Instructions générales

Épreuve expérimentale (20 points)

6 juillet 2026

Le non-respect de l'une des règles suivantes peut entraîner une disqualification. L'épreuve expérimentale dure 5 heures et vaut un total de 20 points. Le début et la fin de l'examen seront indiqués par une annonce. Chaque heure écoulée sera indiquée par une annonce. Une annonce sera également faite pour signaler les trente, quinze et cinq dernières minutes de l'épreuve.

Avant l'épreuve

Ne pas ouvrir les enveloppes ou les boîtes avant d'y être invité(e). Les éléments suivants sont fournis pour l'épreuve : (1) un stylo, (2) une calculatrice scientifique.

Pendant l'examen

• Utiliser le stylo fourni.

• Utiliser les feuilles **A** pour les réponses finales. Remplir les sections appropriées avec les réponses et les observations nécessaires. Tracer les graphiques nécessaires.

• Des feuilles de travail vierges, portant la lettre **W**, sont fournies pour les calculs. Utiliser celles qui sont désignées. Barrer avec une croix X les réponses inutiles et les brouillons qui ne doivent pas être notés. N'utiliser que le recto de chaque feuille et garder la marge vierge. Le verso de chaque feuille ne sera pas scanné et ne sera pas considéré.

• Les réponses doivent être concises et lisibles. Utiliser des équations, des opérateurs logiques, des symboles et des schémas pour exprimer clairement les idées. Éviter d'utiliser des textes explicatifs, car les correcteurs ne sont pas nécessairement multilingues.

• Évaluer systématiquement les incertitudes, sauf indication contraire. Décider soi-même du nombre de points de données ou de séries de mesures nécessaires, sauf indication contraire.

• Ne pas quitter le poste de travail sans autorisation. Pour toute aide (pour aller aux toilettes, avoir de l'eau, etc.), lever la palette avec le signe « Help ».

À la fin de l'examen

• Arrêter d'écrire immédiatement dès l'annonce de la fin de l'examen.

• Placer toutes les feuilles dans l'enveloppe fournie. Les disposer face visible dans l'ordre suivant : instructions générales, feuilles de questions (**Q**), feuilles de réponses (**A**), feuilles de travail (**W**). Classer les feuilles par numéro de page.

• Les surveillants indiqueront quand il sera possible de partir. Ne rien emporter avec soi, ce qui inclut la calculatrice qui doit être laissée sur place.

Nous vous remercions pour votre collaboration.

Instructions spécifiques

Tout au long de l'examen, utiliser exclusivement les valeurs des grandeurs indiquées dans les instructions, sauf indication contraire. Lors d'une série de mesures, indiquer explicitement dans les tableaux les valeurs mesurées et les valeurs représentées dans les graphiques. Prêter attention au nombre de chiffres significatifs utilisés dans les réponses. Tous les graphiques doivent clairement indiquer les grandeurs impliquées. Indiquer systématiquement les unités de toutes les grandeurs utilisées.

Gaz parfait, pression de vapeur saturante et conduction thermique [20 pts]

Dans cette épreuve expérimentale, on étudie trois phénomènes physiques : le comportement d'un gaz parfait, la pression de vapeur saturante de l'eau et le transfert thermique par conduction. L'objectif de l'épreuve est d'analyser les relations entre la pression P, le volume d'air V, la température T et le temps t en présentant les résultats sous forme de graphiques pertinents et en estimant les constantes physiques associées avec leurs incertitudes.

