TP Physique 06 **BCPST 1C**

Détermination d'une capacité thermique et d'une capacité thermique massique

Le but de ce TP est de déterminer la valeur de la capacité thermique C_{cal} *d'un calorimètre puis la capacité thermique massique* c_s *d'un solide métallique.*

I- CAPACITE THERMIQUE C_{CAL} D'UN CALORIMETRE

1) Présentation du calorimètre

Le calorimètre est un dispositif permettant au physicien d'étudier les échanges thermiques entre plusieurs corps. Il se présente comme un gros thermos (à 350 € tout de même !) dans lequel on peut introduire les différents corps à étudier. Un descriptif succinct est donné ci-dessous.

Le calorimètre sera supposé ***parfaitement calorifugé***, c'est-à-dire qu'aucun transfert thermique avec l'extérieur ne sera envisagé. En revanche, ***il ne sera pas*** supposé comme ***idéal***, c'est-à-dire qu'il peut effectuer des transferts thermiques avec ce qu'il contient ; par exemple, les parois du vase Dewar et celles du vase en aluminium dans lequel seront disposés les différents corps étudiés peuvent échanger de l'énergie avec ces corps. Ces transferts thermiques devront donc être pris en compte pour l'exploitation des expériences, nous obligeant à définir une capacité thermique C_{cal} pour l'ensemble du calorimètre, exprimée comme toute capacité thermique en $J.K^{-1}$.

Le but de cette première partie est de déterminer la valeur de cette capacité thermique C_{cal}.

2) Protocole expérimental

Une méthode consiste à mélanger dans le calorimètre deux quantités m_1 et m_2 d'eau à des températures initiales T_1 et T_2 différentes puis de suivre l'évolution de la température du mélange.

- *Démonter l'intégralité du calorimètre en mémorisant dans quel ordre sont disposés les différents éléments.*
- *S'assurer que le vase en aluminium est bien propre et sec puis peser celui-ci :* ➡ m_{vase} = ___________________
- *A l'aide d'une éprouvette graduée, prélever entre 90 mL et 110 mL d'eau distillée « à température ambiante » puis verser celle-ci dans le vase en aluminium (et pas dans le vase Dewar !!!).*
- *Peser le vase en aluminium + son eau et en déduire la masse* m_1 *d'eau « à température ambiante » présente dans celui-ci :*
  ➡ m_1 = ___________________
- *Repositionner l'ensemble des éléments du calorimètre (vase en aluminium, joint, couvercle + bouchon, agitateur mécanique) dans le sens inverse avec lequel vous les avez retirés.*
- *Plonger la sonde de température dans le vase et, si ce n'est pas déjà fait, la connecter à la carte d'acquisition.*
- *Ouvrir le logiciel Latis Pro :*
  - *Une fenêtre TEMPERATURE doit apparaître aux côtés des voies EA1/EA2 …*
  - *Dans « Acquisition », choisir « Temporelle » et précéder aux réglages suivants :*
    Nombre de points : 200 ; Période d'échantillonnage $T_e = 5$ *s ; Durée totale de l'acquisition : 17 min*
  - *Lancer l'acquisition avec la touche* **F10**.
- *Dès le lancement de l'acquisition, agiter régulièrement le contenu du calorimètre en soulevant et en abaissant lentement l'agitateur mécanique pour homogénéiser le système pendant environ 2 ou 3 minutes.*
- *Pendant ce temps, à l'aide d'une éprouvette graduée, prélever entre 90 mL et 110 mL d'eau distillée « chaude » puis déterminer précisément sa masse* m_2 *par pesée :* ➡ m_2 = ___________________

⏩ *Retirer le bouchon situé sur le couvercle du calorimètre, mesurer la température* **T_2** *de l'eau chaude (➡* **T_2** *= ________) puis,* ***sans perdre de temps****, verser cette eau chaude dans le vase en aluminium et replacer le bouchon. Agiter alors régulièrement et lentement pour homogénéiser la température.*

⏩ *Observer l'évolution de la température. Une fois l'acquisition terminée, ne rien démonter !*

