

Vérification de l'équation de Bernoulli

– Mesure avec le capteur de pression et CASSY

Objectifs expérimentaux

- Vérifier si la pression dynamique augmente en cas de rétrécissement de la section transversale.
- Vérifier si la vitesse d'écoulement augmente en cas de rétrécissement de la section transversale.
- Vérifier si le débit volumique et la pression totale restent constants.

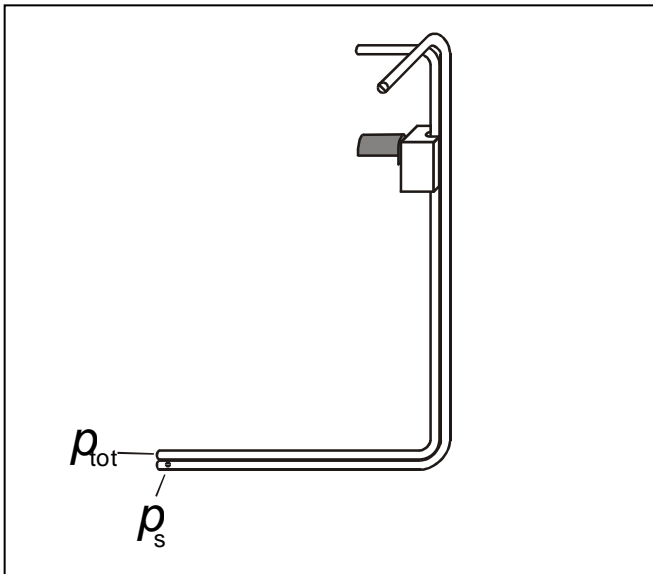
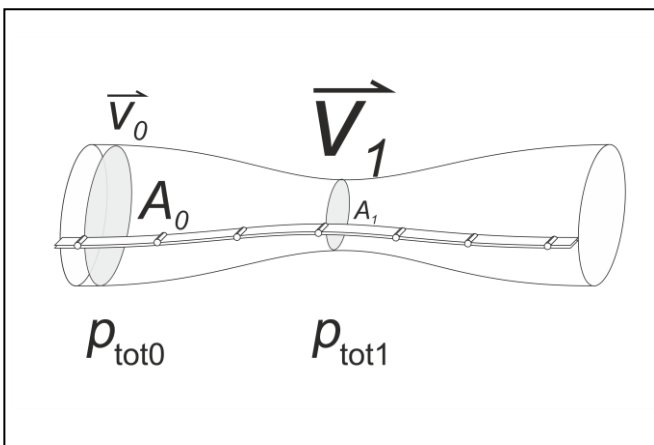


Fig. 1 Sonde manométrique de Prandtl pour mesurer la pression statique p_s et la pression totale p_{tot}

Fig. 2 Principe de Bernoulli : aires A_0 et A_1 de la section transversale, vitesses d'écoulement v_0 et v_1 , pression totale p_{tot0} et p_{tot1} . Taille des caractères proportionnelle à la grandeur physique.



Notions de base

La loi de Bernoulli décrit le rapport entre la pression statique p_s et la vitesse d'écoulement v . Pour un écoulement horizontal sans frottement à travers une conduite fixe entre les points 0 et 1, la formule suivante fournit une bonne approximation :

$$p_{s0} + \frac{\rho}{2} v_0^2 = p_{s1} + \frac{\rho}{2} v_1^2 \quad (I)$$

Densité de l'air : $\rho = 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Plus particulièrement, l'équation (I) dit que la pression totale p_{tot} est partout la même :

$$p_{tot} = p_s + p_d = \text{const.} \quad (II)$$

p_d : pression dynamique

Dans cette expérience, l'air s'écoule à travers un tunnel aérodynamique qui se rétrécit. L'aire de la section transversale diminue et passe de $0,020 \text{ m}^2$ à $0,015 \text{ m}^2$. La pression totale p_{tot} et la pression statique p_s sont mesurées en plusieurs points dans le tunnel aérodynamique.

