

Objektyp: **Chapter**

Zeitschrift: **Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles**

Band (Jahr): **13 (1874-1875)**

Heft 72

PDF erstellt am: **23.07.2024**

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

### **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*  
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, [www.library.ethz.ch](http://www.library.ethz.ch)

<http://www.e-periodica.ch>

# RECHERCHES

## SUR LA DIFFUSION ENTRE L'AIR SEC ET L'AIR HUMIDE

à travers une cloison de terre poreuse (\*)

par

**M. L. DUFOUR,**

Professeur de physique à l'Académie de Lausanne.

---

1. Dans de récentes recherches sur une variation de température qui accompagne la diffusion des gaz à travers une cloison de terre poreuse, j'ai dû examiner, comme question préalable, ce qui arrive lorsque des gaz desséchés ou saturés viennent en contact avec la paroi diffusante. Les expériences ont montré que la circulation des gaz secs donne lieu à un abaissement de température; la circulation des gaz humides s'accompagne, au contraire, d'un réchauffement.

Qu'arrive-t-il si les deux faces de la paroi poreuse se trouvent en contact avec l'air dans deux états différents d'humidité ?

Des expériences assez variées, et dont on trouvera les détails dans les pages qui suivent, montrent que la différence d'état hygrométrique de l'air donne lieu au même résultat que celui qui est dû à deux gaz de densité différente. *Il se produit un double courant à travers la paroi*

(\*) Dans une communication préliminaire présentée à la *Soc. helv. des Sc. nat.* à Fribourg, en 1872, j'ai annoncé et montré le fait d'une diffusion entre l'air sec et l'air humide. (*Archives des Sc. phys.* de Genève, septembre 1872.)

*poreuse et le courant le plus abondant va de l'air plus sec à l'air plus humide.*

Les parois poreuses qui ont servi dans toutes les expériences dont il sera question plus loin, sont celles des vases cylindriques de terre cuite qui servent dans les piles galvaniques à deux liquides. Différents vases ont été utilisés ; ils seront désignés par les lettres P, S, M, T, etc... Ces vases avaient longtemps trempé dans l'eau puis avaient été soigneusement lavés. Tous donnaient, du plus au moins, une très bonne diffusion entre l'air et l'hydrogène, l'air et l'acide carbonique, etc. Les dimensions sont à peu près les mêmes pour tous ; environ 220<sup>mm</sup> de longueur intérieure et 40<sup>mm</sup> de diamètre. L'épaisseur de la paroi est de 3,6<sup>mm</sup> à 4<sup>mm</sup>.

**2.** Une première série d'expériences a été exécutée avec une portion de l'appareil employé dans les recherches *Sur la variation de température qui accompagne la diffusion* (1).

(1) *Bulletin de la Soc. des sc. nat.*, n° 71. — 1874.

Je me permettrai de rappeler ici quelques-unes des conclusions du mémoire : *Sur une variation de température, etc.*, parce qu'il y sera souvent fait allusion dans le présent travail.

« I. Lorsque des courants d'air, d'hydrogène ou de gaz d'éclairage desséchés viennent circuler le long des parois du vase poreux ou d'un vase qui renferme des fragments de la matière poreuse, il se produit un abaissement de température. Cet abaissement se ralentit peu à peu et finit même par cesser tout à fait.

» II. Lorsque des courants des mêmes gaz chargés d'humidité viennent circuler dans les mêmes conditions, il se produit un réchauffement, lequel se ralentit aussi et finit par cesser. »

Pour le cas où il se produit une diffusion à travers une paroi poreuse :

« VI. Il y a un abaissement de température du côté où arrive le courant le plus abondant. Il y a, au contraire, élévation de température du côté opposé.

» VII. Ces variations de température ont été constatées lors-

Voici, de la description de cet appareil, tout ce qui s'applique au sujet actuel :

« ... Le vase poreux P était fermé par un bouchon de caoutchouc joignant parfaitement. Ce bouchon était percé de trois ouvertures qui recevaient :

» 1) Un thermomètre H, dont la cuvette arrivait à peu près au milieu de P ; 2) et 3), des tubes de verre *a* et *b* ; *a* plongeait jusque près du fond du vase ; *b* débouchait dans la partie supérieure. Ces tubes, ainsi que le thermomètre, étaient à frottement juste dans leurs ouvertures.

» Le cylindre P était placé au milieu d'un vase cylindrique de verre, V, ayant 145<sup>mm</sup> de hauteur et 83<sup>mm</sup> de diamètre ; il était librement soutenu dans ce vase, sans toucher ni le fond ni les parois, au moyen d'une pince fixée à un support solide qui serrait le tube *a*, à 10<sup>c</sup> environ au-dessus du bouchon. — Le vase V était fermé par une plaque mince de plomb qui reposait sur son bord supérieur et qui se repliait contre sa paroi extérieure. Cette plaque était percée en son milieu d'une grande ouverture circulaire par laquelle était introduit P ; ouverture qui se trouvait fermée par le bord supérieur du bouchon de caoutchouc. Deux autres ouvertures plus petites, pratiquées dans la plaque de plomb, donnaient passage : 1) à un tube *c* qui aboutissait dans l'espace annulaire vide entre P et V ; 2) à un thermomètre H' dont la cuvette arrivait à moi-

que les gaz prenant part à la diffusion sont desséchés aussi bien que quand ces gaz sont chargés de vapeur d'eau. — Lorsque les gaz sont employés sans dessiccation et sans humidification préalables, la diffusion donne nettement lieu aussi à la variation de température indiquée ci-dessus. Seulement alors, il est probable que cette variation est influencée par la présence de la vapeur d'eau. »

tié hauteur de P et à 2 ou 3<sup>mm</sup> de sa surface extérieure.

» Il résulte de ces dispositions que le vase P pouvait être absolument isolé de l'extérieur par la fermeture des tubes *a* et *b*; mais que l'espace annulaire entre P et V ne pouvait pas l'être. La fermeture avec la feuille de plomb était naturellement insuffisante; elle empêchait le gaz contenu dans l'espace annulaire de se mélanger trop rapidement avec l'air extérieur, mais elle ne permettait pas d'avoir une différence de pression entre cet espace et l'air libre.

