

Technique du vide

Matthieu Schaller et Xavier Buffat

matthieu.schaller@epfl.ch

xavier.buffat@epfl.ch

1^{er} mars 2008

Table des matières

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introduction | 2 |
| 2 | Partie théorique | 2 |
| 2.1 | Pompes | 2 |
| 2.1.1 | Pression limite | 2 |
| 2.1.2 | Vitesse de pompage | 2 |
| 2.2 | Manomètres | 3 |
| 2.2.1 | Jauge de Pirani | 3 |
| 2.2.2 | Jauge de Kammerer | 3 |
| 3 | Partie expérimentale | 4 |
| 3.1 | Schéma de l'installation | 4 |
| 3.2 | Expériences | 4 |
| 4 | Résultats et Discussion | 6 |
| 4.1 | Étalonnage de la jauge de Pirani | 6 |
| 4.2 | Cinétique de pompage | 7 |
| 4.2.1 | Pompe à palettes | 7 |
| 4.2.2 | Pompe à diffusion | 7 |
| 5 | Conclusion | 9 |
| 6 | Annexe | 10 |
| 6.1 | Jauge de Pirani | 10 |
| 6.2 | Cinétique de pompage | 11 |

1 Introduction

La technique du vide joue un rôle très important de nos jours, que ce soit dans l'industrie ou dans la recherche. Il est donc essentiel de maîtriser les outils modernes qui composent ces installations. Il ne s'agit pas simplement de savoir utiliser une pompe ou un manomètre, il faut également savoir choisir parmi toute la gamme de moyens possibles celui ou ceux qui correspondent au but recherché. Les principaux critères permettant de caractériser une pompe sont son domaine d'utilisation, son débit effectif et sa pression limite. Dans ce travail, nous allons nous intéresser aux deux derniers points ainsi qu'au calibrage d'un manomètre de Pirani.

2 Partie théorique

2.1 Pompes

2.1.1 Pression limite

La pression limite P_0 pour une installation de vide est la pression minimale que l'on peut atteindre avec la pompe. A la pression limite, l'air évacué par la pompe est compensé par les fuites et les dégazages. Pour obtenir une pression plus basse, il faut alors changer de pompe ou diminuer ces deux effets. Pour ce faire, il faut être dans des conditions de propreté optimales et diminuer l'humidité au maximum. Durant cette expérience, nous allons utiliser un piège à azote liquide pour diminuer l'humidité de l'air dans l'enceinte.

2.1.2 Vitesse de pompage

La vitesse de pompage ou débit volumétrique S correspond au volume d'air évacué de l'enceinte à travers une surface donnée. Le volume évacué dépend évidemment de la pression régnant dans l'enceinte. La loi phénoménologique qui décrit ce phénomène est :

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{S(P)}{V}(P - P_0) \quad (1)$$

où V est le volume de l'enceinte, P_0 la pression limite de la pompe. Dans un certain domaine, S est quasiment constant, on peut alors résoudre l'équation différentielle et obtenir la relation :

$$-\ln \left(\frac{P_2 - P_0}{P_1 - P_0} \right) \frac{V}{S} = t \quad (2)$$

Cette équation donne le temps nécessaire pour passer de la pression P_1 à la pression P_2 . ($P_1 > P_2$). Nous allons dans cette expérience tenter de déterminer la valeur de S .

2.2 Manomètres

Dans cette expérience, nous utilisons quatre types de manomètres différents. Les deux plus importants sont la jauge de Pirani et la jauge de Kammerer. Le principe de fonctionnement de ces dernières est expliqué dans les sections suivantes.

2.2.1 Jauge de Pirani

Le principe de fonctionnement de cette jauge est basé sur les échanges thermiques entre une résistance et un réservoir de température. Une résistance est placée dans l'enceinte. Elle est parcourue par un courant I constant. La résistance chauffe par effet Joule et une partie de l'énergie est dissipée dans le gaz environnant. Une partie de cette chaleur n'est pas dissipée et modifie la résistivité de la résistance. En mesurant la tension aux bornes de la résistance, on peut ainsi connaître le taux de dissipation d'énergie du gaz. Comme ce taux dépend directement de la pression, on a ainsi un moyen de mesurer la pression dans l'enceinte. Cette jauge a le désavantage de devoir être recalibrée pour chaque gaz.