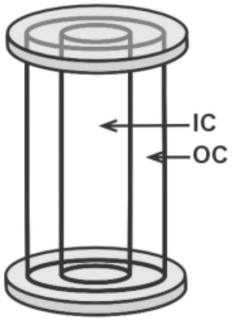
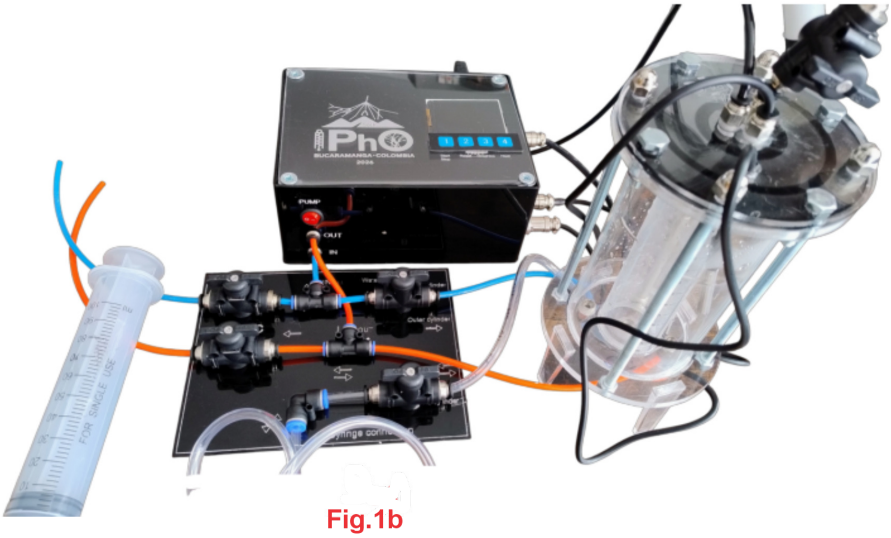


Fig.1a


Fig.1b

Vue d'ensemble du dispositif expérimental

Avant de commencer l'expérience, lire la description complète du montage, la liste du matériel et les instructions générales. Puis, pour chaque partie, lire le protocole associé avant toute manipulation.

Le dispositif expérimental est constitué de deux cylindres concentriques composés d'acrylique (Fig. 1a). Le cylindre intérieur (noté **IC**) peut contenir de l'air et des liquides. L'air contenu à l'intérieur du cylindre intérieur **IC** est appelé « air confiné » (noté **CA**). La quantité de liquide dans le cylindre intérieur **IC** peut être contrôlée en connectant la seringue au **tuyau D** (Fig. 6).
Le cylindre extérieur (noté **OC**) ne peut être rempli qu'avec de l'eau et fait office d'enveloppe thermique. Son niveau d'eau peut être ajusté à l'aide des tuyaux d'entrée et de sortie et des vannes, tandis que sa température est contrôlée avec un chauffage électrique. Deux capteurs sont installés à l'intérieur du cylindre intérieur **IC** : un pour la pression et un pour la température. Un capteur de température distinct est disponible dans le cylindre extérieur **OC**.

