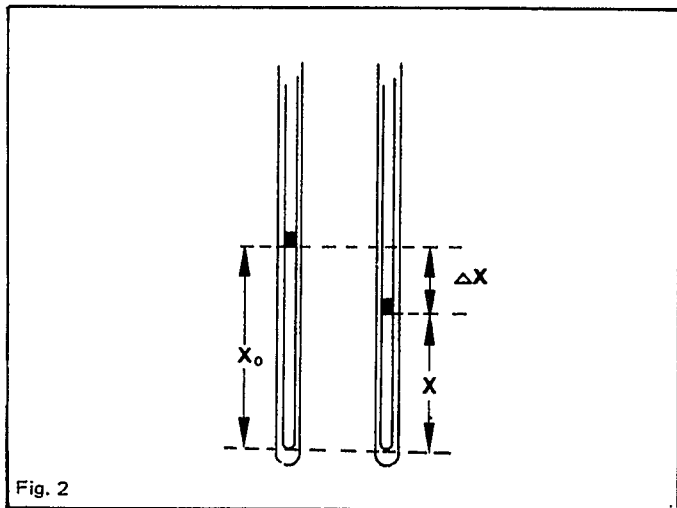




## 4 Expériences sur les lois des gaz

### 4.1 Oscillateur harmonique gazeux

Le volume de gaz enfermé dans le thermomètre à gaz par une goutte de mercure se déplaçant aisément, peut être considéré comme un oscillateur ayant des analogies avec un ressort élastique. Si une force  $F$  agit sur l'index de mercure, celui-ci s'éloigne de sa position d'équilibre (repérée par la longueur au repos  $x_0$ , ou encore par le volume au repos  $V_0 = S_{\text{cap}} \cdot x_0$ ) de la valeur  $\Delta x$  (voir fig. 2). Les forces à faire agir sur l'index de mercure peu-



vent ici être facilement obtenues par des forces de pression: si, en plus de la pression ambiante  $P_{\text{at}}$ , il s'exerce sur l'index de mercure une surpression  $\Delta p$ , celui-ci est soumis à la force  $F = \Delta p \cdot S_{\text{cap}}$ . L'index se déplace alors jusqu'à ce que la force élastique due à la compression du gaz équilibre la force due à la surpression extérieure.

**Question:** L'oscillateur gazeux analogue à un ressort élastique, suit-il la loi de Hooke?

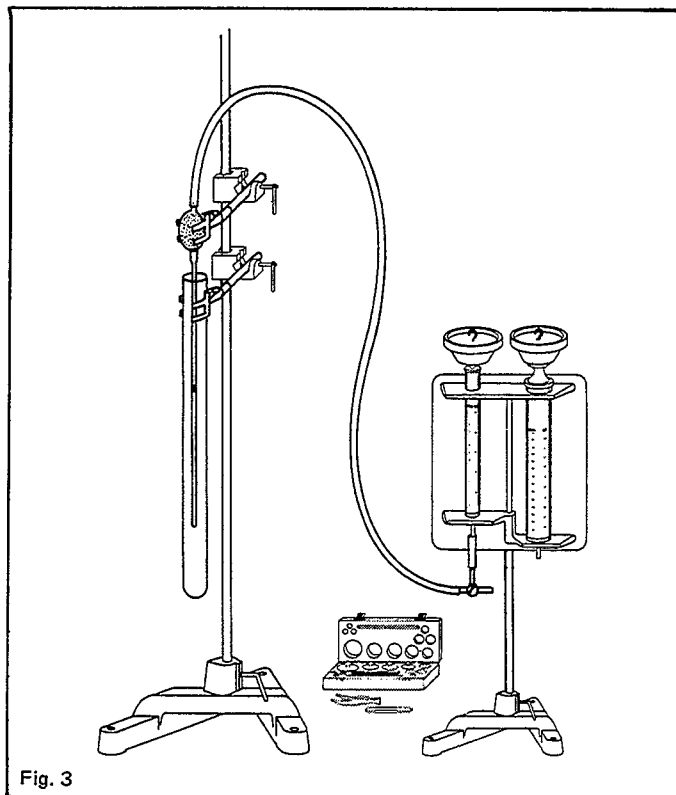
Appareils:	N° de cat.
1 thermomètre à gaz . . . . .	382 00
1 jeu de 2 seringues à gaz, avec support . . . . .	361 30
1 piè en V, 28 cm de côté . . . . .	300 01
1 tige, longueur 1 m. . . . .	300 44
2 noix Leybold . . . . .	301 01
2 pinces à fixation universelle . . . . .	301 72
1 piè en V, 20 cm de côté . . . . .	300 02
1 tige, longueur 47 cm . . . . .	300 42
2 jeux de masses marquées. . . . .	315 31
ou 1 jeu de 10 surcharges . . . . .	590 24
1 robinet à trois voies. . . . .	665 255
tuyau de PVC, $\phi$ intérieur 7 mm,	
1 morceau de 5 cm, l'autre de 150 cm. . . . .	de 667 191