2.2.2 Jauge de Kammerer

Un petit volume V de gaz provenant de l'enceinte est comprimé dans un petit tube capillaire. On mesure ensuite sa pression grâce à une différence de niveau entre ce capillaire et un autre de même diamètre. On utilise ensuite la loi de Mariotte ($PV = cst$) pour déterminer la pression. Un schéma de l'appareil est présenté sur la figure 1. On fait monter le mercure dans les tubes grâce à une manivelle jusqu'à ce que le volume de gaz soit comprimé dans un volume V_c . La différence de pression est alors égale à la différence de niveau entre les deux tubes.

La loi de Mariotte s'écrit alors :

$$PV = (P + h)V_c \quad (3)$$

Comme $V_c \ll V$, on peut écrire $P = h \frac{V_c}{V}$. Le volume de gaz comprimé est alors donné par la géométrie du tube :

$$V_c = \frac{\pi d^2 h}{4} \quad (4)$$

où d est le diamètre du capillaire. La pression est donc finalement donnée par :

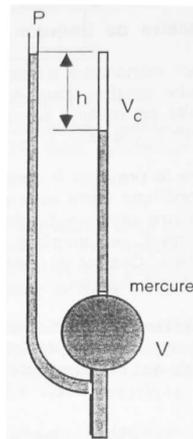


FIG. 1: Jauge de Kammerer

$$P = \frac{\pi d^2 h^2}{4V} \quad (5)$$

Une échelle graduée à coté du capillaire permet de lire directement la valeur de la pression.

3 Partie expérimentale

3.1 Schéma de l'installation

Nous allons réaliser le montage présenté sur la figure 2.

Les jauges de Pirani et de Penning sont raccordées à un circuit électrique muni d'un affichage qui passe automatiquement d'une jauge à l'autre dès que la limite de fonctionnement d'une d'entre-elle est atteinte.

3.2 Expériences

Dans un premier temps, nous allons mesurer le débit volumique de la pompe à palette. Pour ce faire, nous allons partir de la pression atmosphérique (1000 *mBar*) et descendre jusqu' à une pression d'environ $3 \cdot 10^{-2}$ *mBar*. Cette valeur est légèrement supérieure à la pression limite que peut atteindre cette pompe, cependant à partir de 0.1 *mBar*, le débit volumique S n'est plus constant. Il faudrait donc modifier l'équation 2 pour pouvoir la confronter aux résultats expérimentaux. A partir de cette mesure, nous pourrions également calculer la pression limite de cette pompe.

Dans un deuxième temps, nous allons calibrer la jauge de Pirani pour l'air et pour l'hélium. En effet, de par son principe de fonctionnement, cette