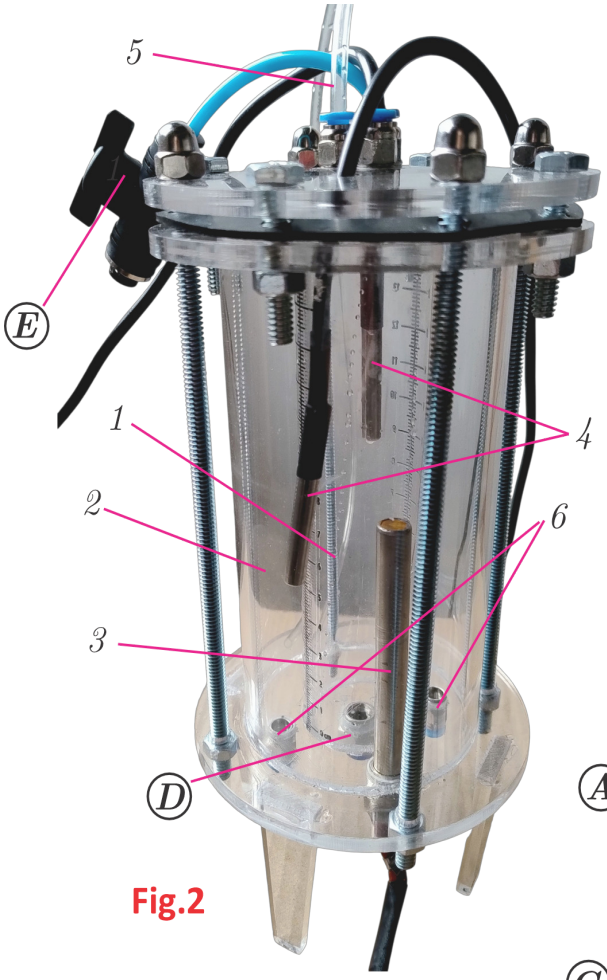


Fig.2



Fig.3

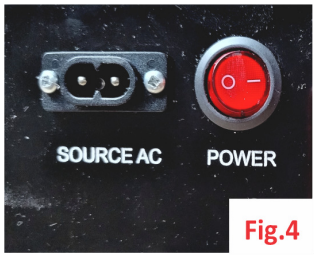


Fig.4

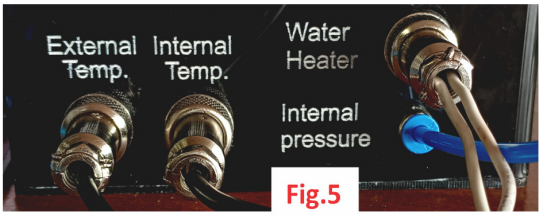


Fig.5

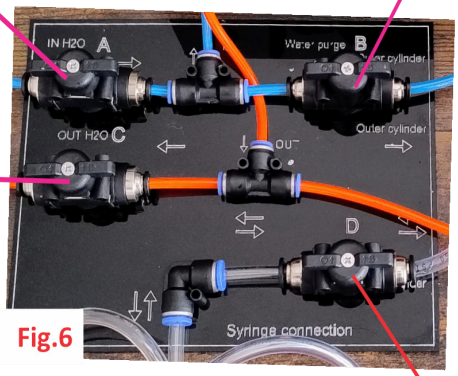


Fig.6

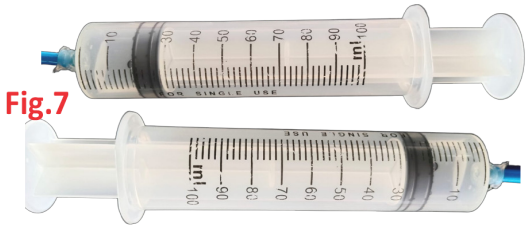


Fig.7



Fig.8

Matériel expérimental

Dispositif principal (voir Fig. 2)

1. **Cylindre intérieur** (**IC**) : gradué par une double échelle centimétrique. Ses couvercles fixes assurent l'étanchéité du contenu.
2. **Cylindre extérieur** (**OC**) : sert d'enveloppe thermique.
3. **Chauffage électrique** : installé dans le cylindre extérieur **OC** et alimenté par le module électronique.
4. **Capteurs de température** : deux capteurs, reliés au module électronique par des fils noirs, qui mesurent la température dans chaque cylindre.
5. **Tuyau du capteur de pression** : relie l'air confiné **CA** à un capteur de pression intégré au module électronique, ce qui permet de mesurer la pression interne.
6. **Raccords d'eau du cylindre extérieur OC** : deux tuyaux (l'un en entrée et l'autre en sortie) qui assurent la circulation de l'eau dans le cylindre extérieur **OC.**

Vanne E — Raccordement du cylindre intérieur IC à l'atmosphère : ouvre ou ferme la connexion entre le cylindre intérieur **IC** et l'atmosphère.

Module électronique (voir Fig. 3)

Le module électronique est à connecter à l'alimentation principale avant utilisation. L'interrupteur de l'alimentation électrique, dénommé **POWER**, est situé à l'arrière du module (Fig. 4).

L'affichage numérique permet de lire les informations suivantes :

- **Pression interne** : pression à l'intérieur du cylindre intérieur **IC** (**INT. PRESSURE**).
- **Pression atmosphérique** : pression atmosphérique locale (**ATM. PRESSURE**).
- **Température interne** : température à l'intérieur du cylindre intérieur **IC** (**INT. TEMPERATURE**).
- **Température externe** : température à l'intérieur du cylindre extérieur **OC** (**EXT. TEMPERATURE**).
- **Chronomètre** : mesure de durée (**TIMER**).

