

## Expérience n°1 – Loi de Boyle-Mariotte et zéro absolu de température

Domaine: Thermodynamique des gaz

Lien avec le cours de Physique Générale:

Cette expérience est liée au chapitre suivant du cours de Physique Générale :

- Physique I, Chapitre 9: Chaleur et température. Gaz, liquides, solides.

### Objectif général de l'expérience

Cette expérience traite **deux cas particuliers de la loi des gaz parfaits**. Le premier objectif de l'expérience est de **vérifier la loi de Boyle-Mariotte** qui relie la pression et le volume d'un **gaz parfait à température constante**.

Le second objectif de l'expérience est de **déterminer la valeur du zéro absolu de température** à partir de la loi de Charles qui relie la pression et la température d'un **gaz parfait à volume constant**.

## 1 Introduction

### 1.1) Loi de Boyle-Mariotte

Les expériences de Boyle (1662) et de Mariotte (1676) ont montré qu'à **une température fixe**  $T$  le produit de la pression  $P$  et du volume  $V$  d'un gaz est une constante, pour autant que deux conditions soient satisfaites: (i) la température doit être "suffisamment élevée" et (ii) la pression "suffisamment faible". Cela signifie d'une part que le volume propre des particules qui constituent le gaz peut être négligé et d'autre part que ces particules sont sans interactions mutuelles (exception faite des collisions). Alors **le gaz est dit parfait** et obéit à la relation :

$$P \cdot V = \text{const} \quad . \quad (\text{Eq. 1})$$

L'unité de pression du système international (SI) est le Pascal (Pa,  $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} = 1 \text{ kg}/(\text{ms}^2)$ ). L'unité standard de volume est le mètre cube ( $\text{m}^3$ ), mais nous utiliserons le millilitre (ml,  $1 \text{ ml} = 1 \text{ cm}^3$ ).

La loi de Boyle-Mariotte (Eq. 1) indique qu'une augmentation de la pression induit une diminution proportionnelle du volume.

### 1.2) Zéro absolu de température

Vers 1800, Gay-Lussac a établi expérimentalement que le volume d'un gaz "peu comprimé" et maintenu à **pression constante** varie linéairement avec la température  $T$ :

$$V_2 = V_1 (1 + \alpha_p \Delta T) \quad , \quad (\text{Eq. 2})$$

où  $V_2$  est le volume après une variation  $\Delta T$  de température,  $V_1$  le volume avant la variation,  $\alpha_p$  le coefficient de dilatation du gaz et  $\Delta T = T_2 - T_1$  est la différence de température du gaz. L'expression (Eq. 2) est la **loi de Gay-Lussac**.

On obtient une variation similaire de pression en réponse à une variation de température, à **volume constant**. C'est la **loi de Charles** :

$$P_2 = P_1 (1 + \alpha_v \Delta T) \quad , \quad (\text{Eq. 3})$$

où  $\alpha_v$  est le coefficient de variation de la pression en fonction de la température,  $P_2$  est la pression après une variation  $\Delta T$  de température,  $P_1$  la pression avant la variation. Pour des gaz ordinaires,  $\alpha_v$  et  $\alpha_p$  sont presque égaux. Nous pouvons donc faire ici l'approximation  $\alpha_v = \alpha_p = \alpha$ . On peut choisir  $T_1$  comme étant égale à  $0^\circ\text{C}$  et ensuite écrire:

$$V = V_0 (1 + \alpha\Delta T) , \quad (\text{Eq. 4})$$

$$P = P_0 (1 + \alpha\Delta T) , \quad (\text{Eq. 5})$$

où  $V_0$  et  $P_0$  sont respectivement le volume et la pression à  $T_c = 0^\circ\text{C}$  (température exprimée en  $^\circ\text{C}$ ).

Lorsque  $T = T_0 = -(1/\alpha)$ , le volume et la pression deviennent tous deux nuls selon les expressions (Eq. 4) et (Eq. 5). Cette température  $T_0$  particulière est la plus basse qui conserve une signification physique : c'est le **zéro absolu de température**. Au zéro absolu, **l'agitation thermique est nulle** et il n'y a plus de collision entre particules. Dans le cas d'une pression extérieure constante, le gaz ne peut plus opposer de résistance et donc son volume doit être nul. Dans le cas d'un volume maintenu constant, le volume de gaz ne peut pas fournir de pression et celle-ci est par conséquent nulle. On peut noter que la situation au zéro absolu est bien compatible avec des particules sans volume et avec les collisions comme seule interaction. La valeur actuellement admise pour la température du zéro absolu est :

$$T_0 = (-273.16 \pm 0.01) ^\circ\text{C} . \quad (\text{Eq. 6})$$

En posant  $T_k = |T_0| + T_c$  on définit une nouvelle échelle de température, dite température absolue  $T_k$ , qui se mesure en Kelvin (K) en l'honneur de William Thompson (Lord Kelvin).