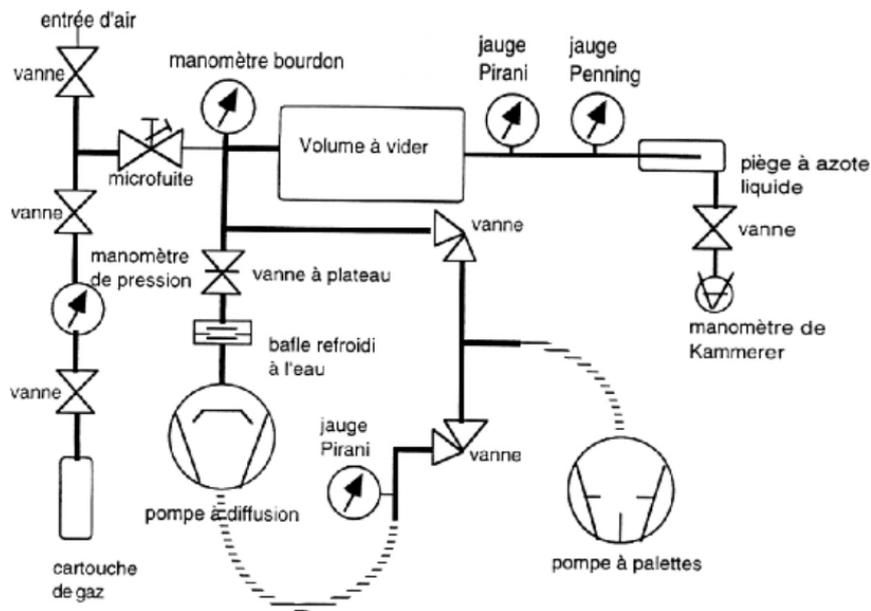


FIG. 2: Schéma de montage de l'installation

jauge dépend du contenu de l'enceinte et en particulier du coefficient de conductivité thermique du gaz présent dans la chambre à vider. Nous allons donc effectuer une série de mesures de la pression entre 10^{-2} et 10^0 *mBar* en comparant la valeur donnée par la jauge de Pirani et celle sensée être exacte donnée par une jauge à compression de Kammerer.

Nous recommandons ensuite la même mesure en remplaçant l'air de l'enceinte par de l'hélium.

Nous pourrions alors déduire la relation entre la pression lue sur la jauge de Pirani et la pression réelle pour chacun des gaz. La relation devrait être linéaire, il s'agira donc de déterminer le coefficient de proportionnalité dans les deux cas de figure.

Finalement, nous allons essayer de déterminer le débit volumétrique de la pompe à diffusion. Le principe est le même que lors de la première expérience, la différence étant le domaine de mesure, situé cette fois entre 10^{-2} *mBar* et 10^{-5} *mBar*. Nous allons à nouveau tenter de déterminer le débit volumétrique ainsi que la pression limite de la pompe.

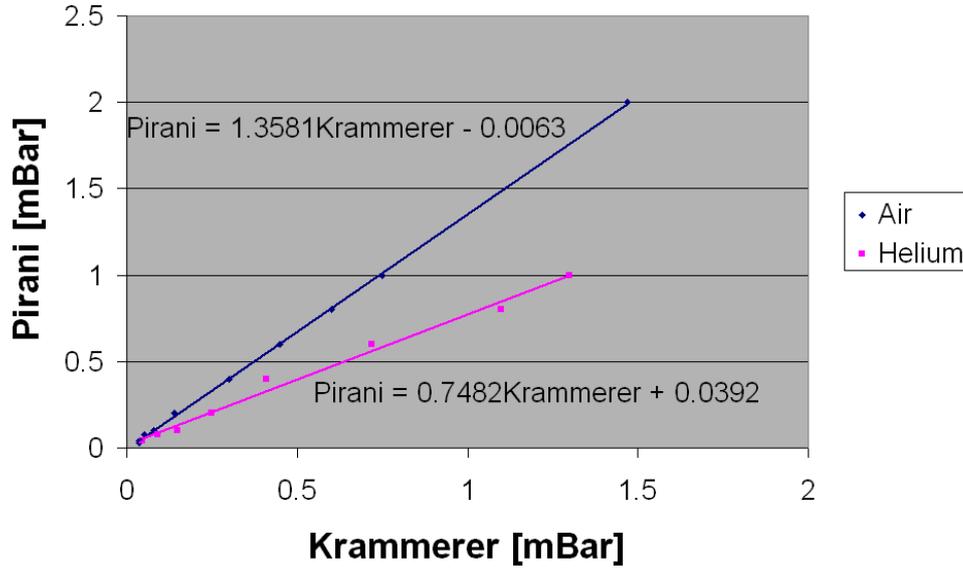


FIG. 3: étalonnage de la jauge de Pirani avec une jauge de Kammerer

4 Résultats et Discussion

4.1 Étalonnage de la jauge de Pirani

La figure 3 présente la pression mesurée avec la jauge de Pirani en fonction de celle mesurée par la jauge de Kammerer.

