

# **FASCICULE DE TRAVAUX PRATIQUES 2019-2020**

## **THERMODYNAMIQUE LSPH201**

### **3 séances de 3h**

- **Les TP sont à préparer avant la séance : lire l'énoncé de façon approfondie et trouver les réponses aux questions à préparer (encadrées). Vos préparations seront vérifiées individuellement par l'enseignant en début de séance.**
- **Il convient d'être soigneux dans les manipulations et de respecter les modes opératoires.**
- **Vous rendrez un compte-rendu en fin de TP. Il s'agit d'un document scientifique à rédiger avec soin : numéroté les questions, vérifiez l'homogénéité de vos formules, attention aux unités, ...**
- **Avant de quitter la salle, il vous faudra essuyer, nettoyer et ranger correctement le matériel sur la paillasse.**



## TP1: Pression et forces exercées par un fluide

**! N'oubliez pas ! Plusieurs questions sont à préparer avant le TP**  
**Votre préparation sera vérifiée par l'enseignant en début de séance.**

### Contenu :

- Loi fondamentale de la statique des fluides.
- Forces exercées par la pression dans un fluide : poussée d'Archimède.

## I. Loi fondamentale de la statique des fluides

### 1) Introduction

Le but de cette manipulation est de mesurer les variations de la pression avec la profondeur dans un fluide : l'eau. La loi fondamentale de la statique des fluides relie la pression  $P$ , la masse volumique du fluide  $\rho$ , l'intensité du champ de pesanteur  $g$  et la profondeur  $z$  dans l'eau (orientation de l'axe vers le bas) par la relation différentielle :  $dP = \rho g dz$

Sous forme intégrée pour les fluides incompressibles ( $\rho = \text{cste}$ ), elle devient  $P(z) = \rho g z + P_0$

On utilisera cette dernière relation pour l'eau en prenant  $z = 0$  à la surface où s'exerce la pression atmosphérique de l'air  $P_0$ .

### 2) Matériel :

- un capteur de pression absolue (pressiomètre) muni d'un tuyau de plastique souple.
- un capteur de pression relatif Latis pro muni d'un tuyau de plastique souple.
- une règle graduée en millimètre.
- une grande éprouvette.
- une potence et une noix de fixation (manipulation par l'enseignant).
- un tube en U (manipulation par l'enseignant).
- de l'huile (manipulation par l'enseignant).

### Un capteur de pression comment ça marche ?

Historiquement les premiers manomètres utilisaient la variation de hauteur d'une colonne de liquide. Le baromètre de Torricelli avec du mercure sera étudié dans la partie 5-c). Aujourd'hui, les capteurs de pression sont miniaturisés, le plus souvent en silicium. Ils renvoient en sortie une grandeur électrique qui peut être ensuite analysée dans un circuit électronique. Ils reposent sur la déformation d'une membrane mesurée de façon résistive ou capacitive (capacité formée entre la membrane mobile et l'autre électrode fixe).

### 3) Préliminaire : comparaison des manomètres

#### ➤ Manipulation

Mise en route : Brancher la sonde de pression Latis-Pro, alimenter électriquement son interface avec l'ordinateur, allumer l'ordinateur et lancer le logiciel Latis-Pro (dans cet ordre). Paramétrer le logiciel en acquisition pas-à-pas et lancer une acquisition pour visualiser la mesure de  $P_r$ .

- Q1:** Donner la valeur mesurée pour l'air ambiant à l'aide des deux capteurs de pression fournis : on notera  $P_a$  la valeur de pression mesurée avec le capteur absolu et  $P_r$  celle mesurée avec le capteur de pression Latis-Pro.
- Q2:** Remplir l'éprouvette avec environ 1L d'eau et plonger les deux manomètres dans l'eau au fond de l'éprouvette. Comment évolue la pression ? Est-ce que vous vous attendiez à ce résultat ?
- Q3:** A quelle grandeur correspond  $P_r$  ? Pourquoi mesurer  $P_r$  plutôt que  $P_a$  pour vérifier la loi fondamentale de la statique des fluides ?

### 4) Relevé des mesures de pression relative : loi de la statique des fluides

Les mesures de pression seront relevées à l'aide du logiciel Latis Pro dont le mode de fonctionnement vous sera présenté par l'enseignant.

#### ➤ Manipulation

**Attention :** La profondeur  $z$  où la pression  $P_r$  est mesurée dans l'eau se situe à l'interface eau/air dans le tuyau du capteur de pression.

Paramétrer Latis-Pro en acquisition pas-à-pas avec la profondeur comme « abscisse clavier ». Entrer au clavier la valeur de profondeur mesurée à la règle et appuyer sur « Entrée ↵ » pour enregistrer la pression à cette profondeur. Mesurer d'abord la pression de l'air ambiant ( $z = 0$ ), puis à différentes profondeurs. On prendra une dizaine de mesures sur la hauteur de l'éprouvette.

- Q4:** Exploitation des résultats : tracer le graphique des mesures  $P_r = f(z)$ . Faire une modélisation avec la fonction mathématique qui vous paraît adaptée.
- Q5:** Imprimer la courbe et sa modélisation en ayant soin de vérifier que toutes les unités sont indiquées correctement. Donner l'équation de cette courbe et indiquer son coefficient de corrélation ( $cc$ ) et l'écart-type avec les mesures réalisées.  
Ces coefficients indiquent si la description des mesures par le modèle est correcte. Dans le meilleur des cas, le  $cc$  vaudra 1 et l'écart type 0.
- Q6:** La loi fondamentale de la statique des fluides est-elle vérifiée ? Justifier votre réponse.

**Q7:** Montrer que la mesure du coefficient directeur de la courbe  $Pr = f(z)$  permet de déterminer  $g$ , l'intensité du champ de pesanteur terrestre. Dédire la valeur expérimentale de  $g$ . Calculer l'écart relatif en % de votre mesure avec la valeur attendue ( $9,81 \text{ m.s}^{-2}$ ) et conclure.

Rappel 1: écart relatif par rapport à une valeur connue =  $\frac{|X_{\text{mesurée}} - X_{\text{connue}}|}{X_{\text{connue}}}$

Rappel 2: la masse volumique de l'eau pure  $\rho_{\text{eau}} = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$ .

## 5) Tubes en U

### a) Eau et huile dans un tube en U

➤ **Manipulation réalisée par l'enseignant :** Dans le tube en U tenu par la noix fixée sur la potence, on met de l'eau jusqu'à la moitié du tube environ. On va ajouter de l'huile d'un côté sur une hauteur de 10 cm environ en versant l'huile avec précaution. Après l'expérience, vider le tout dans l'évier et nettoyer soigneusement le tube en U à l'aide du goupillon, du liquide vaisselle et de l'eau chaude.

