

Thèmes	Premier principe, transferts thermiques	
Matériel sur les paillasses élèves	bécher 200 mL et verre de montre (couvercle) Agitateur et barreau aimanté	Thermomètre numérique et chronomètre Potence et pince
Matériel sur la paillasse prof.	Balance de précision Bouilloire	
Sécurité	Présence d'eau bouillante.	

Lorsque de la puissance électrique est envoyée dans le réseau électrique, elle ne peut pas disparaître : elle doit forcément être consommée ou stockée. Si la consommation est trop faible, cette énergie électrique peut être stockée :

- Sous forme d'énergie chimique dans des batteries ;
- Sous forme d'énergie potentielle en pompant de l'eau dans un lac de barrage ;
- Sous forme d'énergie interne d'un gaz, via une compression ;
- Sous forme thermique, par chauffage d'une grande quantité de fluide.

Pour que cette dernière forme de stockage soit utile, il est nécessaire que le fluide ne se refroidisse pas trop vite (sinon, l'énergie est perdue dans l'environnement).



Dans ce TP, on se propose de vérifier expérimentalement le modèle de refroidissement d'un stockage thermique miniature : un bécher rempli d'eau chaude. L'objectif principal est de mesurer le « coefficient conducto-convectif » qui régit le transfert thermique entre le système et l'extérieur (au travers des parois du récipient).

I - PREMIER PRINCIPE ET TRANSFERT THERMIQUE

I.1 - Modèle simple de transfert thermique au travers d'une paroi

De nombreuses applications industrielles ou scientifiques font intervenir des fluides chauds stockés dans de grands réservoirs, dont il est important de connaître la température (température d'une réaction chimique dans une cuve, température de fermentation de la bière, stockage d'énergie durant la nuit sur de grand volumes de sels fondus, etc.)

Pour déterminer l'évolution de la température d'un fluide dans une enceinte, il est nécessaire de connaître le flux thermique échangé avec l'extérieur. Usuellement, on modélise le flux thermique au travers d'une surface solide de surface S par la loi :

$$\phi_{th} = h (T - T_{ext}) S$$

$$\left\{ \begin{array}{l} [d\phi] = \rule{1.5cm}{0.4pt} \\ [T] = \rule{1.5cm}{0.4pt} \\ [S] = \rule{1.5cm}{0.4pt} \\ [h] = \rule{1.5cm}{0.4pt} \end{array} \right.$$

où **h** est le « coefficient conducto-convectif » entre le système et le fluide extérieur (ici, l'air). Ce coefficient dépend des caractéristiques propres à la surface, ainsi qu'au fluide environnant.

À partir de cette loi et du cours de thermodynamique, nous allons essayer de déterminer le modèle mathématique de variation de température au cours du temps, puis le comparer à une prise de mesure réelle dans le cas d'un petit bécher rempli d'eau. S'il y a concordance, on pourra alors déterminer le coefficient **h**.

Une fois ce coefficient mesuré, et le modèle validé, on pourra alors extrapoler la courbe de refroidissement pour n'importe quel contenant dont la paroi est semblable à celle qu'on utilise, quelle que soit sa taille ou sa forme (ou presque).

1. Dans l'accolade à côté de la formule du flux thermique, indiquer les unités des grandeurs (en USI).

On rappelle l'expression du **premier principe en puissance** exprimé avec l'enthalpie, pour une **transformation monobare ou isobare** :

$$dH = \delta Q \text{ (en énergie)} \quad \Rightarrow \quad \frac{dH}{dt} = \phi_{th} \text{ (en puissance)}$$

- En exprimant la variation d'enthalpie de l'eau liquide, déterminer une équation différentielle vérifiée par $T(t)$. On considère connue la capacité thermique massique c_{eau}^L de l'eau liquide.
- Déterminer alors l'évolution horaire de $T(t)$ pour une température initiale T_0 , et une température extérieure T_{ext} .