Si l'on remplace  $T_c$  par  $T_k - |T_0|$  dans les (Eq. 4) et (Eq. 5), on obtient:

$$\boxed{V = V_0 \alpha T_k \leftrightarrow V/T_k = \text{const} \quad (\text{à } P \text{ constant})} \quad (\text{Eq. 7})$$

$$\boxed{P = P_0 \alpha T_k \leftrightarrow p/T_k = \text{const} \quad (\text{à } V \text{ constant})} \quad (\text{Eq. 8})$$

Les équations  $V/T_k = \text{const}$  (à  $P$  constant),  $P/T_k = \text{const}$  (à  $V$  constant) et  $PV = \text{const}$  (à  $T$  constant) peuvent se résumer en une seule expression, c'est l'importante **loi des gaz parfaits**:

$$PV/T = \text{const} . \quad (\text{Eq. 9})$$

Pour une mole de gaz, la constante est la constante des gaz parfaits  $R = 8.314 \text{ [J/(K}\cdot\text{mol)]}$ . Pour une quantité quelconque de gaz, on obtient la forme standard de la loi des gaz parfaits:

$$\boxed{PV = nRT} . \quad (\text{Eq. 10})$$

## 2 Principe général de l'expérience

L'expérience se déroulera en deux parties, dans lesquelles seront abordés deux cas particuliers de la loi générale des gaz parfaits (Eq. 10). Dans la première partie, on **vérifiera la loi de Boyle-Mariotte** qui relie la pression et le volume d'un gaz parfait à **température constante**.

Dans la seconde partie, on déterminera expérimentalement la **valeur du zéro absolu de température** à partir de la **loi de Charles** qui relie la **pression et la température** d'un **gaz parfait à volume constant**.

## 2.1) Vérification de la Loi de Boyle-Mariotte

### 2.1.1 Montage expérimental

Le montage expérimental pour cette première partie est présenté dans la Figure 1. Une seringue graduée en volume (ml) est connectée à deux sondes mesurant la pression (via le tube transparent) et la température (via la prise "jack") de l'air dans la seringue. Pour mettre l'air contenu dans la seringue à pression atmosphérique, il suffit de débrancher le tube de la sonde en effectuant une légère rotation au niveau de la connection. En appuyant sur le piston de la seringue, on peut donc modifier le volume d'air dans cette dernière, ce qui fait varier la pression de l'air dans la seringue **si cette dernière est connectée à la sonde de pression et que, par conséquent, le nombre de molécules ne change pas.**



Figure 1: Schéma de principe de l'expérience pour la vérification de la loi de Boyle-Mariotte

### 2.1.2 Principe

Le déplacement du piston produit une compression ou une détente du gaz (air) contenu dans la seringue. Ce changement de pression peut être lu par l'intermédiaire du logiciel d'acquisition de l'expérience (Pasco Capstone, voir Figure 2). Dans le même temps, le volume de gaz dans la seringue est aisément mesurable grâce à la graduation (ml) de la seringue. Ceci permet de mesurer la pression (en kPa) en fonction du volume (en ml). La température est maintenue constante dans cette partie (température ambiante).

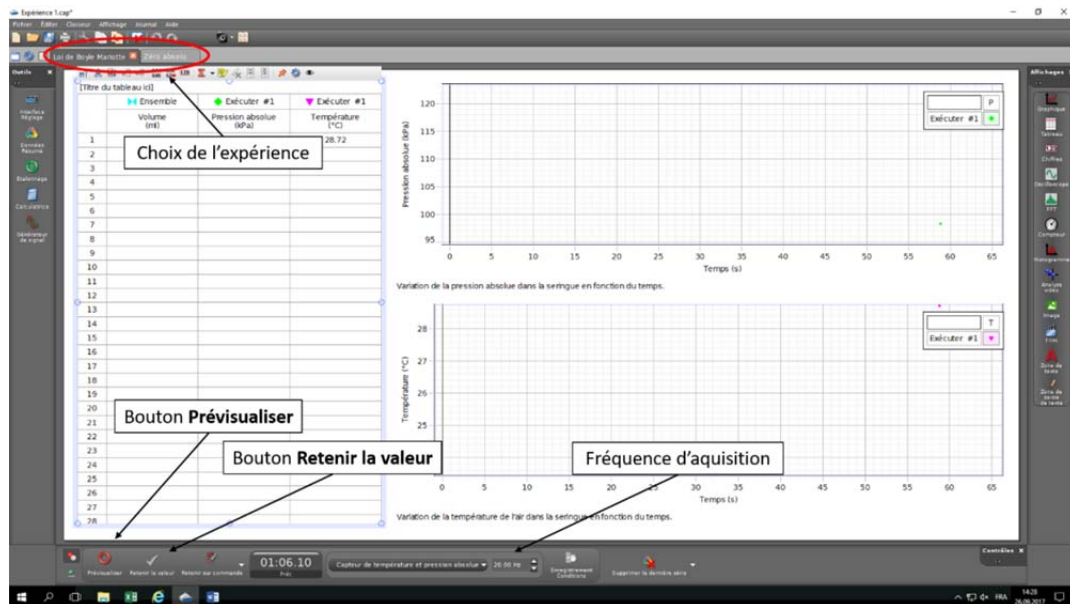


Figure 2: Capture d'écran du logiciel PASCO Capstone. Les principaux éléments nécessaires à l'acquisition des données sont indiqués.