**Q8:** Avant l'ajout d'huile, pourquoi le niveau d'eau est le même des deux côtés ?

**Q9:** à préparer (voir l'exercice 1 du TD2). Faire un schéma de l'expérience après l'ajout d'huile. A partir de la loi fondamentale de la statique des fluides, montrer que cette expérience permet de déduire la masse volumique de l'huile, connaissant celle de l'eau rappelée ci-dessus.

**Q10:** Relever les dimensions utiles pour déduire la masse volumique de l'huile. Vérifier la cohérence de votre résultat par rapport au fait que l'huile flotte sur l'eau.

### b) Mesure de la masse volumique du mercure

➤ **Manipulation :** Il y a dans la salle un baromètre à mercure que l'enseignant vous présentera (ne pas manipuler vous-même ce baromètre, le mercure est un liquide aux vapeurs toxiques).

**Q11:** Pourquoi, à votre avis, le niveau du mercure n'est-il pas le même dans les deux branches, contrairement à l'eau dans le début de la manipulation précédente ? Pour répondre à cette question, faire un schéma en indiquant la pression au niveau de la surface libre du mercure des deux côtés du baromètre. A partir de la loi fondamentale de la statique des fluides, expliquer le principe de fonctionnement de ce baromètre.

**Q12:** Dédire la masse volumique du mercure à partir de la différence de niveau observé et de la valeur de la pression atmosphérique du jour.

### c) Cas de l'air

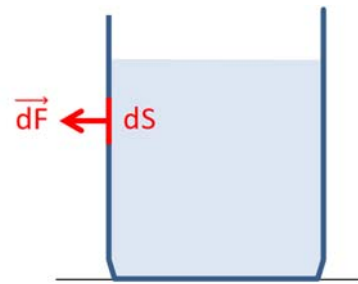
**Q13:** à préparer A partir de la loi des gaz parfaits, montrer que la masse volumique de l'air s'écrit  $\rho_{\text{air}} = PM/RT$ .

- Q14:** Calculer la valeur numérique de  $\rho_{\text{air}}$  dans la salle de TP. On prendra  $M = 29 \text{ g.mol}^{-1}$  et  $R = 8,32 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .
- Q15:** **à préparer** En supposant que la masse volumique de l'air varie peu à l'échelle de la salle ( $\rho_{\text{air}} = \text{constante}$ ), exprimer la variation de pression  $\Delta P$  en fonction de  $\Delta z$ . Calculer la variation de pression pour  $\Delta z = 2,5 \text{ m}$ . L'hypothèse  $\rho_{\text{air}} = \text{constante}$  était-elle justifiée ?
- Q16:** **à préparer** Quelle doit être la précision du manomètre pour pouvoir mesurer la variation de la pression entre le plafond et le sol de la salle ? Pourra-t-on la mesurer avec les manomètres fournis qui ont une précision de 5 % ?
- Q17:** Utiliser le manomètre à votre disposition pour vérifier les calculs précédents. Expliquer pourquoi il est légitime de parler de LA pression de l'air dans la pièce.

Dans cette première partie, vous avez étudié comment la pression évolue dans un fluide. La pression se manifeste par les forces qu'elle exerce sur les solides en contact avec lui. La résultante des forces de pression sur un corps est appelée la « poussée d'Archimède », vous allez la mesurer dans cette deuxième partie.

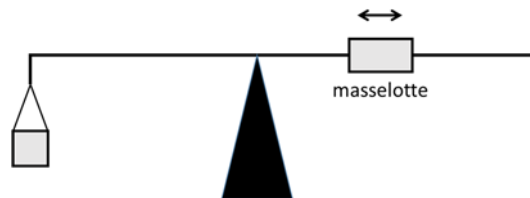


$$\vec{dF} = P \, dS \, \vec{n}$$



## II. Expériences sur la poussée d'Archimède

### 1) Matériel



- une balance romaine. Lorsqu'elle est utilisée à l'air libre, elle permet de mesurer la masse suspendue au crochet. L'équilibre des deux bras est établi en déplaçant la masselotte graduée le long du bras de mesure.
- un bloc de plastique gris équipé d'un fil de suspension.
- un bac gradué.
- un support élévateur.

## 2) Manipulations et interprétation des résultats

- L'enseignant vous expliquera comment manipuler la balance romaine pour réaliser une mesure au gramme près.

**Attention** : éviter les bascules brutales (risque d'endommager la balance)

- Q1:** Mesurer les dimensions du bloc gris. En déduire son volume.
- Q2:** Mesurer la masse  $M_1$  du bloc gris, **suspendu dans l'air**, en équilibrant délicatement la balance romaine. Faire un schéma de l'expérience où vous ferez apparaître les 2 forces qui s'exercent sur le cube.
- Remplir le bac d'eau jusqu'au niveau 1000 mL et le placer sur le support élévateur. Ensuite le bloc gris sera positionné au-dessus du bac. Immerger petit à petit le bloc gris grâce à l'élévateur.
- Q3:** Une fois le bloc totalement immergé, relever grâce aux graduations du bac la valeur du volume d'eau déplacé. Comment se compare-t-il au volume du bloc ?
- Q4:** Relever la valeur de la masse  $M_2$  mesurée avec la balance romaine lorsque le bloc gris est **totalement immergé dans l'eau** ?
- Q5:** Faire un schéma du solide immergé. Vous y ferez apparaître les 3 forces qui s'exercent sur lui et donnerez leur nom. A quelle force correspond  $g(M_1 - M_2)$  ?
- Q6:** Grâce à vos pesées, évaluer numériquement  $g(M_1 - M_2)$ .
- Q7:** Evaluer numériquement le poids du volume de fluide déplacé.
- Q8:** Enoncer le principe d'Archimède. Est-ce qu'il est vérifié avec vos mesures ?
- Q9:** A partir de l'équation de la statique des fluides, calculer la différence des pressions exercées sur les facettes haute et basse du bloc immergé dans l'eau. Connaissant les dimensions des facettes (Q1), calculer la résultante des forces de pression exercée sur le bloc. Comparer à votre mesure de la poussée d'Archimède et conclure.
- **Avant de partir, ranger le matériel et effacer de l'ordinateur tous vos fichiers enregistrés.**





## TP2 : Calorimétrie

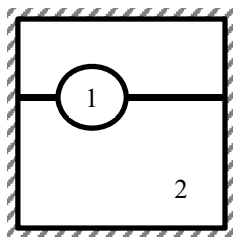
**! N'oubliez pas ! Plusieurs questions sont à préparer avant le TP**  
**Votre préparation sera vérifiée par l'enseignant en début de séance.**

### I. Introduction

La calorimétrie est le domaine de la thermodynamique consacré aux mesures des échanges de chaleur.

