



PSL 



SORBONNE
UNIVERSITÉ

université
PARIS-SACLAY

Centre interuniversitaire de préparation à l'agrégation de Montrouge

THERMOMÉTRIE

2024-2025



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited. This license does not permit commercial exploitation or the creation of derivative works without specific permission.

Table des matières

1	[1P] Notion d'échelle thermométrique	3
2	Thermomètre à résistance de platine	4
2.1	[1P] Vérification du fonctionnement	4
2.2	[2P] Perturbation par la mesure : auto-échauffement	4
3	[1P] Thermocouples	6
3.1	Effet Seebeck et principe de mesure	6
3.2	Réalisation pratique avec des thermocouples	6
4	[1P] Thermistances	7
5	[1P] Pyromètre optique	7
6	[2P] Principe du thermomètre à gaz	9
7	Propriétés thermiques du cuivre	10
7.1	[1P] Mesure de la conductivité thermique du cuivre -- nouvelle version	10
7.2	[1P] Dilatation thermique d'un barreau de cuivre	11
8	Annexes	12
8.1	Principe d'un thermocouple	12
8.2	[AP] Propriétés thermodynamiques du caoutchouc	12

Bibliographie :

- Rocard, Yves (Masson) : Thermodynamique
- Callen : Thermodynamics
- Bertin, Faroux, Renault (Dunod) : Thermodynamique
- Faye : Thermodynamique
- Labether : Mesures thermiques ; températures et flux. Très complet, beaucoup d'idées.
- Olivier, Gié (TEC&DOC) : Thermodynamique
- Quinn : Temperature
- Asch, Georges (Dunod) : Les capteurs en instrumentation industrielle
- Diu, Guthmann, Lederer, Roulet (Hermann) : Thermodynamique (informations sur l'EIT-90 (annexe))

1 [1P] Notion d'échelle thermométrique

(Voir Quinn, app. 2, ou <http://www.bipm.org>, ou Diu)

Il existe plusieurs définitions de la température thermodynamique (gaz parfait, rayonnement du corps noir, rendement thermodynamique d'une machine ditherme réversible...) toutes équivalentes. Cependant, leur mise en œuvre n'est pas simple, et n'est pas à la portée d'un laboratoire moyen. Pour cette raison, on mesure dans la vie courante la température de manière pratique à l'aide de **l'échelle internationale de température** de 1990 (EIT-90) définie comme suit :

- le kelvin, symbole K, est **l'unité** de température thermodynamique du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la constante de Boltzmann, k , égale à $1,380649 \cdot 10^{-23}$ lorsqu'elle est exprimée en $J \cdot K^{-1}$. Autrement dit, un kelvin est égal au changement de la température thermodynamique résultant d'un changement de l'énergie thermique kT de $1,380649 \cdot 10^{-23}$ J.
- on établit une liste de températures réalisables expérimentalement (dont les températures thermodynamiques ont été mesurées avec précision) et auxquelles on fixe des valeurs numériques. Ce sont *les points fixes de définition* de l'échelle.
- on définit la température T_{90} de l'EIT-90 suivant la gamme de température considérée :
 - entre 0,65 K et 5,0 K, T_{90} est définie au moyen des relations entre pression de vapeur saturante et température de l'hélium 3 et de l'hélium 4.
 - entre 3,0 K et le point triple du néon (24,5561 K), T_{90} est définie à l'aide du thermomètre à gaz à hélium étalonné à trois points fixes de définition.
 - entre le point triple de l'hydrogène (13,8033 K ou $-259,3467^\circ\text{C}$) et le point de congélation de l'argent (1234,93 K ou $961,78^\circ\text{C}$), T_{90} est définie à l'aide du thermomètre à résistance de platine étalonné à une série de points fixes de définition.
 - au-dessus du point de congélation de l'argent, T_{90} est définie au moyen de la loi du rayonnement de Planck (corps noir).
- par souci de commodité, on définit des réalisations pratiques approchées de l'EIT-90, mettant par exemple en œuvre des thermomètres à résistance de germanium ou de platine, des thermomètres à pression de vapeur saturante, des thermocouples à base de platine... Des recommandations d'usage sont données, ainsi que des formules de conversion à utiliser pour convertir les grandeurs mesurées en température.