L'équation de continuité décrit le rapport entre les vitesses d'écoulement v_0 et v_1 en deux points du tunnel aérodynamique et les aires A_0 et A_1 de la section transversale :

$$v_0 \cdot A_0 = v_1 \cdot A_1 \quad (III)$$

L'équation de continuité dit que le débit volumique $J = vA$ dans une conduite reste constant en tous points. Au vu des vitesses d'écoulement, on peut supposer que l'air est incompressible.

La définition de la pression dynamique $p_d = \frac{\rho}{2} v^2$ résulte des équations (I) et (II). Ainsi, v_0 peut être éliminée de l'équation (III). On obtient par transposition :

$$v_1 = \sqrt{\frac{2}{\rho} p_{d0} \cdot \frac{A_0}{A_1}} \quad (IV)$$

avec

$$p_d = p_{tot} - p_s \quad (V)$$

La pression dynamique p_d est déterminée par la mesure de la différence de pression avec la sonde manométrique de Prandtl. Les aires de la section transversale sont notées sur la rampe du tunnel aérodynamique.

Matériel

11 tunnel aérodynamique	373 12
1 sonde manométrique de Prandtl.....	373 13
1 ventilateur aspirant/refoulant.....	373 041
1 chariot de mesure pour le tunnel aérodynamique	373 075
1 Sensor-CASSY 2	524 013
ou	
1 Mobile-CASSY	524 009A
ou	
1 Pocket-CASSY 2 Bluetooth	524 018
1 CASSY Lab 2.....	524 220
1 capteur de pression S, ± 70 hPa.....	524 066

Complément nécessaire : 1 PC avec Windows XP ou version plus récente

Consignes de sécurité

Veillez respecter les remarques de sécurité mentionnées dans les modes d'emploi des accessoires de mesure 2 et du ventilateur aspirant/refoulant.

Avant d'enlever la grille de protection ou la buse,

- débrancher la prise secteur et
- attendre au moins 30 secondes jusqu'à ce que le ventilateur soit totalement arrêté.