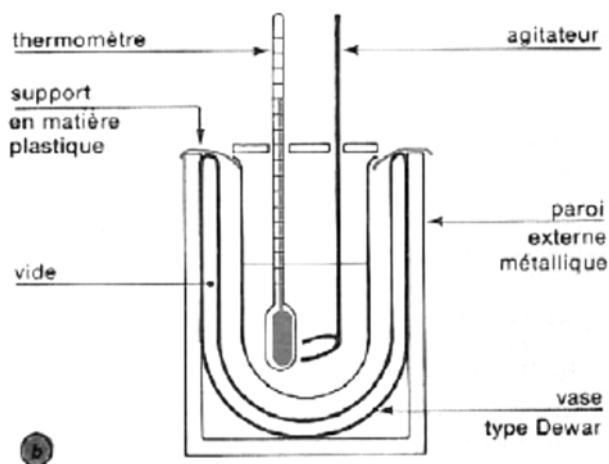
#### 1) Le calorimètre

La calorimétrie s'effectue dans des enceintes appelées « calorimètres », dans laquelle deux corps échangent de la chaleur entre eux. Le corps (1) est le système à étudier. Le corps (2) est un corps de référence, aux propriétés thermiques bien connues : dans ce TP ce sera l'eau liquide.



Les parois du calorimètre sont isolées thermiquement du milieu extérieur

Le milieu extérieur est ici l'atmosphère de la pièce. Les enceintes des calorimètres ont des parois quasi-adiabatiques qui rendent les transferts de chaleur avec le milieu extérieur aussi petits que possible. L'isolation thermique est réalisée par une double paroi sous vide (vase « Dewar », sur le principe de la bouteille thermos). Le calorimètre de Berthelot, utilisé dans ce TP est équipé d'un vase Dewar et d'accessoires adaptés aux mesures des échanges de chaleur (figure ci-dessous).



Calorimètre de Berthelot

## 2) Principe de la mesure des capacités calorifiques : Méthode des mélanges

Il s'agit de mesurer la capacité calorifique d'un objet (1) de masse  $m_1$  porté à la température initiale  $\theta_1$ . On le plonge dans le calorimètre contenant une masse  $m_2$  d'eau (2) à la température initiale  $\theta_i$ . L'eau sera le corps calorimétrique de propriétés connues, utilisé comme référence dans vos expériences. Au bout d'un moment, l'équilibre thermique est atteint. Tous les corps sont à la même température finale  $\theta_f$ .

Le bilan énergétique du système isolé formé de {calorimètre, corps (1), corps (2)} s'écrit avec le premier principe :  $\Delta U = Q_1 + Q_2 + Q_{cal} = 0$ . En utilisant les capacités calorifiques, il vient :

$$m_1 c_1 (\theta_f - \theta_1) + (m_2 c_{eau} + C_{cal}) (\theta_f - \theta_i) = 0$$

où :  $c_1$  : capacité calorifique massique de l'objet (1).  
 $c_{eau}$  : capacité calorifique massique de l'eau liquide.  
 $C_{cal}$  : capacité calorifique (totale) du calorimètre et de ses accessoires.

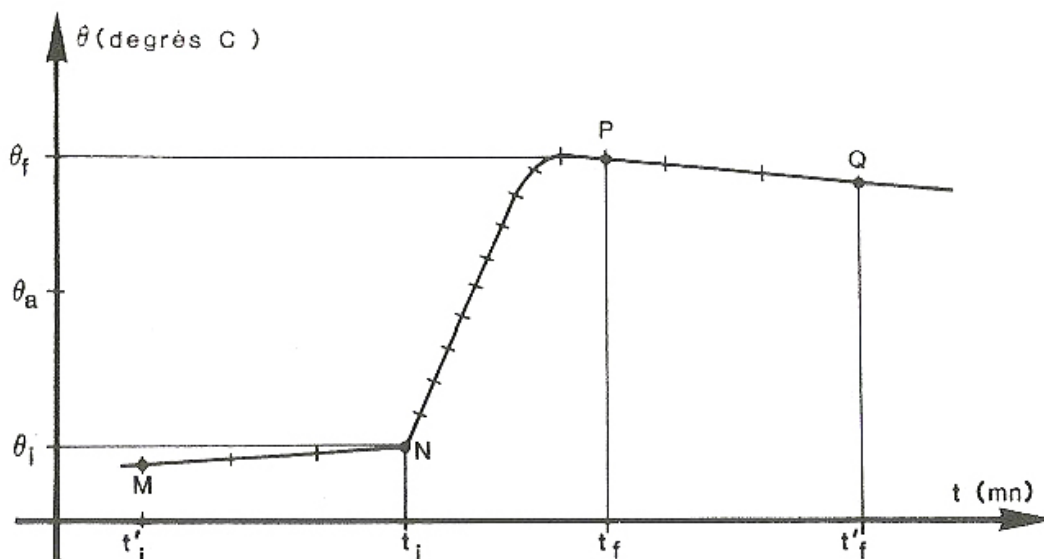
On voit dans cette expression, qu'une mesure précise des masses et des températures initiales et finales permet de déterminer la capacité calorifique massique  $c_1$  du corps (1).

Dans ce bilan, intervient la capacité calorifique du calorimètre, car la paroi du récipient et ses accessoires échangent aussi avec les corps (1) et (2). Une manipulation préliminaire s'avèrera nécessaire pour déterminer la capacité calorifique totale  $C_{cal}$  du calorimètre et de ses accessoires (partie II).

### **Méthode de Régnauld (ou comment s'affranchir des fuites de chaleur du calorimètre ?)**

En réalité, le calorimètre ne constitue pas un système parfaitement isolé et sa variation d'énergie interne n'est pas exactement nulle :  $\Delta U = Q_{fuites}$ . La méthode expérimentale et la précision du relevé des températures  $\theta_i$  et  $\theta_f$  influent de manière significative sur la qualité des mesures de capacités calorifiques.

**Pour limiter l'influence des fuites de chaleur, une méthode consiste à choisir une température initiale et une température finale encadrant la température ambiante  $\theta_a$ .** Dans ces conditions expérimentales, la graphique  $\theta = f(t)$  est de la forme :



- Entre M et N, la température dans le calorimètre est inférieure à celle de l'atmosphère ambiante. A cause de l'isolation thermique imparfaite, le système à l'intérieur du calorimètre reçoit une quantité de chaleur  $Q_{MN} > 0$  de l'atmosphère. La température dans le calorimètre s'élève de  $\theta_M$  à  $\theta_i$  (état initial).
- Entre les points P et Q, la température dans le calorimètre est supérieure à celle de l'atmosphère ambiante. Le sens des fuites de chaleur est inversée  $Q_{PQ} < 0$ , la température diminue de  $\theta_f$  (état final) à  $\theta_Q$ .
- C'est entre les points N et P qu'ont lieu les échanges thermiques entre les deux corps (1) et (2). La position de ces points permet de déterminer précisément  $\theta_i$  et  $\theta_f$ .