À partir de ces instruments, on peut étalonner toutes sortes de thermomètres¹ (à dilatation de mercure, à thermocouple, à thermistance...). Dans ce TP, nous vous proposons de *repérer* des températures par différents procédés. Un exemple de point fixe (ne faisant pas partie des points fixes de définition) est le point triple de l'azote ; il sera étudié dans le TP Transitions de Phase.

On propose dans ce TP une illustration grossière de deux instruments utilisés pour la définition de l'EIT-90 : thermomètre à gaz et résistance de platine (on ne traite pas ici le cas des basses températures). On présente également une illustration de deux instruments de réalisation pratique de l'EIT-90 : le pyromètre optique et le thermocouple. On mentionne aussi les thermistances, largement répandues en raison de leur grande sensibilité. Différentes applications liées à la thermométrie sont également étudiées.

Pour toutes ces expériences, il est essentiel de garder à l'esprit que les transferts thermiques sont lents, et les pertes thermiques inévitables ; on s'efforcera :

- **d'agiter le liquide** dont on veut repérer la température (agitateur en verre ou magnétique) afin de minimiser les gradients thermiques ;
- **d'éviter les ponts thermiques** (fuites thermiques via un objet métallique par exemple).

1. Les thermomètres sont divisés en deux grandes catégories. Pour les thermomètres dits "primaires", la grandeur qu'on mesure est une fonction parfaitement connue de la température, et permet de remonter directement à celle-ci. Pour les thermomètres dits "secondaires", la grandeur mesurée ne permet pas de recalculer directement la température, à cause du manque de contrôle du système physique utilisé, ou à défaut d'une théorie complète. Ceux-ci nécessitent alors une calibration ou un étalonnage.

On s'intéressera aux différentes propriétés des thermomètres utilisés : la plage de fonctionnement, la linéarité, la sensibilité (si X est la quantité mesurée, alors il s'agit de $(1/X)(dX/dT)$) et la justesse (écart entre les valeurs mesurée et vraie).

Remarque : Rigoureusement, une mesure de la température repose sur le **principe zéro de la thermodynamique** et la définition de l'**équilibre thermique**. Les procédures expérimentales rigoureuses pour obtenir un équilibre thermique du système que l'on étudie sont d'isoler le système dans un calorimètre ou d'utiliser un thermostat avec lequel le système est en équilibre thermique (cf. ensemble canonique par exemple). Dans la plupart des manipulations qui suivent, nous ne sommes pas rigoureusement dans cette situation expérimentale et l'équilibre thermique est approché.

Il faut pouvoir justifier que l'équilibre thermique est assez bien approché dans l'exploitation des résultats, en gardant à l'esprit qu'on se réfère ici aussi bien à l'équilibre thermique du système (lors qu'on le chauffe ou qu'on le laisse refroidir), **mais aussi** à l'équilibre thermique entre le système et le capteur qui sert de thermomètre.

2 Thermomètre à résistance de platine

2.1 [1P] Vérification du fonctionnement

Utilisée pour la définition de l'EIT-90, la sonde à résistance de platine permet également d'illustrer les précautions à prendre pour la thermométrie.

La sonde, fragile, est constituée d'un fil de platine très fin et calibré. On dispose en général d'une «Pt100» ($R_0 = 100 \Omega$ à 0°C) ou d'une «Pt1000» ($R_0 = 1000 \Omega$ à 0°C). La résistance de ce fil est tabulée en fonction de la température (cf. notice N455). La sonde est montée dans un support assurant un bon contact thermique avec le corps dont la température est à mesurer. Pour cette première expérience, on utilisera la sonde la plus robuste, montée dans un support en cuivre et en Teflon.

Il faut limiter le courant de mesure pour éviter d'abîmer la sonde, et pour perturber le moins possible la mesure à cause de l'auto-échauffement par effet Joule. Dans la notice, le courant conseillé est de 1 mA. On trouvera également dans la notice le coefficient d'autoéchauffement permettant de faire les corrections éventuelles.

Pour déterminer une température, mesurer la résistance R_0 dans le thermostat de référence (mélange eau-glace à 0°C) puis mesurer la résistance R pour la température T inconnue. Le rapport R/R_0 permet d'accéder à la température au moyen de la table ou de la formule donnée dans la notice. Vérifier son fonctionnement en mesurant par exemple la température de l'eau ou de l'azote en ébullition.