⏩ *Repérer graphiquement les différentes températures suivantes à l'aide de l'outil « Réticule » ou « Pointeur » (on les obtient en faisant un click droit sur la fenêtre d'acquisition) :*

- *Température* **T_1** *de l'eau froide et du calorimètre, juste avant introduction de l'eau chaude :* ➡ **T_1** = _________
- *Température* **T_F** *la plus haute atteinte par le mélange :* ➡ **T_F** = _________

3) Exploitation des résultats

Dans la suite, on étudie le système {calorimètre + eau froide + eau chaude}, macroscopiquement au repos.

✍**1-** Pourquoi n'étudie-t-on pas simplement le système {eau froide + eau chaude} ?

✍**2-** Appliquer le premier principe de la thermodynamique au système et en déduire la relation entre m_1, m_2, T_1, T_2, T_F, C_{cal} et c_{eau} (*capacité thermique massique de l'eau* : $4{,}18.10^3$ $J.K^{-1}.kg^{-1}$). Expliquer toutes les simplifications réalisées.

✍**3-** En déduire l'expression de la capacité thermique C_{cal} du calorimètre en fonction de c_{eau}, m_1, m_2, T_1, T_2 et T_F. Faire l'application numérique.

La notice du calorimètre fournit « la valeur en eau µ » du calorimètre : il s'agit de la masse d'eau qui aurait la même capacité thermique que celle du calorimètre.

✍**4-** Exprimer la valeur en eau µ de votre calorimètre en fonction de C_{cal} et de c_{eau}. Faire l'application numérique.

4) Incertitude sur la capacité thermique du calorimètre

Suite aux différentes manipulations, la valeur de C_{cal} obtenue expérimentalement est assortie d'une incertitude **$u(C_{cal})$** qui est reliée aux différentes incertitudes suivantes :

$u(m_1)$ = incertitude sur la masse **m_1** d'eau froide introduite dans le calorimètre ;

$u(m_2)$ = incertitude sur la masse **m_2** d'eau chaude introduite dans le calorimètre ;

$u(T_1)$ = incertitude sur la température **T_1** de l'eau froide juste avant l'introduction de l'eau chaude ;

$u(T_2)$ = incertitude sur la température **T_2** de l'eau chaude juste avant son introduction dans le calorimètre ;

$u(T_F)$ = incertitude sur la valeur de la température **T_F** la plus haute atteinte par le mélange.

Mais le calcul de C_{cal} réalisé à la question **3-** n'étant pas simple, l'utilisation des formules de propagation des incertitudes va s'avérer être une tâche très complexe ! Dans ma grande bonté, je vais donc vous épargner ce calcul ! Mais nous allons quand même pouvoir calculer cette incertitude par la ***méthode de simulation de Monte-Carlo*** : cette méthode consiste à simuler numériquement un très grand nombre de fois l'expérience qui a été réalisée en TP.

Dans notre cas, nous allons simuler 1000 expériences en tirant au sort les valeurs de m_1, m_2, T_1, T_2 et T_F, celles-ci n'étant pas tout à fait choisies au hasard. Elles seront en effet choisies aléatoirement dans un intervalle raisonnable centré sur vos valeurs expérimentales de m_1, m_2, T_1, T_2 et T_F. Typiquement, si on estime que **l'erreur qu'on commet** en lisant une valeur **m** vaut **a(m)** (cette erreur est aussi appelé « **demi-étendue** »), alors on fera des tirages de cette grandeur dans l'**intervalle [m – a(m) ; m + a(m)]**. Une fois ces 1000 tirages au sort réalisés, le programme permettra de calculer la moyenne obtenue pour C_{cal} avec son incertitude-type $u(C_{cal})$, cette dernière s'identifiant à l'écart-type.

✍**5-** Pour définir les intervalles dans lesquels doivent être tirées au sort les valeurs de m_1, m_2, T_1, T_2 et T_F, indiquer ce que valent leur demi-étendue $a(m_1)$, $a(m_2)$, $a(T_1)$, $a(T_2)$ et $a(T_F)$.