Le meilleur choix consiste à prendre  $\theta_a = \frac{1}{2}(\theta_i + \theta_f)$  car, dans ces conditions expérimentales, on a  $Q_{MN} + Q_{PQ} = 0$ . Ainsi les deux termes de fuite de chaleur se compensent.

Grâce à la courbe  $\theta=f(\text{temps})$ , vous pourrez par extrapolation de MN obtenir la valeur précise de  $\theta_i$  et par extrapolation de PQ, celle de  $\theta_f$ . C'est cette méthode que vous mettrez en œuvre dans ce qui suit.

## II. Matériel et manipulations préliminaires

On mesurera **quatre grandeurs thermodynamiques**: d'abord la capacité calorifique du calorimètre (II), ensuite la capacité calorifique massique d'un métal (III), la chaleur latente de fusion de l'eau (IV) et enfin une enthalpie de réaction chimique (V).

### 1) Matériel

- Un calorimètre avec ses accessoires dont l'agitateur.
- Un thermomètre électronique (utiliser le calibre de  $0.1^\circ\text{C}$ ).
- La sonde de température Latis.
- Une bouilloire.
- Une balance électronique de précision qui permet de faire la tare (remise à zéro). Ne pas oublier de débloquent le plateau de la balance en face arrière en début de séance et de le rebloquer à la fin.
- Une potence avec une noix et une pince.
- De la glace pilée à  $0^\circ\text{C}$  et des glaçons sortant du congélateur ( $-18^\circ\text{C}$ ).
- Du gros sel.
- Des masses cylindriques en métal (aluminium ou laiton selon les postes).
- Du chlorure d'ammonium  $\text{NH}_4\text{Cl}$  en poudre.

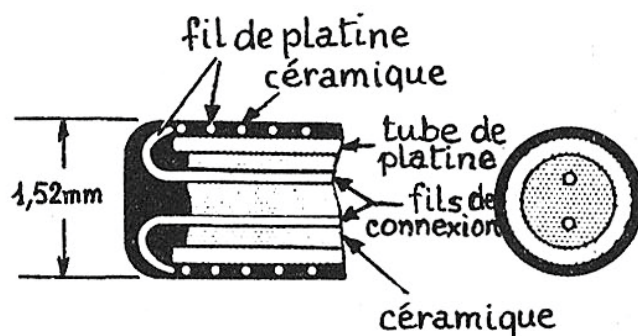
### 2) Recommandations

- Laisser le calorimètre sur la balance tout au long des mesures.
- Pour la mise en place de la sonde de température, régler sa hauteur et sa position de manière à ce qu'elle mesure la température de l'eau (un contact avec la paroi du calorimètre ou avec la masse métallique fausserait la mesure).
- Fermer les ouvertures du calorimètre pour limiter les fuites de chaleur avec l'atmosphère.

### 3) Quelques mots sur la mesure de température

Pour construire un thermomètre, on utilise une grandeur physique qui varie avec la température :

- Le produit PV de la pression et du volume d'un gaz à basse pression est proportionnel à la température absolue définie en thermodynamique: c'est le thermomètre à gaz parfait, le thermomètre de référence de la thermodynamique. Cependant, il est extrêmement délicat à manipuler.
- Les thermomètres à dilatation de liquide, alcool ou anciennement mercure.
- Les thermocouples : ils utilisent la tension qui apparaît lorsque l'on met en contact deux fils de métaux différents : cette tension varie avec la température.
- Les thermomètres métalliques dont la résistance électrique varie avec la température. La sonde platine (norme internationale Pt100) est sans doute le capteur de température le plus répandu. En effet le platine peut être obtenu avec une très grande pureté (99,999%), est chimiquement inerte et ne présente pas de changement de phases cristallines sur une grande plage de température. Cela la rend utilisable de  $-200^{\circ}\text{C}$  à  $+1000^{\circ}\text{C}$ .



(d'après G. Asch, Les capteurs en instrumentation industrielle)

Pour obtenir une résistance relativement élevée  $R=\rho L/S$ , mesurable avec précision à l'aide d'un ohmmètre, on choisit une grande longueur du fil ( $L \sim 10$  cm) et on diminue la section ( $\varnothing \sim 10 \mu\text{m}$ ) pour limiter l'encombrement et le prix. Le fil est bobiné sur un support isolant en quartz ou alumine (voir schéma ci-dessus).

- Pour les très hautes températures, on préfère des pyromètres qui par voie optique, analysent le rayonnement qu'émettent les corps portés à hautes températures (ex : un métal chauffé devient rouge, jaune et même « chauffé à blanc » lorsque sa température augmente)

#### 4) Détermination de la capacité calorifique $C_{cal}$ du calorimètre utilisé

##### a) Principe

Le but de cette expérience est de mesurer la capacité calorifique du calorimètre  $C_{cal}$ , par la méthode des mélanges précédemment décrite, à l'aide du tracé de la courbe  $\theta = f(t)$ . Ici  $m_1$  et  $m_2$  représentent des masses d'eau à des températures **différentes**.

##### b) Manipulations

- Poser le calorimètre sur la balance et en utilisant la fonction « tare » de la balance, la mettre à 0, puis verser une masse  $m_2$  (environ 150g) d'eau à une température d'environ 5°C en dessous de la température ambiante. Noter la valeur de  $m_2$  au gramme près.
- Ouvrir Latis pro et le configurer en mode « temporel » pour relever une mesure toutes les 6 s pendant 20 mn.
- Lancer l'acquisition automatique du tracé de la courbe  $\theta = f(\text{temps})$  de la température de l'eau dans le calorimètre à l'aide de la sonde de température. Aussitôt un décompte des minutes apparaît.
- Prenez soin de remuer régulièrement l'eau à l'intérieur du calorimètre avec l'agitateur.
- Préparer une masse d'eau  $m_1$  (environ 150g) à  $30^\circ\text{C} \leq \theta_1 \leq 35^\circ\text{C}$ . Relever la température  $\theta_1$  avec le thermomètre numérique, juste avant de l'introduire dans le calorimètre.
- Au bout de 9-10 min après avoir lancé l'enregistrement, faire la tare et introduire l'eau chaude dans le calorimètre et le fermer aussitôt. Continuer le relevé de la température encore pendant 10 min en agitant l'eau régulièrement. Relever la masse  $m_1$  d'eau introduite au gramme près.