La mesure de la résistance de la sonde se fait à l'aide d'une mesure quatre points (il faut être à l'aise sur son avantage par rapport à la mesure classique à deux points dite « courte dérivation »). On pourra

- utiliser pour cela la fonction quatre points des multimètres HP34401A (mode « $\Omega 4W$ »);
- sinon appliquer une tension continue aux bornes de la sonde de platine, mesurer le courant avec un ampèremètre et la tension à ses bornes avec un voltmètre dans une configuration quatre points. Attention, afin de limiter le courant, il est important de placer une autre résistance R' en série avec la sonde.

2.2 [2P] Perturbation par la mesure : auto-échauffement

Le phénomène d'auto-échauffement de la sonde de température est un problème

- soit parce qu'il peut conduire à une mesure erronée de la température comme nous l'illustrons plus bas,
- soit parce qu'il vient localement chauffer le système dont on cherche à mesurer la température, ce qui peut poser problème par exemple dans des cryostats où tout chauffage supplémentaire implique une surconsommation de liquide cryogénique (voir mesure de la chaleur latente de l'azote).

Pour mettre en évidence le phénomène d'auto-échauffement, on utilise une Pt100 pour mesurer la température de l'air ambiant, qui contrairement aux liquides évacue très mal la chaleur. **On prendra soin d'utiliser la petite**

sonde Pt100, sans support métallique. Ce dernier lui confère en effet une plus grande capacité calorifique, ainsi qu'un meilleur contact thermique avec l'environnement, qui limitent les effets qu'on cherche à observer ici.

On alimente la Pt100 avec une source de courant continu, utilisée en contrôle de courant. Pour cela, on branche en série avec la source de tension :

- un boîtier AOIP $\times 1000\Omega$,
- un ampèremètre,
- la sonde Pt100.

On mesure la tension aux bornes de la Pt100 avec un voltmètre. Courant et tensions sont mesurée par la méthode des 4 fils.

Un multimètre «usuel» MX-579 suffit aussi bien pour le voltmètre que pour l'ampèremètre. La résistance $\times 1000\Omega$ permet de s'assurer qu'on n'envoie pas plus que quelques mA dans la Pt100. Dans cette expérience, on se limitera à un courant de 8 mA. Adapter la valeur de la résistance du boîtier AOIP pour que le courant max qui circule dans la Pt100 soit de 8 mA.

Remarque : Nos sources à courant continu sont souvent faites pour délivrer des ampères ou des fractions d'ampère, et le réglage de la source en contrôle de courant peut s'avérer délicat pour les plus petits courants. On peut dans ce cas brancher en parallèle de la source un rhéostat de 100Ω qui agit comme un diviseur de courant. Dans ce cas, on ne passera pas sous les $0,5\text{mA}$: avec $\approx 100\mu\text{A}$, les valeurs de résistance obtenues augmentent quand le courant diminue. Ces valeurs absurdes sont probablement dues aux bruits électriques non négligeables à ces faibles courants. On peut alors utiliser une résistance de 100Ω à la place du rhéostat pour retrouver des valeurs raisonnables. Toutefois, ces résistances sont rarement compatibles avec des courants plus élevés et ne peuvent pas servir de diviseur de courant quand on applique quelques mA dans la Pt100.

Mesurer, pour plusieurs valeurs de courants (entre 0,5 et 8mA), la tension aux bornes de la Pt100 et donc sa résistance. Il faut attendre presque une minute entre chaque modification de courant pour s'assurer que la résistance a atteint un régime stationnaire. On aura donc intérêt à mesurer la résistance en augmentant progressivement le courant électrique. Tracer R en fonction de I et faire un ajustement par une loi quadratique : $R = R_0 + \alpha I^2$, caractéristique de l'effet Joule. En utilisant la notice (et la formule fournie), tracer la température mesurée T en fonction de la puissance P dissipée par effet Joule dans la Pt100. On constate que $T = T_0 + \beta P$. Le coefficient β est le coefficient d'auto-échauffement. Il se situe typiquement entre 0.02 et 0.3K/mW.

Remarque : Pour distinguer une modification de la valeur de la résistance due à l'auto-échauffement d'une variation due à un changement de la température dans la pièce, on veillera à :

- protéger la Pt100 des courants d'air,
- placer à proximité une autre Pt100 qu'on mesurera avec un multimètre HP, et qui servira de mesure de la température de l'air ambiant.