On constate que la dépendance est linéaire dans les deux cas, ce qui correspond au modèle théorique. Par régression linéaire on a :

$$\begin{aligned} \text{Air :} & \quad P_{\text{Pirani}} \approx 1.36P_{\text{Kammerer}} \\ \text{Helium :} & \quad P_{\text{Pirani}} \approx 0.75P_{\text{Kammerer}} \end{aligned} \quad (6)$$

On aurait pu s'attendre à ce que les jauges Pirani et Kammerer donnent des résultats identiques lorsque l'enceinte est remplie d'air ambiant, puisque c'est pour ces conditions que la jauge de pirani a initialement été calibrée. Toutefois, il faut tenir en compte la qualité de l'air. En effet, la jauge de Pirani a probablement été calibrée lors de sa fabrication dans un environnement différent de celui de notre laboratoire. On note par exemple qu'une différence d'humidité dans l'air peut provoquer une différence ou encore une différence de température.

Aux conditions standards de température et de pression, la conductivité thermique de l'air est de $0.02 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, tandis que celle de l'hélium est de $0.14 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Puisque la jauge de Pirani détermine en fait la conductivité thermique du gaz pour en déduire la pression, la présence d'un gaz à conductivité plus élevée correspond à une augmentation de la pression. Ce qui correspond exactement à l'inverse des résultats observés. On pourrait

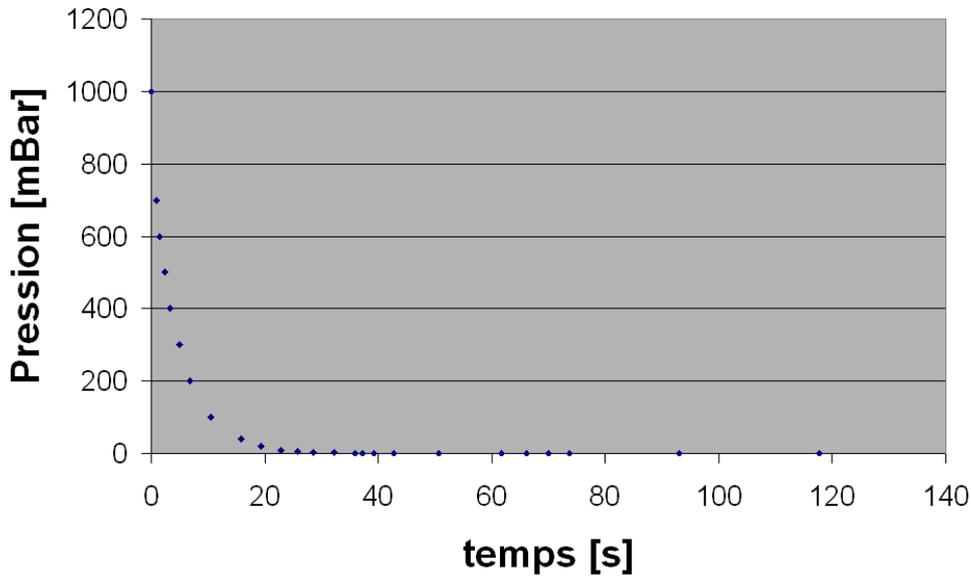


FIG. 4: Cinétique de la pompe à palettes

attribuer une faible différence aux fuites d'air ambiant dans l'enceinte qui se mélange à l'hélium et diminue la conductivité. Toutefois, ce facteur n'explique pas les résultats obtenus. Les résultats sont donc dus à un facteur inconnu.

L'expérience n'est donc pas concluante puisque l'on obtient des résultats sans explications. On ne tiendra pas compte de la calibration de la jauge Pirani dans la suite de nos calculs, puisque le coefficient de proportionnalité est probablement incorrecte.

4.2 Cinétique de pompage

4.2.1 Pompe à palettes

On peut voir sur la figure 4 la pression dans l'enceinte en fonction du temps de pompage, au temps 0, la pression est la pression atmosphérique.