Quatre boutons se trouvent sous l'écran et contrôlent les principales fonctions du module :

- **Bouton 1** — **Start/Stop** : démarre ou arrête le chronomètre.
- **Bouton 2** — **Reset** : remet à zéro le chronomètre.
- **Bouton 3** — **Graphics** : bascule entre l'affichage graphique et l'affichage numérique. **Cette fonction n'est pas utilisée dans les expériences.**
- **Bouton 4** — **Heat** : active/désactive le chauffage électrique. Lorsque le chauffage électrique est actif, l'indicateur dans le coin inférieur droit de l'écran alterne entre le rouge et le vert.

Remarque : ne jamais activer le chauffage électrique s'il n'est pas au préalable entièrement immergé dans l'eau. Lorsque la température du cylindre extérieur (OC) atteint 65 °C, le chauffage électrique se désactive. Il ne peut être réactivé qu'une fois que le voyant animé n'est plus rouge.

Le côté droit du module (Fig. 5) comporte les connexions pour le capteur de température du cylindre intérieur **IC** (**Internal Temp.**), le capteur de température du cylindre extérieur **OC** (**External Temp.**), le chauffage (**Water Heater**) et le tuyau qui relie l'air confiné **CA** au capteur de pression (**Internal pressure**).

Module hydraulique (voir Fig. 6)

Le module hydraulique contient quatre vannes, étiquetées **A**, **B**, **C** et **D**. Chaque vanne contrôle un circuit de fluide spécifique dans le dispositif :

- **Vanne A — Vanne d'entrée d'eau** : contrôle le flux d'eau entrant dans le cylindre extérieur **OC** par le **tuyau A** (**IN H2O**).
- **Vanne B — Vanne de recirculation** : contrôle le flux d'eau dans le mode recirculation. Ce mode sera expliqué dans les instructions de fonctionnement de la pompe qui suivent.
- **Vanne C — Vanne de sortie d'eau** : contrôle le flux d'eau sortant du cylindre extérieur **OC** par le **tuyau C** (**OUT H2O**).
- **Vanne D — Vanne de connexion avec la seringue** : contrôle l'entrée et la sortie des fluides dans le cylindre intérieur **IC** à l'aide de la seringue connectée au **tuyau D** (Fig. 2). Si la vanne fuit, il est possible de détacher le tuyau D de la vanne et de le connecter directement à la seringue.

Fonctionnement de la pompe et des vannes

L'interrupteur de la pompe (**PUMP**), situé à l'avant du module électronique (Fig. 8), active la pompe à l'intérieur du module électronique. Avant de mettre la pompe en marche, régler les vannes en fonction de l'opération souhaitée. Utiliser les pinces à linge pour fixer les tuyaux au bord des récipients avant de faire fonctionner la pompe.

- **Remplir le cylindre extérieur OC avec de l'eau** : ouvrir la **vanne A** et fermer les **vannes B** et **C**. Placer le **tuyau A** dans un récipient d'eau. Lorsque le niveau souhaité est atteint, fermer la **vanne A**. S'assurer que le niveau d'eau reste au moins 1 cm en dessous du couvercle du cylindre. *Si l'eau n'entre pas efficacement dans le cylindre extérieur **OC**, ouvrir et fermer immédiatement la **vanne B** pour purger la pompe.*
- **Vidanger l'eau du cylindre extérieur OC** : fermer la **vanne A** et ouvrir les **vannes B** et **C**. Placer le **tuyau C** dans un récipient pour recueillir l'eau.

- **Homogénéiser la température du cylindre extérieur OC (mode de recirculation)** : ouvrir la **vanne B** et fermer les **vannes A** et **C**. Dans cette configuration, l'eau circule dans le cylindre extérieur **OC** en circuit fermé, ce qui contribue à uniformiser la température.