Par mesure de sécurité, lorsqu'on manipule du mercure, il est recommandé d'ajouter:

1 cuvette à mercure . . . . .	309 63
1 ramasseur de mercure adsorbant . . . . .	306 83

#### Montage et conduite de l'expérience:

a) Enfermer dans le thermomètre à gaz un volume au repos  $V_0$  (voir 3.1). Une bonne valeur pour la longueur en repos  $x_0$  est d'environ les 2/3 de la longueur totale du tube capillaire. Lorsque le volume  $V_0$  de gaz est enfermé, il ne faut plus secouer le thermomètre à gaz, pour éviter que la goutte de mercure se divise en gouttelettes.



b) Réaliser le montage suivant la fig. 3: nettoyer au préalable parfaitement la seringue à gaz. Dans le jeu des 2 seringues, sur support, on choisira d'utiliser de préférence celle de 25 ml. La grande éprouvette sert uniquement à recueillir le mercure, au cas où il y aurait bris de verre.

c) Avant de déposer les surcharges, tirer le piston de la seringue au maximum vers le haut (pour cela mettre brièvement en relation le volume intérieur de la seringue et l'air ambiant en actionnant le robinet à trois voies).

Placer, l'une après l'autre, les diverses masses marquées sur le plateau de la seringue choisie; (par ex. les masses marquées du jeu 315 31), et mesurer à chaque fois l'écart  $\Delta x$  à la position  $x_0$  de repos de la colonne gazeuse. Prendre soin de charger le plateau de façon symétrique, pour éviter, par une charge dissymétrique, que le piston se coince, ce qui fausserait les mesures.

#### Exploitation de l'expérience:

Lorsque le plateau de la seringue de 25 ml utilisée est chargé de masses marquées dont le poids total est  $G$ , l'index de mercure subit une force

$$F = G \cdot \frac{S_{\text{cap}}}{S_{\text{piston}}}$$

ou  $S_{\text{piston}} = \frac{\pi}{4} \cdot d_{\text{piston}}^2$  surface du piston de la seringue à gaz

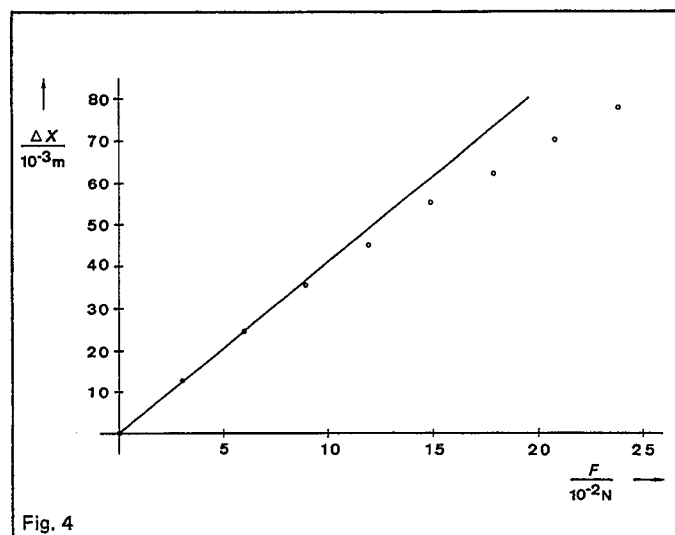
et  $S_{\text{cap}} = \frac{\pi}{4} \cdot d_{\text{cap}}^2$  surface de la section du tube capillaire