» Les deux vases P et V, emboîtés ainsi l'un dans l'autre, étaient installés dans un grand cylindre, M, de terre ordinaire. V reposait sur trois bouchons placés sur le fond de ce dernier vase. Tout l'espace entre V et M était rempli de coton lâche; une couche de coton recouvrait la lame de plomb; enfin le vase de terre lui-même était entouré d'une couche de coton retenue par un linge formant une sorte de manteau extérieur. C'est du milieu de ce manteau et du coton qui avait encore été placé au-dessus de M, que sortaient les tubes *a*, *b*, *c* et les deux thermomètres H et H'. » *a*, *b* et *c* étaient reliés à des tubes de caoutchouc qui servaient à introduire, dans le poreux ou dans l'espace qui l'entourait, l'air sec ou l'air humide.

Les courants d'air étaient obtenus à l'aide d'un aspirateur à écoulement d'eau et à l'aide d'un grand sac de caoutchouc comprimé. Pour les saturer de vapeur ou pour les dessécher, on les faisait passer à travers deux tubes en U remplis de papier brouillard imbibé d'eau, ou à travers un ou deux appareils à ponce sulfurique.

Voici deux des expériences faites.

1<sup>re</sup> EXPÉRIENCE. — Un courant d'air provenant du sac de caoutchouc et desséché a été dirigé, par le tube *c*, dans l'espace compris entre le poreux, P, et V. Un autre courant, provoqué par l'aspirateur et desséché également, entrainé par *a* dans le vase poreux et en sortait par *b*. Cette circulation, prolongée de 22 à 54 minutes, a produit l'abaissement connu de température dû à un gaz sec. A 54<sup>m</sup>, on a interrompu le second courant d'air, fermé le tube *a* et relié immédiatement *b* (par conséquent l'intérieur du vase poreux) avec un manomètre à eau. Le gaz sec continuait à l'extérieur. — On voit que la température s'est faiblement relevée et que la pression, dans P, a un peu augmenté. A 61<sup>m</sup>, le courant extérieur a cessé de passer sur la ponce sulfurique et a été dirigé au contraire à travers le papier brouillard imbibé d'eau. La pression, dans le vase P, n'a pas tardé à baisser et a varié de 11<sup>mm</sup> en deux minutes et demie. — A 64<sup>m</sup>, le courant extérieur humide a été interrompu et la pression s'est immédiatement rapprochée de la pression extérieure. De 69 à 72<sup>m</sup>, le robinet de *a* a été ouvert afin de laisser s'établir l'équilibre des pressions. — A 72<sup>m</sup>, nouveau courant d'air sec à l'extérieur; la pression, dans P, a baissé de 2 à 3<sup>mm</sup> dans les premières secondes, mais s'est bientôt accrue et a atteint une valeur de + 9<sup>mm</sup> à 76<sup>m</sup>. Ce courant sec ayant été interrompu, la différence des pressions extérieure et intérieure a immédiatement diminué et était nulle à 84<sup>m</sup>. — A 91<sup>m</sup>, courant d'air humide à l'extérieur donnant lieu à des phénomènes semblables à ceux qui se sont produits de 61 à 63<sup>m</sup>; la pression varia de — 10<sup>mm</sup>,5. — A 98<sup>m</sup>, interruption du courant à laquelle succéda bientôt l'égalisation des pressions.

**Exp. I.**

TEMPS.	TEMPÉRAT.	PRESSION.	TEMPS.	TEMPÉRAT.	PRESSION.
22 <sup>m</sup>	23 <sup>o</sup> 49	. . .	72 <sup>m</sup>	23 <sup>o</sup> 14	0 <sup>mm</sup>
36	23,46	. . .	73	23,14	— 2
38	23,36	. . .	74	. . .	+ 1
50	22,76	. . .	75	23,12	+ 7
52	22,78	. . .	76	23,06	+ 9
54	22,79	. . .	79	23,00	+ 9
55	22,80	+ 3 <sup>mm</sup>	80	22,98	+ 6
57	22,80	+ 4	84	. . .	0
59	22,84	+ 4	85	22,98	0
61	22,85	+ 4	90	23,00	0
61 <sub>,5</sub>	22,86	+ 1	91	23,02	— 2
62	22,84	— 4	93	23,08	— 9
63	22,93	— 10	94	23,12	— 10
64	23,00	— 11	98	23,27	— 10
65	. . .	— 7	99	23,31	— 7
68	23,12	— 2	105	23,33	— 2
69	23,12	0			

2<sup>me</sup> EXP. — A 0 minute commença une double circulation d'air chargé de vapeur à l'extérieur et à l'intérieur du vase poreux; le manomètre n'était pas encore relié à l'appareil. La température s'éleva conformément à la loi connue, puis demeura sensiblement stationnaire dès 31<sup>m</sup>. — A 37<sup>m</sup>, le tube *a* fut fermé; *b* fut relié au manomètre qui accusa, dans les premiers instants, une faible diminution de pression. A 46<sup>m</sup>, le courant extérieur fut desséché et passa très lentement à travers deux tubes à ponce sulfurique. La pression ne tarda pas à s'élever dans le vase poreux et atteignit

+ 20<sup>mm</sup> en 6 minutes. — A 56<sup>m</sup>, le courant extérieur cessa d'être desséché et fut dirigé à travers le papier brouillard mouillé. La pression diminua aussitôt, l'excès devint nul vers 59<sup>m</sup> et ensuite négatif.

**Exp. 2.**

TEMPS.	TEMPÉRAT.	PRESSION.	TEMPS.	TEMPÉRAT.	PRESSION.
<u>57<sup>m</sup></u>	22 <sup>o</sup> 34	. . .	49 <sup>m</sup>	22 <sup>o</sup> 44	+ 14 <sup>mm</sup>
0	22,34	. . .	50	22,39	+ 17
6	22,40	. . .	52	22,16	+ 20
21	22,58	. . .	54	22,00	+ 20
31	22,56	. . .	<u>56</u>	21,92	+ 20
34	22,56	. . .	57	21,84	+ 17
<u>37</u>	22,56	. . .	58	21,84	+ 3
39	22,55	— 1 <sup>mm</sup>	59	21,86	+ 1
<u>45</u>	22,53	— 2	60	21,96	— 1
46	22,54	— 3	64	22,18	— 4
48	22,54	+ 2	<u>70</u>	22,40	— 4

**3.** En examinant de près les diverses phases des expériences précédentes, on voit que la présence d'un air plus sec à l'intérieur du poreux et d'un air moins sec ou humide à l'extérieur donne lieu à une diminution de la pression. Inversément, lorsque l'air est plus sec à l'extérieur et humide à l'intérieur, la pression augmente. Ce résultat indique donc, de l'air sec à l'air humide, un courant plus abondant que dans le sens inverse.