Pour les opérations suivantes, connecter la seringue au **tuyau D**. La pompe n'est pas utilisée dans ces cas.

- **Ajouter du liquide au cylindre intérieur IC** : ouvrir les **vannes D** et **E,** puis utiliser la seringue pour introduire le liquide.
- **Retirer du liquide du cylindre intérieur IC :** ouvrir les **vannes D** et **E**, puis utiliser la seringue pour aspirer le liquide.

Fig.9



Fig.10



Fig.11

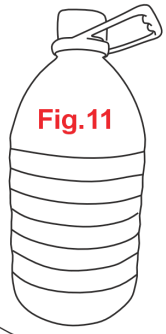


Fig.12

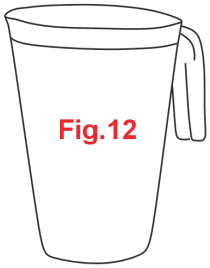


Fig.13

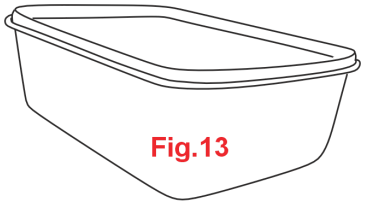


Fig.14

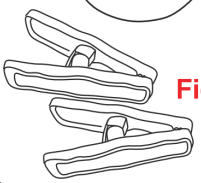


Fig.15

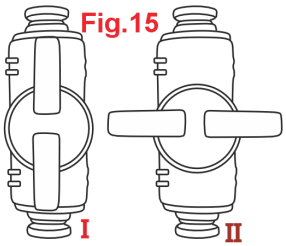


Fig.16

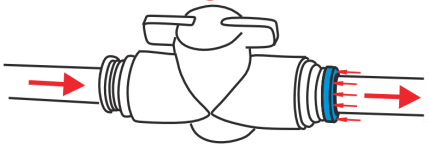


Fig.17

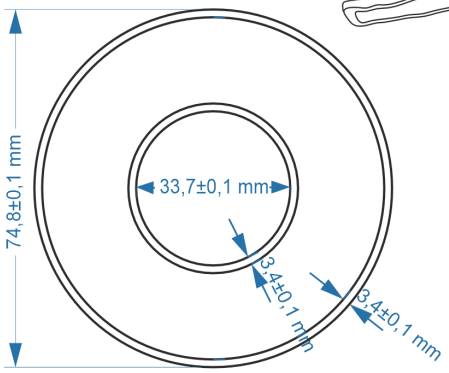
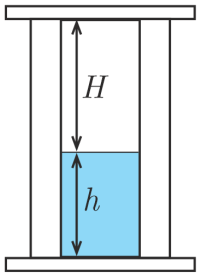


Fig.18



Éléments supplémentaires : les composants suivants sont fournis pour toute l'épreuve.

- **Deux seringues de 100 mL** avec un tuyau de connexion (Fig. 7). Une seringue est pour l'eau, l'autre pour le propylène glycol **PG**.
- **Propylène glycol (PG)** : un récipient contenant 100 mL de propylène glycol **PG**, dont la pression de vapeur saturante est négligeable dans la plage de température utilisée dans cette expérience (Fig. 9). **Attention : le PG est miscible avec l'eau.** Il peut également s'hydrater s'il est exposé à l'air. Il est recommandé de garder le récipient fermé lorsqu'il n'est pas utilisé.
- **Eau froide** : une bouteille thermos contenant 500 mL d'eau froide (Fig. 10).
- **Eau à température ambiante** : une bouteille d'eau à température ambiante (Fig. 11).
- **Récipient à bec verseur** : un récipient utilisé pour verser de l'eau (Fig. 12).
- **Bassine à eau excédentaire** : une bassine pour collecter l'eau excédentaire (Fig. 13).
- **Pinces à linge** : pinces à linge pour fixer les tuyaux et soutenir les composants pendant l'expérience (Fig. 14).
- **Essuie-tout** pour le nettoyage.