Les écarts  $\Delta x$  à la position de repos sont portés en fonction de la force  $F$  sur un diagramme (voir fig. 4).

Exemples de valeurs expérimentales obtenues:

$\frac{d_{cap}}{10^{-3}m}$	$\frac{S_{cap}}{10^{-6}m^2}$	$\frac{d_{piston}}{10^{-3}m}$	$\frac{S_{piston}}{10^{-4}m^2}$	$\frac{x_0}{10^{-3}m}$
2,7	5,7	15,5	1,9	277

Masse posée sur le plateau (en grammes)	$\frac{\Delta x}{10^{-3}m}$	$\frac{F}{10^{-2}N}$
0	0	0
2x 50	12,5	2,94
2x 100	24,5	5,89
3x 100	35,5	8,83
2x 200	45,0	11,77
(2x 200) + (2x 50)	55,0	14,72
(2x 200) + (2x 100)	62,5	17,66
(2x 200) + (2x 100) + (2x 50)	70,0	20,60
(2x 200) + (4x 100)	78,0	23,54



Résultat:

Pour l'oscillateur gazeux étudié, la loi de Hooke est vérifiée pour de petits écarts à la position d'équilibre (inférieurs à env. 10 % de la longueur totale), voir fig. 4. Pour des écarts plus importants, la loi de Hooke n'est plus vérifiée, ce qui révèle d'ailleurs encore l'analogie avec le ressort élastique. Pour un ressort élastique en effet, la loi de Hooke n'est vérifiée que dans un domaine restreint d'élongations.

4.2 Loi de Boyle-Mariotte (Transformations isothermes)

A température constante, les variables d'état pression et volume d'une certaine masse de gaz enfermé ne varient pas indépendamment l'une de l'autre. Le volume de gaz enfermé dans le thermomètre à gaz par la goutte de mercure doit être soumis, à température constante, à d'importantes variations de la pression  $p$ . Le volume  $V$  doit à chaque fois être déterminé.

Question: Une transformation isotherme suit-elle la loi de Boyle-Mariotte:  $p \cdot V = c^{te}$ ?

Pour conduire l'expérience on se sert des mêmes appareils que pour 4.1.

Conduite de l'expérience:

La mise en relation du thermomètre à gaz avec une seringue à gaz munie d'un plateau que l'on peut charger, permet une variation quantitative de la pression régnant dans le volume enfermé dans le thermomètre à gaz. Le montage et la conduite de l'expérience sont strictement identiques à ceux de l'expérience 4.1. Seule l'exploitation des résultats en diffère.

Exploitation de l'expérience:

La pression totale régnant dans le volume de gaz enfermé dans le thermomètre à gaz résulte de la somme de la pression atmosphérique  $p_{at}$ , de la pression à l'hauteur de l'index de mercure  $p_{Hg}$ , de la pression due au poids du piston seul et du plateau non chargé  $p_{piston}$  et de la pression due aux surcharges posées sur le plateau  $\Delta p$ .

$$p = p_{at} + p_{Hg} + p_{piston} + \Delta p$$

Les pressions dues à des poids se déduisent aisément de ceux-ci si l'on connaît les surfaces des sections considérées:

$$p_{Hg} = \frac{G_{Hg}}{S_{cap}} \quad p_{piston} = \frac{G_{piston}}{S_{piston}} \quad \Delta p = \frac{G}{S_{piston}}$$

$G$  étant le poids total des surcharges posées sur le plateau. Le poids de l'index de mercure se déduit de son poids volumique  $\gamma$  et de son volume.