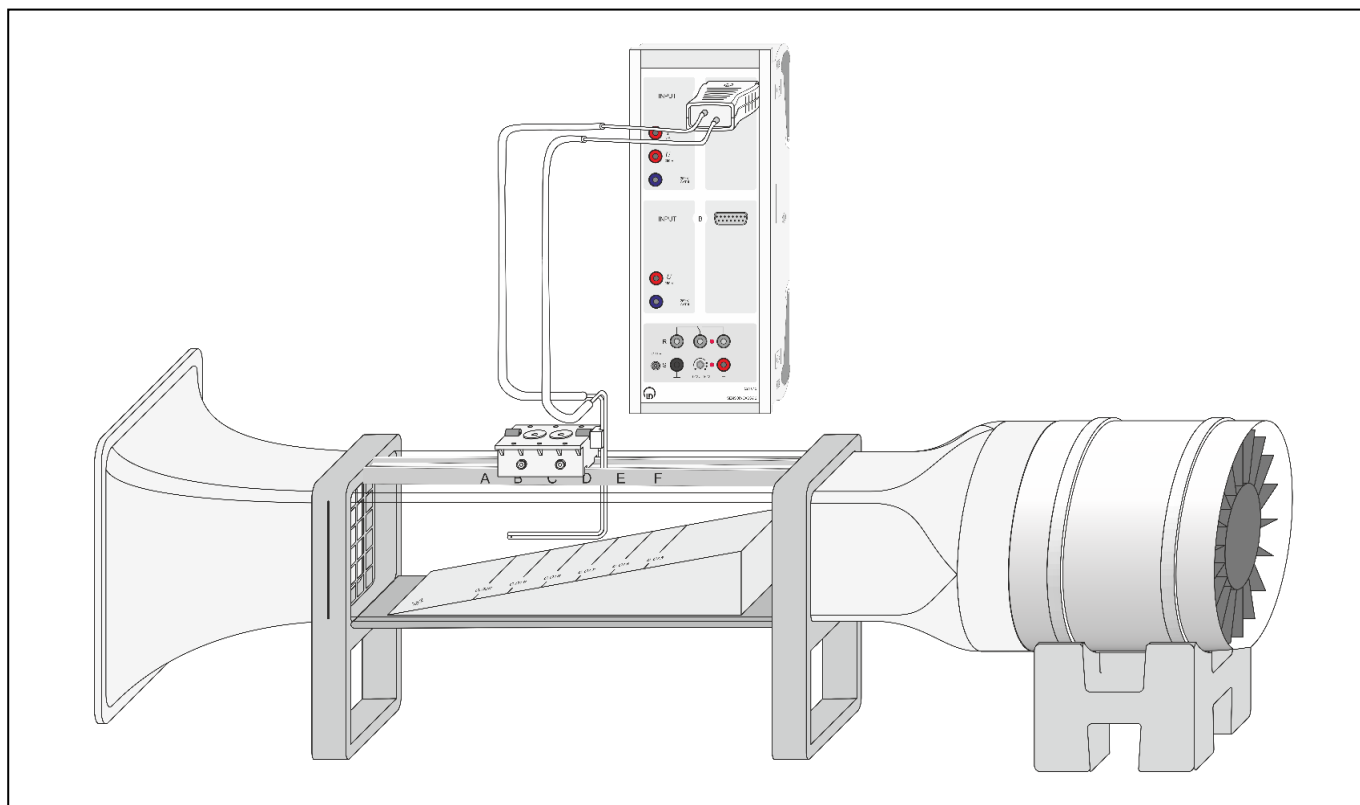
Montage

Assembler le ventilateur aspirant/refoulant et le tunnel aérodynamique comme indiqué sur la fig. 3. Enficher le côté aspiration du ventilateur dans la buse de sortie du tunnel aérodynamique de manière à ce que l'air soit aspiré à l'intérieur du tunnel. Laisser un espace libre d'env. 1 m devant la buse d'aspiration et derrière le ventilateur pour que l'air puisse être aspiré sans turbulences à travers le tunnel aérodynamique.

- Insérer le filtre de stabilisation (grille de protection) dans la fente de la porte d'entrée du tunnel aérodynamique.
- Fixer la rampe de Bernoulli à l'aide des quatre vis sous le couvercle en plexiglas de façon à ce qu'elle monte dans le sens de l'écoulement.
- Fixer la baguette d'étanchéité (fournie avec le tunnel aérodynamique) sur les rails.
- Faire délicatement passer la sonde manométrique de Prandtl à travers le joint en mousse de la baguette d'étanchéité et l'enfoncer jusqu'à env. 2 cm au-dessus du plus haut point de la rampe.
- Enficher la sonde manométrique de Prandtl sur le chariot de mesure.
- Amener l'avant du chariot de mesure jusqu'à la position A de la baguette d'étanchéité.
- Enficher le capteur de pression S, ± 70 hPa à l'entrée A du Sensor-CASSY 2 (fig. 3) ou du Mobile-CASSY (fig. 5).
- Connecter le tuyau de 3 mm du raccord de pression p_1 (en haut) du capteur de pression S avec le tuyau de 5 mm de la sonde manométrique de Prandtl.
- Connecter l'autre extrémité du tuyau de 5 mm avec la sortie pour p_{tot} à la sonde manométrique de Prandtl (cf. fig. 1).
- De la même manière, connecter le raccord de pression p_2 (en bas) du capteur de pression S avec la sortie pour p_s de la sonde manométrique de Prandtl (cf. fig. 1).

