prend naissance dans la région de la section de sortie du divergent.

Le décollement en dehors du cas exceptionnel du divergent As d'ouverture 25°, se produisant toujours le long du plan supérieur, nous avons cherché la cause de cette anomalie.

---

(1) A. MARTINOT-LAGARDE. - C. R. 198, p. 709, 1934.

Pour se rendre compte de l'influence possible de la table sur laquelle la soufflerie est installée, on a disposé au-dessus de la soufflerie par aspiration, un grand panneau symétrique de la table par rapport à l'axe longitudinal XX' de la soufflerie; on n'observe aucune modification dans l'écoulement, même si l'on exagère l'influence possible en rapprochant davantage le panneau du bourrelet arrondi de la section d'entrée du convergent.

Enfin, nous avons étudié l'influence de l'inclinaison sur l'horizontale de l'axe de rotation du ventilateur; pour que celui-ci puisse être déplacé, on a relié son carter à la chambre C (*fig. 5*) par l'intermédiaire d'une toile de bâche disposée en forme de soufflet; dans le cas du divergent As d'ouverture  $31^\circ$ , il est nécessaire d'avoir une inclinaison de  $6^\circ$  pour pouvoir observer un changement dans l'écoulement, avec cette inclinaison le décollement ne se produit plus régulièrement le long du plan supérieur, mais tantôt le long de ce plan, tantôt le long du plan inférieur, sans qu'aucune différence apparente n'intervienne dans le mode d'établissement du courant d'air.

En conséquence, comme un défaut de montage du ventilateur peut donner une inclinaison de l'axe de rotation sur l'horizontale de  $1^\circ$  au maximum, il n'est pas possible d'incriminer un tel défaut.

A l'heure actuelle, le fait bien établi du décollement sur le plan supérieur demeure donc pour nous un phénomène inexpliqué.

---

## CHAPITRE V

### DISTRIBUTION de la PRESSION STATIQUE dans le DIVERGENT de la SOUFFLERIE par REFOULEMENT

Nous mesurons simultanément la pression statique, le long de l'axe longitudinal du plan supérieur A'B', en seize points répartis comme l'indique la *figure 14*; la dépression à la paroi, en chacun de ces points, est mesurée par une ouverture de 0,5 mm de diamètre, pratiquée dans la plaque d'ébonite

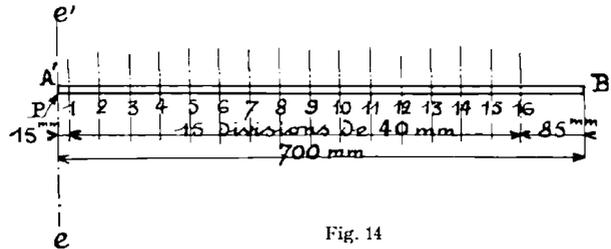


Fig. 14

(*fig. 15*); la pression statique au voisinage immédiat de la paroi sur le segment *ee'*, étant sensiblement constante, la dépression à la paroi au point P (*fig. 14*) est mesurée avec le tube *St* placé à environ 5 mm de la paroi.

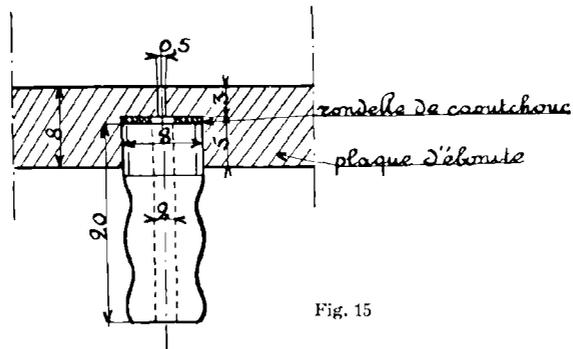


Fig. 15

Pour obtenir simultanément la dépression statique aux seize points, on utilise un manomètre multiple à alcool, comprenant dix-sept tubes de 5 mm de diamètre intérieur. L'inclinaison des tubes donne une amplification de 10 : 1 mm de la graduation représente 0,1 mm d'eau.

Les niveaux sont enregistrés photographiquement (*fig. 16*); le dernier tube à droite, sur la photographie, correspond à l'ouverture 1 située près du col; le dernier tube à gauche communique directement avec l'atmosphère, les valeurs lues sont, par conséquent, des dépressions par rapport à la pression atmosphérique.

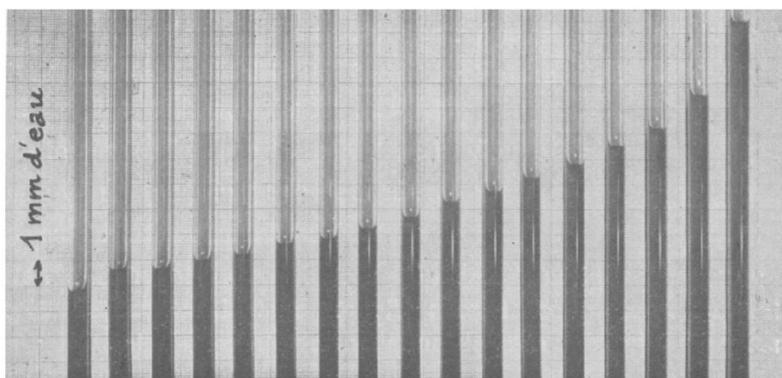


Fig. 16

Avant et après chaque série de mesures, on enregistre les zéros qui diffèrent légèrement d'un tube à l'autre. Le réservoir auquel les tubes sont réunis, est relié à une éprouvette qui, déplacée verticalement, permet de changer la position des zéros.

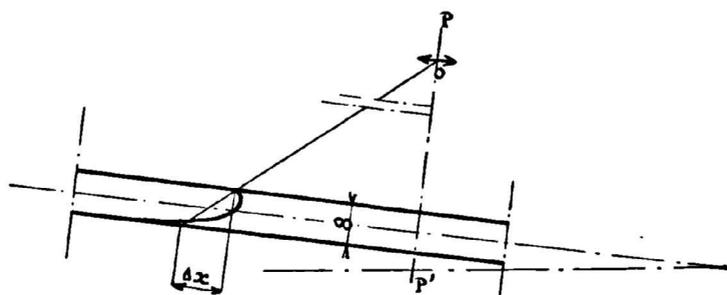


Fig. 17

Nous avons ainsi vérifié que le coefficient d'amplification du manomètre est le même pour tous les tubes et qu'il est constant dans la région utilisée; pour cela, il suffit de déplacer les zéros et de prendre un enregistrement des niveaux dans les deux positions extrêmes limitant la région utilisée du manomètre; on doit obtenir deux enregistrements identiques.

L'emploi de l'enregistrement photographique nécessite une correction  $\Delta x$  (*fig. 17*) quand le bas du ménisque n'est pas dans le plan  $PP'$  passant par le centre  $O$  de l'objectif de l'appareil photographique et perpendiculaire aux tubes, Nous faisons chaque fois cette correction  $\Delta x$  qui, dans nos mesures, atteint la valeur maximum 0,25 mm d'eau.



Fig. 18. — Distribution de la pression statique le long du plan supérieur du divergent, pour des angles d'ouverture variant de 0 à 30°.

Nous avons obtenu pour des angles d'ouverture variant de 0 à 30°, une série de clichés avec la vitesse de rotation du ventilateur  $R_1$  et une autre série avec la vitesse de rotation  $R_3$ . Quand les niveaux deviennent instables, pour un angle d'ouverture et une vitesse de rotation donnés, on enregistre une série de clichés dans le but d'étudier les variations de pression dues à la turbulence. Avec la vitesse de rotation  $R_3$  les niveaux sont stables jusqu'à l'angle d'ouverture de 22°, puis de 22° à 30°, les niveaux deviennent de plus en plus instables, l'amplitude maximum des variations de pression atteint environ 2 mm d'eau. Avec la vitesse de rotation  $R_1$ , les niveaux sont instables à partir de 24°, l'amplitude maximum des variations n'atteint pas 1 mm d'eau.

Le tableau 2 donne les dépressions statiques, par rapport à la pression atmosphérique, dans le cas de  $R_3$  (la première ligne horizontale contient les numéros de repère des points de mesure indiqués sur la figure 14).

Ces résultats sont portés sur la figure 18 (sur l'horizontale correspondant à une pression nulle, on a porté les numéros de repère des points de mesure).

Pour les angles de 22 à 30°, on a simplement tracé un segment de droite joignant le maximum et le minimum des pressions enregistrées.

TABLEAU 2

$\alpha$	P	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
degrés																	
0	0,66	0,65	0,6	0,56	0,53	0,5	0,46	0,42	0,38	0,35	0,3	0,26	0,23	0,2	0,16	0,13	0,1
2	0,9	0,85	0,73	0,66	0,6	0,56	0,51	0,48	0,45	0,43	0,4	0,36	0,33	0,3	0,26	0,23	0,2
3	1,56	1,5	1,33	1,23	1,11	1,03	0,96	0,87	0,82	0,77	0,7	0,63	0,56	0,5	0,43	0,36	0,3
4	2,2	2,1	1,87	1,71	1,56	1,4	1,35	1,25	1,16	1,07	0,96	0,8	0,7	0,6	0,56	0,45	0,35
5	2,83	2,7	2,43	2,25	2,07	1,9	1,75	1,6	1,5	1,3	1,2	1,1	0,93	0,8	0,68	0,5	0,4
6	3,5	3,3	3	2,7	2,5	2,3	2,13	1,97	1,8	1,6	1,45	1,2	1,1	0,93	0,7	0,6	0,45
7	4,1	3,9	3,5	3,2	2,9	2,6	2,4	2,23	2,03	1,83	1,6	1,42	1,23	1,03	0,85	0,6	0,5
8	4,7	4,5	4	3,6	3,3	3	2,7	2,5	2,3	2,03	1,8	1,5	1,3	1,3	0,9	0,7	0,5
9	5,3	5	4,5	4	3,6	3,3	3	2,73	2,47	2,2	1,93	1,66	1,4	1,2	0,9	0,7	0,5
10	5,9	5,6	5	4,4	4	3,6	3,3	2,98	2,67	2,3	2,03	1,7	1,5	1,24	1	0,76	0,52
12	7,1	6,7	5,8	5,2	4,6	4,13	3,7	3,3	2,9	2,6	2,3	1,9	1,6	1,37	1	0,8	0,55
14	8,3	7,57	6,5	5,7	5	4,4	4	3,5	3,1	2,7	2,38	2,07	1,73	1,4	1,1	0,8	0,55
16	9,5	8,2	6,9	6,1	5,2	4,6	4,1	3,6	3,2	2,8	2,43	2,1	1,75	1,4	1,1	0,8	0,55
18	10,6	8,9	7,2	6,2	5,4	4,7	4,2	3,7	3,25	2,8	2,45	2,12	1,77	1,4	1,15	0,86	0,58
20	11,6	9,5	7,4	6,4	5,5	4,8	4,2	3,75	3,27	2,86	2,45	2,12	1,8	1,4	1,17	0,86	0,58
22	12,6	9,8	7,6	6,46	5,6	4,9	4,3	3,75	3,3	2,87	2,46	2,12	1,8	1,4	1,17	0,9	0,6
22 à 30° maxima		10,5	7,7	6,3	5,5	4,8	4,1	3,5	3,1	2,6	2,2	1,9	1,6	1,4	1,2	0,9	0,7
22 à 30° minima		8,7	6,1	4,8	4,3	3,8	3,2	2,8	2,4	2,2	1,9	1,6	1,4	1,1	0,9	0,6	0,4

On admet généralement que le rendement d'un diffuseur est indépendant du débit et que les pertes sont proportionnelles au carré de la vitesse.

Dans ces conditions, le rapport des dépressions statiques mesurées, par rapport à la pression totale en amont du divergent, en deux points quelconques de la veine divergente doit rester constant quand le débit varie.

Nous avons mesuré ce rapport pour les points 1 et 16 (*fig. 14*); nous appelons  $h_1$  et  $h_{16}$  les dépressions statiques aux points 1 et 16, par rapport à la pression totale mesurée au centre de la section du col avec le tube  $T_2$ ; les dépressions statiques sont mesurées par les ouvertures 1 et 16.