* *Demi-étendues :* *- la demi-étendue des températures mesurées via la sonde Latis-Pro vaut* 0,3 °C *(valeur annoncée par la notice de la sonde).*

- sans notice, la demi-étendue d'une grandeur mesurée avec un appareil à affichage numérique correspond au plus petit digit affiché par cet appareil.

Pour réaliser ces 1000 simulations, nous allons utiliser une programmation Python disponible sur le lien suivant, envoyé par mail par votre professeur :

https://colab.research.google.com/drive/1UfKoJAgmvgDQUYy6KdKMjQ3IeNpVP77E

✍**6-** Compléter le fichier Python sur ce lien ainsi que dans les différents cadres ci-dessous en lisant attentivement les différentes consignes qui accompagnent chaque ligne de programme.

```
# Importation des bibliothèques utiles :
……………………………………………………………………………………………  # Pour faire des calculs, des tableaux …
……………………………………………………………………………………………  # Pour tracer des graphiques
import numpy.random as rd                                     # Pour générer des nombres aléatoires sous l'alias rd

# Définition des grandeurs physiques :
m1 = ………………………...          # Renseigner la valeur de la masse d'eau froide introduite (en kg)
m2 = ………………………...          # Renseigner la valeur de la masse d'eau chaude introduite (en kg)
T1 = ………………………....         # Renseigner  la valeur de la température initiale de l'eau froide et du calorimètre (en °C)
T2 = ………………………….          # Renseigner  la valeur de la température initiale de l'eau chaude (en °C)
TF = ………………………….          # Renseigner  la valeur de la température finale du système (en °C)
c_eau = ……………………..        # Renseigner la valeur de la capacité thermique massique de l'eau (en J/K/kg)

# Définition des demi-étendues estimées :
a_m1 = ……………………..         # Renseigner la valeur de la demi-étendue estimée pour la masse m1 (en kg)
a_m2 = ……………………..         # Renseigner la valeur de la demi-étendue estimée pour la masse m2 (en kg)
a_T1 = ……………………..         # Renseigner la valeur de la demi-étendue estimée pour la température T1 (en °C)
a_T2 = ……………………..         # Renseigner la valeur de la demi-étendue estimée pour la température T2 (en °C)
a_TF = ……………………..         # Renseigner la valeur de la demi-étendue estimée pour la température TF (en °C)

# Saisie du nombre N d'expériences numériques à simuler pour la méthode de Monte-Carlo :
N = ……………………..            # Renseigner le nombre d'expériences à simuler

# Tirage de valeurs des grandeurs physiques mesurées :
m1s=rd.uniform(m1-a_m1,m1+a_m1,N)        # Formule qui simule N valeurs de m1 dans l'intervalle [m1 – a(m1) ; m1 + a(m1)]
m2s=rd.uniform(m2-a_m2,m2+a_m2,N)        # Formule qui simule N valeurs de m2 dans l'intervalle [m2 – a(m2) ; m2 + a(m2)]
T1s=rd.uniform(T1-a_T1,T1+a_T1,N)        # Formule qui simule N valeurs de T1 dans l'intervalle [T1 – a(T1) ; T1 + a(T1)]
T2s=rd.uniform(T2-a_T2,T2+a_T2,N)        # Formule qui simule N valeurs de T2 dans l'intervalle [T2 – a(T2) ; T2 + a(T2)]
TFs=……………………………………………………………………………  # Formule qui simule N valeurs de TF dans l'intervalle [TF – a(TF) ; TF + a(TF)]

# Formule qui calcule la capacité thermique C_cal du calorimètre à partir de c_eau et des valeurs simulées m1s, m2s, T1s, T2s et TFs :
C_cal = ……………………………………………………………………………………………………………………………………………

# Formule qui calcule la valeur moyenne de C_cal et son incertitude à partir des N expériences numériques aléatoires :
C_cal_moy= np.mean(C_cal)        # Valeur moyenne des N valeurs simulées de C_cal
u_C_cal=np.std(C_cal,ddof=1)     # Ecart-type des N valeurs simulées de C_cal

# Formules qui affichent la valeur moyenne de µ et son incertitude :
print('C_cal_moy=', …………………… , 'J/K' )    # Affiche la valeur moyenne des N valeurs simulées de C_cal avec son unité
print('u(C_cal)=', …………………… , 'J/K' )     # Affiche l'incertitude (égale ici à l'écart-type) des N valeurs simulées de C_cal avec son unité
```