Le courant de mesure conseillé pour les Pt100 est de 1mA. Intercaler un ampèremètre dans la ligne de mesure du multimètre HP (relier l'ampèremètre à une des deux bornes rouges du HP) pour constater que le courant utilisé est bien de 1 mA. D'après vos mesures précédentes, estimer l'erreur par auto-échauffement sur la mesure de la température en utilisant le multimètre HP.

[2P] Temps de réponse de la Pt100 On peut mesurer le temps que met la Pt100 pour atteindre son régime stationnaire. Pour cela, laisser la Pt100 non alimentée pendant quelques minutes, puis mesurer sa résistance en fonction du temps par la méthode précédente après avoir établi un courant de 5 mA. En faire un ajustement par une loi exponentielle. Justifier alors pourquoi qu'il fallait attendre quasiment une minute dans la mesure de $R(I)$ précédente.

3 [1P] Thermocouples

3.1 Effet Seebeck et principe de mesure

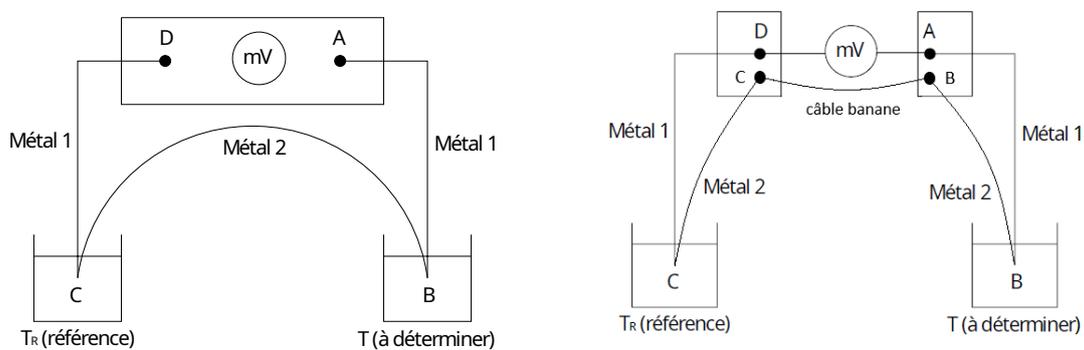
Leur fonctionnement est basé sur l'effet Seebeck (effet thermoélectrique) : un gradient de température dans un métal en circuit ouvert génère une différence de potentiel. En effet, en régime linéaire, et pour des gradients suffisamment petits, on a

$$\vec{j}_e = -\sigma \vec{\nabla}V + L_{eQ} \vec{\nabla}T, \quad (1)$$

où σ est la conductivité électrique, le terme en $\vec{\nabla}T$ provenant de la théorie de la réponse linéaire. Dans le cas où le circuit est ouvert, il n'y a pas de courant électrique, et la relation donne alors

$$\vec{\nabla}V = \varepsilon \vec{\nabla}T, \quad (2)$$

où ε est le coefficient thermoélectrique du métal. Il sera supposé par la suite indépendant de la température sur les plages étudiées. Pour une introduction plus complète, on pourra se référer par exemple au complément 9.B. du D.G.L.R de Thermodynamique, ou à l'annexe du présent TP.



a) Principe d'utilisation des thermocouples. b) Réalisation pratique du schéma précédent.

FIGURE 1 – Utilisation des thermocouples.

La figure (a) ci-dessus illustre une réalisation de principe d'une mesure avec l'effet Seebeck, qui repose sur trois fils (deux d'un métal 1 et un d'un métal 2) et un bain de température connue avec précision (température de référence T_R). Les points A et D étant à la température ambiante T_{amb} , on peut intégrer la différence de potentiel le long du circuit, et on obtient

$$(V_A - V_D) = \varepsilon_1(T_{amb} - T) + \varepsilon_2(T - T_R) + \varepsilon_1(T_R - T_{amb}), \quad (3)$$

soit

$$\Delta V = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)(T_R - T). \quad (4)$$

On comprend bien la nécessité d'utiliser deux métaux différents. Pour un couple donné de métaux, des tables donnent la correspondance entre ΔV et T .