Le volume de l'air enfermé est  $V = S_{cap} \cdot x$ .

Tracer le diagramme montrant les variations du logarithme de la pression totale  $p$  en fonction du logarithme du volume  $V$  (fig. 5  $\lg p$  en fonction de  $\lg V$ ). Calculer le produit  $p \cdot V$  pour diverses valeurs de surcharges, et le consigner dans un tableau.

Exemples de valeurs expérimentales obtenues:

$\frac{d_{cap}}{10^{-3}m}$	$\frac{S_{cap}}{10^{-6}m^2}$	$\frac{d_{piston}}{10^{-3}m}$	$\frac{S_{piston}}{10^{-4}m^2}$	$\frac{x_0}{10^{-3}m}$
2,7	5,7	15,5	1,9	277

$$\text{masse volumique de mercure } \rho_{Hg} = 13,55 \times 10^3 \frac{kg}{m^3}$$

$$\text{poids volumique de mercure } \gamma_{Hg} = \rho_{Hg} \cdot g = 1,329 \times 10^5 \frac{N}{m^3}$$

$$\text{longueur de l'index de mercure } h = 10^{-2} m$$

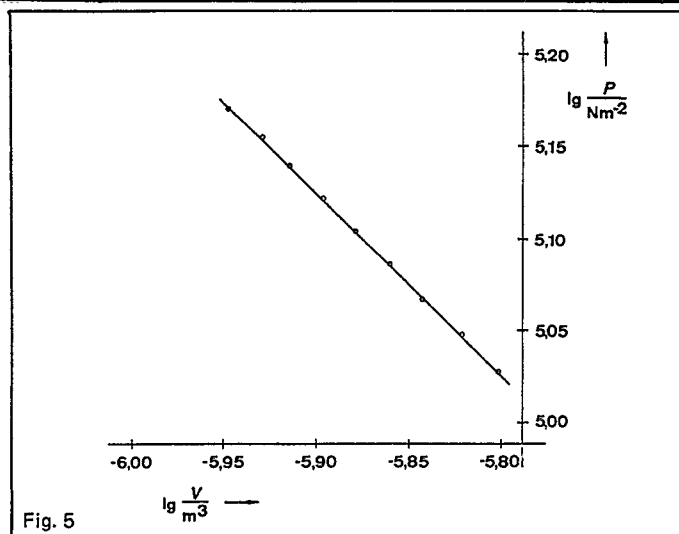
$$G_{piston} = 0,78 N$$

$$p_{at} = 101,3 \times 10^3 \frac{N}{m^2}$$

$$p_{Hg} = \frac{\gamma_{Hg} \cdot V_{Hg}}{A_{cap}} = \gamma_{Hg} h = 1,3 \times 10^3 \frac{N}{m^2}$$

$$p_{piston} = \frac{0,78 N}{1,9 \times 10^{-4} m^2} = 4,1 \times 10^3 \frac{N}{m^2}$$

masse posée sur le plateau (en grammes)	$x$ $10^{-3} m$	$V$ $10^{-6} m^3$	$\Delta p$ $10^3 \frac{N}{m^2}$	$p$ $10^3 \frac{N}{m^2}$	$p \cdot V$ $10^{-3} Nm$
0	277,0	1,58	0	106,7	168,6
2x 50	264,5	1,51	5,2	111,9	169,0
2x 100	252,5	1,44	10,3	117,0	168,5
3x 100	241,5	1,38	15,5	122,2	168,6
2x 200	232,0	1,32	20,7	127,4	168,2
(2x 200) + (2x 50)	222,0	1,27	25,8	132,5	168,0
(2x 200) + (2x 100)	214,5	1,22	31,0	137,7	167,9
(2x 200) + (2x 100) + (2x 50)	209,0	1,19	36,1	142,8	167,9
(2x 200) + (4x 100)	199,0	1,13	41,3	148,0	167,2