Si l'on examine la marche du thermomètre H, on voit qu'il a varié conformément aux lois rappelées dans la note<sup>(1)</sup>. Il accuse un accroissement de température du côté où le courant le plus abondant pénètre dans la paroi



poreuse et un refroidissement du côté où ce courant sort de la même paroi<sup>(2)</sup>. — Il est à remarquer que les variations de pression du manomètre ne peuvent pas s'attribuer aux changements de température du gaz qui remplit le vase poreux, car ces changements sont précisément inverses de ce qu'ils devraient être pour expliquer les changements de la pression.

Les changements dans la pression, ainsi que les variations du thermomètre, n'ont pas coïncidé exactement avec l'instant noté pour les changements dans les courants. Cette différence est très probablement due au fait que les courants circulaient avec assez de lenteur et qu'ils devaient parcourir les tubes de caoutchouc avant d'arriver au contact du vase poreux.

Plusieurs autres expériences, tout à fait semblables aux deux précédentes, ont toujours fourni des résultats analogues. Il me paraît superflu de les décrire.

4. Le vase poreux P a été retiré de l'appareil dont il vient d'être question. Il est resté fermé par le bouchon de caoutchouc et muni du thermomètre H ainsi que du tube *a* destiné à la communication avec le manomètre. Sur le trajet de ce tube a été placé un robinet à trois voies afin de pouvoir facilement laisser la pression intérieure s'équilibrer avec la pression extérieure.

(<sup>2</sup>) La variation de température est plus forte que celle qui a été obtenue lors de la diffusion entre l'air et l'hydrogène ou l'air et le gaz d'éclairage. Il me paraît probable que, dans les expériences actuelles, la variation de température est un résultat combiné de ce qui provient du fait même de la diffusion et de ce qui est dû à l'absorption de la vapeur d'eau par la matière poreuse ou à son dégagement. (Voir note 1.)

Quant à la variation de pression, elle est ici si faible qu'elle ne doit pas influencer d'une manière sensible sur le changement de la température qui règne dans les vases poreux.

Deux vases cylindriques de verre, dont il sera souvent question dans la suite, ont été préparés d'une façon telle que l'un renfermait de l'air sec et l'autre de l'air très humide ou saturé. Ces cylindres, de 15<sup>c</sup> de hauteur et de 9<sup>c</sup> de diamètre étaient suffisamment grands pour que les vases poreux pussent être complètement plongés dans leur intérieur. Le premier a été revêtu, sur sa face interne, de deux doubles de papier brouillard plongeant dans une couche d'eau de 8 à 10<sup>mm</sup> qui recouvrait le fond. Le second a reçu une couche de quelques millimètres d'acide sulfurique concentré. L'un et l'autre étaient soigneusement fermés par un couvercle jusqu'au moment où ils devaient servir dans une expérience. — Peu de temps avant de les employer, on avait soin de les incliner et de les tourner quelques instants, de telle sorte que soit l'eau, soit l'acide sulfurique vinssent mouiller les parois intérieures. L'un des vases fournissait donc une atmosphère très humide ou saturée (je le nommerai le *cylindre humide*) et l'autre une atmosphère desséchée (le *cylindre sec*). Dans ce dernier, l'acide sulfurique était fréquemment renouvelé.

3<sup>me</sup> EXP. — Le vase poreux P, qui avait été quelques jours à l'air libre dans une atmosphère de 12 à 15<sup>o</sup>, a été soutenu par une pince qui saisissait le tube de verre *a*, puis on a amené le *cylindre sec* de telle sorte que P plongeât entièrement dans son intérieur. Du coton lâche a été placé en bourrelet entre la partie supérieure du poreux et le bord du cylindre qui l'entourait, afin d'empêcher l'air de ce dernier de se mélanger trop facilement avec l'atmosphère ambiante. Après quelques minutes, le *cylindre sec* a été enlevé et remplacé par le

*cylindre humide*. Voici les indications du thermomètre et du manomètre :

**Exp. 3.**

TEMPS.	TEMPÉRAT.	PRESSION.	TEMPS.	TEMPÉRAT.	PRESSION.
13 <sup>m</sup>	15 <sup>o</sup> 90	0,0 <sup>mm</sup>	20 <sup>m</sup>	15 <sup>o</sup> 65	+ 11,5 <sup>mm</sup>
14	15,95	0,0	22	15,55	+ 11,0
15	15,98	0,0	23	15,50	— 0,5
16	15,90	+ 5,5	24	15,50	— 7,5
17	15,84	+ 10,0	26	15,80	— 8,0
18	15,80	+ 11,1	28	16,05	— 7,8

Jusqu'à 15 minutes, le poreux était à l'air libre. A ce moment, on a placé le *cylindre sec*; la pression s'est immédiatement élevée et a présenté une valeur maximum  $\Delta p = + 11^{\text{mm}},5$ . — A 22<sup>m</sup>, le *cylindre sec* a été remplacé par le *cylindre humide*. La pression a rapidement baissé et a présenté une diminution de 8<sup>mm</sup> au-dessous de la pression normale.

Si l'on consulte le thermomètre, on voit que la température a baissé dans la première phase de l'expérience; elle a au contraire monté durant la seconde.

Ce résultat confirme donc, et d'une manière très simple, ceux qui ont été obtenus dans les expériences 1 et 2. Il paraît y avoir une diffusion de l'air plus sec vers l'air plus humide, et la variation de la température se trouve conforme aux lois connues. Cette variation se produit dans un sens précisément inverse de ce qui devrait être si c'était la chaleur qui fût la cause du changement de la pression.