Remarques importantes quant à l'utilisation du matériel

Garder les remarques suivantes à l'esprit lors de la mise en place et l'utilisation du matériel :

- **Positions des vannes** : chaque vanne n'a que deux positions, ouverte (**I**) ou fermée (**II**) (Fig. 15).
- **Connexion des tuyaux** : pour retirer un tuyau, pousser le collier vers l'extérieur et retirer le tuyau. Pour insérer un tuyau, il faut l'enfoncer complètement (Fig. 16). **Noter que l'appareil est entièrement assemblé au début de l'épreuve et que les tuyaux n'ont normalement pas besoin d'être reconnectés lors du fonctionnement normal de l'appareil.**
- **Dimensions des cylindres** : la figure 17 montre les dimensions de la section transversale des cylindres.
- **Notation** : la figure 18 définit la notation utilisée pour le contenu du cylindre intérieur **IC** : h est la hauteur du liquide et H est la hauteur de l'air au-dessus du liquide.
- **Corrections de volume** : le volume interne des tuyaux de connexion est approximativement compensé par le volume du capteur de température à l'intérieur du cylindre intérieur **IC**. Par conséquent, ces effets doivent être négligés.

Constantes et valeurs de référence

Les constantes et valeurs de référence suivantes sont utilisées tout au long de l'expérience :

- **Nombre d'Avogadro :** $N_A = 6,022 \times 10^{23}$ mol^{-1}
- **Capacité thermique massique de l'eau :** $c_0 = 4,184 \times 10^3$ J/(kg·K)
- **Masse volumique de l'eau :** $\rho_0 = 1000$ kg/m^3
- **Masse molaire de l'eau :** $M_0 = 18,02$ g/mol
- **Masse molaire de l'air :** $M_a = 28,96$ g/mol
- **Volume molaire d'un gaz parfait dans les conditions normales de température et de pression :** $V_m = 22,4$ L/mol, pour $T_0 = 273,15$ K et $P_0 = 101,3$ kPa

Partie A [4,0 pts]. Transformation isochore (isovolume) d'un gaz parfait

L'air confiné **CA** obéit à l'équation d'état des gaz parfaits

$$PV = nRT \qquad (1)$$

où R est la constante universelle des gaz parfaits.

Protocole

Introduire le propylène glycol **PG** dans le cylindre intérieur **IC** jusqu'à $h = 4,5$ cm. Fermer **D** et **E**. Ceci assure que le volume d'air confiné **CA** est constant.

La densité de l'air ambiant à Bucaramanga varie avec la température et la pression locales. Pour la question suivante, utiliser la valeur exacte $\rho = 1,12$ kg/m^3.

A1. [0,4 pt] Déterminer la masse m, le nombre de moles n et le nombre total de molécules d'air N de l'air confiné **CA.**

Protocole

1. Remplir le cylindre extérieur **OC** avec de l'eau à température ambiante presque jusqu'en haut du cylindre.
2. Allumer le chauffage électrique. Veiller à homogénéiser la température avec le mode de recirculation de la pompe.

A2. [1 pt] Consigner dans un tableau la pression P de l'air confiné **CA** en fonction de sa température T.

A3. [0,9 pt] À partir des données obtenues à la question A2, tracer l'évolution de la pression en fonction de la température.

Dans les conditions des IPhO, les capteurs peuvent être intentionnellement mal étalonnés afin de modifier la valeur attendue de R par rapport à la valeur de référence.

A4. [1,0 pt] Utiliser le graphique de la question A3 pour déterminer la valeur expérimentale de R.

Le coefficient de dilatation thermique à volume constant est défini par la relation :

$$\beta_0 = \frac{1}{P_0}\left(\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}T}\right) \qquad (2)$$

où P_0 est la pression du système à la température de référence T_0, grandeurs de valeurs indiquées dans la section « Constantes et valeurs de référence ».