Le tube  $T_2$ , les ouvertures 1 et 16 communiquent avec le manomètre multiple.

Le rapport  $\frac{h_{16}}{h_1}$  a été calculé pour deux débits : d'abord avec une vitesse de rotation du ventilateur  $R_1$ , puis une vitesse de rotation  $R_3$ .

Les résultats, pour des angles d'ouvertures de  $0,8$  et  $22^\circ$ , sont portés dans le tableau ci-dessous.

TABLEAU 3

	$0^\circ$		$8^\circ$		$22^\circ$	
	$R_1$	$R_3$	$R_1$	$R_3$	$R_1$	$R_3$
$h_1$	4,2	6,35	8,05	11,2	11	16,45
$h_{16}$	4,7	6,9	5,26	7,18	5,3	7,18
$\frac{h_{16}}{h_1}$	1,11	1,08	0,65	0,64	0,48	0,43

Avec les ouvertures de  $0^\circ$  et de  $8^\circ$  la différence, entre les valeurs du rapport  $\frac{h_{16}}{h_1}$  aux vitesses de rotation  $R_1$  et  $R_3$ , est presque insensible. Mais avec une ouverture de  $22^\circ$  le rapport  $\frac{h_{16}}{h_1}$  diminue nettement quand la vitesse augmente; d'après ce résultat, la perte dans le divergent d'ouverture  $22^\circ$  n'est donc pas rigoureusement proportionnelle au carré de la vitesse, mais proportionnelle à :

$$k \cdot V^m \quad \text{où : } m < 2$$

ÉTUDE du CHAMP AÉRODYNAMIQUE

I. — Distribution des vitesses.

Les mesures sont faites dans le plan vertical médian. Dans le divergent  $Re$  la pression dynamique est enregistrée à l'aide du tube de Pitot double et du manomètre Richard, le long du segment  $ee'$  de la section du col, puis le long du segment  $ss'$  de la section de sortie.

Dans le divergent  $As$  le long du segment  $ee'$ , on enregistre avec le tube  $Sl$ , la dépression statique par rapport à la pression atmosphérique; en chaque point cette dépression est égale à la pression dynamique (à moins de 1 % près) puisque, dans le convergent la perte de charge étant nulle, la pression totale dans la section du col reste égale à la pression atmosphérique jusqu'à environ 5 mm de la paroi. La pression dynamique est enregistrée le long du segment  $ss'$  avec le tube de Pitot double.

Sur la courbe enregistrée en un point, on obtient la valeur moyenne par rapport au temps, de la pression dynamique, en prenant le milieu de l'amplitude délimitée par les valeurs maximum et minimum enregistrées. Dans la plupart de nos mesures, la pression dynamique est voisine de 10 mm d'eau; avec une telle pression, on peut de cette façon connaître la vitesse à moins de 3 % près. Cependant, quand on calcule la vitesse d'après les mesures de

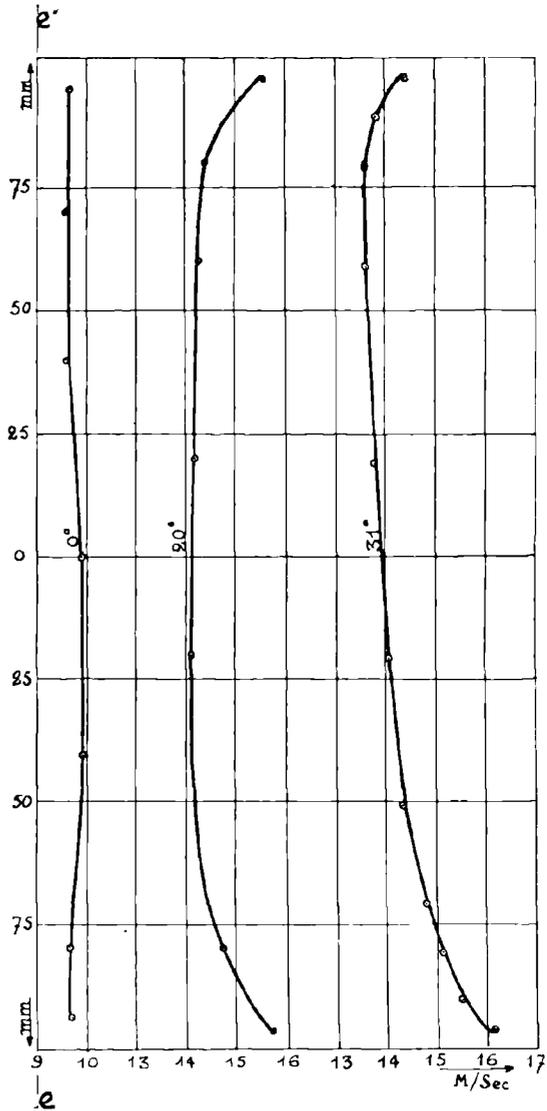


Fig. 19  
Distribution des vitesses le long du segment  $ee'$  du divergent  $R$

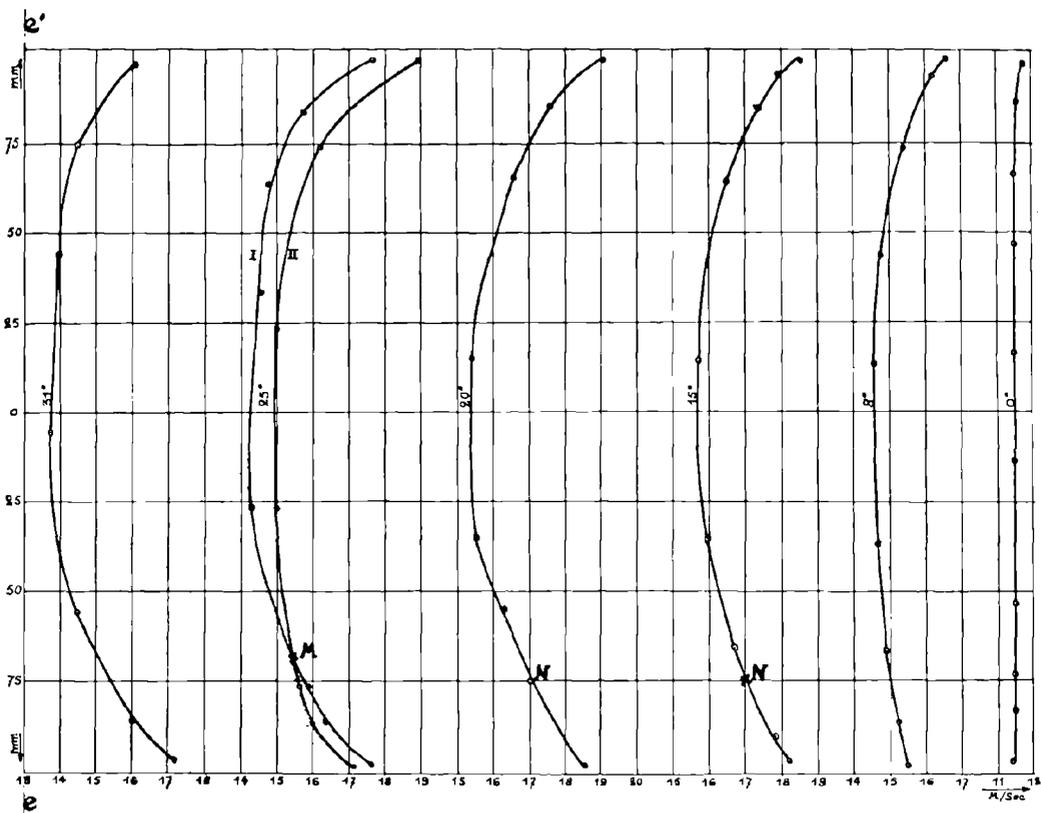


Fig. 20. — Distribution des vitesses le long du segment ee' du divergent As

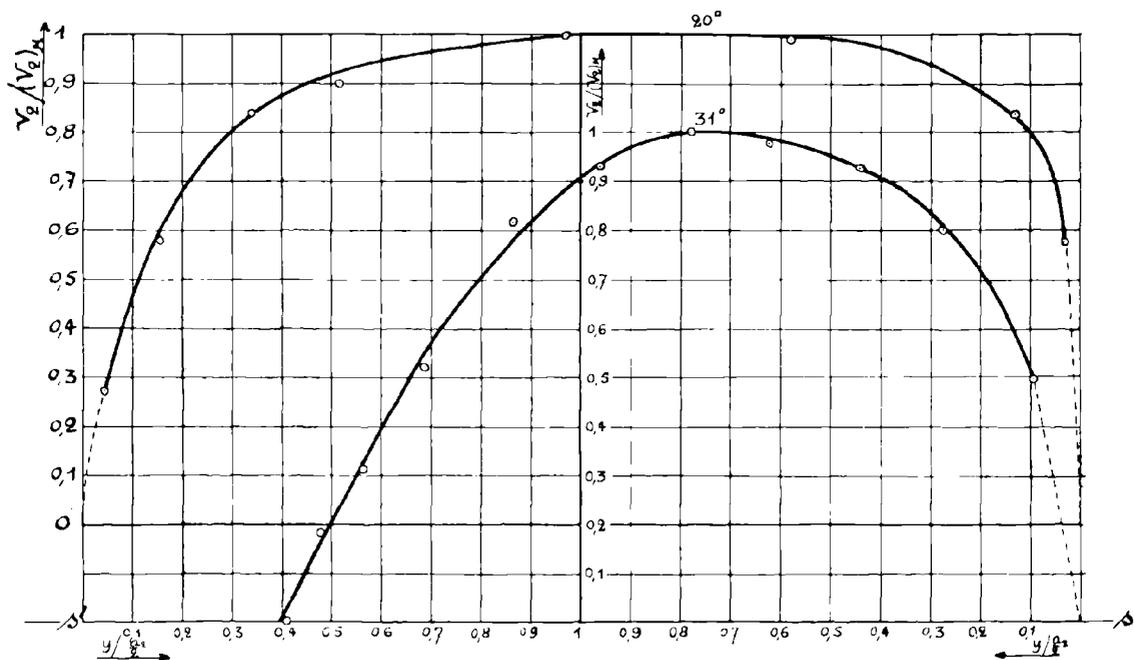


Fig. 21. — Distribution le long du segment ss' du divergent Re des vitesses rapportées à la vitesse maximum sur ss'

pression dynamique moyenne par rapport au temps, l'erreur sur la vitesse, si la turbulence est grande, peut devenir bien supérieure à 3 %.

Les mesures sont faites dans le divergent Re avec la vitesse de rotation du ventilateur R<sub>2</sub> et dans le divergent As avec la vitesse de rotation R<sub>3</sub>.

Au col, quand  $\alpha = 0^\circ$ , la vitesse est répartie uniformément (*fig. 20*) dans le divergent As, mais elle augmente légèrement vers le centre dans le cas du divergent Re (*fig. 19*). Dès que l'angle d'ouverture augmente, le profil des vitesses présente au centre un minimum très prononcé; si un décollement se produit, le courant devient dissymétrique, les vitesses étant notablement plus faibles au voisinage du plan le long duquel le décollement est observé, c'est ce que montre la *figure 19* quand  $\alpha = 31^\circ$  et la *figure 20* quand,  $\alpha = 31^\circ$  et  $\alpha = 25^\circ$  où les courbes I et II correspondent respectivement au régime I avec décollement sur le plan supérieur et au régime II avec décollement sur le plan inférieur. Remarquons que dans tous les cas la couche limite au col a une très faible épaisseur.

Dans la section de sortie, nous avons rapporté les vitesses V<sub>2</sub> mesurées sur le segment ss', à la vitesse maximum sur ce segment : (V<sub>2</sub>)<sub>M</sub>.

Les valeurs de  $\frac{V_2}{(V_2)_M}$  sont portées sur les *figures 21* et *22* en fonction de la distance à la paroi y comptée sur le segment ss' et rapportée à la demi-hauteur  $\frac{a_2}{2}$ .

Dans les tableaux 4 et 5, la partie au-dessus du trait correspond à la moitié supérieure de la section de sortie, et la partie au-dessous du trait correspond à la moitié inférieure de la section de sortie.