La marche qui vient d'être décrite dans cette expérience a été reproduite un très grand nombre de fois par

diverses températures ambiantes et avec divers vases poreux. Les résultats ont toujours été conformes à ceux qui viennent d'être cités comme exemples ; mais la grandeur de la variation de pression diffère un peu d'un vase poreux à l'autre. Cette variation d'ailleurs dépend dans une grande mesure — on le verra plus tard — de la tension de la vapeur d'eau.

4<sup>me</sup> EX. — Un petit godet de verre, de 35<sup>mm</sup> de diamètre et de 30<sup>mm</sup> de hauteur, a été à moitié rempli d'eau puis introduit dans le vase poreux S, de telle sorte qu'il reposait sur le fond de ce vase. Un paquet de mousseline, formant mèche, a été installé d'une manière telle qu'il trempait dans l'eau du godet et s'élevait jusque vers le milieu de S, sans cependant toucher les parois. Grâce à cette disposition, le poreux s'est trouvé rempli d'air très humide. Il a été fermé avec le bouchon de caoutchouc puis relié au manomètre. Le manomètre a immédiatement accusé une augmentation de pression. On a observé, au bout de deux minutes,  $\Delta p = + 6^{\text{mm}}$  à  $6,5^{\text{mm}}$ , indiquant ainsi une diffusion de l'air ambiant, moins humide, vers l'air intérieur plus humide. Le vase poreux a été placé ensuite dans le *cylindre humide* décrit plus haut. L'excès de pression a diminué et s'est arrêté à une valeur de  $+ 0^{\text{mm}},5$  à  $0^{\text{mm}},8$ , due probablement à ce que l'atmosphère intérieure du vase poreux se maintenait plus riche en vapeur que celle du *cylindre humide* dépourvu de son couvercle. Le vase poreux a été ensuite placé dans le *cylindre sec*. La pression s'est rapidement élevée à  $+ 20$  et  $+ 21^{\text{mm}}$ . Pendant cette expérience, la température était de  $23$  à  $24^{\circ}$ .

Des faits tout semblables ont été constatés un grand

nombre de fois avec divers vases poreux et par diverses températures ambiantes. Ils se sont toujours reproduits de manière à indiquer une diffusion de l'air plus sec vers l'air plus humide.

5<sup>me</sup> EX. — Le vase poreux P avait été placé, durant quelques heures, sous une grande cloche à côté d'une capsule remplie d'acide sulfurique. On avait en outre placé, dans l'intérieur de P, un petit godet de verre à demi rempli d'acide sulfurique concentré. Le vase P ainsi préparé puis relié au manomètre a fourni, après deux minutes d'exposition à l'air libre, une diminution de pression de — 8 à — 9<sup>mm</sup>. On l'a installé dans le *cylindre humide* et la diminution a rapidement atteint — 14<sup>mm</sup>. La température ambiante était de 15 à 16°.

Dans cette expérience, comme dans la précédente, le thermomètre plongé dans le vase poreux a présenté une variation de quelques dixièmes de degré pendant que le changement de pression se produisait. Cette variation a été chaque fois en sens opposé de ce qu'elle aurait dû être, si le changement de pression eût été provoqué par une variation de température de l'air contenu dans le vase. En revanche, le sens de la variation de la température est bien conforme à la loi connue (voir note 1).

Cette expérience cinquième a été répétée bien souvent avec différents vases poreux; elle a toujours fourni des résultats semblables à ceux qui viennent d'être indiqués. On peut se borner à introduire dans le poreux le petit godet de verre avec acide sulfurique sans préalablement exposer le vase tout entier à l'air sec, le changement de pression demeure encore très prononcé.

5. Dans les expériences qui viennent d'être décrites, les résultats paraissent bien être dus à une diffusion à travers la paroi poreuse. Il n'est cependant pas inutile d'indiquer quelques faits et quelques considérations à l'appui de cette interprétation du phénomène.

1) Lorsqu'on chauffe ou qu'on refroidit un vase poreux, on trouve que la tension du gaz contenu dans son intérieur change assez fortement et assez rapidement pour que le manomètre varie *avant* que le thermomètre ait commencé à signaler le réchauffement ou le refroidissement. La marche du thermomètre est alors d'accord avec celle du manomètre, c'est-à-dire qu'il y a un accroissement de pression lors d'un réchauffement et une diminution lors d'un refroidissement. Or, dans les expériences précédentes, le thermomètre, on l'a vu, variait toujours en sens opposé de ce qui aurait dû être, d'après les indications du manomètre.

2) Lorsque, dans le vase poreux, la pression change par suite d'une variation de température, qu'elle augmente, par exemple, sous l'influence d'un réchauffement, l'équilibre tend à se rétablir à cause de la porosité du vase. Si, après que le gaz a subi sa dilatation accusée par le manomètre, on établit un instant une communication avec l'air extérieur, l'excès de pression disparaît, et si le réchauffement ne continue pas à augmenter la différence de pression ne se reproduit pas. Il en est tout autrement lorsqu'une diffusion intervient dans les conditions des expériences décrites plus haut. Lorsqu'on plonge, par exemple, le vase poreux rempli d'air saturé dans le *cylindre sec*, il se produit, en quelques secondes, un accroissement de pression de quelques millimètres. Le manomètre atteint un certain maximum et s'y maintient. Si l'on établit la com-

munication avec l'air extérieur, les pressions extérieure et intérieure s'équilibrent immédiatement ; mais dès que la communication avec l'extérieur est supprimée, la différence de pression reparaît. On peut ainsi un grand nombre de fois, à de courts intervalles, rétablir la communication avec l'air ambiant, laisser par conséquent sortir du vase poreux un peu d'air pour rétablir l'équilibre : *on voit toujours la différence de pression se renouveler, toujours dans le même sens et toujours sensiblement de la même quantité*, dès que la communication avec l'extérieur est supprimée.

3) On pourrait supposer peut-être que le changement de pression est dû à quelque modification dans la dimension du vase poreux, laquelle se réduirait un peu lorsque l'air sec est en contact avec la face extérieure, et, au contraire, s'accroîtrait dans le cas d'un air plus humide. Cette supposition est évidemment écartée par les détails indiqués ci-dessus 2) ; elle l'est aussi d'une façon très évidente par les détails qu'on trouvera plus loin (9<sup>e</sup> et 10<sup>e</sup> Exp.).