Conformément à la théorie, on observe le comportement exponentiel de la courbe. De la formule 2, on calcule le débit effectif S pour chaque mesure avec $P_0 = 0.02 \pm 0.005$ et $V = 5.5$. Le calcul de la moyenne et de la déviation standard des résultats obtenus nous donnent $S = 1.13 \pm 0.38$ l/s.

4.2.2 Pompe à diffusion

La figure 5 montre la pression obtenue en vidages secondaire en fonction du temps. La pression au départ de la mesure est de $2 \cdot 10^{-4}$ mBar.

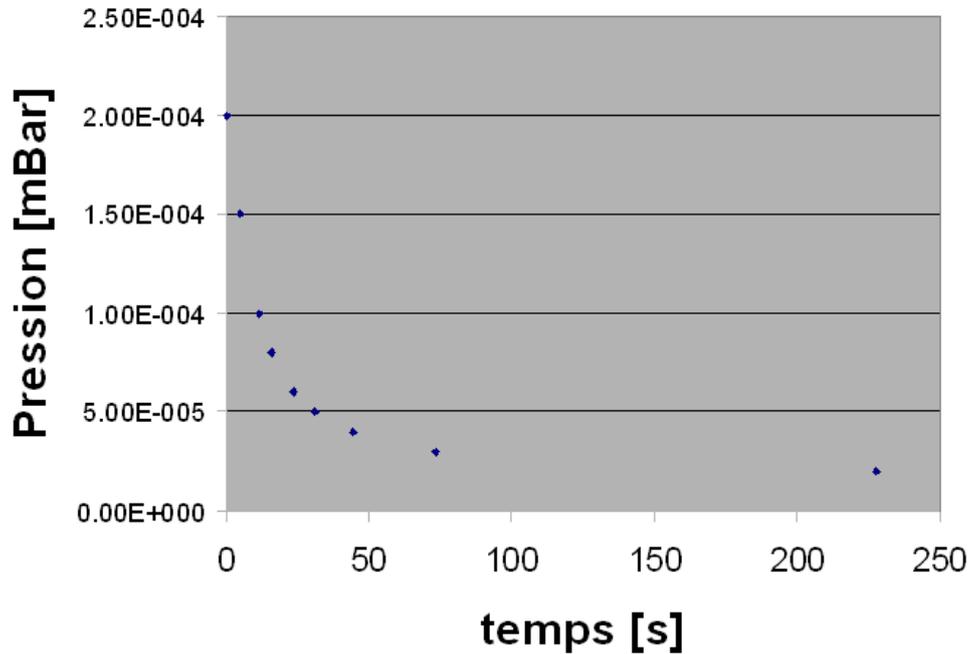


FIG. 5: Cinétique de la pompe à diffusion d'huile

Encore fois, on constate un comportement exponentiel. On obtient, de manière analogue à la manipulation précédente avec $P_0 = 1.9 \pm 0.1 \cdot 10^{-5}$, le débit spécifique de la pompe à diffusion $S = 0.31 \pm 0.08$ l/s.

Les expériences effectuées montrent que la pompe à palettes à un débit bien plus important que la pompe à diffusion. Il n'y a rien d'étonnant à cela puisque lors du vidage secondaire, le nombre de particules par unité de volume est très faible, il n'est donc pas possible d'avoir un débit aussi bon que lors du vidage primaire.

La mesure effectuée lors du vide primaire est précise à environ 8%, alors que celle effectuée en vide secondaire n'est précise qu'à 20%. On peut expliquer cette différence notamment par la présence de fuite et du dégazage. En vide primaire, ces effets sont négligeable devant le pompage. Les effets se font vraiment ressentir à l'approche de la pression limite de la pompe à palette. A partir de là, les fuites sont du même ordre que le pompage, ce qui explique les fluctuations des mesures à basse pression.