✍7- Exécuter le programme Python puis annoncer alors la valeur de C_{cal} en l'accompagnant de son incertitude-type $u(C_{cal})$ avec un nombre de chiffres significatifs raisonnable.

II- CAPACITE THERMIQUE C_S D'UN SOLIDE

1) Protocole expérimental

On souhaite déterminer la capacité thermique massique c_s d'un solide métallique. Pour cela, procéder selon le protocole ci-dessous.

- *Si ce n'est déjà fait, plonger la sonde de température dans le vase calorimétrique contenant déjà, grâce à la manipulation du* I-, *une masse d'eau* $m_1 + m_2$, *soit* m_3 = __________.
- *Si vous n'avez pas quitté Latis Pro, lancer directement une acquisition en appuyant sur la touche* **F10** ; *sinon, relancez Latis Pro et programmez de nouveau l'acquisition avec les mêmes paramètres que* dans le **I-2**.
- *Dès le lancement de l'acquisition, agiter régulièrement le contenu du calorimètre en soulevant et en abaissant l'agitateur mécanique pour homogénéiser le système pendant environ 2 minutes.*
- *Pendant ce temps, aller chercher le cylindre de votre choix sur la paillasse du professeur, et relever la température* T_C *de l'eau du bain thermostaté dans lequel il trempe depuis plusieurs dizaines de minutes.* ➡ T_C = _________
- ***Sans perdre de temps***, *retirer le bouchon situé sur le couvercle du calorimètre, déposer délicatement le solide au milieu du vase et replacer le bouchon. Agiter alors régulièrement pour homogénéiser la température de l'eau et observer l'évolution de T.*
- *Une fois l'acquisition terminée, retirer le solide de l'eau et déterminer sa masse* m_C : ➡ m_C = ________

⏩ *Repérer graphiquement les différentes températures suivantes à l'aide de l'outil « Réticule » ou « Pointeur » :*

- *Température* T_1 *de l'eau et du calorimètre,* *juste avant introduction du cylindre chaud* : ➡ T_3 = _________
- *Température* T_F *la plus haute atteinte par le mélange* : ➡ T_F = _________

3) Exploitation des résultats

8- Par analogie avec la partie **I-**, quel système est-il conseillé d'étudier ici ?

9- Appliquer le premier principe de la thermodynamique à ce système et en déduire la relation entre m_C, m_3, T_3, T_C, T_F, C_{cal}, c_{eau} et c_S . Expliquer toutes les simplifications réalisées.

10- En déduire l'expression de la capacité thermique massique c_S du solide étudié en fonction de c_{eau}, C_{cal}, m_3, m_C, T_3, T_C et T_F. Faire l'application numérique.