4) Pour m'assurer que les phénomènes dont il s'agit ici sont bien dépendants de la porosité des parois du vase, j'ai verni deux vases poreux qui avaient nettement fourni des résultats semblables à ceux des expériences 1 à 5. L'un d'eux a été verni (vernis de gomme laque et cire dans l'alcool) à l'intérieur et l'autre à l'extérieur. Après cette opération, il n'y a plus eu de traces d'une influence de l'air sec ou humide pour provoquer un changement de pression de l'air contenu dans ces vases. — J'ai également soumis aux mêmes épreuves un ballon et une éprouvette de verre. Le résultat a été nul également, ainsi qu'on pouvait s'y attendre. En revanche, les cylindres poreux vernis et les vases de verre accusaient très nettement et dans

le sens voulu les variations de la température; c'étaient de véritables thermomètres à air.

**6.** Les expériences précédentes, et aussi celles qui vont suivre, établissent seulement que l'air plus sec passe ou tend à passer à travers la paroi poreuse, se dirigeant du côté où se trouve un air plus humide. — Mais il n'est pas douteux que la vapeur d'eau traverse également la paroi en sens opposé, et c'est la différence des deux courants qui est accusée dans les expériences décrites ici. Ce phénomène paraît analogue à celui qui se produit entre deux gaz de densité différente, et on peut bien lui appliquer le nom de diffusion.

Quoique les preuves du passage de la vapeur d'eau à travers la paroi poreuse semblent peut-être superflues, je me permettrai cependant d'indiquer les faits suivants :

1) Si l'on place dans un vase poreux bien fermé un morceau de papier brouillard ou un morceau de mousseline imbibés d'eau, et qu'on abandonne ce vase à l'air libre, le corps mouillé finit par être parfaitement sec au bout de peu de jours.

2) Si le vase poreux est installé dans un cylindre de verre avec une soucoupe d'acide sulfurique, la dessiccation se fait plus promptement.

3) Un godet à demi rempli d'acide sulfurique a été placé dans un vase poreux, puis ce vase, hermétiquement fermé, a été installé dans un *cylindre humide*. Après vingt-quatre heures, le godet avait augmenté de 0<sup>g</sup>,074. Dans une autre occasion, après trois jours, le poids du godet avait augmenté de 0<sup>g</sup>,525, c'est-à-dire de un sixième à peu près du poids de l'acide sulfurique qui y avait été placé. — Ces accroissements de poids, dus à la vapeur aqueuse



absorbée, prouvent bien le passage de cette vapeur à travers la cloison poreuse.

7. Voici maintenant diverses autres expériences qui confirment, par des faits assez frappants et assez inattendus, la réalité de cette diffusion entre l'air sec et l'air humide.

6<sup>e</sup> EXP. Un vase poreux, S, muni de son thermomètre, H, et relié avec le manomètre, a été placé dans un cylindre de verre de 16 cent. hauteur et de 12 cent. de diamètre. Le vase poreux, soutenu par la pince qui saisissait le tube *a*, était suspendu librement au milieu de ce cylindre. Un second thermomètre, H', a été installé de telle façon que sa cuvette plongeât dans l'espace annulaire entre S et le cylindre extérieur.

A 0 minute, la communication avec l'extérieur a été supprimée. Le manomètre a accusé une faible augmentation de pression. Les thermomètres ont peu varié entre 0 et 10<sup>m</sup>. — A 10<sup>m</sup>, on a chauffé très faiblement, avec une petite flamme d'alcool, le fond du cylindre de verre. On voit que les températures H et H' se sont élevées de 4 et de 6<sup>o</sup> à peu près, et, en même temps, le gaz du vase S a augmenté de force élastique. On a là l'effet simple et ordinaire d'une variation de température. Il est à remarquer cependant que si le vase n'eût pas été poreux et que l'air intérieur n'eût pas pu sortir en partie par les parois, l'accroissement de force élastique aurait sûrement été plus considérable. A 22 minutes, la flamme fut éteinte et l'appareil abandonné au refroidissement, le vase poreux communiquant librement avec l'extérieur.

Après 38 minutes d'interruption, on versa sur le fond du vase extérieur une couche de 3 à 4 millimètres d'eau,

puis on supprima la communication avec l'air extérieur et on chauffa de nouveau très faiblement à partir de 4 minutes. On voit que les deux thermomètres H et H' accusèrent bientôt l'accroissement de la température, mais que le manomètre *baissa*. A 26 minutes, malgré un réchauffement de plusieurs degrés de H et de H', la dépression était de 5<sup>mm</sup>,5. — Ce résultat est dû sans doute à la présence d'une atmosphère humide autour du vase poreux. Il y avait diffusion plus abondante de l'intérieur vers l'extérieur.

**Exp. 6.**

TEMPS	H	H'	PRESSION
0 <sup>m</sup>	20 <sup>o</sup> 60	20 <sup>o</sup> 40	+ 0,5 <sup>mm</sup>
5	20,20	20,45	+ 1,0
<u>10</u>	20,30	20,80	+ 1,0
11	20,40	21,40	+ 2,0
13	21,25	23,20	+ 6,0
16	23,00	25,15	+ 10,0
<u>22</u>	24,35	27,20	+ 12,5
<u>0</u>	19,48	19,55	0,0
5	19,60	19,65	— 2,0
14	19,95	19,80	— 2,5
16	20,65	20,00	— 3,5
21	24,05	22,50	— 4,0
<u>26</u>	28,10	25,55	— 5,5
<u>33</u>	22,80	20,05	+ 6,0
35	21,40	20,15	+ 7,5
38	20,65	20,70	+ 8,5

A 26 minutes, on éloigna le cylindre de verre et on le remplaça, autour du poreux, par le *cylindre sec* dont il a

souvent été question. Le manomètre accusa immédiatement un accroissement de pression, parce que l'atmosphère environnant S se trouvait plus sèche que l'intérieur du vase lui-même, et de 33 à 38 minutes, malgré un abaissement de température de  $1^{\circ},15$ , le manomètre continua à s'élever.