3.2 Réalisation pratique avec des thermocouples

En pratique, on ne travaille pas avec des fils métalliques isolés, mais directement avec des thermocouples, qui sont constitués de deux fils homogènes de métaux ou d'alliages différents réunis à l'une de leurs extrémités pour former la soudure de mesure. Ces thermocouples peuvent être branchés à des boîtiers permettant de relever le potentiel des deux métaux avec des câbles bananes. On notera que les broches de branchement des thermocouples ne sont pas symétriques, pour pouvoir identifier de manière unique le métal relié à chaque contact. **Il sera donc important de s'assurer que les branchements sont bien effectués dans le bon sens, et de ne surtout pas les forcer.**

La figure (b) ci-dessus illustre comment réaliser la mesure de principe que l'on vient de décrire, mais avec de tels thermocouples. Pour cela, on utilise deux thermocouples, qu'on branche à deux boîtiers avec connecteurs bananes. On mesure alors la tension aux bornes d'un des métaux (bornes AD, pour le métal 1 ici), tout en reliant entre eux

les câbles de l'autre métal (bornes CD, pour le métal 2). En pratique, ces boîtiers de connexion sont eux-même à température ambiante, et il n'y a donc pas d'effet Seebeck aux niveau des connecteurs bananes : on comprend donc qu'avoir la connexion CB effectuée avec le métal 2, ou bien avec tout autre métal, ne change pas la tension mesurée par rapport à la mesure de principe de la figure (a).

Les thermocouples utilisés en TP sont des thermocouples chromel-alumel. Le chromel est un alliage à base de nickel et de chrome, et l'alumel un alliage à base de nickel et d'aluminium. C'est un thermocouple très stable dont la loi $\Delta V(T)$ est très proche d'une loi linéaire (pouvoir thermoélectrique d'environ $40 \mu\text{V.K}^{-1}$). On l'utilise de -200°C à 200°C . Ces thermocouples correspondent aux thermocouples de « type K ».

Effectuer les manipulations suivantes :

- Vérifier la tension obtenue quand les deux soudures plongent dans le même bain de référence. Que se passe-t-il si on inverse le branchement d'une des soudures ?
- Mesurer par exemple la température d'ébullition de l'eau avec la température de référence égale à 0°C et un voltmètre, en utilisant la table du Handbook (entrée «thermocouple» de l'index).

Dans le cadre d'un montage, il est possible d'étalonner un thermocouple à l'aide d'une sonde Pt 100 et d'un bain thermostaté.

Remarque : les thermomètres **électroniques** à thermocouple possèdent une thermistance interne, qui fournit une mesure de la température ambiante, et permet ainsi de s'affranchir du bain de référence. De plus, la tension est convertie en température à l'aide d'une formule donnant $\varepsilon_1(T) - \varepsilon_2(T)$ (voir notice).

4 [1P] Thermistances

Un très grand nombre de thermomètres d'utilisation courante utilisent des thermistances comme capteur, car ils sont peu coûteux et qu'un simple mesure de résistance permet d'obtenir une mesure de la température. Les thermistances sont des matériaux semi-conducteurs dont la résistance varie approximativement suivant la loi

$$R = A e^{B/T}. \quad (5)$$

Vérifier cette loi entre 0°C et 100°C , par exemple avec un petit béccher d'eau portée à ébullition qu'on fait refroidir en le plongeant dans de la glace (utiliser si possible un agitateur magnétique) ; on relève alors la température à l'aide d'un des thermomètres précédent et la résistance de la thermistance (voir aussi le polycopié «semi-conducteurs» pour une autre vérification de cette loi).

Elles sont aussi très utilisées dans les mesures de basses températures (on ne propose rien ici sur ce sujet) ainsi que dans les mesures courantes car elles ont une grande sensibilité. La sensibilité est évaluée par le coefficient de température, défini par :

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}. \quad (6)$$

Calculer et comparer la sensibilité de la résistance de platine et de la thermistance, par exemple à 0°C et 100°C . Le caractère exponentiel de la variation de la résistance de la thermistance en fonction de la température explique cette grande sensibilité. Cependant, la plage de température où celle-ci est valide est limitée, ce qui peut restreindre son utilisation.

5 [1P] Pyromètre optique

À haute température, dans l'EIT-90, la température d'un corps noir est définie à l'aide de la formule reliant sa densité spectrale de luminance énergétique au voisinage d'une longueur d'onde laissée au choix de l'expérimentateur.

Par ailleurs, on peut utiliser des détecteurs infrarouges à large bande pour la réalisation pratique de l'EIT-90. On illustre ici le principe du «pyromètre à radiation totale» :

- pyromètre = instrument qui sert à mesurer les hautes températures ;
- à radiation totale : le détecteur est la thermopile, dont on aura ôté le filtre anti-thermique.