TABLEAU 4 Valeurs de V<sub>2</sub> et  $\frac{V_2}{(V_2)_M}$  dans le divergent Re

$\alpha = 20^\circ$				$\alpha = 31^\circ$			
$\frac{a_2}{2} = 220,5 \text{ mm}$		$(V_2)_M = 9,4 \text{ m/sec}$		$\frac{a_2}{2} = 291 \text{ mm}$		$(V_2)_M = 9,8 \text{ m/sec}$	
y mm	$\frac{y}{\frac{a_2}{2}}$	V <sub>2</sub> m/sec	$\frac{V_2}{(V_2)_M}$	y mm	$\frac{y}{\frac{a_2}{2}}$	V <sub>2</sub> m/sec	$\frac{V_2}{(V_2)_M}$
8	0,036	2,6	0,276	120	0,41	0	0
34	0,154	5,4	0,58	140	0,48	1,8	0,184
74	0,335	7,9	0,84	164	0,56	3,1	0,316
114	0,516	8,4	0,9	200	0,69	5,1	0,52
214	0,97	9,4	1	252	0,86	8	0,82
6	0,027	5,4	0,58	28	0,096	4,9	0,5
28	0,127	7,9	0,84	80	0,275	7,8	0,8
128	0,58	9,3	0,99	128	0,44	9,1	0,93
				180	0,62	9,6	0,98
				228	0,78	9,8	1
				280	0,96	9,1	0,93

TABEAU 5

Valeurs de  $V_2$  et  $\frac{V_2}{(V_2)_M}$  dans le divergent As

$\alpha = 0^\circ$				$\alpha = 8^\circ$			
$\frac{a_2}{2} = 100,5 \text{ mm}$		$(V_2)_M = 12,3 \text{ m/sec}$		$\frac{a_2}{2} = 150 \text{ mm}$		$(V_2)_M = 10,7 \text{ m/sec}$	
$y \text{ mm}$	$\frac{y}{\frac{a_2}{2}}$	$V_2 \text{ m/sec}$	$\frac{V_2}{(V_2)_M}$	$y \text{ mm}$	$\frac{y}{\frac{a_2}{2}}$	$V_2 \text{ m/sec}$	$\frac{V_2}{(V_2)_M}$
6	0,06	10,5	0,85	4	0,026	6,2	0,58
20	0,2	11,2	0,91	28	0,187	9,4	0,88
60	0,6	11,5	0,935	58	0,386	9,5	0,89
6	0,06	11,3	0,92	108	0,72	9,5	0,89
15	0,15	12,3	1	4	0,026	6,9	0,645
25	0,25	12,1	0,985	12	0,08	9,9	0,925
45	0,45	11,8	0,96	42	0,28	10,7	1
95	0,95	11,8	0,96	92	0,614	10,2	0,954

$\alpha = 15^\circ$				$\alpha = 20^\circ$			
$\frac{a_2}{2} = 192 \text{ mm}$		$(V_2)_M = 9,20 \text{ m/sec}$		$\frac{a_2}{2} = 220,5 \text{ mm}$		$(V_2)_M = 9,1 \text{ m/sec}$	
$y \text{ mm}$	$\frac{y}{\frac{a_2}{2}}$	$V_2 \text{ m/sec}$	$\frac{V_2}{(V_2)_M}$	$y \text{ mm}$	$\frac{y}{\frac{a_2}{2}}$	$V_2 \text{ m/sec}$	$\frac{V_2}{(V_2)_M}$
6	0,031	4	0,435	2	0,009	— 1,7	— 0,187
22	0,115	6,6	0,72	10	0,045	— 1,7	— 0,187
52	0,27	8,2	0,89	16	0,073	— 1,2	— 0,132
152	0,79	9,1	0,99	26	0,118	1,7	0,187
6	0,031	5,6	0,61	36	0,164	3	0,33
16	0,083	6,2	0,675	44	0,2	3,8	0,42
36	0,188	8,4	0,91	56	0,254	5	0,55
86	0,45	9	0,98	84	0,38	6,3	0,692
136	0,71	9,1	0,99	184	0,835	7,5	0,825
				6	0,027	4	0,44
				36	0,164	7,7	0,85
				66	0,3	8,9	0,98
				166	0,755	8,5	0,935

TABLEAU 5 (suite)  
Valeurs de  $V_2$  et  $\frac{V_2}{(V_2)_M}$  dans le divergent As

$\alpha = 25^\circ$				$\alpha = 31^\circ$			
$\frac{a_2}{2} = 251,5 \text{ mm}$		$(V_2)_M = 9,4 \text{ m/sec}$		$\frac{a_2}{2} = 291 \text{ mm}$		$(V_2)_M = 9,7 \text{ m/sec}$	
$y \text{ mm}$	$\frac{y}{\frac{a_2}{2}}$	$V_2 \text{ m/sec}$	$\frac{V_2}{(V_2)_M}$	$y \text{ mm}$	$\frac{y}{\frac{a_2}{2}}$	$V_2 \text{ m/sec}$	$\frac{V_2}{(V_2)_M}$
16	0,064	— 1,2	— 0,128	3	0,010	— 1,2	— 0,124
22	0,088	— 1,5	— 0,16	12	0,041	— 1,2	— 0,124
26	0,104	— 1,7	— 0,18	21	0,072	— 1,2	— 0,124
46	0,183	— 1,2	— 0,128	30	0,103	— 1,7	— 0,175
56	0,223	— 0,8	— 0,085	39	0,134	— 2,4	— 0,248
66	0,262	0	0	48	0,165	— 2,1	— 0,216
76	0,3	1,2	0,128	57	0,196	— 2,1	— 0,216
86	0,34	1,7	0,181	66	0,226	— 1,7	— 0,175
114	0,455	3,4	0,362	75	0,258	— 1,7	— 0,175
216	0,86	8,1	0,86	84	0,29	0	0
10	0,04	5,4	0,575	93	0,32	0	0
48	0,192	9	0,96	114	0,392	2,4	0,248
98	0,39	9,4	1	135	0,465	3,2	0,33
198	0,79	9	0,96	153	0,525	4	0,41
				156	0,54	5	0,515
				177	0,61	5,5	0,57
				252	0,865	7,7	0,795
				12	0,041	5,2	0,536
				72	0,25	8,7	0,9
				132	0,453	9,6	0,99
				231	0,795	9,4	0,97

Les courbes ainsi obtenues confirment l'ensemble des résultats fournis par la visualisation, elles montrent (*fig. 22*) nettement la présence du décollement au voisinage du plan supérieur. Quand l'écoulement se fait sans décollement, les courbes sont déjà dissymétriques avec un maximum de vitesse déplacé vers le plan inférieur. Dans le divergent As, l'épaisseur de la zone du courant de retour augmente assez régulièrement avec l'angle d'ouverture (*fig. 22*).

Le long du plan supérieur du divergent Re quand  $\alpha = 31^\circ$ , le courant de retour n'est pas permanent; on ne peut pas faire de mesures dans cette zone où le courant se rétablit par moment dans le sens direct (*fig. 21*,  $\alpha = 31^\circ$ ).

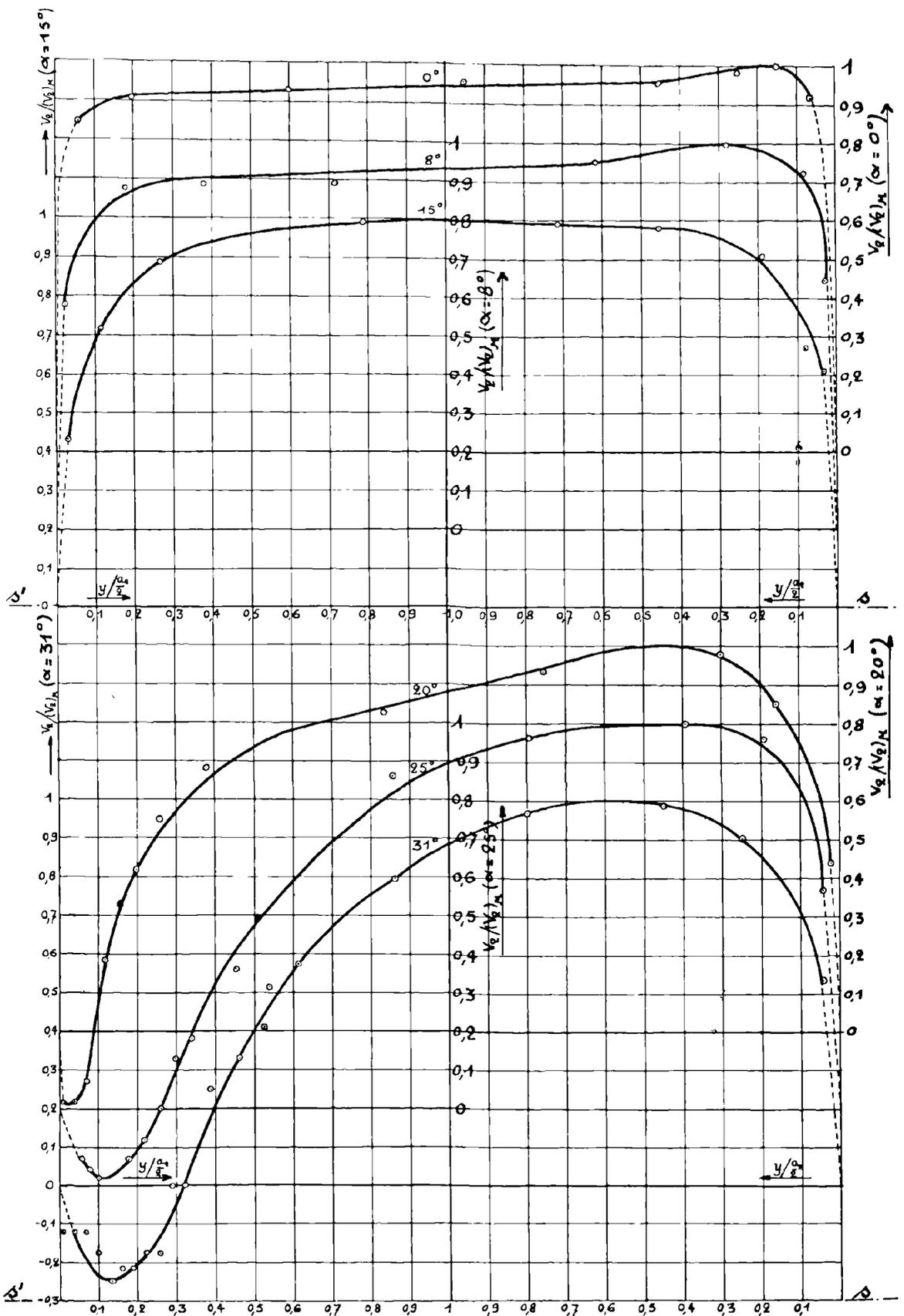


Fig. 22. -- Distribution le long du segment  $ss'$  du divergent  $As$  des vitesses rapportées à la vitesse maximum sur  $ss'$