**Résultats:**

a) Le diagramme (fig. 5) obtenu à partir des mesures montre que  $\lg p$  est proportionnel à  $\lg V$ , avec un coefficient de proportionnalité égal à  $-1$ . Il s'en suit que le volume est inversement proportionnel à la pression, c. à. d. que la relation  $p \cdot V = c^{te}$  est vérifiée.

b) Les produits  $p \cdot V$  calculés pour toutes les valeurs expérimentales trouvées sont constants à  $\pm 1\%$  près.

**4.3 Lois de Gay-Lussac et de Charles**

Les variables d'état volume et température d'une masse donnée de gaz dépendent de la température. On se propose de déterminer comment varie la pression et le volume de la masse de gaz enfermée par la goutte de mercure dans le thermomètre à gaz. Le domaine de variation de la température va de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  à env.  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

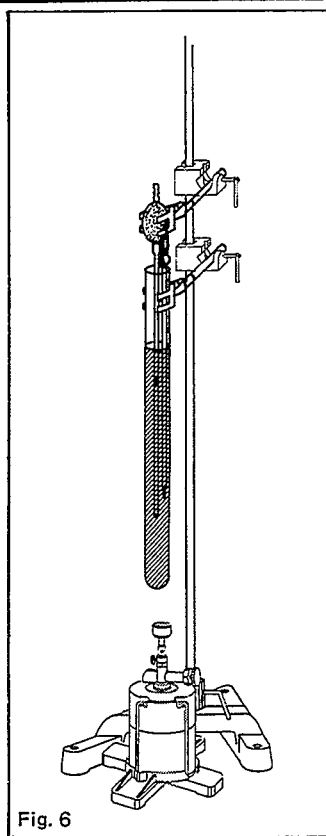
**Question:** Existe-t-il une dépendance linéaire entre pression et température? Entre volume et température? Une extrapolation vers les basses température permet-elle de définir le zéro absolu et par suite une échelle absolue de température?

**4.3.1 Loi de Gay-Lussac: variation du volume en fonction de la température à pression constante (transformation isobare)**

Appareils:	N <sup>o</sup> de cat.
1 thermomètre à gaz . . . . .	382 00
1 pied en V, 28 cm de côté . . . . .	300 01
1 tige, longueur 1 m. . . . .	300 44
2 noix Leybold . . . . .	301 01
2 pinces à fixation universelle . . . . .	301 72
1 thermomètre $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ : . . . . .	382 34
du fil à ligne. . . . .	de 309 49
1 bec Bunsen . . . . .	par. ex. 303 11
avec cartouche . . . . .	303 12

**Conduite de l'expérience:**

a) Enfermer au préalable la quantité d'air voulue dans le thermomètre à gaz et l'isoler par l'index de mercure (voir 3.1). Une bonne valeur initiale du volume  $V$  (à température et pression ambiantes) est d'env. les  $2/3$  du volume totale du tube capillaire. Lorsque le volume  $V$  de gaz est enfermé, il ne faut plus secouer le thermomètre à gaz, pour éviter que la goutte de mercure se divise en gouttelettes.



b) Réaliser le montage suivant la fig. 6. Introduire le thermomètre dans l'éprouvette, parallèlement au thermomètre à gaz, et à l'aide du fil de ligne (boucle d'env. 3 cm), l'accrocher à la pince de fixation universelle retenant le thermomètre à gaz, comme l'indique la fig. 7.