N. B. : pour plus d'informations sur le montage, voir les modes d'emploi 373 12, 373 13, 373 041 et 524 066.

Fig. 3: Montage expérimental avec le Sensor-CASSY 2

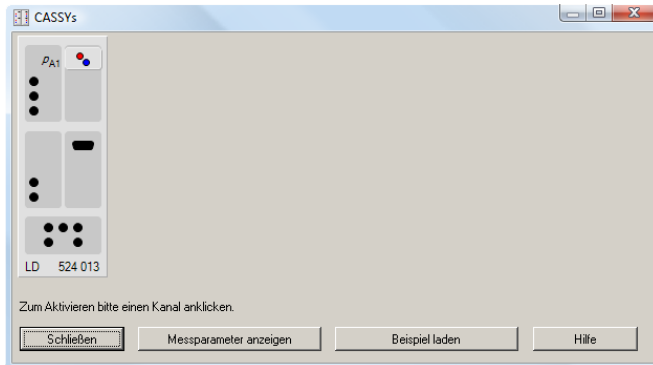


Manipulation



- Lancer le logiciel CASSY Lab 2 ou l'installer si cela n'est pas encore fait.


a) Mesure avec le Sensor-CASSY 2

- [Charger les paramètres dans CASSY LAB 2.](#)
- Le capteur de pression S connecté est affiché lorsque le Sensor-CASSY 2 est branché à l'ordinateur via le port USB.
- Activer le capteur de pression S connecté à l'entrée A en cliquant sur Capteur de pression S.












N. B. : pour plus d'informations sur la connexion des capteurs avec le Sensor-CASSY 2, consulter le guide utilisateur de CASSY Lab 2 ou l'aide en ligne.

- Calibrer le capteur de pression S en cliquant sur $\rightarrow 0 \leftarrow$. Pour ce faire, marquer le sous-menu « Pression relative p_{A1} » dans la fenêtre « Paramètres ».
- Régler le ventilateur aspirant/refoulant sur la vitesse minimale (c.-à-d. : potentiomètre en butée gauche). Le mettre ensuite en marche.
- Augmenter lentement la vitesse du ventilateur jusqu'à atteindre une différence de pression $\Delta p (= p_d)$ d'env. 8 Pa à la position A.
- Pour enregistrer les valeurs de la pression avec CASSY Lab 2, cliquer sur le bouton  lorsque la feuille de travail « $p_d(A)$ [autom.] » est affichée. (Dans cette expérience, « Pression relative p_{A1} » est identique à p_d).
- Déplacer le chariot de mesure avec la sonde manométrique de Prandtl jusqu'à la position suivante.
- Répéter la mesure pour les positions « B » à « F ».
- Six mesures ayant été effectuées, sélectionner une nouvelle série de mesures après avoir cliqué sur #1 . Légèrement augmenter la vitesse de l'air et ramener le chariot de mesure à la position A.
- Recommencer la procédure décrite pour deux autres vitesses de l'air.


N. B. : le bouton $\rightarrow 0 \leftarrow$ apparaît dans la fenêtre « Paramètres »  lorsque « Pression relative p_{A1} » est marquée dans le sous-menu de « CASSYs ». Conseil : actionner le bouton $\rightarrow 0 \leftarrow$ avant chaque série de mesures.




b) Mesure avec le Mobile-CASSY

N. B. : pour enregistrer automatiquement les valeurs de la pression, suivre les instructions du point a).

- Mettre Mobile-CASSY en marche avec .
- Ouvrir le menu principal en réappuyant sur .
- Sélectionner le sous-menu « Grandeurs mesurées » avec  ou  et valider avec le bouton .
- Sélectionner le sous-menu « p » avec le bouton .
- Sélectionner « Corriger l'offset » et mettre la valeur de la pression à zéro en appuyant sur le bouton .
- Appuyer sur le bouton  puis sur le bouton  gauche pour afficher la valeur actuelle de la pression.
- Régler le ventilateur aspirant/refoulant sur la vitesse minimale (c.-à-d. : potentiomètre en butée gauche). Le mettre ensuite en marche.