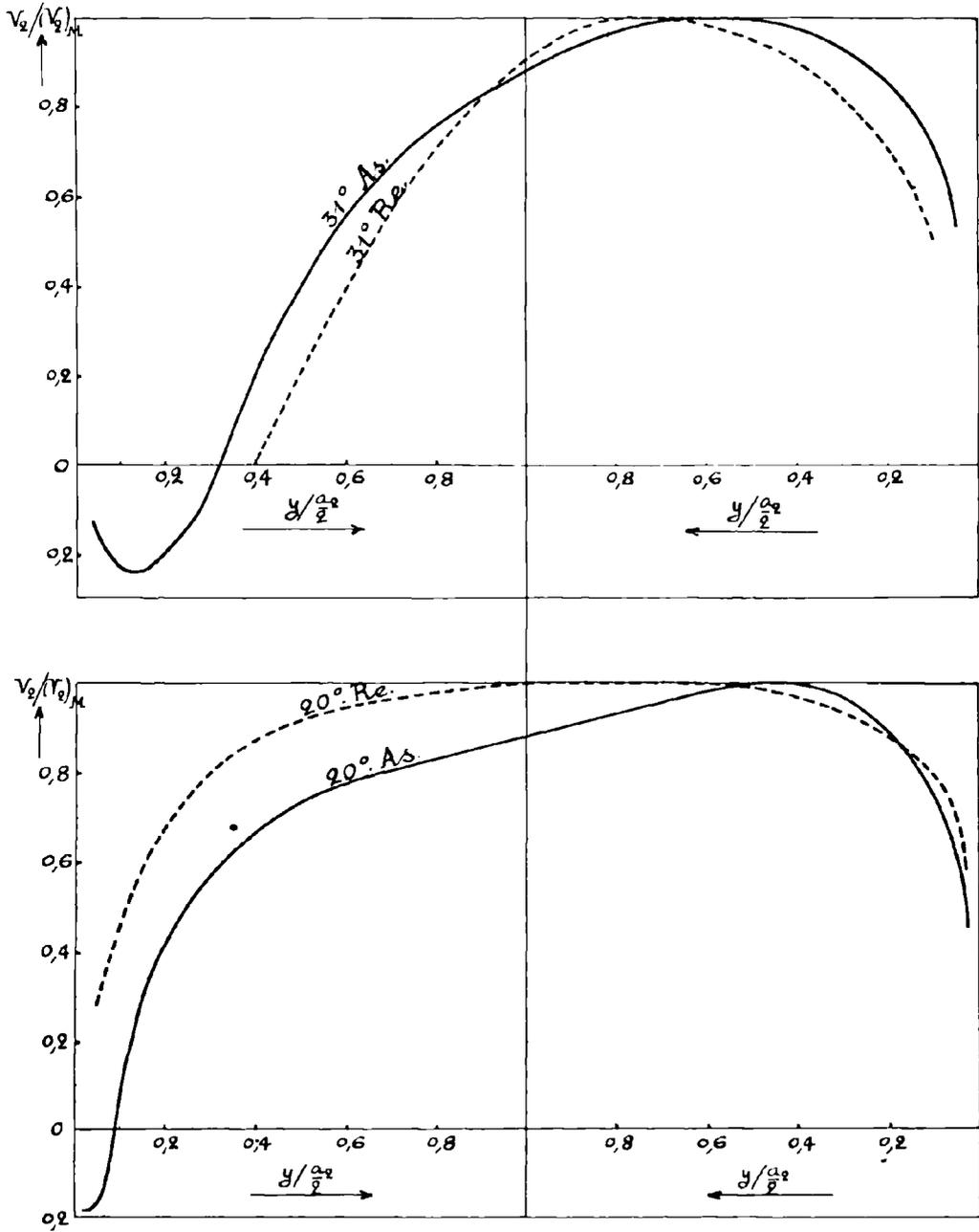


Fig. 23. — Comparaison des distributions de vitesse dans les sections de sortie des divergents Re et As d'ouverture  $\alpha = 20^\circ$  et  $\alpha = 31^\circ$

Nous avons tracé les courbes des distributions de vitesse à la sortie du divergent, en coordonnées logarithmiques; ces courbes sont intéressantes dans le cas du décollement, c'est-à-dire dans le divergent Re avec  $\alpha = 31^\circ$  et dans le divergent As avec  $\alpha = 20^\circ, 25^\circ$  et  $31^\circ$ .

TABLEAU 6

Valeurs de  $\frac{V_2}{(V_2)_M}$  en fonction de  $\frac{z}{Z}$

Divergent Re			Divergent As								
$\alpha = 31^\circ$			$\alpha = 20^\circ$			$\alpha = 25^\circ$			$\alpha = 31^\circ$		
$y_0$ = 117 mm	$Z$ = 247 mm		$y_0$ = 19,8 mm	$Z$ = 322 mm		$y_0$ = 66 mm	$Z$ = 324 mm		$y_0$ = 93 mm	$Z$ = 321 mm	
$z$	$\frac{z}{Z}$	$\frac{V_2}{(V_2)_M}$									
11	0,044	0,1	4,4	0,013	0,10	9,4	0,029	0,1	11,7	0,036	0,1
43	0,17	0,3	24,3	0,075	0,42	34,6	0,106	0,32	52,5	0,16	0,4
87	0,35	0,57	68,4	0,21	0,67	110	0,34	0,69	110,7	0,34	0,67
145	0,58	0,82	134,5	0,41	0,81	210,6	0,65	0,93	198	0,61	0,88
247	1	1	200,7	0,62	0,88	324	1	1	321	1	1
			322	1	1						

Sur papier doublement logarithmique (*fig. 25*) nous portons en abscisses

$\frac{z}{Z}$  et en ordonnées  $\frac{V_2}{(V_2)_M}$ ; nous appelons  $z$  la distance du point de vitesse  $V_2$  au point O où la vitesse change de signe (*fig 24*) et  $Z$  la valeur de  $z$  quand la vitesse est égale à  $(V_2)_M$ .

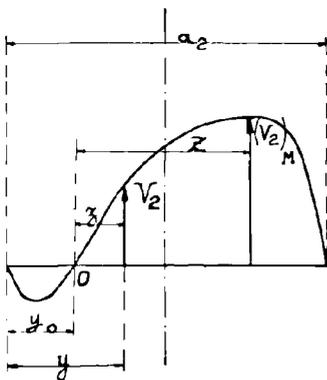


Fig. 24

Paramètres de la courbe de répartition des vitesses dans le cas d'un décollement

Nous avons calculé les valeurs des variables  $\frac{z}{Z}$  et  $\frac{V_2}{(V_2)_M}$  pour un certain nombre de points, choisis sur chaque profil de vitesse, en nombre suffisant pour définir la répartition des vitesses; ces valeurs sont contenues dans le tableau 6.

La partie du profil des vitesses adjacente à la zone du courant de retour, se laisse compenser par deux droites dont les angles avec l'axe des abscisses ont pour tangentes  $4/5$  et  $1/4$ ; on a

donc successivement deux lois de répartition données par les expressions :

$$V_2 = K \cdot z^{4,5} \quad \text{et} \quad V_2 = K' \cdot z^{1/4}$$

où K et K' sont des constantes.

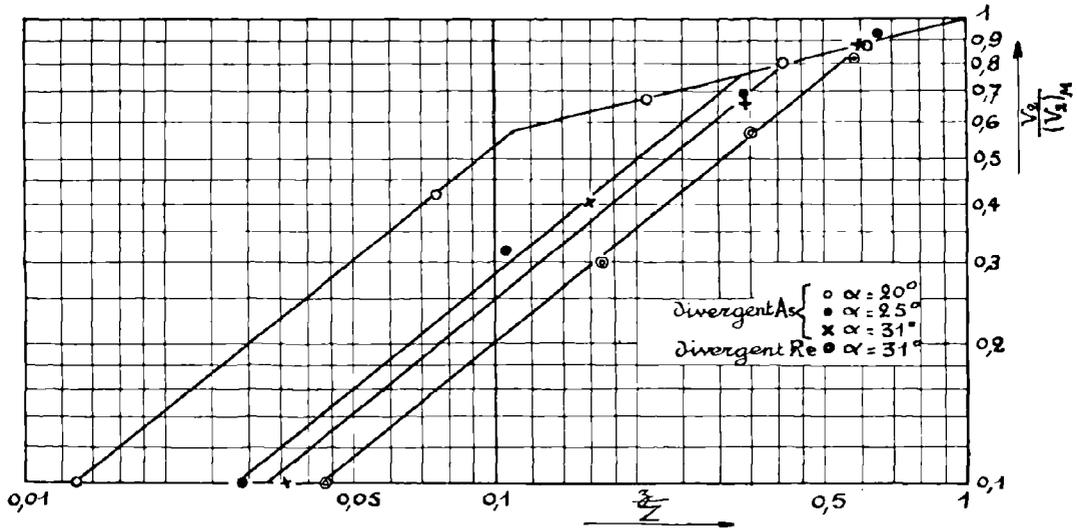


Fig. 25. — Distribution des vitesses en coordonnées logarithmiques

## II. — Distribution de la pression statique.

Dans les divergents Re et As si  $\alpha = 0^\circ$ , la pression statique au col et dans toutes les sections droites situées le long du divergent, est répartie uniformément dans chacune de ces sections. Mais si l'angle d'ouverture  $\alpha$  croît, la pression statique sur le segment  $ee'$  subit la variation de direction des filets; elle doit diminuer à mesure que l'on se rapproche du centre de courbure des filets, autrement dit, comme le montrent nos mesures, la pression statique sur le segment  $ee'$  diminue fortement vers les parois.

La variation maximum de la dépression statique depuis le centre du col jusqu'à la paroi, a lieu dans les divergents Re et As pour les angles  $\alpha$  compris entre  $20^\circ$  et  $31^\circ$ , elle est d'environ  $0,4 H$  dans le divergent Re et  $0,5 H$  dans le divergent As ( $H = \frac{\rho}{2} (V_1)^2_m$ ).

Sur le segment  $ss'$ , quand  $\alpha$  croît, la pression statique reste constante dans la région centrale sur les  $3/4$  de la hauteur, puis augmente près des parois; la variation maximum a lieu dans le divergent As quand  $\alpha = 31^\circ$ , elle est égale à  $0,10 H$ .

## III. — Distribution de la pression totale.

Dans le plan vertical passant par l'axe du divergent Re, nous avons relevé les courbes de pression totale pour l'angle d'ouverture de  $30^\circ$  et la vitesse de rotation  $R_1$ , les résultats sont résumés sur la figure 27.

Les mesures sont faites à l'aide du tube  $T_1$  relié au manomètre à colonne liquide; comme zéro des pressions, nous avons pris la pression atmosphérique.

Sur la figure, les cinq sections de mesure sont placées dans leurs positions

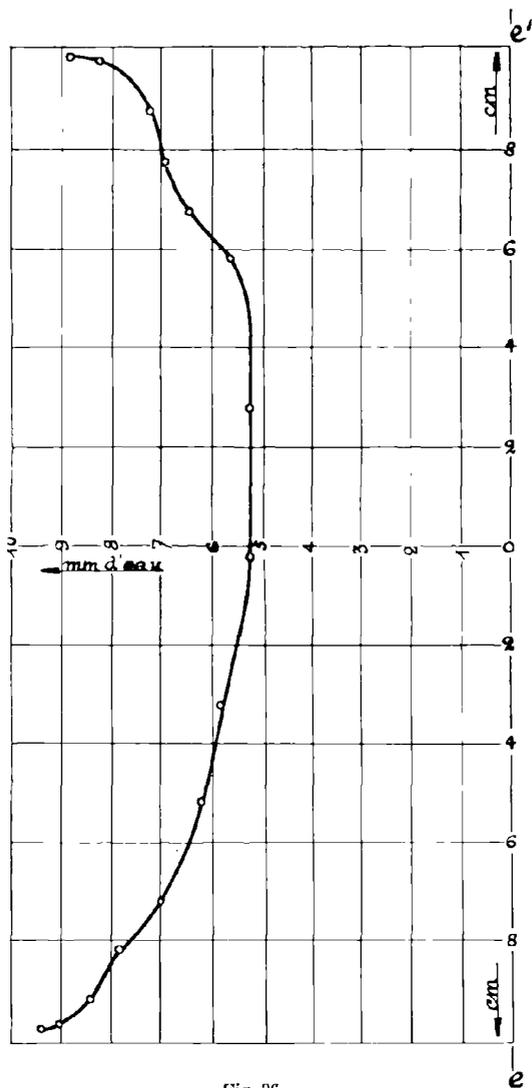


Fig. 26

Distribution de la dépression statique par rapport à la pression atmosphérique, le long du segment  $ee'$  du divergent  $Re$  ( $\alpha = 30^\circ$ , vitesse de rotation du ventilateur  $R_1$ )

respectives, I est la section d'entrée du divergent; dans cette section, la courbe de répartition de la pression totale reste la même pour tous les angles d'ouverture allant de  $0$  à  $30^\circ$ .

Le tube  $T_1$  étant disposé horizontalement, la mesure la plus proche des parois est obtenue en appliquant l'extrémité du tube contre la paroi.