La grande éprouvette sert dans cette expérience à recevoir le bain-marie, et également à recueillir le mercure s'il y avait bris de verre.

c) A l'aide du bec Bunsen, chauffer l'eau contenue dans la grande éprouvette jusqu'à peu avant l'ébullition. Eviter de faire bouillir l'eau, ce qui provoque des projections d'eau qui peuvent éteindre la flamme du bec Bunsen. Pour que le gradient de température entre le thermomètre à gaz et l'eau du bain-marie reste aussi faible que possible, il est recommandé de commencer les mesures à température élevée, et de laisser refroidir lentement l'ensemble une fois le bec Bunsen éteint. Mesurer le volume  $V$  (par mesure de  $x$ ) de l'air fermé chaque fois que la température a baissé d'env.  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Lorsque la température ambiante est à nouveau atteinte, remplir l'éprouvette d'un mélange d'eau et de glace pilée, afin d'atteindre la température de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Attendre quelques minutes avant de lire le volume à  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  pour éviter une mesure qui serait faussée par l'existence d'un gradient de température.

**Exploitation de l'expérience:**

Les valeurs des volumes déterminés sur le thermomètre à gaz pour les diverses températures allant de  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  sont portées sur un diagramme (voir fig. 8 – volume en fonction de la température). La droite obtenue est extrapolée vers les basses températures.

Exemples de valeurs expérimentales trouvées:

$$S_{\text{cap}} = 5,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

$\vartheta$ °C	$\frac{x}{10^{-3} \text{ m}}$	$\frac{V}{10^{-6} \text{ m}^3}$
95	293	1,67
90	289	1,65
80	281	1,60
70	273	1,56
60	265	1,51
50	257	1,47
40	249	1,42
30	241	1,37
20	232	1,32
10	225	1,28
0	218	1,24

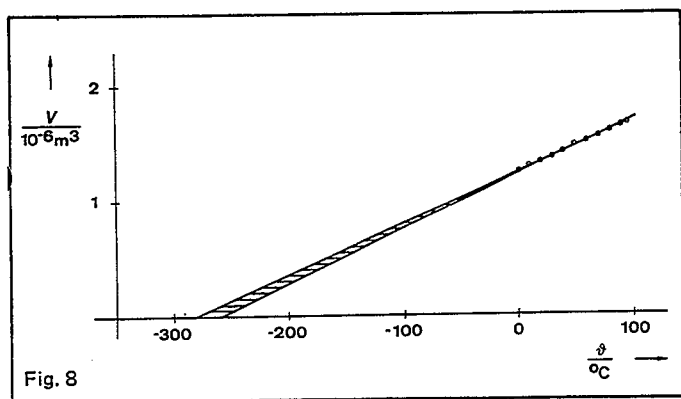


Fig. 8

**Resultats:**

Les points expérimentaux (voir fig. 8) sont alignés et vérifient l'équation  $V = V_0 (1 + \alpha \vartheta)$ ,  $V_0$  étant le volume à 0 °C.

$\alpha$ , compte tenu de la dispersion des valeurs expérimentales, vaut:  $(3,71 \pm 0,14) 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Le zéro absolu "0,0 K" résulte de l'intersection des droites expérimentales extrêmes trouvées avec l'axe des températures (c. à d.  $V = 0$ ). L'extrapolation conduit à  $-270 \text{ } ^\circ\text{C} \pm 10 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

**4.3.2 Loi de Charles: Variation de la pression en fonction de la température à volume constant (transformation isochore)**

Les appareils nécessaires sont les mêmes que pour l'expérience 4.1, avec, en supplément:

- |  |                   |
|--|-------------------|
|  | <i>No de cat.</i> |
| 1 bec Bunsen .....   | par ex. 303 11    |
| cartouche .....  | 303 12            |
| 1 thermomètre $-10 \text{ } ^\circ\text{C}$ à $+110 \text{ } ^\circ\text{C}$ ..... | 382 34            |
| du fil de ligne. ....  | de 309 48         |

**Conduite de l'expérience:**

a) Enfermer un certain volume d'air et réaliser le montage comme il est indiqué dans l'expérience 4.1. Compléter le montage suivant a fig. 9. Nettoyer très soigneusement la seringue au préalable.

Nous recommandons l'utilisation de la seringue à gaz de 25 ml faisant partie du jeu de 2 seringues sur support (361 30).