7<sup>e</sup> EXP. Le cylindre de verre, pourvu du thermomètre H', a été chauffé lentement et avait atteint une température de  $36^{\circ}$ . A ce moment, on introduisit dans son intérieur le poreux P, dont la température était de  $19^{\circ},30$ . En 7 minutes, le thermomètre H monta à  $27^{\circ},20$  et, pendant ce temps, la pression augmenta de 15 millimètres. C'est l'accroissement ordinaire de force élastique dû au réchauffement de P et de l'air qui y était renfermé. Le vase poreux fut retiré du cylindre de métal et abandonné au refroidissement. — Après 40 minutes, on observait  $H = 20^{\circ},40$  et  $H' = 21^{\circ}$ . Une couche d'eau de quelques millimètres fut versée sur le fond du cylindre de verre, puis l'on chauffa faiblement comme dans la phase précédente. Ce cylindre se remplit donc d'air chaud, mais saturé d'humidité. A 43 minutes, on observait  $H' = 29^{\circ},30$ . A ce moment, le poreux fut introduit comme ci-dessus. De 43 à 48 minutes, sa température monta de  $1^{\circ},8$  et, pendant ce temps, le manomètre *baissa* de  $8^{\text{mm}},5$ . A 48 minutes, la communication fut établie avec l'air extérieur, durant 20 secondes, afin de laisser les pressions s'équilibrer, puis cette communication fut supprimée. En moins de une minute, le manomètre accusa de nouveau — 7 millimètres.

Ici encore, on voit que la pression a diminué dans le vase poreux lorsque ce vase a été plongé dans une atmos-

phère saturée d'humidité, quoique notablement plus chaude (1).

8<sup>e</sup> EXP. Un vase poreux, M, a été installé, à 39 minutes, dans un cylindre métallique remplaçant le cylindre de verre des deux expériences précédentes, puis on a très lentement chauffé avec une faible flamme d'alcool. Après 37 minutes, on observait  $H' = 34^{\circ}$ ,  $H = 32^{\circ},10$ , et la pression s'était accrue de  $12^{\text{mm}},4$ . A ce moment, on versa à travers un tube aboutissant jusqu'au fond du cylindre de métal environ 30 grammes d'eau à  $90^{\circ}$ . Il devait donc se développer rapidement de la vapeur autour du vase poreux. Les thermomètres H et H' continuèrent à monter jusqu'à  $35^{\circ},6$  et  $35^{\circ},9$ , et, pendant ce temps, la pression *baissa* de manière à atteindre environ 18 millimètres au-dessous de sa valeur normale.

On peut obtenir un résultat semblable à celui qui vient d'être indiqué sans chauffage préalable. Ainsi, un vase poreux était installé dans le cylindre de métal à la température ambiante du laboratoire,  $12$  à  $13^{\circ}$ . On versa par l'intermédiaire du tube de verre, sur le fond de ce dernier vase, un peu d'eau à  $30^{\circ}$ . Le manomètre accusa, en peu de minutes, une dépression de 6 millimètres pendant que les thermomètres H et H' s'élevaient de plus de

(3) Il intervient probablement, dans une certaine mesure, les phénomènes de thermodiffusion découverts dernièrement par M. Feddersen. L'atmosphère qui entoure le vase poreux doit être, en effet, à chaque instant un peu plus chaude que l'intérieur même du vase, dans lequel la chaleur arrive seulement avec un certain retard. Mais la thermodiffusion n'est sûrement pas la cause des différences de pression constatées ici, puisque ces différences ne se produisent qu'autant que l'air intérieur du cylindre poreux est dans un état hygrométrique autre que celui de l'air extérieur.

1° sous l'influence de la vapeur chaude qui s'était répandue autour du vase poreux.

**Exp. 8.**

TEMPS	H	H'	PRESSION mm
39 <sup>r</sup>	7 <sup>o</sup> 60	7 <sup>o</sup> 60	0,0
42	11,60	8,85	+ 9,5
52	22,00	17,80	+ 10,4
71	32,35	30,10	+ 12,1
76	34,00	32,10	+ 12,4
77	34,00	32,20	+ 11,0
78	34,20	32,55	— 4,1
79	34,40	33,25	— 12,1
80	34,80	34,05	— 17,1
81	35,25	34,40	— 17,6
83	35,50	35,55	— 18,1
84	35,60	35,90	— 18,5

**8.** Les trois dernières expériences ont été répétées fréquemment, avec différents vases poreux et en variant un peu le mode d'opération. — Dans ces essais, deux causes, agissant en sens inverse, influent sur la force élastique du gaz renfermé dans le vase poreux: la variation de la température et la diffusion due à la différence de tension de la vapeur sur les deux faces de la paroi. — Lorsque la variation de température est rapide, elle donne lieu à une hausse plus ou moins forte du manomètre, tandis que si le réchauffement est lent, la porosité du vase permet au gaz de s'éliminer assez pour empêcher ou pour diminuer l'accroissement de la pression. Si l'air qui entoure le vase poreux est chargé de vapeur en même temps qu'il est chaud, la diffusion entre l'air plus sec de l'intérieur et l'air

plus humide de l'extérieur tend à diminuer la pression, et en opérant avec une température pas trop élevée ou pas trop rapidement croissante, ce dernier effet peut être prédominant. C'est ce qui est arrivé dans les expériences 6, 7 et 8, où l'on a le phénomène assez inattendu d'une diminution de pression dans un vase en même temps que sa température s'élève d'une façon très prononcée.

J'ai, à plusieurs reprises, opéré d'une manière rigoureusement semblable à celle des expériences 6, 7 et 8, en employant des vases poreux vernis à l'intérieur ou à l'extérieur. Les résultats ont toujours nettement été ce que l'on peut attendre en pareil cas, c'est-à-dire que la pression a paru dépendre seulement de la variation de température, que l'air entourant ces vases fût sec ou humide. Il me paraît superflu de donner en détail ces expériences de contrôle, puisqu'elles ont simplement constaté des changements de pression en rapport avec des changements de température, tels que les offrent des volumes d'air renfermés dans des vases imperméables.

Le réchauffement d'un poreux verni donne lieu, pour une même variation de la température du thermomètre intérieur, à un plus grand accroissement de pression que le réchauffement d'un poreux ordinaire plongé dans l'air non humide. Cette différence tient au fait, déjà indiqué ci-dessus, que, dans ce dernier cas, le gaz intérieur s'élimine partiellement à travers la paroi à mesure que sa pression tend à dépasser celle qui règne à l'extérieur.