N. B. : pour plus d'informations sur l'utilisation du Mobile-CASSY, voir le mode d'emploi (524 009A).

- Augmenter lentement la vitesse du ventilateur jusqu'à atteindre une différence de pression $\Delta p (= p_d)$ d'env. 8 Pa à la position A.
- Relever la pression dynamique p_d .
- [Charger les paramètres dans CASSY LAB 2](#) et inscrire la valeur de la pression avec l'aire de la section correspondante (par ex. : 0,020 m²) dans le tableau « $p_d(A)$ [manu.] » (à gauche dans CASSY Lab 2).
- Déplacer le chariot de mesure avec la sonde manométrique de Prandtl jusqu'à la position suivante.
- Répéter la mesure pour les positions « B » à « F ».
- Six mesures ayant été effectuées, sélectionner une nouvelle série de mesures après avoir cliqué sur #1 . Légèrement augmenter la vitesse de l'air et ramener le chariot de mesure à la position A.
- Recommencer la procédure décrite pour deux autres vitesses de l'air.

N. B. : pour enregistrer d'autres séries de mesure en plus des trois séries préparées, ouvrir « Mesure » dans la barre de menus puis sélectionner  « Ajouter une nouvelle série ». Sélectionner le tableau « $p_d(A)$ » et cliquer une fois sur . Ouvrir la fenêtre  « Paramètres » et marquer « $p_d(A)$ » dans le sous-menu « Représentations ». Cliquer sur le bouton « Ajouter une nouvelle courbe » puis sélectionner « $p_d\#4$ » dans le menu déroulant pour l'« axe y ».

Exemple de mesure

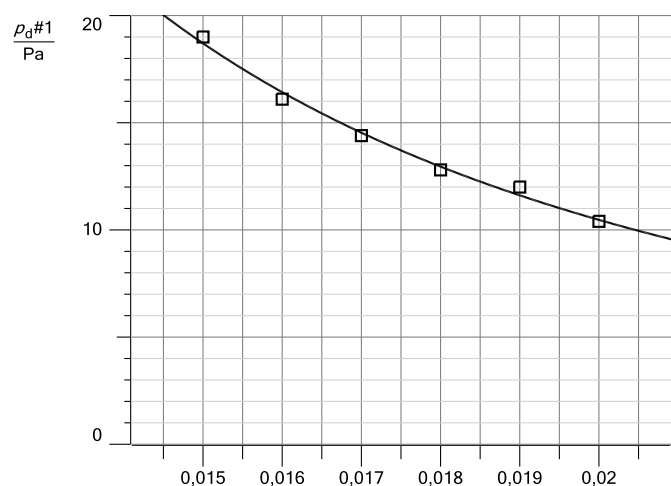


Fig. 4 Pression dynamique p_d en fonction de l'aire A de la section. La ligne continue correspond à une hyperbole $1/A^2$.

Tab. 1 Pression dynamique p_d aux positions A à F pour une vitesse du ventilateur constante

Position	$\frac{A}{m^2}$	$\frac{p_d}{Pa}$
A	0,020	10,4
B	0,019	12,0
C	0,018	12,8
D	0,017	14,4
E	0,016	16,1
F	0,015	19,0