**Garder l'eau dans le calorimètre à la fin de l'expérience et le maintenir fermé pour la manipulation suivante.**

##### c) Exploitation des résultats

On rappelle :

$$m_1 c_1 (\theta_f - \theta_1) + (m_2 c_{eau} + C_{cal}) (\theta_f - \theta_i) = 0$$

- Q1:** **à préparer** Dans cette expérience préliminaire  $c_1 = c_{eau}$ . Donner l'expression de  $C_{cal}$  en fonction des grandeurs  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $c_{eau}$ ,  $\theta_1$ ,  $\theta_i$ ,  $\theta_f$  (température d'équilibre final). Pourquoi les températures peuvent-elles être exprimées en °C dans l'application numérique ?
- Q2:** A l'aide de l'enregistrement, déterminer précisément les valeurs de  $\theta_i$  et  $\theta_f$  avec la méthode de Régnauld. Vous les ferez apparaître sur l'enregistrement que vous imprimerez et joindrez au rapport.
- Q3:** On donne  $c_{eau} = 4180 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ . En déduire  $C_{cal}$ .
- Q4:** La valeur de  $C_{cal}$  donnée par le fabricant de calorimètre est  $159 \text{ J.K}^{-1}$ . Comparer la grandeur mesurée à celle fournie par le constructeur en calculant l'écart relatif :  $\frac{|X_{mesurée} - X_{connue}|}{X_{connue}}$ . A votre avis quels sont les facteurs qui peuvent être à l'origine de cet écart ?

Dans le cas où vous trouveriez un écart trop important avec la valeur fournie du constructeur, il est conseillé de prendre pour la suite du TP,  $C_{cal}=159 \text{ J.K}^{-1}$ .

### III. Mesure de la capacité calorifique massique d'un métal

#### 1) Principe

Le but de cette expérience est de mesurer la capacité thermique massique  $c_1$  d'un métal de masse  $m_1$  par la méthode des mélanges, à l'aide du tracé de la courbe  $\theta = f(t)$ , et d'évaluer l'incertitude relative faite sur cette mesure.

Ici  $m_2$  représente la masse d'eau dans le calorimètre.

#### 2) Manipulations

- Utiliser comme masse d'eau de départ celle restante dans le calorimètre que vous avez mesuré précisément à la partie I.
- Ouvrir Latis pro et le configurer pour prendre une mesure toutes les 6 s pendant 20 mn.
- Lancer l'acquisition automatique du tracé du graphique  $\theta = f(\text{temps})$  de la température de l'eau dans le calorimètre à l'aide de la sonde de température.
- Pendant ce temps, mesurer la masse  $m_1$  du solide (en laiton ou aluminium) dont on veut déterminer la capacité calorifique massique.
- Puis suspendre le solide à la potence de telle sorte qu'il plonge dans la bouilloire sans qu'il en touche la résistance chauffante. Faire bouillir l'eau de sorte que le métal atteigne une température d'environ  $100^\circ\text{C}$  dans la bouilloire. Attention à ne pas se brûler.
- Vers 9 minutes, le sortir de l'eau, le sécher et relevez la température du solide  $\theta_1$  dans le trou fait pour cet usage, **juste avant de le plonger** le calorimètre (la température du solide baisse rapidement). Eviter que la masse métallique touche le fond. Refermer le calorimètre et continuer le relevé de la température jusqu'à la fin des 20 minutes.

**Garder l'eau dans le calorimètre et le maintenir fermé pour la manipulation suivante.**

#### 3) Exploitation des résultats:

On rappelle :

$$m_1 c_1 (\theta_f - \theta_1) + (m_2 c_{\text{eau}} + C_{\text{cal}}) (\theta_f - \theta_i) = 0$$

- Q1:** à préparer : Donner l'expression de  $c_1$  en fonction de  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $c_{\text{eau}}$ ,  $C_{\text{cal}}$  (la vôtre ou celle du constructeur en cas de non concordance des deux),  $\theta_1$ ,  $\theta_i$ ,  $\theta_f$  (température d'équilibre final).
- Q2:** A l'aide de l'enregistrement et de la méthode précédemment décrite, déterminer les valeurs précises de  $\theta_i$  et  $\theta_f$ . Vous les ferez apparaître sur l'enregistrement que vous imprimerez et joindrez au rapport.
- Q3:** Présenter vos résultats et en déduire la capacité calorifique massique du solide  $c_1$ .

- Q4:** Les valeurs tabulées sont :  $c_{\text{laiton}} = 380 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$  ;  $c_{\text{alu}} = 890 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ . Calculer l'écart relatif entre votre grandeur mesurée et celle attendue en théorie. A votre avis quels sont les facteurs qui peuvent être à l'origine de cet écart ?

#### IV. Mesure de la chaleur latente de fusion de l'eau

##### 1) Principe

Le changement d'état d'un système est provoqué par la modification de son énergie interne. Ici il s'agira d'étudier la fusion glace  $\rightarrow$  eau liquide. Pour transformer une masse  $m_1$  de glace en liquide, la variation d'énergie interne nécessaire est  $\Delta U = m_1 L$  où  $L$  est la chaleur latente de fusion de l'eau.

Quand on introduit une masse  $m_1$  de glace à  $\theta_1 = 0^\circ\text{C}$  dans le calorimètre contenant une masse  $m_2$  d'eau liquide à la température  $\theta_i$ , le bilan d'énergie s'écrit :

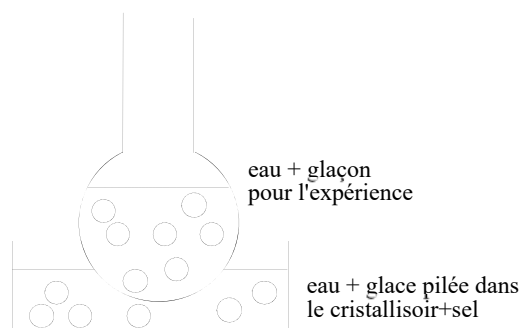
$$(m_2 c_{\text{eau}} + C_{\text{cal}}) (\theta_f - \theta_i) + m_1 c_{\text{eau}} (\theta_f - \theta_1) + m_1 L = 0$$

où  $\theta_f$  est la température dans l'état d'équilibre final.

On se propose ici de déterminer la valeur de la chaleur latente de fusion  $L$  de l'eau.