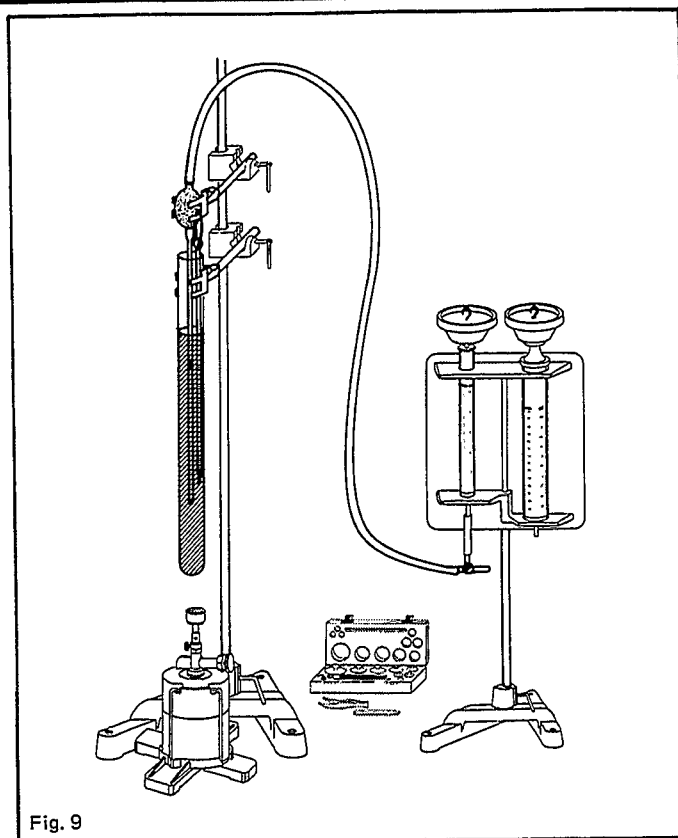


Fig. 9

La grande éprouvette sert à recueillir le mercure qui pourrait se répandre lors d'un éventuel bris de verre, mais également ici à recevoir le bain-marie. Remplir la grande éprouvette aux 3/4 d'un mélange d'eau et de glace. Introduire le thermomètre dans l'éprouvette, parallèlement au thermomètre à gaz, et à l'aide du fil de ligne (boucle d'env. 3 cm), l'accrocher à la pince de fixation universelle retenant le thermomètre à gaz, comme l'indique la fig. 7.

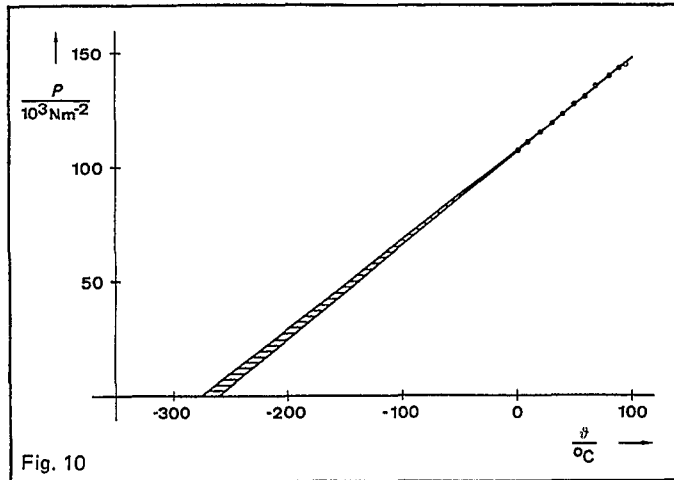
b) Repérer la position inférieure de l'index de mercure lorsque la température de l'appareil est à 0 °C. Puis chauffer l'eau de la grande éprouvette à l'aide du bec Bunsen jusqu'à peu avant l'ébullition. Eviter l'ébullition qui provoque des projections d'eau pouvant éteindre la flamme du bec Bunsen. Lorsque la température est d'env. 95 °C, surcharger le plateau de la seringue de 25 ml jusqu'à réobtenir le volume obtenu précédemment à 0 °C. Avant de surcharger le plateau, tirer le piston, parfaitement nettoyé, le plus haut possible dans la seringue (pour cela mettre brièvement en relation le volume intérieur de la seringue et l'air ambiant et actionnant le robinet à trois voies). Le bec Bunsen étant éteint, laisser refroidir lentement l'ensemble. Lorsque la température s'est abaissée de 10 °C, enlever des surcharges jusqu'à ce que le volume reprenne la valeur qu'il avait initialment à 0 °C. Recommencer ainsi de 10 °C en 10 °C. Noter la masse des surcharges en fonction de la température du bain-marie.