A5. [0,7 pt] Déterminer la valeur du coefficient de dilatation thermique à volume constant β_0 pour l'air.

Retirer le propylène glycol PG du cylindre intérieur IC et nettoyer ce cylindre avant de passer aux autres parties. Pour passer à la partie B, ne pas retirer l'eau chaude du cylindre extérieur OC.

Partie B [8,0 pts]. Pression de vapeur saturante

Dans un récipient fermé contenant un liquide et sa vapeur à l'équilibre, la pression de vapeur saturante dépend de la température absolue T selon l'équation de Clausius–Clapeyron :

$$P_v = P_{v0}\, e^{-\frac{Q_v}{R}\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0}\right)} \qquad (3)$$

Ici, T_0 est la température de référence égale à 0 °C. P_{v0} est la pression de vapeur saturante à T_0. R est la constante universelle des gaz parfaits et Q_v est l'enthalpie molaire de vaporisation de l'eau.

Protocole

On rappelle que le propylène glycol PG et l'eau sont miscibles. Utiliser des seringues différentes pour l'eau et pour le propylène glycol PG.

- Remplir le cylindre extérieur **OC** d'eau jusqu'à ce que le niveau d'eau soit proche du couvercle.
- Remplir une seringue d'eau, la connecter au cylindre intérieur **IC** et ouvrir la **vanne E**. Retirer le piston de la seringue, puis soulever la seringue jusqu'à ce que le niveau d'eau atteigne la hauteur $h = 5,0$ cm. Fermer la **valve E**, puis fixer la seringue au récipient à bec verseur comme indiqué sur la Figure 19. Ce dispositif maintient la pression à l'intérieur du cylindre intérieur **IC** approximativement égale à la pression atmosphérique. Veiller qu'aucune bulle d'air ne subsiste dans le tuyau.

- Chauffer l'eau dans le cylindre extérieur **OC** à 65 °C. Veiller à utiliser le mode de recirculation de la pompe pour homogénéiser la température de l'eau.
- Attendre que la température commence à diminuer pour commencer à relever la hauteur H en fonction de la température T.
- Pour abaisser davantage la température, il est possible de remplacer l'eau dans le cylindre extérieur **OC** par l'eau froide fournie au moment approprié.

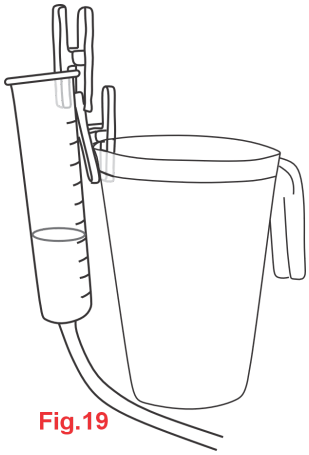


Fig.19

B1. [1,0 pt] Relever la hauteur H en fonction de la température T dans un tableau.

B2. [1,0 pt] Utiliser les données obtenues à la question B1 pour tracer la hauteur H en fonction de la température T.

À température ambiante, la pression de vapeur saturante est relativement faible et la courbe $H(T)$ peut être approximée par une fonction affine de la température.

B3. [0,5 pt] Utiliser le graphe de la question B2 pour obtenir la valeur extrapolée de H à 0 °C notée H_0.

B4. [1,0 pt] On suppose que la pression de vapeur saturante à 0 °C est nulle. On suppose également que le cylindre intérieur **IC** contient à la fois de l'air sec et de la vapeur d'eau. Déduire une expression littérale pour la pression de vapeur saturante P_v en fonction de la pression atmosphérique P_{atm} et de H_0, H, T_0 et T.

Pour les questions suivantes, utiliser la valeur de référence R = 8.31 J/(mol·K).

B5. [4,0 pts] En utilisant l'équation (3) et l'expression de la question B4, construire un graphique approprié pour déterminer la valeur expérimentale de l'enthalpie molaire de vaporisation de l'eau Q_v.

B6. [0,5 pt] À partir de la valeur de Q_v, déterminer l'enthalpie massique de vaporisation de l'eau L_v en indiquant la formule utilisée.