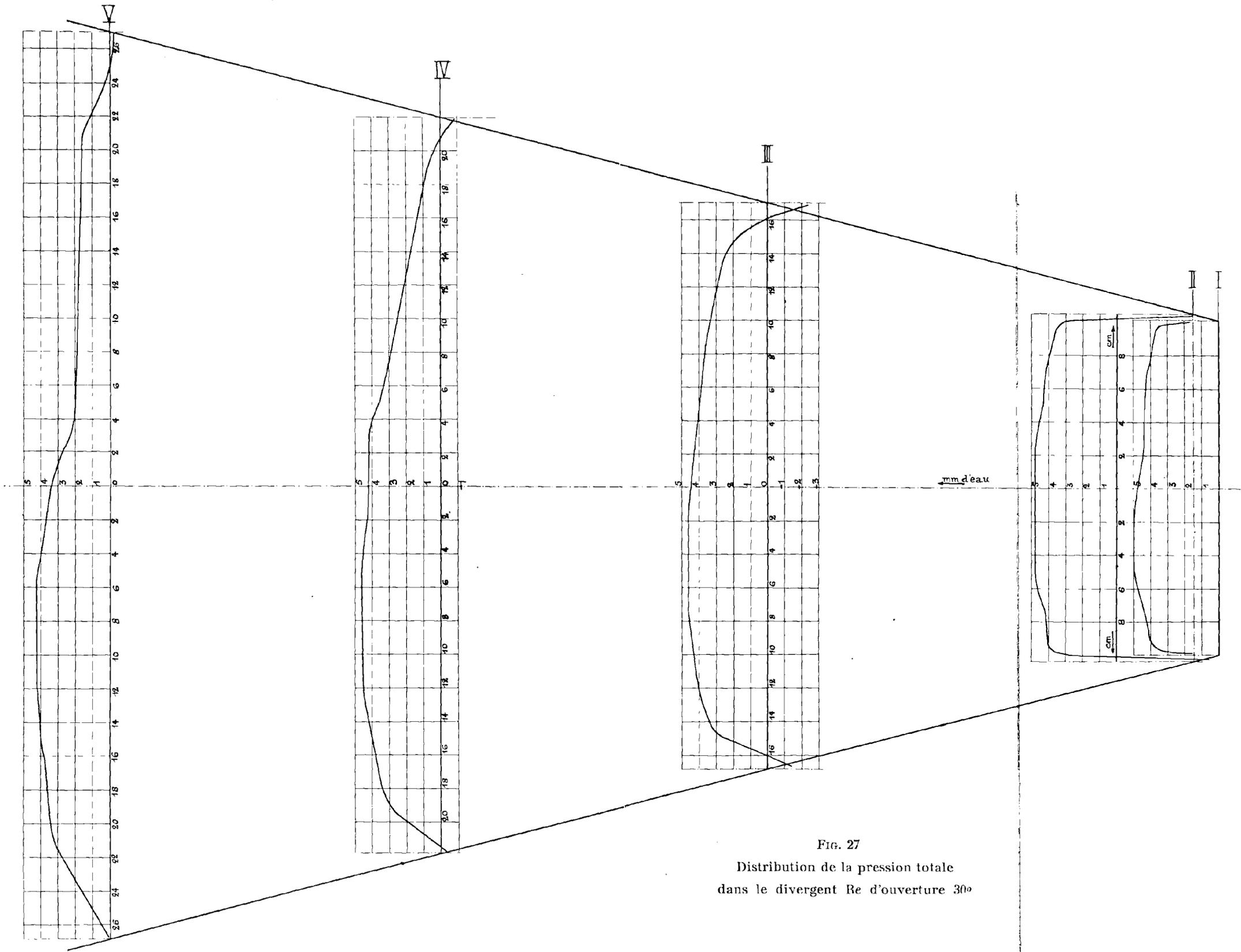


FIG. 27  
 Distribution de la pression totale  
 dans le divergent Re d'ouverture 30°



Près des deux plans mobiles, l'amplitude des variations de la pression totale dépasse 4 mm d'eau aussi, dans ce cas et principalement dans la section V, les mesures ne donnent que des valeurs moyennes approchées.

Les courbes montrent que la couche limite augmente régulièrement tout le long du divergent, au surplus, il semble se dégager une baisse graduelle du point de vitesse maximum vers le plan inférieur.

On voit, d'après les profils relevés dans les sections I et II que la pression totale au voisinage des deux plans mobiles du divergent, immédiatement après le col, diminue brusquement; remarquons d'ailleurs que la pression statique dans la même région, mesurée avec le tube *Sf* et par les orifices percés dans la paroi, varie de façon continue.

Des mesures des pressions totale et statique le long des plans dans cette zone, on a déduit la courbe donnant la vitesse; cette courbe met en évidence une chute brusque de vitesse qui se produit près des parois (jusqu'à une distance d'environ 3 mm de la paroi quand  $\alpha = 30^\circ$ ) entre les sections I et II. Cette chute brusque diminue avec l'angle d'ouverture et disparaît quand  $\alpha = 0$ .

#### IV. — Étude de la turbulence.

En un point où la vitesse reste sensiblement constante, quand on apporte certaines modifications aux conditions de l'écoulement (par exemple, substitution de l'aspiration au refoulement ou variation de l'angle  $\alpha$ ), les mesures effectuées avec le manomètre enregistreur permettent d'étudier, d'une manière approchée, les variations relatives de l'amplitude des oscillations de pression.

##### 1. — Essais préliminaires.

*Rentrées d'air.* — La soufflerie par aspiration, décrite plus haut, a d'abord été réalisée sans filtre et sans bourrelet arrondi. De plus, des rentrées d'air se produisaient le long des raccords entre les plans mobiles et les glaces, on sait que des rentrées d'air à faible vitesse favorisent la formation du courant de retour. L'écoulement à travers le divergent se faisait dans ce cas (enregistrement 3, *fig.* 28) avec un décollement important sur le plan *inférieur*, se manifestant par des variations de pression statique au col, dont l'amplitude est plus grande que dans tous les autres cas.

Mais, si l'on bouche les fuites (enregistrement 4), le décollement se produit le long du plan *supérieur* et l'amplitude des oscillations de pression statique diminue.

*Filtre et bourrelet.* — En plaçant le filtre et le bourrelet arrondi, l'amplitude des oscillations (enregistrement 2) diminue de nouveau et le décollement a lieu sur le plan *supérieur*.

Le filtre placé en amont du divergent n'a d'influence ni sur les profils des vitesses le long des segments *ee'* et *ss'*, ni sur l'épaisseur de la région du courant de retour; il amortit simplement les pulsations de pression statique au col et dans la veine divergente.

## 2. — *Divergents Re et As.*

Les enregistrements 1 et 1' (*fig. 28*) montrent que les variations de la pression totale, dues à la turbulence, sont plus grandes dans la soufflerie par refoulement que dans la soufflerie par aspiration.

Les enregistrements 2 et 2' montrent que les variations de la pression statique à l'entrée du divergent, sont plus petites dans la soufflerie par refoulement que dans la soufflerie par aspiration.

En outre, la vitesse mesurée avec le Pitot double dans la section de sortie du divergent *Re*, a des oscillations plus faibles que dans la section de sortie du divergent *As*; ceci constitue un indice de la présence d'un décollement moins intense dans le divergent *Re*.

Remarquons encore que dans les divergents *Re* et *As*, les oscillations des pressions enregistrées le long du segment *ee'* ont une plus grande amplitude près des parois qu'au centre.

D'après les enregistrements 5 et 6 qui donnent, dans le divergent *As* quand  $\alpha = 25^\circ$ , la pression statique au col respectivement en régime stable et métastable, on voit que l'amplitude des variations de la pression statique est plus grande en régime stable; or, l'épaisseur de la zone occupée par le courant de retour du régime stable est supérieure à celle qu'occupe le courant de retour du régime métastable, l'épaisseur du courant de retour et l'amplitude des variations de la pression statique au col varient donc dans le même sens.

Les enregistrements 7 et 8 donnent respectivement la pression statique au col du divergent *As* avec des angles d'ouverture de  $20^\circ$  et de  $15^\circ$ , on voit que les pulsations de la pression statique disparaissent presque entièrement dès que l'on passe du régime avec décollement au régime sans décollement.

### LÉGENDE DE LA FIGURE 28

- 1° *Enregistrements obtenus au centre de la section du col.* — Vitesse moyenne en ce point : 14 m/s environ; angle d'ouverture :  $\alpha = 31$  degrés.
- Enregistrements 1 et 1' :* pression totale mesurée avec le tube  $T_2$  respectivement dans les divergents *As* et *Re*.
- Enregistrements 2 et 2' :* pression statique mesurée avec le tube *St* respectivement dans les divergents *As* et *Re*.
- Enregistrements 3 et 4 :* pression statique mesurée avec le tube *St* dans le divergent *As* quand le filtre et le bourrelet arrondi, qui précèdent le convergent, sont retirés.
- 2° *Enregistrements de la pression statique mesurée, avec le tube St, au point M (voir figure 20) du segment ee' du divergent As.* — Vitesse au point M : 15,4 m/s;  $\alpha = 25$  degrés.
- Enregistrements 5 et 6 :* obtenus respectivement dans le cas des régimes stable et métastable.
- 3° *Enregistrements de la pression statique mesurée, avec le tube St, au point N (voir figure 20) du segment ee' du divergent As.* — Vitesse au point N : 17 m/s.
- Enregistrements 7 et 8 :* obtenus respectivement avec des angles d'ouverture de  $20$  degrés et  $15$  degrés.

La présence d'un décollement n'a, au contraire, aucune action sur les oscillations de la pression totale au col qui dépendent uniquement des conditions en amont du divergent.

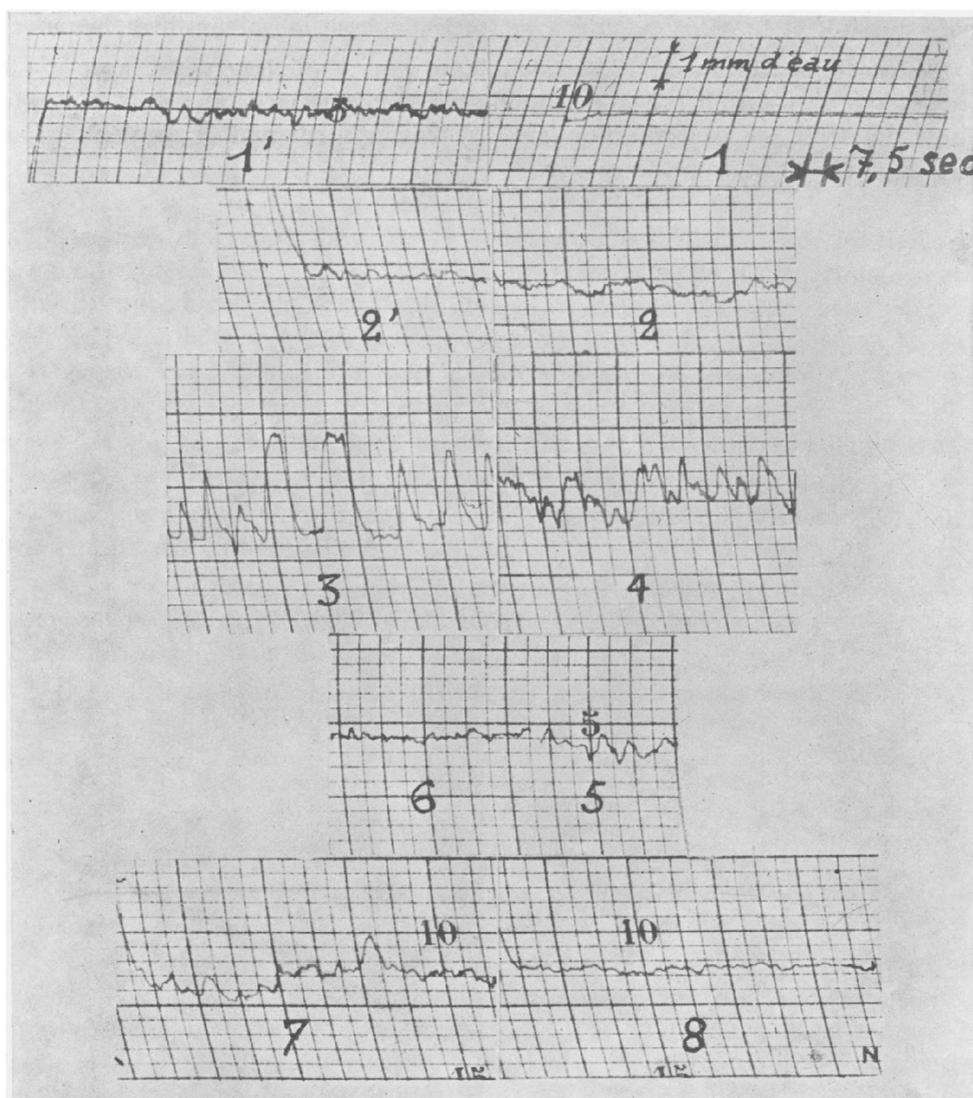


Fig. 28

3. — *Evaluation de la turbulence par intégration de la vitesse efficace.*

A la sortie du divergent, la pression dynamique a été mesurée directement avec le tube de Pitot double, le manomètre indique par suite les moyennes des carrés des vitesses par rapport au temps, la vitesse qu'on en déduit est la vitesse efficace.