## 2.2) Détermination du zéro absolu de température

### 2.2.1 Montage expérimental

La Figure 3 montre le montage utilisé pour la mesure du zéro absolu de température. Un ballon de volume fixe est connecté à deux sondes mesurant la pression (via le tube transparent) et la température (via la prise "jack") de l'air dans comme dans la partie précédente. Une certaine quantité d'air est piégée dans un volume fixé. Une petite partie du gaz est contenue dans le tube entre le ballon et la sonde de pression, mais la majorité se trouve dans le ballon que vous placerez au centre d'un réservoir permettant de contrôler sa température (et donc celle du gaz). Le gaz peut être refroidi en remplissant le réservoir avec un mélange d'eau et de glace ou chauffé en ajoutant de l'eau portée à ébullition dans une bouilloire.



**Figure 3:** Matériel à disposition pour la détermination du zéro absolu de température.

### 2.2.2 Principe

En chauffant ou refroidissant le ballon, le gaz à l'intérieur va respectivement se dilater ou se contracter. Il est possible d'avoir une compréhension qualitative du phénomène, car les variations seront clairement observables lors de l'expérience par la lecture de la pression avec le logiciel d'acquisition de l'expérience (Pasco Capstone, voir Figure 2). Il est donc possible de faire varier la température et de mesurer la variation correspondante de pression, à volume constant. Ici aussi, la pression sera mesurée en kPa.

## 3 **Marche à suivre**

### 3.1) Vérification de la loi de Boyle-Mariotte

Mesures à effectuer:

- Ouvrir le logiciel PASCO Capstone via l'icône "Exp01 - Mariotte.cap" **que vous aurez au préalable copié dans votre session.**
- Dans le logiciel, cliquez sur l'onglet correspondant à cette expérience (voir Figure 2) et pré-remplissez la colonne **Volume (ml)** avec six valeurs comprises entre 50 ml et 25 ml (tous les 5 ml). Vous pouvez également entrer ces valeurs dans le fichier Excel de l'expérience.
- Déconnectez le tube en plastique du capteur de pression afin que l'air dans la seringue soit à pression atmosphérique pour toute position du piston.
- Placez le piston de telle sorte que le volume dans la seringue soit de 50 ml.
- Reconnectez le tube à la sonde de pression. Maintenant, si la position du piston change, la pression dans la seringue sera modifiée car le nombre de molécules dans la seringue reste constant (volume fermé).
- Cliquez sur "**Prévisualiser**" dans l'interface du logiciel afin que le programme commence à lire la pression et la température.

- Alors que le volume est encore de 50 ml, cliquez sur "**Retenir la valeur**" afin que les mesures actuelles soient sauvegardées dans le tableau. Vous noterez qu'elles sont sauvegardées dans la première ligne du tableau, puis que la nouvelle mesure passe dans la ligne suivante.
- Appuyer sur le piston jusqu'à ce que le volume atteigne votre seconde valeur et maintenez-le dans cette position. Observez le graphique "Température vs Temps" et attendez que la température revienne à sa valeur d'équilibre (température ambiante), tout en vérifiant que la pression reste stable. Cliquez sur "**Retenir la valeur**" pour enregistrer les données lorsque c'est le cas.
- Faites de même pour les quatre valeurs de volume restantes.

Remplissez la feuille Excel relative à la première mesure puis reportez les points de mesures sur un graphique  $V = f(1/P)$  avec les barres d'erreur. Vérifier au moyen d'une régression linéaire qu'il s'agit bien d'une droite, ce qui démontre la loi  $PV = \text{const.}$

#### Calcul d'erreur:

- Estimer les incertitudes de mesure sur  $V$  et  $P$  et en déduire l'incertitude sur  $1/P$ .
- Représenter les barres d'incertitudes sur chaque point du graphique.
- Afin d'obtenir une vérification quantitative de la loi de Boyle-Mariotte, on calculera l'incertitude relative sur la pente de la régression linéaire.

Pour quel volume  $V_0$  la pression mesurée tend-elle vers l'infini selon votre graphique? Comment expliquer-vous cette valeur? A quoi correspond-elle? Comment faut-il modifier l'expression de la loi de Boyle-Mariotte pour tenir compte de ce volume?