Nos mesures sont entachées d'une erreur systématique dont le calcul d'erreur ne tiens pas compte. En effet, il est difficile de connaître la valeur de la pression initiale. Lorsque l'on démarre le pompage primaire, l'enceinte est effectivement à la pression atmosphérique, mais le tuyau de l'enceinte à la

pompe est déjà vide, ainsi lorsque l'on ouvre la vanne, le remplissage de se tuyau fait baisser la pression dans l'enceinte. Ici, cette effet est négligeable car le débit initial de la pompe à palette est très élevé se qui fait disparaître cette imprécision. Le passage au vide secondaire est plus délicat, car la pression ne peut pas être maintenue de façon stable au alentour de 10^{-3} mBar sans faire intervenir une micro-fuite, qui ne peut pas être ouverte lors du commencement du pompage. Ainsi, la valeur pression lors du départ du chronomètre est extrêmement imprécise dans ce cas.

On mentionnera en plus les problèmes dus à la calibration de la jauge Pirani effectué lors de la première partie de l'expérience qui amène aussi une erreur systématique non négligeable aux résultats.

Nous n'avons pas de possibilité de vérifier les résultats obtenus. Au vu des erreurs commise dans l'expérience, il est probable qu'ils soient plus imprécis que le laisse croire le calcul d'erreur. L'expérience n'est toutefois pas vaine puisque les résultats sont qualitativement correcte. La précision des résultats peut être améliorée en apportant plus de soin aux mesure effectuées en basses pressions et en calibrant la jauge de Pirani de façon plus précise.

5 Conclusion

Cette expérience nous a permis de mieux comprendre le fonctionnement des pompes et des manomètres, chose très importante pour la réalisation d'autres expériences. Nous avons également été confrontés aux difficultés de mesures qui apparaissent dans des conditions de basse pression. Les résultats que nous avons obtenus semblent qualitativement corrects et correspondent bien à la théorie. Nous aurions cependant pu obtenir une plus grande précision si nous avions attendu à chaque fois qu'un équilibre s'installe, comme il faudrait le faire pour chaque expérience se passant sous vide partiel.

6 Annexe

6.1 Jauge de Pirani

Air

| Pirani [mBar] | Kammerer [mBar] |
|---------------|-----------------|
| 0.03 | 0.04 |
| 0.04 | 0.04 |
| 0.08 | 0.05 |
| 0.1 | 0.08 |
| 0.2 | 0.14 |
| 0.4 | 0.3 |
| 0.6 | 0.45 |
| 0.8 | 0.6 |
| 1 | 0.75 |
| 2 | 1.47 |

Helium

| Pirani [mBar] | Kammerer [mBar] |
|---------------|-----------------|
| 0.04 | 0.05 |
| 0.08 | 0.09 |
| 0.1 | 0.15 |
| 0.2 | 0.25 |
| 0.4 | 0.41 |
| 0.6 | 0.72 |
| 0.8 | 1.1 |
| 1 | 1.3 |

6.2 Cinétique de pompage

Vide primaire

Vide secondaire

| Temps [s] | Pression [mBar] |
|-----------|-----------------|
| 0 | 1000 |
| 0.89 | 700 |
| 1.46 | 600 |
| 2.34 | 500 |
| 3.34 | 400 |
| 4.94 | 300 |
| 6.83 | 200 |
| 10.48 | 100 |
| 15.86 | 40 |
| 19.38 | 20 |
| 22.78 | 10 |
| 25.7 | 6 |
| 28.55 | 4 |
| 32.28 | 2 |
| 35.93 | 1 |
| 37.26 | 0.8 |
| 39.25 | 0.6 |
| 42.81 | 0.4 |
| 50.61 | 0.2 |
| 61.7 | 0.1 |
| 66.22 | 0.08 |
| 70.01 | 0.07 |
| 73.76 | 0.06 |
| 92.96 | 0.04 |
| 117.76 | 0.03 |

| Temps [s] | Pression [mBar] |
|-----------|-----------------|
| 0 | 2.00E-004 |
| 4.59 | 1.50E-004 |
| 11.46 | 1.00E-004 |
| 15.67 | 8.00E-005 |
| 23.3 | 6.00E-005 |
| 30.82 | 5.00E-005 |
| 44.08 | 4.00E-005 |
| 73.2 | 3.00E-005 |
| 228.07 | 2.00E-005 |