---

9. Dans les expériences indiquées jusqu'ci, la différence des deux courants qui traversent la paroi poreuse se manifeste par une variation de pression. On peut ad-

mettre que la différence de pression qui se produit diminue celui des deux courants qui est le plus abondant et accroît au contraire l'autre. Il s'établit bientôt un état stationnaire correspondant à une différence,  $\Delta p$ , des pressions pour laquelle les deux courants ont à chaque instant une intensité égale. C'est cette quantité  $\Delta p$  qui est la variation maximum fournie par le manomètre et qui est sensiblement fixe tant que la différence des conditions hygrométriques se maintient la même des deux côtés de la paroi poreuse.

Si la pression est maintenue égale des deux côtés de la paroi poreuse, la différence des courants de diffusion deviendra appréciable par un déplacement gazeux dirigé de l'air plus sec à l'air plus humide. — On en trouvera des exemples dans les expériences qui suivent.

9<sup>e</sup> EXP. — Dans le vase poreux X a été placé le petit godet à demi rempli d'acide sulfurique. Ce vase a été ensuite relié à un long tube de 3 millimètres de diamètre intérieur, disposé horizontalement et pourvu d'un index liquide de quelques millimètres de longueur. Le vase X étant laissé à l'air libre, dont la température était de 15°, l'index se mit en mouvement du côté de X, indiquant ainsi une aspiration. Le vase poreux ayant été entouré du *cylindre humide*, le mouvement de l'index devint immédiatement plus rapide; il se ralentit dès que le cylindre humide fut éloigné.

Le même vase poreux, pourvu du godet rempli d'eau avec mèche de mousseline afin qu'il se remplît d'air humide, fut mis en communication avec le tube à index dont il vient d'être question. L'index se déplaça en s'écartant du vase, accusant ainsi une entrée de l'air à tra-

vers la paroi poreuse. Le déplacement, assez lent, était d'environ 9 millimètres par minute. On installa alors le poreux dans le *cylindre sec* ; le mouvement de l'index s'accéléra immédiatement et fut de 58 millimètres en une minute, de 112 millimètres en deux minutes, etc.

10<sup>e</sup> Exp. — Dans un tube en V fut introduit une petite colonne d'eau, juste suffisante pour fermer toute communication d'une branche à l'autre ; mais un faible excès de pression dans l'un ou l'autre sens déplaçait un peu la colonne et permettait à une bulle de gaz de passer. — L'une des branches de ce tube fut reliée à un vase poreux, M, qui renfermait le godet à demi rempli d'acide sulfurique, puis le vase lui-même fut installé dans le *cylindre humide*. On vit bientôt la colonne d'eau se déplacer et permettre le passage d'une bulle d'air dirigée de l'extérieur vers le vase poreux. A cette bulle en succéda une deuxième, puis une troisième, etc. Le mouvement était bien régulier. Avec l'appareil employé, il passa douze bulles en seize minutes. La température était de 10°,5 à 10°,9. — Un autre vase poreux, X, placé dans des conditions identiques, donna un résultat tout semblable. Le passage des bulles était un peu plus lent.

Un autre poreux, P, pourvu du godet d'eau avec mèche de mousseline, fut relié au tube en V, puis laissé à l'air libre. La colonne d'eau se déplaça un peu, accusant une augmentation de pression dans le vase ; mais elle ne fut pas soulevée suffisamment pour qu'une bulle pût passer. La différence de tension de vapeur entre l'air ambiant et l'air intérieur de P était trop peu considérable. On plaça alors autour de ce dernier le *cylindre sec*. Les bulles d'air passèrent bientôt et fort régulièrement à raison de



une en 70 secondes environ. La température était de  $8^{\circ},1$  à  $8^{\circ},6$ .

Dans ces deux dernières expériences, le mouvement d'un index ou le passage des bulles de gaz fait voir nettement le sens dans lequel marche, à travers la paroi poreuse, le courant le plus abondant. On reconnaît bientôt que la rapidité du déplacement de l'index et du passage des bulles est étroitement liée à la différence d'état hygrométrique entre l'air intérieur et l'air extérieur du vase poreux. Elle dépend donc de l'état de l'air ambiant lorsque le poreux est pourvu d'un godet d'acide sulfurique ou d'eau ; elle se modifie immédiatement dès qu'on fait arriver au contact de la paroi extérieure de ce vase un air plus sec ou un air plus humide.

10<sup>e</sup> Exp. *bis*. — Je décrirai ici une expérience analogue à la précédente, mais dans laquelle j'ai cherché à mesurer la quantité de gaz diffusant à travers la paroi poreuse.

Le vase poreux S a été pourvu du godet d'eau avec mèche de mousseline, puis il a été relié au tube en V mentionné ci-dessus. On l'a exposé d'abord à l'air libre ; on l'a placé ensuite dans un grand cylindre de verre, sur le fond duquel avait séjourné, durant quelques heures, une couche d'acide sulfurique. En outre, un tube amenait d'une manière continue, dans ce cylindre, un courant d'air desséché par son passage à travers de la ponce sulfurique.

Voici une partie des observations faites. Le temps était noté chaque fois qu'une bulle gazeuse passait dans le coude du tube en V, accusant un courant de diffusion allant de l'extérieur à l'intérieur du vase poreux.