Le débit à la sortie du divergent, calculé à partir des vitesses efficaces, demeure égal au débit mesuré au col tant que la turbulence est faible, c'est-à-dire chaque fois qu'il n'y a pas de décollement.

Quand un décollement se forme sur l'un des plans, la turbulence augmente aussitôt et le débit calculé à la sortie dépasse la valeur du débit au col.

L'écart maximum de 13 % est obtenu dans le divergent As, avec  $\alpha = 31^\circ$  et la vitesse de rotation  $R_3$ ; remarquons qu'en ce cas le débit à la sortie est la somme du débit positif correspondant au courant principal et du débit négatif correspondant au courant de retour.

---

RENDEMENT

Dans un divergent, l'énergie cinétique au col se transforme partiellement en énergie potentielle; nous prenons le rendement de cette transformation comme rendement  $\eta$  du diffuseur, nous le définissons par l'augmentation d'énergie potentielle moyenne par unité de débit, depuis le col jusqu'à la sortie du divergent, rapportée à l'énergie cinétique moyenne par unité de débit dans la section du col.

L'écoulement étant à deux dimensions, le rendement est calculé d'après les mesures obtenues dans le plan vertical médian.

Ces mesures sont faites à la vitesse de rotation du ventilateur  $R_2$  pour le divergent  $Re$  et  $R_3$  pour le divergent  $As$ .

La pression totale mesurée au centre de la section d'entrée de l'ajutage convergent-divergent est prise pour zéro des pressions; ce zéro est égal à la pression atmosphérique dans la soufflerie par aspiration.

Conventionnellement, nous prendrons pour valeur du rendement :

$$(1) \quad \eta = 1 - \frac{h_2}{\frac{\rho}{2} (V_1)^2_m}$$

où  $h_2$  est la dépression statique dans la section de sortie du divergent.

Cette valeur simplifiée est entièrement justifiée par les considérations suivantes.

Soient  $h_1$ ,  $V_1$  et  $u_1$  la dépression statique, la vitesse et sa projection sur l'axe  $XX'$  (voir *fig. 4* et *5*), en un point quelconque du segment  $ee'$  de la section du col de hauteur  $a_1$  et soient  $h_2$ ,  $V_2$  et  $u_2$  la dépression statique, la vitesse et sa projection sur l'axe  $XX'$ , en un point quelconque du segment  $ss'$  de la section de sortie du divergent de hauteur  $a_2$ ; le rendement est alors égal à :

$$(2) \quad \eta = \frac{\frac{1}{\int_0^{a_1} u_1 dx} \int_0^{a_1} h_1 u_1 dx - \frac{1}{\int_0^{a_2} u_2 dx} \int_0^{a_2} h_2 u_2 dx}{\frac{1}{\int_0^{a_1} u_1 dx} \int_0^{a_1} \frac{\rho}{2} V_1^2 u_1 dx}$$

Remarquons tout d'abord que quand l'angle d'ouverture maximum est réalisé, la vitesse en un point de la veine divergente est égale à sa composante

suisant XX' à moins de 4 % près, on peut donc dans l'expression de  $\eta$ , remplacer  $u_1$  par  $V_1$  et  $u_2$  par  $V_2$ .

La pression totale sur toute la section du col du divergent As est égale à la pression atmosphérique, puisque les pertes dans le convergent sont négligeables, d'où :  $h_1 = \frac{\rho}{2} V_1^2$ . Pour le divergent As, le premier terme du numérateur et le dénominateur de (2) sont alors égaux; ceci est encore vrai pour le divergent Re, car la pression totale au centre de la section d'entrée de l'ajutage convergent-divergent est approximativement égale à l'énergie totale moyenne par unité de débit dans cette section.

D'autre part, la dépression statique  $h_2$  est constante sur presque toute la hauteur de la section de sortie du divergent; la variation qui se produit près des parois étant faible, on peut considérer  $h_2$  comme constante dans le deuxième terme du numérateur de l'expression (2).

Enfin, au dénominateur nous remplaçons :

$$\frac{1}{\int_0^{a_1} V_1 dx} \int_0^{a_1} \rho \frac{V_1^3}{2} \cdot dx \quad \text{par :} \quad \frac{\rho}{2} (V_1)_{2m}^2$$

où  $(V_1)_m$  est la vitesse moyenne calculée d'après les mesures de distribution de vitesse; l'erreur ainsi faite est inférieure à :

$$0,01 \Pi \left( \Pi = \frac{\rho}{2} (V_1)_{2m}^2 \right).$$

Après ces simplifications, on obtient la valeur du rendement :

$$\eta = 1 - \frac{h_2}{\frac{\rho}{2} (V_1)_{2m}^2}.$$

Les tableaux 7 et 8 contiennent les valeurs du rendement, calculé d'après la formule (1), en pour cent de l'énergie cinétique moyenne au col.

TABLEAU 7  
Rendement du divergent Re

$\alpha$	$h_2$	$\frac{\rho}{2} (V_1)_{2m}^2$	$\eta$ %
degrés			
0	6,4	6	— 6,7
4	6,4	7,7	17
8	6,5	9,5	31,6
15	6,4	12,3	48
20	6	13	54
22	5,9	13,2	55,4
25	5,7	12,5	51,4
31	5,7	12,3	53,7

TABLEAU 8  
Rendement du divergent As

$\alpha$	$h_2$	$\frac{\rho}{2} (V_1)_{2m}^2$	$\eta$ %
degrés			
0	9,7	8,3	— 16,8
4	8,6	11,4	25
8	7,8	14	44,3
15	6,3	17	63
18	5,5	17	67,7
20	5,5	17	67,7
25	5,9	14	58
31	6,8	13,1	48

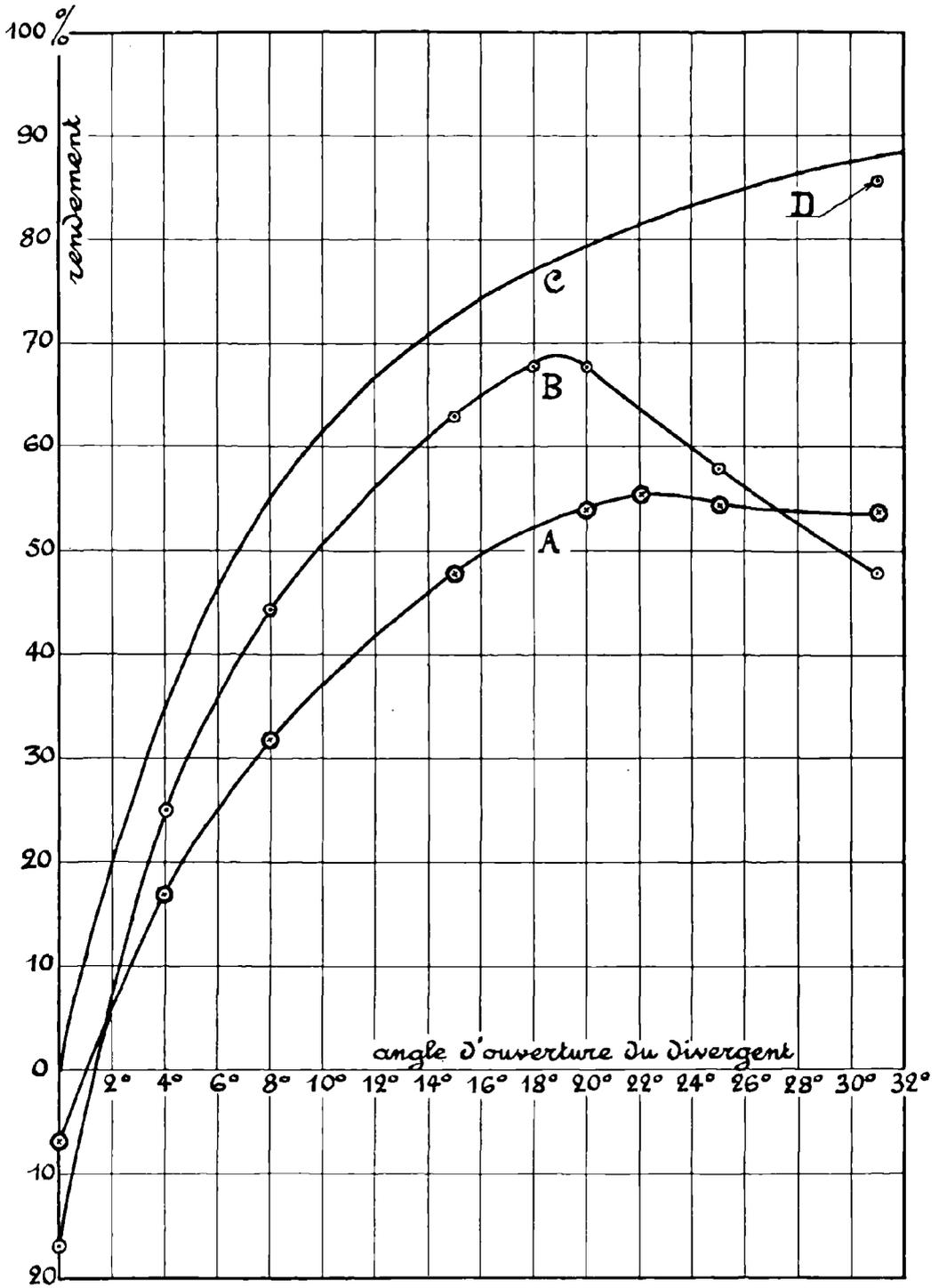


Fig. 29

Les courbes A et B (*fig. 29*) représentent respectivement les variations avec l'angle d'ouverture, des rendements des divergents Re et As.

Quand  $\alpha = 0^\circ$ , l'écoulement se fait entre plans parallèles, l'expression de  $\eta$  devient négative; il se produit une perte d'énergie potentielle plus grande dans le divergent As : 16,8 % au lieu de 6,7 % dans le divergent Re; l'accroissement de turbulence entraîne, ainsi dans ce cas, une diminution du coefficient de perte de charge.

Pour un angle  $\alpha$  compris entre 0 et  $2^\circ$ , l'énergie potentielle reste constante tout le long du divergent, on a :  $\eta = 0$ .

Le rendement du divergent Re croît avec  $\alpha$  jusqu'à :  $\alpha = 22^\circ$ , angle pour lequel commence à se produire un courant de retour; le rendement est alors de 55,4 %. Ensuite de 22 à  $31^\circ$ , le rendement diminue très peu.

Le rendement du divergent As augmente rapidement avec  $\alpha$ , et devient supérieur à celui du divergent Re; il passe par un maximum de 69 % quand  $\alpha = 19^\circ$  environ. A partir de cet angle, un décollement se produit; le rendement décroît ensuite très vite, et vers  $\alpha = 27^\circ$ , il devient inférieur au rendement du divergent Re, car, dans ce dernier, l'absence de décollement bien établi diminue beaucoup les pertes aux grands angles.