Partie C [8,0 pts]. Conduction thermique

Dans cette partie de l'épreuve, on étudie le transfert thermique entre l'eau du cylindre extérieur **OC** et l'eau du cylindre intérieur **IC** à travers la paroi qui les sépare. L'objectif de cette partie est d'estimer la résistance thermique effective de la paroi, la température d'équilibre du système, ainsi que la conductivité thermique de l'acrylique en analysant l'évolution temporelle de la température de l'eau dans le cylindre intérieur **IC**, notée T_{IC}, et celle de l'eau dans le cylindre extérieur **OC**, notée T_{OC}.

La conduction thermique à travers une paroi solide suit la relation :

$$\frac{Q}{\Delta t} = \frac{1}{R_{Th}}(T_{OC} - T_{IC}) \qquad (4)$$

où Q est le transfert thermique reçu par l'eau du cylindre intérieur **IC** à travers la paroi pendant l'intervalle de temps Δt. La résistance thermique effective R_{Th} dépend du matériau et de la géométrie de la paroi séparant le cylindre intérieur **IC** du cylindre extérieur **OC**.

Protocole

1. Régler le niveau d'eau dans le cylindre extérieur **OC** à $h = 15$ cm.
2. Chauffer l'eau dans le cylindre extérieur **OC** à 65 °C. Utiliser le mode de recirculation de la pompe pour homogénéiser la température de l'eau.
3. Régler le niveau d'eau dans le cylindre intérieur **IC** à $h = 10$ cm et démarrer le chronomètre.

C1. [1,0 pt] Relever les valeurs de la température du cylindre intérieur T_{IC} et de la température du cylindre extérieur T_{OC} en fonction du temps t.

C2. [1,0 pt] Sur un même graphique, tracer T_{IC} et T_{OC} en fonction du temps t.

Pour les questions C3 et C4, ignorer la capacité thermique de l'appareil. T_{eq} désigne la température d'équilibre qui serait atteinte par le cyclindre intérieur **IC** et par le cylindre extérieur **OC** s'il n'y avait pas de transfert thermique avec l'environnement.

C3. [0,7 pt] Tracer $T_{OC} - T_{IC}$ en fonction de T_{OC} et de T_{IC} sur le même graphique, avec T_{OC} et T_{IC} ensemble sur le même axe et $T_{OC} - T_{IC}$ sur l'autre axe.

C4. [1,1 pt] À partir des graphiques construits en C3, déterminer T_{eq}. Il n'est pas nécessaire de calculer d'incertitude pour cette question.

Si les variables sont mesurées un nombre fini de fois, l'équation (4) se traduit comme suit :

$$\frac{T_{IC,\,j} - T_{IC,\,(j-1)}}{t_j - t_{j-1}} \;\text{ est }\; \text{proportionnel à } \; \overline{T}_{OC} - \overline{T}_{IC} \qquad (5)$$

où j représente le numéro de mesure et $\overline{T}$ désigne la température moyenne au niveau de chaque cylindre pendant l'intervalle allant de t_{j-1} à t_j.

C5. [1,0 pt] Représenter graphiquement le terme à gauche dans la relation 5 en fonction du terme à droite.

C6. [1,6 pt] Déterminer la valeur de R_{Th} à partir du graphique construit en C5.

La loi de Fourier pour le transfert thermique par conduction radiale à travers une paroi cylindrique mince s'écrit :

$$\frac{\delta Q}{dt} = -\lambda\, A \frac{dT}{dr} \qquad (6)$$

où A est l'aire de la paroi intérieure, λ est la conductivité thermique du matériau de la paroi et r désigne la distance par rapport à l'axe du cylindre.

C7. [1,6 pt] En utilisant les équations (4) et (6), déterminer la valeur de la conductivité thermique λ de l'acrylique (le matériau séparant le cylindre intérieur **IC** et le cylindre extérieur **OC**) en indiquant la formule utilisée.