Résultat

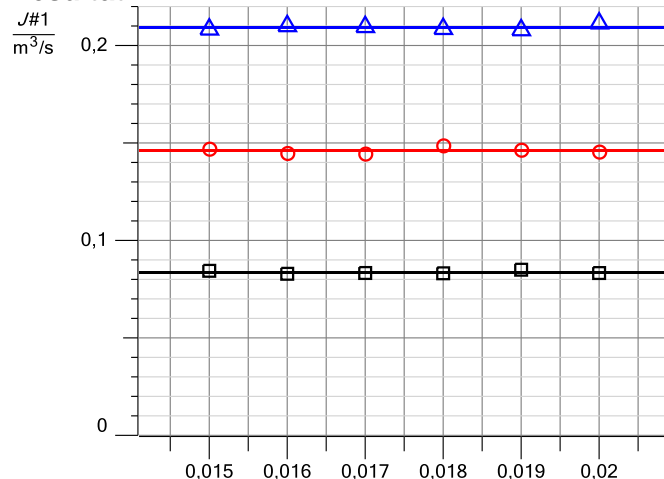
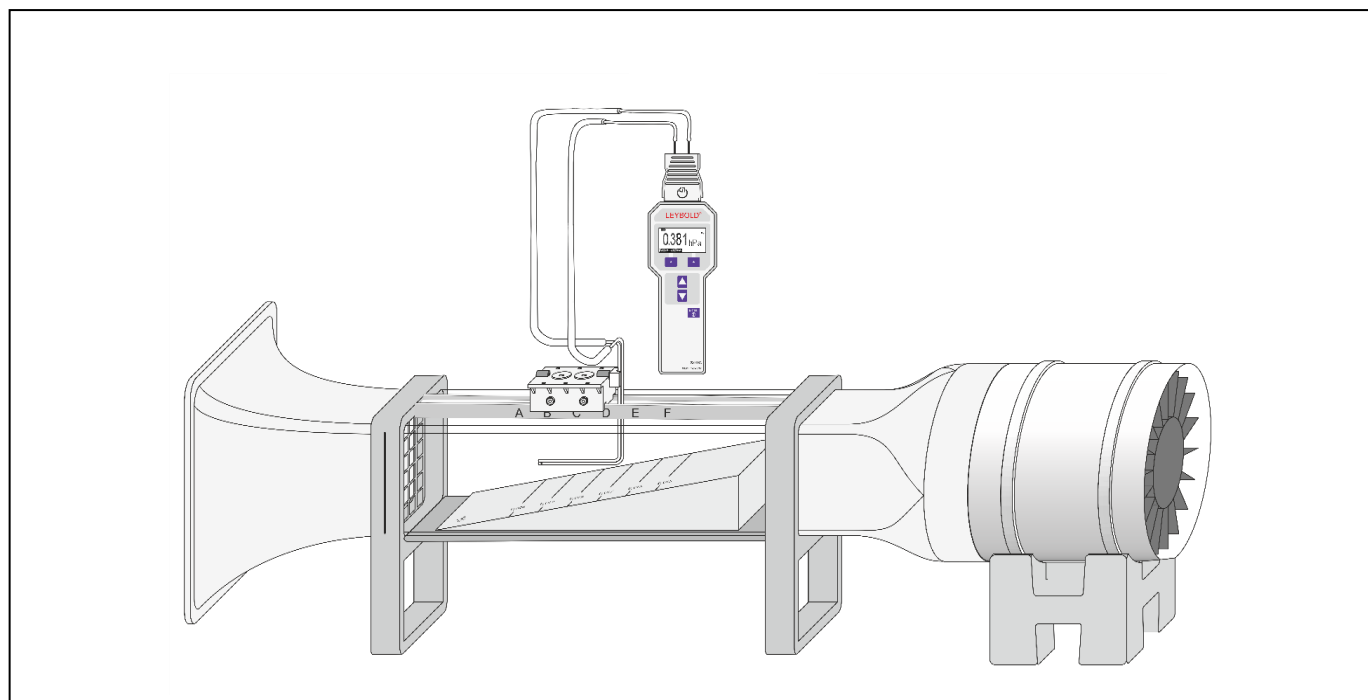


Fig. 6 Débit volumique J en fonction de l'aire A de la section pour différentes vitesses de l'air. Les lignes continues correspondent à la valeur moyenne d'une série de mesures.

Tab. 2 Vitesse d'écoulement v et débit volumique J calculés avec les valeurs du tab. 1

Position	$\frac{v}{m/s}$	$\frac{J}{m^3/s}$
A	4,2	0,083
B	4,5	0,085
C	4,6	0,083
D	4,9	0,083
E	5,2	0,083
F	5,6	0,084