**Exploitation de l'expérience:**

La pression régnant dans le volume d'air enfermé dans le thermomètre à gaz se calcule comme il est indiqué en 4.2, à partir de la pression atmosphérique et des pressions partielles qui s'y ajoutent. Les pressions obtenues sont portées sur un diagramme en fonction de la température (voir fig. 10). La droite obtenue est extrapolée vers les basses températures.

Exemples de valeurs expérimentales obtenues:

$\frac{p_{at}}{10^3 \text{ Nm}^{-2}}$	$\frac{p_{piston}}{10^3 \text{ Nm}^{-2}}$	$\frac{p_{Hg}}{10^3 \text{ Nm}^{-2}}$	$\frac{x_0}{10^{-3} \text{ m}}$	$\frac{S_{piston}}{10^{-4} \text{ m}}$
101,6	4,1	1,3	257	1,9



$\frac{\vartheta}{^\circ\text{C}}$	masse posée sur le plateau (en grammes)	$\frac{\Delta p}{10^3 \text{ Nm}^{-2}}$	$\frac{p}{10^3 \text{ Nm}^{-2}}$
95	(2x200)+(3x100)+20	37,2	144,2
90	(2x200)+(2x100)+50+20	34,6	141,6
80	(2x200)+(2x100)+(2x20)	33,0	140,0
70	(2x200)+100+50	28,4	135,4
60	(2x200)+(2x20)+(3x10)	24,3	131,3
50	(3x100)+50+(2x20)	20,1	127,1
40	(3x100)+10	16,0	123,0
30	(2x100)+20+10	11,9	118,9
20	(2x50)+(2x20)+10+5	8,0	115,0
10	(2x20)+(3x10)+5	3,9	110,9
0	0	0	107,0

Résultats:

Les points expérimentaux (voir fig. 10) sont alignés et vérifient l'équation  
 où  $p_0$  est la pression à 0 °C.

$\alpha$ , compte tenu de la dispersion des valeurs expérimentales, vaut:  
 $(3,74 \pm 0,11) \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

Le zéro absolu "0,0 K" résulte de l'intersection des droites expérimentales extrêmes trouvées avec l'axe des températures (c. à d.  $p = 0$ ), l'extrapolation conduit à  $-267 \text{ } ^\circ\text{C} \pm 8 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Remarque:

Les mesures de pressions en fonction de la température à volume constant peuvent également être effectuées à l'aide d'un manomètre en U comme l'indique la figure 11. La seringue à gaz avec robinet (361 28) sert à maintenir constant le volume de l'air enfermé dans le thermomètre à gaz. La pression peut directement être lue sur le manomètre, mais pour obtenir une bonne précision, il est recommandé d'intercaler une échelle millimétrique entre le tube en U et son support. Pour des raisons de sécurité (mercure!), il est malgré tout préférable de faire l'expérience en utilisant le jeu des 2 seringues à gaz (361 30).

Remarques

1. Les numéros à 5 chiffres entre parenthèses sont les numéros de catalogue des dits appareils.
2. Les indications et reproductions sont données sans engagement de notre part vu que nous nous efforçons de perfectionner nos appareils en faisant profiter notre production des plus récentes connaissances scientifiques et techniques.