Répétez ce protocole expérimental pour **huit valeurs de volume réparties entre 60 ml et 25 ml** (tous les 5 ml) et remplissez la feuille Excel relative à la deuxième mesure. Représentez la deuxième série de points  $V = f(1/P)$  sur le même graphique que la première série. Que constatez-vous? Pourquoi la pente obtenue est-elle différente?

### 3.2) Détermination du zéro absolu de température

Mesures à effectuer:

- Dans le logiciel PASCO Capstone cliquez sur l'onglet correspondant à cette expérience (voir Figure 2).
- Cliquez sur "**Prévisualiser**" dans l'interface du logiciel afin que le programme commence à lire la pression et la température.
- Déconnectez le tube en plastique du capteur de pression afin que l'air dans le ballon soit à pression atmosphérique pour toute température.
- Faites bouillir de l'eau et versez-la dans le récipient contenant le ballon. **Le ballon doit être entièrement immergé.**
- Lorsque la température lue sur le logiciel se stabilise, reconnectez le tube à la sonde de pression. La quantité de molécules de gaz dans le système est maintenant fixée.
- Cliquez sur "**Retenir la valeur**" afin que les mesures actuelles de température et de pression soient sauvegardées dans le tableau.
- En ajoutant petit à petit de l'eau froide (au début) ou de la glace pilée (ensuite) dans le récipient, la température de l'eau va diminuer, de même que celle du ballon et du gaz qu'il contient, ce qui va faire varier la pression. Vous allez ainsi effectuer neuf mesures supplémentaires entre la température de départ et  $0^\circ\text{C}$  afin d'avoir un total de dix températures. **Planifiez vos mesures afin d'avoir des intervalles de température réguliers.**
- Il faudra bien agiter le mélange d'eau ou d'eau et de glace avant chaque mesure afin que la température dans le bac soit la plus homogène possible.

Remplissez la feuille Excel puis reporter  $P$  en fonction de  $T_C$  sur un graphique  $P = f(T_C)$  avec les barres d'incertitudes correspondantes. Nous utiliserons ici  $T_C$  pour la température exprimée en degrés Celsius, pour marquer la différence avec l'échelle de température absolue (en Kelvin), notée  $T$  ou  $T_K$  précédemment.

Déterminer la droite de régression et en déduire la valeur du zéro absolu  $T_0$ . On utilisera pour cela la feuille de calcul Excel de l'expérience.

Calcul d'erreur:

- Estimer les incertitudes de mesure sur  $P$  et  $T_C$ .
- Représenter les barres d'incertitudes sur chaque point du graphique.
- Déterminer l'incertitude sur le zéro absolu à partir de la droite de régression du graphique.

# Travaux Pratiques de Physique

## Expérience N°1 : Mariotte

### 3.1) Vérification de la loi de Boyle-Mariotte

Mesure des pressions et des volumes:

Incertitude sur les volumes mesurés:

[ml]

Incertitude sur les pressions mesurées:

[kPa]

#### Première mesure (volume initial 50 ml)

V [ml]	$\Delta V$ [ml]	P [kPa]	$1/P$ [kPa <sup>-1</sup> ]	$\Delta(1/P)$ [kPa <sup>-1</sup> ]
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

#### Deuxième mesure (volume initial 60 ml)

V [ml]	$\Delta V$ [ml]	P [kPa]	$1/P$ [kPa <sup>-1</sup> ]	$\Delta(1/P)$ [kPa <sup>-1</sup> ]
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Représentation graphique:  $V = f(1/P)$  (2 séries de mesures sur le même graphique)

insérer graphique ici

#### Première mesure

***pente***  =  [ml·kPa]  
 ***Δpente***  =  [ml·kPa]

***V<sub>0</sub>***  =  [ml]  
 ***ΔV<sub>0</sub>***  =  [ml]

#### Deuxième mesure

***pente***  =  [ml·kPa]  
 ***Δpente***  =  [ml·kPa]

***V<sub>0</sub>***  =  [ml]  
 ***ΔV<sub>0</sub>***  =  [ml]

# Travaux Pratiques de Physique

## Expérience N°1 : Mariotte

### 3.2) Détermination du zéro absolu de température

Mesure des températures et des pressions:

Incertitude sur les températures mesurées:

[°C]

Incertitude sur les pressions:

[kPa]

Tableau de mesures:

$T_c$ [°C]	$P$ [kPa]

Représentation graphique :  $P = P(T_c)$

insérer graphique ici

$pente =$		[kPa/°C]
$\Delta p_{pente} =$		[kPa/°C]
$\Delta p/p =$		[%]

$T_0 =$		[°C]
$\Delta T_0 =$		[°C]
$ \Delta T_0/T_0  =$		[%]