11- Compléter le programme Python suivant afin qu'il permette de déterminer la valeur de l'incertitude sur c_S par une simulation de Monte-Carlo.

```
# Définition des grandeurs physiques :
m3 = .................                  # Renseigner la valeur de la masse d'eau présente dans le calorimètre (en kg)
mc = .................                  # Renseigner la valeur de la masse du cylindre métallique utilisé (en kg)
T3 = .................                  # Renseigner  la valeur de la température initiale de l'eau et du calorimètre (en °C)
Tc = .................                  # Renseigner  la valeur de la température initiale du cylindre métallique (en °C)
TF = .................                  # Renseigner  la valeur de la température finale du système (en °C)
c_eau = .................               # Renseigner la valeur de la capacité thermique massique de l'eau (en J/K/kg)
C_calo = .................              # Renseigner la valeur de la capacité thermique du calorimètre (en J/K)
uC_calo = .................             # Renseigner la valeur de l'incertitude obtenue sur la capacité thermique du calorimètre dans la partie I- (en J/K)

# Définition des demi-étendues estimées :
a_m3= .................                 # Renseigner la valeur de la demi-étendue estimée pour la masse m3 d'eau (en kg)
a_mc = .................                # Renseigner la valeur de la demi-étendue estimée pour la masse mc du cylindre (en kg)
a_T3 = .................                # Renseigner la valeur de la demi-étendue estimée pour la température T3 (en °C)
a_Tc = .................                # Renseigner la valeur de la demi-étendue estimée pour la température Tc (en °C)
a_TF = .................                # Renseigner la valeur de la demi-étendue estimée pour la température TF (en °C)
a_C_calo = uC_calo*np.sqrt(3)           # Valeur de la demi-étendue estimée pour la capacité thermique C(calo) du calorimètre (en J/K)

# Saisie du nombre N d'expériences numériques à simuler pour la méthode de Monte-Carlo :
N = .................                   # Renseigner le nombre d'expériences à simuler

# Tirage de valeurs des grandeurs physiques mesurées :
m3s=rd.uniform(m3-a_m3,m3+a_m3,N)       # Formule qui simule N valeurs de m3 dans l'intervalle [m3 – a(m3) ; m3 + a(m3)]
mcs=.........................................................................   # Formule qui simule N valeurs de mc dans l'intervalle [mc – a(mc) ; mc + a(mc)]
T3s=rd.uniform(T3-a_T3,T3+a_T3,N)       # Formule qui simule N valeurs de T3 dans l'intervalle [T3 – a(T3) ; T3 + a(T3)]
Tcs=rd.uniform(Tc-a_Tc,Tc+a_Tc,N)       # Formule qui simule N valeurs de Tc dans l'intervalle [Tc – a(Tc) ; Tc + a(Tc)]
TFs=rd.uniform(TF-a_TF,TF+a_TF,N)       # Formule qui simule N valeurs de TF dans l'intervalle [TF – a(TF) ; TF + a(TF)]
C_calos=rd.uniform(C_calo-a_C_calo, C_calo+a_C_calo,N)   # Formule qui simule N valeurs de Ccalo dans l'intervalle [Ccalo – a(Ccalo) ; Ccalo + a(Ccalo)]

# Formule pour calculer la capacité thermique massique c_s du solide à partir de c_eau et des valeurs simulées m3s, mcs, T3s, Tcs, TFs et C_calos :
c_s = ..............................................................................................................................................................

# Formule qui calcule la valeur moyenne de c_s et son incertitude à partir des N expériences numériques aléatoires :
c_s_moy=...........................................................................   # Valeur moyenne des N valeurs simulées de c_s
u_c_s=.............................................................................   # Ecart-type des N valeurs simulées de c_s

# Formules qui affichent la valeur moyenne de c_s et son incertitude :
print('c_s_moy=', ......................... , 'J/K/kg' )   # Affiche la valeur moyenne des N valeurs simulées de c_s avec son unité
print('u(c_s)=', ......................... , 'J/K/kg')     # Affiche l'incertitude (égale ici à l'écart-type) des N valeurs simulées de c_s avec son unité
```

12- Exécuter ce programme Python puis annoncer la valeur de c_S en l'accompagnant de son incertitude-type $u(c_S)$ avec un nombre de chiffres significatifs raisonnable.

13- Comparer à la valeur mentionnée dans les tables pour les solides :

$c_{aluminium} = 897\ J.K^{-1}.kg^{-1}$; $c_{cuivre} = 385\ J.K^{-1}.kg^{-1}$; $c_{diamant} = 502\ J.K^{-1}.kg^{-1}$;
$c_{fer} = 444\ J.K^{-1}.kg^{-1}$; $c_{laiton} = 377\ J.K^{-1}.kg^{-1}$; $c_{zinc} = 380\ J.K^{-1}.kg^{-1}$;