**Exp. 10.**

TEMPS.	TEMPÉRAT.	TEMPS.	TEMPÉRAT.
48 <sup>m</sup> 00	14 <sup>o</sup> 80	10 <sup>m</sup> 09	14 <sup>o</sup> 25
52-30 <sup>s</sup>	14,85	10-40	14,20
57-15	14,80	11-10	14,20
62-28	14,80	11-41	14,20
5 <sup>m</sup> 00 <sup>s</sup>	14,70	12-11	14,15
5-30	14,65	12-42	14,15
6-05	14,60	13-13	14,10
6-40	14,50	13-44	14,05
7-06	14,45	14-16	14,00
7-38	14,40	14-45	14,00
8-08	14,40	. .	. .
8-40	14,35	. .	. .
9-08	14,30	. .	. .
9-38	14,25	32-10	13,80

De 48 à 62 minutes 28 secondes, il passa trois bulles, à des intervalles de 5 minutes à peu près. Le vase poreux était exposé à l'air libre et, par conséquent, dans une atmosphère déjà passablement riche en vapeur d'eau. On le plaça ensuite dans le cylindre sec de grande dimension où arrivait lentement, mais régulièrement, un courant d'air desséché. Les bulles devinrent alors beaucoup plus fréquentes, et les chiffres de la colonne *temps* montrent que leur apparition (surtout après que les premières minutes furent écoulées) se faisait avec une remarquable régularité. — A 32 minutes 10 secondes, on comptait la cinquantième bulle. L'intervalle moyen séparant deux bulles successives est donc de 32<sup>s</sup>,6, et, durant toute la série, les intervalles particuliers diffèrent très peu de ce chiffre moyen. Pendant ce temps, la température a

baissé de  $14^{\circ},70$  à  $13^{\circ},80$ , dans un sens qui est bien conforme à la loi connue.

Lorsque le tube en V eut été séparé du vase poreux, ce dernier fut mis en communication avec le manomètre. La diffusion qui donnait lieu au courant dont il vient d'être question était capable de produire un excès de pression de 12 millimètres.

Dès que cette série eut été interrompue, le tube en V, conservé exactement dans la même situation, fut relié avec le haut d'une éprouvette graduée renfermant de l'eau qui pouvait s'écouler par la partie inférieure. Par l'écoulement de l'eau, il se formait une aspiration, laquelle provoquait des bulles parfaitement semblables à celles qui avaient passé durant la diffusion. Dans une première série, il passa 19 bulles pendant que 16 centimètres cubes d'eau s'écoulèrent ; dans une seconde série, 39 bulles correspondirent à  $33^{\text{cc}},4$ . On déduit de là que le volume moyen d'une bulle est  $1^{\text{cc}},152$ . Les cinquante bulles comptées ci-dessus correspondent donc à  $57^{\text{cc}},60$

En mesurant le volume du vase poreux et en soustrayant l'espace occupé par le bouchon et par le godet rempli d'eau, on a trouvé que le volume réel était de  $86^{\text{cc}},96$ . Ainsi, l'excès de volume qui a passé de l'extérieur à l'intérieur à travers la paroi poreuse, durant 41 minutes, a fait entrer dans le vase poreux un volume de gaz égal au volume total de ce vase.

La paroi diffusante (paroi cylindrique et fond circulaire) présente une surface d'environ 146 centimètres carrés. Il est donc entré en moyenne, à travers *un* centimètre carré et durant *une* minute,  $0,015$  centimètres cubes de gaz.

Dans une seconde expérience parfaitement semblable à la précédente, mais faite avec un autre vase poreux, P, on a observé 40 bulles durant 27 minutes 15 secondes. L'intervalle moyen entre deux bulles est donc de  $39^s,4$ . Le volume moyen de chaque bulle, déterminé comme ci-dessus, a été trouvé de  $1^{\text{cc}},140$ , et, par conséquent, les 40 bulles équivalent à  $45^{\text{cc}},6$ , soit aux 54 centièmes du volume entier ( $84^{\text{cc}},32$  après déduction du bouchon et du godet) du vase poreux. Il aurait suffi que l'expérience durât 48 minutes 37 secondes pour qu'il entrât un volume gazeux égal à celui du vase. — Durant cette expérience, la température a varié de  $15^{\circ},40$  à  $15^{\circ}$ . Eprouvée au manomètre, la diffusion était capable de donner un excès de pression de  $10^{\text{mm}},5$  à 11 millimètres.

Dans un autre essai avec le poreux P, il passa, avec beaucoup de régularité, 45 bulles en 19 minutes 30 secondes, soit, en moyenne, une bulle de 25 en 25 secondes. La température était de  $20$  à  $21^{\circ}$ .

**10.** Ces résultats montrent quel peut être le degré d'importance de cette diffusion entre l'air sec et l'air humide dans certaines conditions déterminées. On aurait des chiffres différents en opérant à d'autres températures et avec une paroi poreuse différente.

Il est à remarquer que les bulles passaient à travers le tube en V seulement lorsque l'excès de pression avait atteint une certaine valeur  $\Delta p$ . Dans les conditions des expériences précédentes, cette valeur nécessaire  $\Delta p$  était de  $3^{\text{mm}},5$  à 4 millimètres. Or, il est certain que la diffusion est d'autant moins active que la différence de pression entre l'extérieur et l'intérieur est plus grande; elle cesse lorsque cette différence a atteint un certain maxi-

mun, qui est précisément l'indication fournie par le manomètre, lorsque cet instrument est seul relié au vase poreux fermé. Ce qui prouve, entre autres, que le courant de diffusion est plus considérable lorsque la pression est plus faible, c'est que le manomètre monte plus rapidement lorsqu'il est encore près de sa position d'équilibre, et que sa vitesse d'ascension diminue à mesure qu'il indique une plus grande différence entre l'extérieur et l'intérieur.

On est parfaitement sûr que, dans les expériences précédentes, les volumes de gaz qui sont entrés dans le vase poreux sont inférieurs à ce qui aurait passé si la différence de pression entre les deux faces de la paroi diffusante n'avait pas dû atteindre, par intermittences, 3 à 4 millimètres pour que les bulles gazeuses pussent soulever la colonne d'eau du tube en V. On peut ainsi affirmer que, entre deux masses d'air, l'une sèche et l'autre humide, séparées par une cloison poreuse, dont les pressions demeurent égales, le courant de diffusion doit être *supérieur* au chiffre qui a été obtenu dans les expériences précédentes.

Pour des températures plus hautes, la diffusion entre l'air sec et humide est capable de donner au manomètre des différences de pression qui dépassent notablement celles des dernières expériences. Dans ces conditions donc, le courant de diffusion est sûrement supérieur aux quantités mesurées ci-dessus. Il me paraît probable que ce courant doit devenir très important dans les températures élevées.

---

**11.** 11<sup>e</sup> Exp. — Le vase poreux P, vide, relié au manomètre, a été placé dans un cylindre de verre. Sa tempé-