##### 2) Manipulations

- On utilise la masse  $m_2$  d'eau (de l'ordre de 300g) précédente sans le solide, la température de l'eau doit être supérieure à celle de la pièce (de l'ordre de  $5^\circ\text{C}$  au plus), puis faire la tare.
- Ouvrir Latis pro et le configurer pour prendre une mesure toutes les 6 s pendant 20 mn.
- Lancer l'acquisition automatique du tracé du graphique  $\theta = f(\text{temps})$  de la température de l'eau dans le calorimètre à l'aide de la sonde de température.
- Pour avoir des glaçons à  $0^\circ\text{C}$  précisément, il est nécessaire de les mettre en équilibre thermique avec l'eau liquide (lorsqu'ils sortent du congélateur ils sont à  $-18^\circ\text{C}$  et collent aux doigts). Pour que les glaçons ne fondent pas trop vite, on peut les placer dans un bain réfrigérant eau-glace pilée **avec un peu de sel** comme le montre le schéma ci-dessous.



- Prélever plusieurs morceaux de glace (environ 60 g) dans le ballon (ou le bécher). Il faut que la glace soit **fondante** pour être certain d'avoir un solide à la température de  $0^\circ\text{C}$ , température de coexistence de l'eau sous forme solide et liquide.

- Essuyer les glaçons avant de les introduire rapidement dans le calorimètre vers  $t = 10$  min. Refermer aussitôt le calorimètre. Il est essentiel d'agiter le mélange pour uniformiser la température.
- Relever la masse  $m_1$  de glace introduite.
- Continuer l'enregistrement pendant 10 min en continuant de bien agiter l'eau.

**Garder l'eau dans le calorimètre et le maintenir fermé pour la manipulation suivante.**

### 3) Exploitation des résultats :

- Q1:** à préparer : Donner l'expression de  $L$  en fonction de  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $c_{\text{eau}}$ ,  $C_{\text{cal}}$  (la vôtre ou celle du constructeur en cas de non concordance des deux),  $\theta_1$ ,  $\theta_i$ ,  $\theta_f$  (température d'équilibre final).
- Q2:** A l'aide de l'enregistrement et de la méthode précédemment décrite, déterminer les valeurs précises de  $\theta_i$  et  $\theta_f$ . Vous les ferez apparaître sur l'enregistrement que vous imprimerez et joindrez au rapport.
- Q3:** Déterminer la chaleur latente de fusion  $L$  de l'eau en tenant compte de la capacité calorifique du calorimètre précédemment mesurée.
- Q4:** La valeur théorique pour la chaleur latente de fusion de la glace est  $L_{\text{glace-eau}} = 334000 \text{ J.kg}^{-1}$ . Calculer l'écart relatif entre votre grandeur mesurée et celle attendue en théorie. A votre avis quels sont les facteurs qui peuvent être à l'origine de cet écart ?

## V. Mesure de l'enthalpie standard d'une réaction chimique

### 1) Principe

On réalise la dissolution d'un sel de chlorure d'ammonium  $\text{NH}_4\text{Cl}$  dans l'eau. Cette réaction est endothermique. La quantité de chaleur nécessaire à la réaction de dissolution est donnée par :

$$Q = [m c_{\text{eau}} + C_{\text{cal}}](\theta_i - \theta_f)$$

### 2) Manipulations

- On utilise la masse  $m$  d'eau restante (de l'ordre de 360 g si tout s'est bien passé avant).
- Préparer environ 6 g de  $\text{NH}_4\text{Cl}$  mesurée à 0,1 g près (six bonnes spatules).
- Ouvrir Latis pro et le configurer pour prendre une mesure toutes les 6 s pendant 20 mn.
- Lancer l'acquisition automatique du tracé du graphique  $\theta = f(\text{temps})$  de la température de l'eau dans le calorimètre à l'aide de la sonde de température.
- Au bout de 10 min, verser le chlorure d'ammonium  $\text{NH}_4\text{Cl}$ . Refermer aussitôt le calorimètre.
- Continuer l'enregistrement pendant 10 min en continuant de bien agiter l'eau.



### 3) Exploitation des résultats

**Q1:** Calculer le nombre de moles  $n$  de  $\text{NH}_4\text{Cl}$ . On donne  $M(\text{NH}_4\text{Cl}) = 53,5 \text{ g.mol}^{-1}$ .

**Q2:** **à préparer** : La réaction étant endothermique on a  $Q > 0$ . En thermochimie on définit l'enthalpie molaire pour une mole de réactif  $\Delta H = + Q/n$ .

Donner l'expression de  $\Delta H$  en fonction de  $m$ ,  $c_{\text{eau}}$ ,  $C_{\text{cal}}$ ,  $\theta_i$  et  $\theta_f$ .

**Q3:** A l'aide de l'enregistrement et de la méthode précédemment décrite, déterminer les valeurs de  $\theta_i$  et  $\theta_f$ . Vous les ferez apparaître sur l'enregistrement que vous imprimerez et joindrez au rapport.

**Q4:** Analysez vos résultats pour en déduire la valeur de l'enthalpie molaire de dissolution du sel  $\text{NH}_4\text{Cl}$ .

**Q5:** Comparer votre mesure à la valeur que l'on trouve dans les tables de thermochimie:  $\Delta H = + 14 \text{ kJ.mol}^{-1}$  en calculant l'écart relatif avec votre grandeur mesurée. Commenter votre résultat.

**Q6:** Conclure sur l'ensemble du TP.

➤ **Avant de partir, effacer tous vos fichiers de l'ordinateur et ranger le matériel.**



## TP3 : Etude du moteur thermique à air

**! N'oubliez pas ! Plusieurs questions sont à préparer avant le TP**  
**Votre préparation sera vérifiée par l'enseignant en début de séance.**

### Contenu :

- Modélisation de l'air comme un gaz parfait.
- Etude d'un cycle moteur ditherme irréversible.

### I. Comportement thermo-élastique de l'air

L'objet de cette partie introductive est d'étudier le comportement thermo-élastique de l'air ambiant et d'envisager sa description par le modèle du gaz parfait. C'est le plus simple des modèles pour les gaz, avec l'équation d'état:

$$PV = nRT$$

#### 1) Matériel

- le panneau loi des gaz est équipé de plusieurs capteurs, nous utiliserons ceux de volume V et de pression P. **Ce panneau est fragile, le manipuler avec précaution. Ne pas descendre au-dessous du volume minimum indiqué par le repère sur la seringue.**
- l'interface électronique entre les capteurs et l'ordinateur.
- le logiciel d'acquisition et d'exploitation Latis-Pro sur ordinateur.

Attention : mettre sous tension l'interface électronique **avant** de démarrer l'ordinateur.

#### 2) Paramétrage de l'acquisition numérique

- Ouvrir Latis pro. Taper sur espace pour sortir de l'écran d'accueil.
- Brancher sur l'entrée **EA0** la tension correspondant au **volume**, puis activer cette entrée en tant que capteur de volume dans Latis-Pro (clic-droit et choix du « capteur utilisateur »).
- Brancher sur l'entrée **EA1** la tension correspondant à la **pression** et puis activer cette entrée en tant que capteur de pression dans Latis-Pro (clic-droit et « capteur utilisateur »).
- Sélectionner le mode pas à pas.
- Le volume sera configuré en « abscisse instrumentée ».