I.2 - Application

Dans ce TP, on s'intéresse à un bécher rempli d'eau initialement très chaude (en sortie de bouilloire). On souhaite établir la loi d'évolution de sa température grâce au thermomètre numérique. Dans la partie expérimentale, on réalisera donc un montage permettant de relever sa température au cours du temps à partir des éléments présents sur la paillasse. Pour que la température du système soit homogène, on place le système sur un agitateur magnétique.

- Pour être précis, quel terme faudrait-il ajouter au premier principe lorsque le barreau aimanté fait tourner l'agitateur magnétique dans le bécher ? Que peut-on dire de ce terme supplémentaire ?
- Pourquoi est-il important de couvrir le bécher afin qu'il soit approximativement clos ?
- Dans le but de déterminer h , pourquoi est-il nécessaire de peser la masse d'eau avant l'expérience ? et pourquoi est-il nécessaire de connaître la surface de contact eau/paroi/air ?

Dans toute la suite, on considèrera que la capacité thermique massique de l'eau liquide est $c_{\text{eau}} \simeq 4200 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$.

II - DETERMINATION EXPÉRIMENTALE DU COEFFICIENT DE TRANSFERT

On essaiera réfléchir au choix de divers paramètres expérimentaux :

- Comment placer le thermomètre afin qu'il indique des valeurs exploitables : Au centre ? Sur les bords ?
- À quelle fréquence relever la température ? Pendant combien de temps ?

On considèrera que le thermomètre a une incertitude-type égale à $\Delta T = 0.01 \cdot T_{\text{affiché}}$, et on négligera les incertitudes liées à la balance (qui sont faibles devant le reste).

Réaliser l'expérience, en gardant toujours en tête que :

- ON NE COMMENCE JAMAIS UNE EXPERIENCE SANS SAVOIR PRECISEMENT CE QU'ON MESURE et POURQUOI.**
- ON PREPARE TOUJOURS LE(S) TABLEAU(X) DE MESURE EN AMONT (sur papier ou logiciel)**
- ON DOIT CONNAITRE AVANT L'EXPERIENCE L'ALLURE DU RESULTAT (donc avoir compris le modèle)**

- Tracer l'évolution de $T(t)$ dans le logiciel Regressi (ou avec Python si vous préférez). L'allure est-elle conforme à vos attentes ? **Attention** : ne jamais utiliser « Excel » ou « LibreOffice Calc » pour relever les mesures et tracer des graphiques. Ces logiciels ne sont pas adaptés au traitement de données expérimentales et vous feront prendre de mauvais automatismes.
- Une fois les mesures finies, peser le bécher à nouveau, puis déterminer l'énergie liée à l'évaporation de l'eau (on rappelle que l'enthalpie massique de vaporisation de l'eau est $l_{\text{vap}} \simeq 2300 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$). Comparer cette énergie (en ordre de grandeur) à l'énergie perdue par le système lors du refroidissement, puis conclure quant à la possibilité de négliger l'évaporation dans les bilans d'énergie.
- Sous Regressi, déterminer quelles grandeurs tracer en abscisse et en ordonnée afin de déterminer h (ou une grandeur proportionnelle à h) via une régression linéaire.
- En utilisant la fonctionnalité d'ajustement linéaire de Regressi, trouver la valeur de h , ainsi que ses incertitudes.
- Si on avait utilisé un bécher de même forme, mais contenant 100 fois plus d'eau, quelle aurait-été le temps caractéristique du refroidissement ? Le temps caractéristique de refroidissement est-il proportionnel à la masse d'eau qui se refroidit ? Quelle masse d'eau serait-il nécessaire d'utiliser si on souhaitait stocker de l'énergie sous forme thermique pendant un mois ?

Attendus de la présentation orale :

- Rappel du modèle mathématique ;
- Schéma du protocole expérimental ;
- Graphique des points expérimentaux ;
- Ajustement linéaire permettant d'obtenir la valeur de h et ses incertitudes ;

Tout autre ajout est le bienvenu (réponse à la question 5), commentaire sur les incertitudes de mesurées ou calculées, etc.