La courbe C (*fig. 29*) représente la variation en fonction de  $\alpha$ , du rendement  $\eta'$  des divergents Re et As dans le cas d'un écoulement idéal, où la seule perte d'énergie serait égale à l'énergie cinétique dans la section de sortie et où, en outre, la distribution uniforme des vitesses au col se conserverait jusque dans le plan de sortie du divergent, on aurait :

$$h_2 = \frac{\rho}{2} V_2^2 \quad \text{et} : \quad \eta' = 1 - \frac{1}{n^2},$$

où  $n$  est le rapport des sections de sortie et d'entrée du divergent.

Si pour les valeurs de  $\alpha$  où l'écoulement se fait sans décollement, l'on retranche des ordonnées de la courbe C les ordonnées correspondantes pour les courbes A et B, la différence obtenue caractérise la somme, rapportée à l'énergie cinétique moyenne au col, de la perte d'énergie dans le divergent par frottement et tourbillons, et de la perte provenant de l'augmentation de l'énergie cinétique à la sortie du divergent par suite de la déformation du profil des vitesses dans cette section.

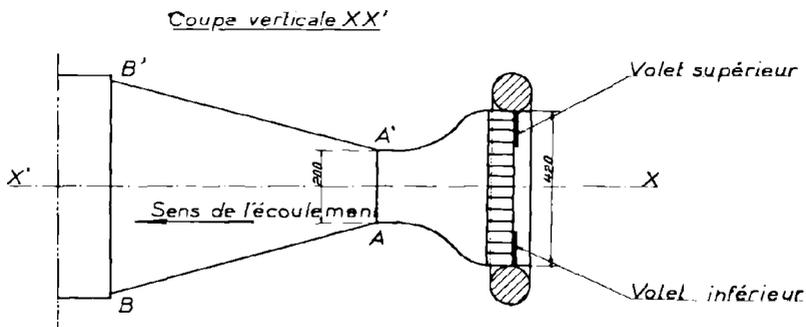
---

## CHAPITRE VIII

### RÉALISATION d'un ÉCOULEMENT très TURBULENT

Nous avons cherché à supprimer tout décollement, le long des deux plans mobiles du divergent, à l'aide de volets de hauteurs déterminées, convenablement placés en amont du divergent.

Pour observer simultanément l'allure des filets fluides au voisinage des deux plans mobiles, on se sert, comme dans les observations précédentes, de



fil de soie; des spectres d'air chaud permettent ensuite de confirmer l'allure de l'écoulement en certains points.

Dans le divergent  $A_3$ , d'angle d'ouverture  $\alpha = 31^\circ$ , à la vitesse de rotation du ventilateur  $R_3$ , l'écoulement se fait avec décollement sur le plan supérieur (régime I).

Dans ce cas, nous avons disposé un volet supérieur (*fig. 30*) ayant une hauteur de 13 cm et une largeur de 42 cm, égale à la largeur de la section en cet endroit, dans la partie supérieure du plan d'entrée de l'ajutage convergent-divergent.

Si le régime avec décollement sur le plan supérieur (régime I) est établi, on passe au régime avec décollement sur le plan inférieur (régime II') en plaçant le volet supérieur; de même en partant du repos, le volet supérieur étant en place, le régime II' s'établit quelle que soit la façon, brusque ou progressive, d'établir le courant d'air.

Si le volet supérieur que l'on ajoute a seulement une hauteur de 12 cm, on peut avoir, selon la manière dont on établit le courant, deux régimes différents : un régime à décollement sur le plan supérieur (régime I') s'établit quand on pousse brusquement le ventilateur à sa vitesse maximum, mais le régime II' s'établit si l'on fait démarrer lentement le ventilateur. Cependant, le régime I étant établi, il suffit d'ajouter le volet de 12 cm pour passer au régime II'.

Nous avons enregistré le passage du régime I au régime II' par addition du volet supérieur, en cinématographiant le spectre d'air chaud dans la zone du décollement le long du plan supérieur.

Les films obtenus, avec les mêmes conditions d'expérience que celles données dans la légende du film de la *figure 12*, montrent par quel processus s'effectue le passage d'un régime à l'autre. Les filets d'air chaud, d'abord parallèles au plan supérieur et dirigés en sens inverse du courant principal, se raccourcissent et s'inclinent vers le bas. La turbulence devient extrêmement grande, à l'endroit des fils chauds on voit de gros points noirs, les fils sont donc à ce moment entourés d'une gaine d'air chaud. La rotation des filets continue toujours dans le même sens jusqu'à ce qu'ils s'orientent parallèlement au plan supérieur, dans le sens du courant principal; les filets s'allongent, le régime II' est établi.

Nous avons aussi enregistré, avec les mêmes conditions d'expérience que celles du film de la *figure 12*, l'établissement du régime II'; nous avons, pour cela, cinématographié le spectre d'air chaud dans la zone du décollement le long du plan supérieur quand, partant du repos avec le volet supérieur de 13 cm de hauteur en place, on pousse brusquement le ventilateur à sa vitesse maximum.

Les filets d'air chaud, après la mise en marche du ventilateur, sont au début parallèles au plan et très longs; puis, ils se raccourcissent brusquement; sur un certain nombre de vues les filets ne sont plus visibles et à l'endroit des fils chauds, on voit comme dans le film précédent de gros points noirs; enfin, les filets redeviennent visibles et parallèles au plan, ils sont d'abord courts, puis s'allongent, le régime II' est alors établi.

Ce film montre donc que le régime sans décollement le long du plan supérieur ne s'établit pas directement : bien qu'il n'y ait pas eu de changement de sens local du courant, l'écoulement dans la région où se trouvent les fils chauds ne s'est pas établi par croissance continue de la vitesse du courant d'air.

Avec le volet supérieur de 13 cm de hauteur en place et le régime II' établi, on retourne au régime I' en mettant un deuxième volet, de largeur 42 cm et hauteur minimum 8 cm (*fig. 30*), dans la partie inférieure du plan d'entrée de l'ajutage. Ainsi, un volet supérieur supprime le décollement le long du plan supérieur et un volet inférieur supprime le décollement sur le plan inférieur; n'est-il pas possible en combinant l'action de deux volets, supérieur et inférieur, de hauteurs soigneusement déterminées, de supprimer complètement le décollement ?

Ce résultat est obtenu en prenant des volets, supérieur et inférieur, de largeur 42 cm et de hauteurs respectives 15 cm et 9 cm; le mode d'établissement, brusque ou progressif, du courant d'air n'a pas d'influence.

Le long de chaque plan mobile, dans une zone d'environ 4 cm d'épaisseur, les filets d'air chaud sont immobiles et parallèles au plan. Cependant on observe, en comparant la longueur des filets d'air chaud au voisinage des plans divergents, que quand la vitesse du ventilateur est inférieure à 3 000 t/mn, la turbulence est surtout grande le long du plan inférieur; quand la vitesse est supérieure à 3 000 t/mn, la turbulence est plus grande près du plan supérieur.

A l'extérieur de cette zone qui s'étend le long des plans divergents, des battements se produisent, la direction des filets d'air chaud oscille dans un angle — égal au demi-angle d'ouverture du divergent — dont un côté est horizontal, l'autre côté est parallèle au plan supérieur ou au plan inférieur suivant que le

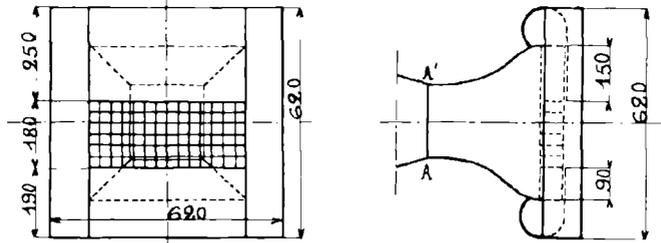


Fig. 31. — Schéma du dispositif d'entrée dans le divergent D

point considéré est au-dessus ou au-dessous du plan médian horizontal du divergent; tout près de ce plan médian les battements diminuent d'amplitude.

Remarquons qu'on peut par addition d'un seul volet — supérieur ou inférieur —, supprimer le décollement existant sur l'un des plans divergents et le faire apparaître nécessairement sur l'autre plan, mais qu'il est impossible de produire un décollement sur l'autre plan divergent tout en conservant le premier décollement.

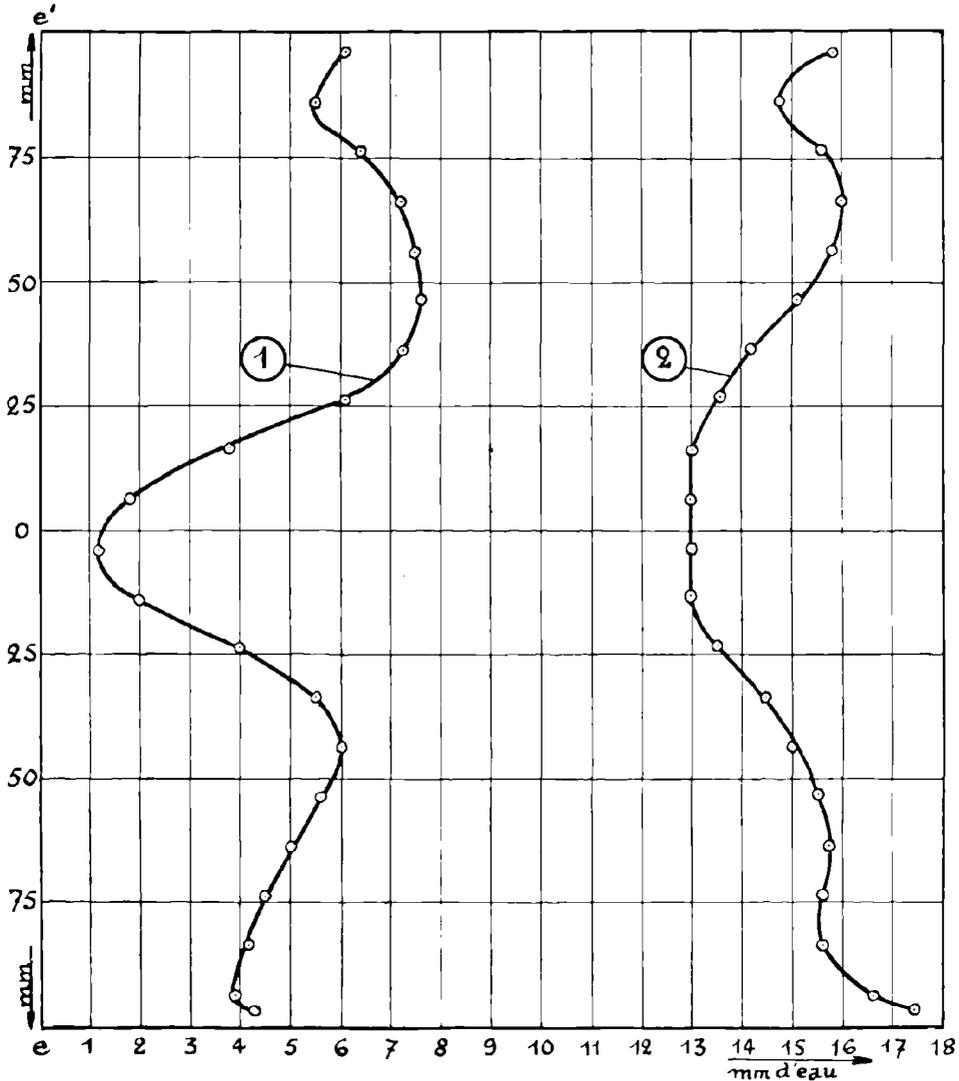
Tous les régimes résultant de l'action des volets, supérieur ou inférieur, sont stables: ils subsistent quand on introduit une nouvelle turbulence par brassage de l'air à l'entrée de l'ajutage ou quand, un régime étant établi, on fait ultérieurement descendre, puis remonter progressivement la vitesse de rotation du ventilateur.