Fig. 5 Montage expérimental avec Mobile-CASSY



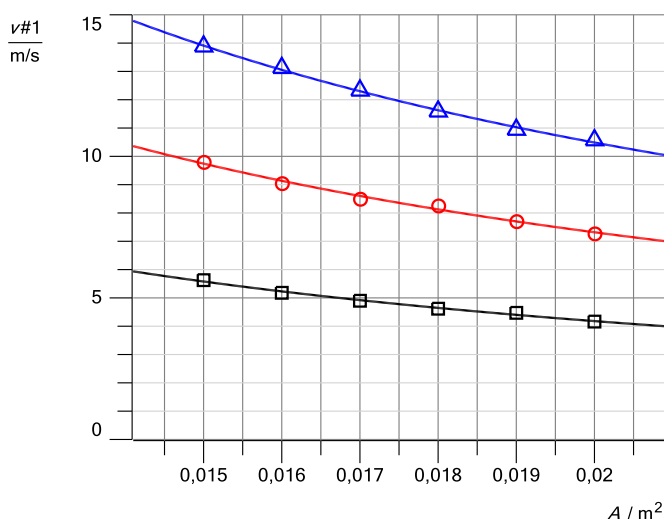


Fig. 7: Vitesse d'écoulement v en fonction de l'aire A de la section pour trois vitesses de l'air différentes. Les lignes continues correspondent à des hyperboles $1/A$.

Exploitation

Le rapport dérivé du principe de Bernoulli et de l'équation de continuité

$$p_d \propto \frac{1}{A^2}$$

semble vérifié par les valeurs mesurées du tab. 1 et de la fig. 4. La fonction de régression est une hyperbole quadratique.

L'équation (IV) semble vérifiée par le tab. 2 et la fig. 6 :

$$v \propto \frac{1}{A}$$

(Densité de l'air : $\rho = 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)

La vitesse d'écoulement augmente au fur et à mesure que l'aire A de la section diminue. La fonction de régression est une hyperbole.

Le débit volumique

$$J = v A$$

est constant quelle que soit l'aire de la section transversale (fig. 6). Les faibles écarts s'expliquent par les tolérances de mesure et des défauts d'étanchéité. Les prévisions du principe de Bernoulli et de l'équation de continuité ont ainsi été vérifiées qualitativement.

Information supplémentaire

La pression totale p_{tot} constante pour une aire A de la section de moins en moins grande peut aussi se vérifier directement. Pour ce faire, il suffit de connecter un seul tuyau avec la sortie pour p_{tot} (fig. 1) de la sonde manométrique de Prandtl (cf. fig. 8). Le tuyau mène au raccord de pression p_1 (en haut) du capteur de pression S.

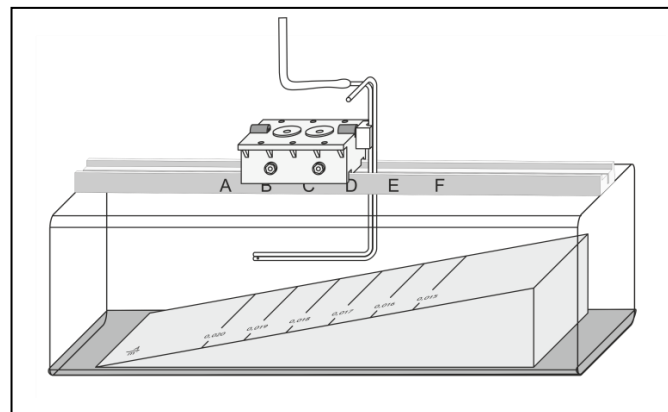


Fig. 8 Montage expérimental pour la mesure de la pression totale p_{tot}

De même, la baisse de la pression statique p_s en cas de rétrécissement de l'aire A de la section peut se vérifier directement. Pour ce faire, il suffit de connecter un seul tuyau avec la sortie pour p_s (fig. 1) à la sonde manométrique de Prandtl (pas illustré sur la fig. 8). Le tuyau mène au raccord de pression p_2 (en bas) du capteur de la pression S.

N. B. : la baisse de la pression statique p_s pour une aire de la section de moins en moins grande a déjà été vérifiée dans la fiche d'expérience P1.8.5.4.