#### 3) Tracé de l'isotherme de l'air dans le diagramme de Clapeyron

Le principe de l'expérience est le suivant : de l'air est enfermé dans une seringue et pour différents volumes, on mesure les pressions correspondantes à la température ambiante.

- Régler le volume de la seringue sur 20 cm<sup>3</sup>. Débrancher le tuyau souple relié à la sonde de pression pour faire entrer l'air dans la seringue. Refermer la seringue (rebrancher le tuyau). On a ainsi enfermé une certaine quantité d'air (n moles) dans la seringue à la pression atmosphérique.

**Q1:** à préparer Calculer le nombre n de moles d'air emprisonné dans la seringue.

En faisant varier le volume de la seringue, on va comprimer/dilater l'air et mesurer sa pression. Le panneau de gaz est à la température de la pièce et la paroi de la seringue est diatherme. On effectue de cette manière une transformation isotherme.

- Commencer les mesures au volume maximum (environ  $60 \text{ cm}^3$ ) et diminuer progressivement le volume du gaz par étape d'environ  $2,5 \text{ cm}^3$  pour terminer à environ  $20 \text{ cm}^3$ . A chaque point, attendre que l'équilibre thermique s'établisse (au moins une minute) avant de cliquer sur « acquisition » pour enregistrer simultanément les valeurs de pression et de volume.

**Une fois les mesures terminées, enregistrer votre fichier sur le bureau.**

- Q2:** Quel est le signe du travail fourni au gaz dans cette expérience de compression ? Appliquer le premier principe au gaz enfermé dans la seringue. On se placera dans le modèle du gaz parfait dont l'énergie interne ne dépend que de la température. Quel est le signe de la chaleur échangée par le gaz ? Quel est le sens de l'échange de chaleur entre le gaz enfermé dans la seringue et l'atmosphère ? Pourquoi après chaque modification du volume, il est nécessaire d'attendre que le nouvel équilibre thermique s'établisse ?

#### **4) Exploitation : modélisation de l'isotherme dans le diagramme de Clapeyron**

On envisage de décrire le comportement de l'air par le modèle du gaz parfait. Pour cela, vous choisirez une modélisation de vos résultats en loi de **puissance** du type  $P = aV^b$ , où  $a$  et  $b$  sont des constantes. Le logiciel calcule alors les valeurs de  $a$  et  $b$  pour que le modèle s'approche au plus près de vos points expérimentaux.

- Q3:** Quelles sont les valeurs des paramètres  $a$  et  $b$  extraits de la modélisation ? Qu'attendez-vous pour la valeur de  $b$  dans le cas d'un gaz parfait ? Le modèle du gaz parfait décrit-il correctement vos mesures ?

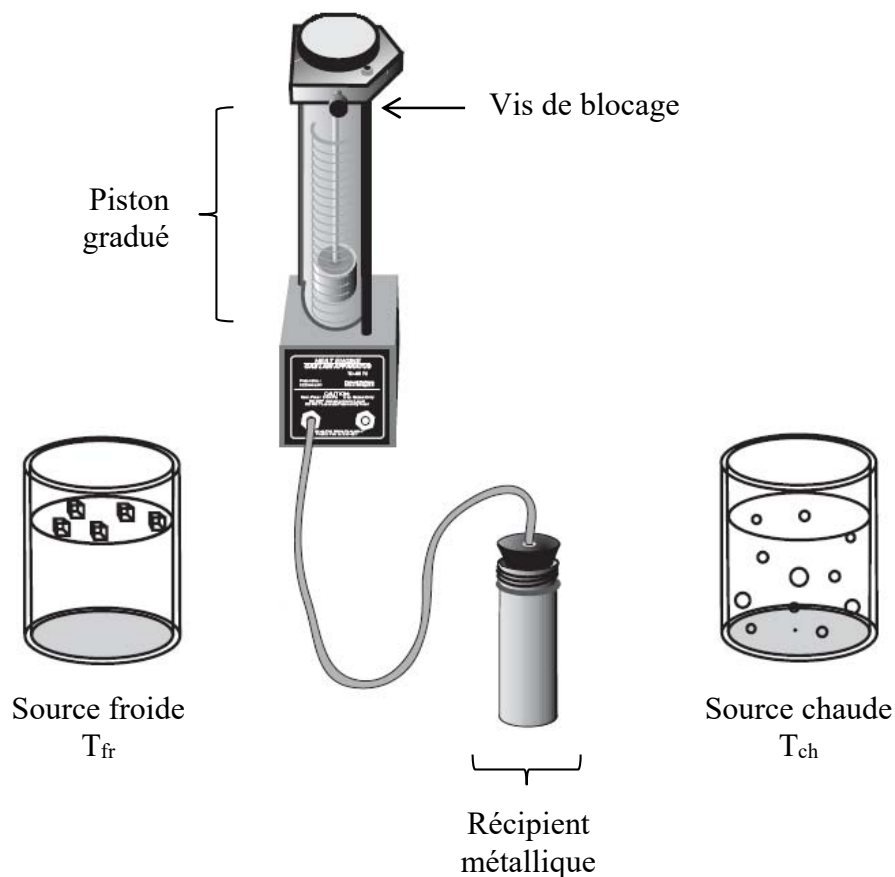
**Imprimer vos points expérimentaux et la modélisation associée.**

- Q4:** Quelles sont les limites du modèle du gaz parfait pour décrire les gaz réels ?

## **II. Moteur thermique à air**

### **1) Liste du matériel nécessaire**

- 1 piston gradué connecté à un récipient à paroi métallique.
- 2 récipients en plastique.
- 1 bouilloire.
- 1 thermomètre numérique.
- 1 masse de 150 g (support compris).
- papier millimétré.



## 2) Principe de l'étude expérimentale du moteur à air

On va enfermer  $n$  moles d'air dans un récipient étanche composé de deux parties : un récipient à paroi métallique (diatherme et indéformable) relié à un piston gradué de volume variable.

Par différentes manipulations, on va faire subir à ces  $n$  moles d'air un cycle moteur de 4 transformations, ramenant le gaz à son état initial.

Les échanges de chaleur seront réalisés en plongeant le cylindre métallique dans une source froide ou une source chaude.

La pression extérieure s'appliquant sur le gaz sera modifiée en ajoutant/retirant une masse sur le plateau supérieur relié au piston.

## 3) Bilan thermodynamique sur le cycle ABCDA (à préparer à la maison)

### a) Présentation du cycle

Comme sources de chaleur, on dispose de deux thermostats, qui peuvent être mis en contact thermique avec le système fermé décrivant le cycle. Un thermostat est constitué d'eau froide à la température  $T_{fr}$ , l'autre d'eau chaude à la température  $T_{ch}$ .