Nous avons étudié l'écoulement, sans décollement, à travers le divergent d'angle d'ouverture  $31^\circ$  muni des volets de hauteurs 15 cm et 9 cm, après avoir modifié le bourrelet arrondi (*fig. 31*); nous désignerons ce nouveau dispositif en disant « divergent D ».

La résistance du circuit avec ce nouveau dispositif est plus grande que dans le cas des divergents Re et As; d'où une vitesse moyenne au col de 12,5 m/s au lieu de 14,5 m/s dans le divergent As de même angle d'ouverture. Cette augmentation de résistance du circuit entraîne donc une légère diminution du nombre de Reynolds.

**I. — Distribution de la pression totale, de la pression statique et des vitesses dans le divergent D.**

Nous nous sommes préalablement assurés que l'écoulement est sensiblement à deux dimensions : la variation de vitesse, dans les sections d'entrée et



*Courbe. 1: Dépression totale*  
*Courbe. 2: Dépression statique*

Fig. 32  
Distribution le long du segment  $ee'$  du divergent D, de la dépression totale et de la dépression statique par rapport à la pression atmosphérique

de sortie du divergent, le long d'une ligne horizontale, est inférieure à 5 % de la vitesse moyenne dans ces sections.

Toutes les mesures sont faites avec la vitesse du ventilateur  $R_3$ .

Dans le plan vertical médian, on enregistre (le zéro des pressions étant

la pression atmosphérique) au col, avec le tube  $T_2$  la pression totale (*fig. 32*), avec le tube  $St$  la pression statique (*fig. 32*) d'où la vitesse (*fig. 33*), et à la sortie du divergent avec le tube de Pitot double la pression statique et la pression dynamique (*fig. 34*).

Les pertes dans le convergent ne sont plus négligeables : dans le convergent l'énergie totale moyenne par unité de débit, diminue de 4,8 mm d'eau. De plus, la répartition de la dépression totale au col n'est pas uniforme.

La variation maximum de la dépression statique le long du segment  $ee'$  est égale à :

$$0,45 H \left( H - \frac{\rho}{2} (V_t)^2_m \right).$$

La vitesse au col le long du segment  $ee'$  présente de fortes variations, la répartition est à peu près symétrique (*fig. 33*) par rapport à l'axe  $O$  : la vitesse diminue quand on s'éloigne d'une paroi, elle passe par un minimum, puis croît rapidement jusqu'au maximum de vitesse qui se trouve au centre.

La variation maximum de vitesse le long de  $ee'$  est de 32 % de la vitesse moyenne. Pour le divergent  $As$ , cette variation n'était jamais supérieure à 22 % et à 17 % dans le divergent  $Re$ .

La courbe de distribution des vitesses le long de  $ss'$  confirme l'absence de décollement.

La dépression statique sur  $ss'$  décroît légèrement vers les parois, sa variation maximum est égale à 0,04  $H$ .

## II. — Turbulence.

L'amplitude des oscillations de la dépression totale varie fortement le long du segment  $ee'$ ; elle est minimum (enregistrement 2, *figure 35*) dans la région occupant 1 cm environ de part et d'autre de l'axe  $O$  (*fig. 33*), puis, elle croît rapidement (enregistrements 1 et 3, *figure 35*); les oscillations sont plus amorties près des parois.

Cette variation de l'amplitude des oscillations de la dépression totale le long du segment  $ee'$ , s'accorde bien avec les observations faites sur les filets

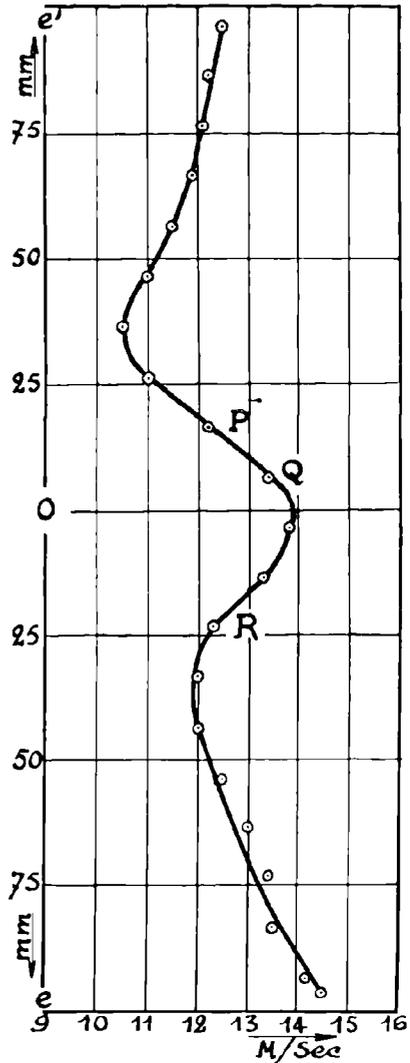


Fig. 33. — Distribution de la vitesse le long du segment  $ee'$  du divergent  $D$

d'air chaud. Nous avons en effet vu plus haut, dans les résultats sur la visualisation de l'écoulement sans décollement à travers le divergent muni des deux volets supérieur et inférieur, que les filets d'air chaud n'oscillent sensiblement pas dans la région du plan médian horizontal du divergent; ils oscillent fortement dès qu'on s'éloigne de ce plan et, enfin, près des plans mobiles demeurent calmes et parallèles entre eux.

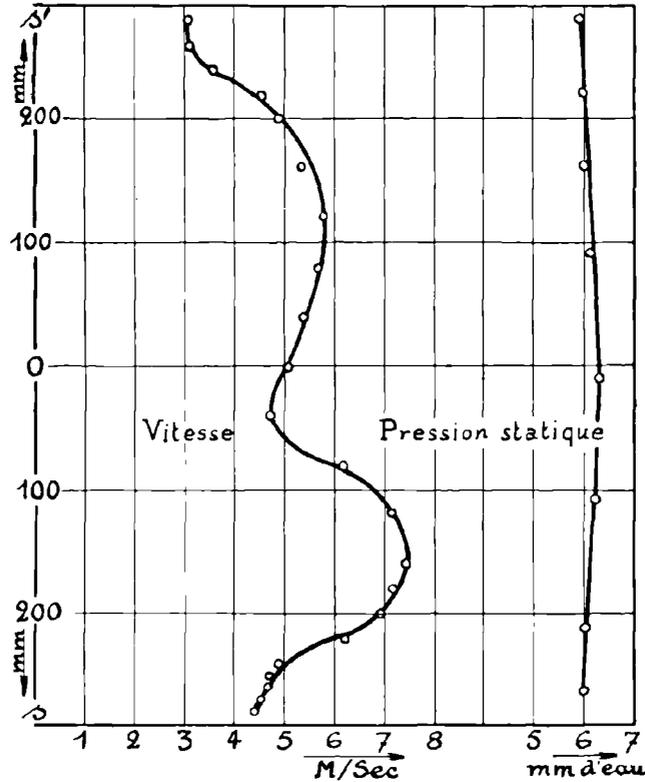


Fig. 34. — Distribution le long du segment  $ss'$  du divergent D, de la vitesse et de la dépression statique par rapport à la pression atmosphérique

Les enregistrements de la *figure 35* et les enregistrements 1, 2, 1', 2' de la *figure 28* ont été obtenus au même point de la section du col, avec une même vitesse en ce point et un même angle d'ouverture du divergent.

La comparaison, des enregistrements 1, 2, 3 de la *figure 35* avec les enregistrements 1 et 1' de la *figure 28*, montre que la turbulence dans le divergent D est plus grande que dans les divergents Re et As. D'ailleurs, le débit calculé à la sortie, à partir des vitesses efficaces, dépasse le débit au col de 16 %.

L'amplitude des oscillations de la pression statique au col du divergent D (enregistrement 4, *figure 35*) est faible par rapport à celle des oscillations de la pression statique au col des divergents As et Re (enregistrements 2 et 2', *figure 28*).

En résumé, un accroissement de turbulence, réalisé d'une certaine façon en amont d'un ajutage divergent où un courant de retour s'est établi, peut amener la disparition de ce courant de retour en même temps qu'une diminution de l'amplitude des oscillations de la pression statique au col.

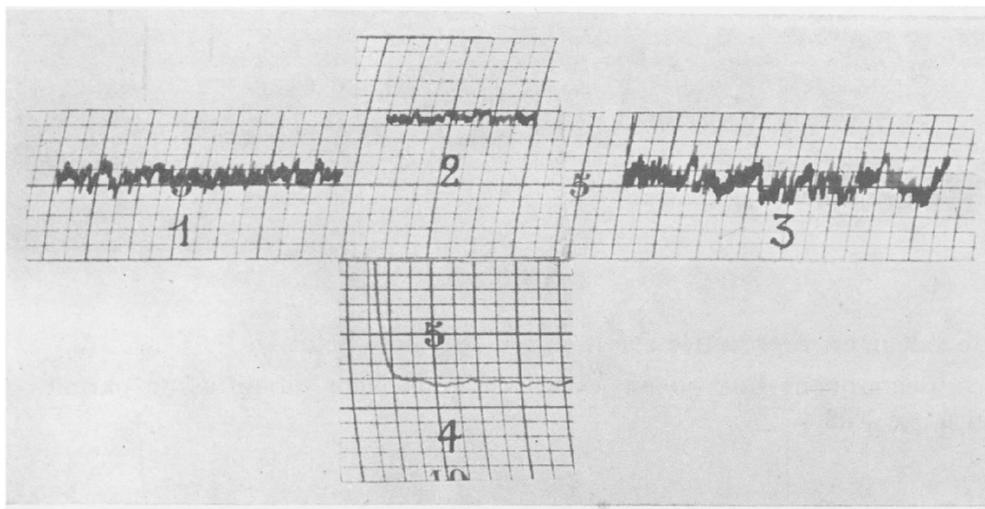


Fig. 35

LÉGENDE DE LA FIGURE 35

*Enregistrements obtenus sur le segment ee' du divergent D.* — Vitesse au centre de la section du col : 14 m/s; angle d'ouverture :  $\alpha = 31$  degrés.

*Enregistrements 1, 2, 3 :* dépression totale mesurée avec le tube  $T_2$  respectivement aux points P, Q et R situés sur ee' (voir la figure 33).

*Enregistrement 4 :* dépression statique mesurée avec le tube  $St$ , au centre de la section du col.

**III. — Rendement.**

Nous avons calculé le rendement du divergent D, dont la valeur est donnée par la formule (2) (voir chapitre VII « Rendement »).

Le calcul graphique de l'intégrale :

$$\frac{1}{\int_0^{a_1} V_1 dx} \int_0^{a_1} h_1 V_1 dx,$$

donne pour résultat : 14,63 mm d'eau.

La dépression statique le long de  $ss'$  étant constante à 0,04 H près, nous remplaçons :

$$\frac{1}{\int_0^{a_1} V_1 dx} \int_0^{a_2} h_2 V_2 dx$$

par la valeur moyenne de  $h_2$  égale à 6,2 mm d'eau.

La distribution des vitesses au col est loin d'être uniforme; c'est pourquoi, au dénominateur de l'expression (2) au lieu de prendre comme pour les divergents Re et As la valeur de  $\frac{\rho}{2} (V_1)_{2m}^2$  égale dans le divergent D à 9,76 mm d'eau, nous avons fait le calcul graphique de l'intégrale :

$$\frac{1}{\int_0^{a_1} V_1 dx} \int_0^{a_1} \frac{\rho}{2} V_1^3 dx = 9,83 \text{ mm d'eau.}$$

Le rendement devient :

$$\eta = \frac{14,63 - 6,2}{9,83} = 85,7 \%$$

cette valeur est représentée sur la *figure 29* par le point D.

Remarquons que quand  $\alpha = 31^\circ$ , le rendement du diffuseur parfait est égal à :  $\eta' = 88 \%$ .

---

DEUXIÈME THÈSE

---

Propositions données par la Faculté

---

LES PHÉNOMÈNES DE RÉSONANCE EN MÉCANIQUE

---

Vu et approuvé :

*Lille, le 20 Février 1936*

Le Doyen de la Faculté des Sciences

MAIGE

Vu et permis d'imprimer :

Le Recteur de l'Académie de Lille

Albert CHATELET