On peut modifier la pression extérieure en ajoutant une masse  $m$  sur un plateau lié au piston. La pression extérieure appliquée sur le gaz vaut alors  $P_1 = P_0 + mg/S$ ,  $P_0$  étant la pression atmosphérique prise égale à  $10^5$  Pa,  $g$  l'accélération de la pesanteur valant  $9,81 \text{ m.s}^{-2}$  et  $S$  la section du piston.

Le cycle ABCDA effectué par l'air enfermé est irréversible. Il comprend 4 transformations :

AB : Compression irréversible isotherme à  $T_{fr}$ . La pression extérieure est constante et vaut  $P_1$ .

BC : Dilatation irréversible isobare.

CD : Dilatation irréversible isotherme à  $T_{ch}$ . La pression extérieure est constante et vaut  $P_0$ .

DA : Compression irréversible isobare.

### **b) Etude du cycle**

- Q1:** à préparer Tracer qualitativement le diagramme de Clapeyron de ce cycle.
- Q2:** à préparer Déterminer les expressions de  $W_{AB}$ ,  $W_{BC}$ ,  $W_{CD}$  et  $W_{DA}$ .
- Q3:** à préparer Montrer que  $W = W_{AB} + W_{BC} + W_{CD} + W_{DA} = -mg(h_C - h_A)$ .
- Q4:** à préparer Déterminer les expressions de  $Q_{AB}$ ,  $Q_{BC}$ ,  $Q_{CD}$  et  $Q_{DA}$ .
- Q5:** à préparer Donner l'expression de la quantité de chaleur échangée par le gaz avec la source chaude au cours du cycle,  $Q_{ch}$ , en fonction de 2 quantités de chaleur choisies parmi les 4 ci-dessus.

## **4) Manipulation et mesures**

### **a) Préparation du matériel**

- Source froide : remplir un récipient avec 2L d'eau du robinet.
- Source chaude : remplir un récipient avec 1,5L d'eau bouillante (bouilloire électrique) et compléter avec 0,5 L d'eau du robinet.
- Préparation du système fermé : retirer le bouchon en caoutchouc du cylindre à paroi métallique pour faire entrer l'air dans le système. Vérifier que la vis de blocage est bien desserrée. Maintenir le piston à une hauteur de 40-50 mm (à peu près à mi-hauteur) pendant que vous refermerez le bouchon soigneusement. Vous avez ainsi enfermé une certaine quantité d'air ( $n$  moles) à la pression atmosphérique dans la seringue.

## b) Manipulation et mesures

- Etat initial A : Maintenir immergé le fond du récipient métallique dans l'eau froide. **Mesurer  $h_A$ .**
- AB : Compression isotherme : poser la masse m, le volume du gaz diminue. **Mesurer  $h_B$ .**
- BC : Dilatation isobare : transporter puis immerger le récipient métallique dans l'eau chaude, le volume augmente. **Mesurer  $h_C$ .**
- CD : Dilatation isotherme : retirer la masse m, le volume augmente. **Mesurer  $h_D$ .**
- DA' : Compression isobare : transporter puis immerger le cylindre dans l'eau froide. Attendre l'équilibre. **Mesurer  $h_A$ .**

**Q6:** On devrait revenir au point A. Y revient-on exactement ? Pour quelle raison ?

**Q7:** Mesurer les températures  $T_{ch}$  et  $T_{fr}$  des sources chaude et froide.

## 5) Exploitation des mesures

### **Q8: Calcul des volumes de gaz**

Le volume du piston gradué vaut  $h \cdot S$ , où  $S$  est la section du piston et  $h$  la hauteur mesurée sur le cylindre gradué. On prendra  $S = 8,3 \text{ cm}^2$ .

Le volume du récipient métallique et des tubes souples est de  $190 \text{ cm}^3$ .

En déduire le volume total du système fermé aux 4 états d'équilibre du cycle :

$h_A =$	$V_A =$	
$h_B =$	$V_B =$	$V_C / V_B =$
$h_C =$	$V_C =$	
$h_D =$	$V_D =$	$V_D / V_A =$

**Q9:** à préparer Montrer que les rapports  $V_C/V_B$  et  $V_D/V_A$  doivent être égaux lors du cycle de transformations réalisé.

### **Q10: Diagramme de Clapeyron du cycle**

Calculer la variation de pression  $P_1 - P_0$ .

Placer sur du papier millimétré les 4 points d'équilibre du cycle A, B, C et D dans un diagramme de Clapeyron.

### **Q11: Calcul du travail $W$ du gaz sur le cycle**

On rappelle  $W = -mg(h_C - h_A)$

Calculer la valeur de  $W$ . Justifier son signe.

Expliquer comment l'utilisateur récupère en pratique l'énergie mécanique issue de ce moteur.

### **Q12: Mesure de la quantité de chaleur $Q_1$ fournie par le thermostat chaud au gaz**

On rappelle  $Q_{ch} = Q_{BC} + Q_{CD}$

En supposant que l'air se comporte comme un gaz parfait, calculer le nombre de moles  $n$  enfermé dans le système à partir de la loi des gaz parfaits au point d'équilibre A. On rappelle  $R = 8,31 \text{ J.K}^{-1}$

On rappelle que  $Q_{BC} = n C_P (T_{ch} - T_{fr})$ . En prenant  $C_P = 7R/2$  (gaz diatomique), en déduire la

valeur de  $Q_{BC}$ .

On a  $Q_{CD} = P_0(V_D - V_C)$ , calculer la valeur de  $Q_{CD}$ .

En déduire la valeur de  $Q_{ch}$ . Justifier son signe.

**Q13: Calcul du rendement du cycle ABCD irréversible**

On rappelle que le rendement d'un cycle moteur s'écrit  $r = -W/Q_{ch}$ , où  $W$  est le travail total reçu par le fluide sur un cycle et  $Q_{ch}$ , la quantité de chaleur totale reçue par le gaz du thermostat chaud.

Calculer la valeur du rendement  $r_{ABCD}$  du cycle ABCDA.

Combien de thermostats interviennent dans ce cycle ?

**Q14: Comparaison avec le rendement d'un cycle ditherme réversible utilisant les mêmes thermostats**

Exprimer le rendement  $r_{rév}$  en fonction de  $T_{ch}$  et  $T_{fr}$  et calculer sa valeur numérique.

Comparer les valeurs numériques de  $r_{ABCD}$  et  $r_{rév}$ . Conclure.

- **Avant de partir, effacer tous vos fichiers de l'ordinateur et ranger soigneusement le matériel.**