La thermopile est constituée par une succession de thermocouples, placés en série électriquement et en parallèle thermiquement, comme schématisé sur la figure 2.

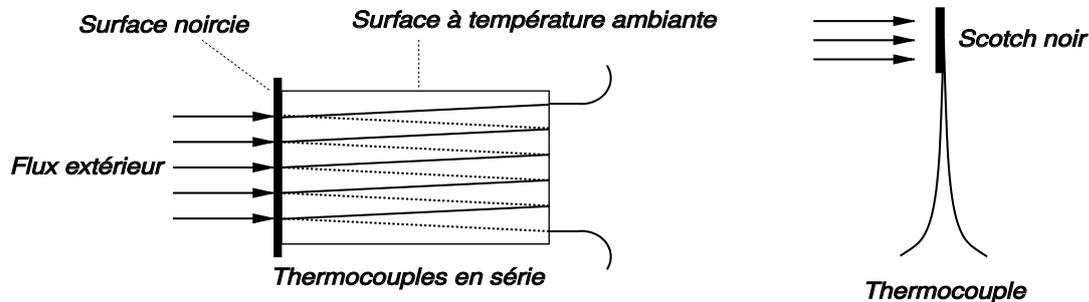


FIGURE 2 – A gauche : schéma de principe de la thermopile ; à droite : illustration expérimentale.

Le principe de fonctionnement de la thermopile repose sur la mesure de la différence de température $\Delta T_{\text{surf}} = T_{\text{surf}} - T_{\text{amb}}$ entre ses surfaces intérieure et extérieure. En effet, une fois un régime permanent atteint, le flux lumineux incident chauffant la surface intérieure est entièrement compensé par les pertes thermiques proportionnelles à ΔT_{surf} .² Tous les thermocouples étant disposés entre T_{surf} et T_{amb} , la différence de potentiel aux bornes de chacun d'eux est bien reliée à cette différence de température, et les relier en série électriquement permet de sommer leurs tensions, donnant :

$$V_{\text{thermopile}} \propto \Delta T_{\text{surf}} \propto \Phi_{\text{incident}}, \quad (7)$$

avec une relation de proportionnalité fournie par le constructeur (sensibilité de 0,16 mV/mW).

On propose d'effectuer ici une mesure relative de la température d'un corps noir (ce qui correspond aux techniques réelles) à l'aide du montage présenté figure 3.

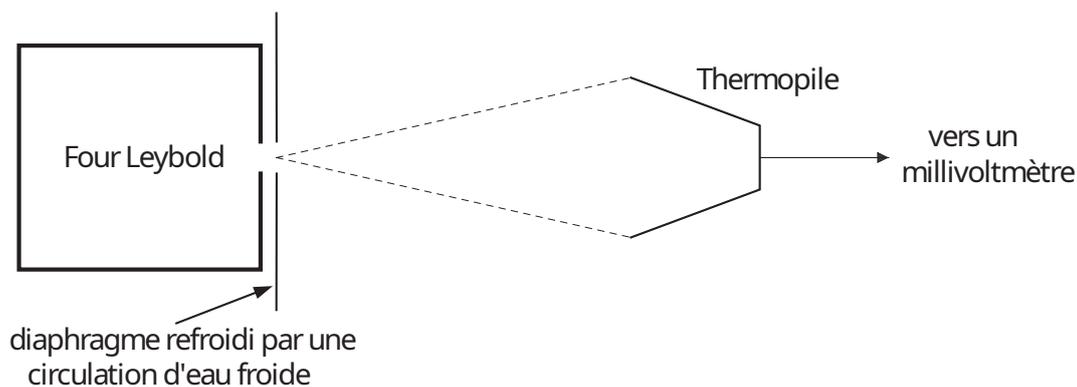


FIGURE 3 – Principe d'utilisation du pyromètre optique.

En pratique, on réalise un corps noir de la manière suivante : on utilise un four aux parois noircies percé d'une petite ouverture : tout rayon incident est piégé dans le four. À l'intérieur, le rayonnement est absorbé et réémis à plusieurs reprises par la paroi interne du four ; une petite partie de ce rayonnement thermostaté est émise par l'orifice. Ce four est porté à la température T , son émission totale est donc proportionnelle à T^4 (loi de Stefan). On

2. On peut en effet écrire le premier principe appliqué à la surface absorbante :

$$C \frac{dT_{\text{surf}}}{dt} = \Phi_{\text{incident}} - G(T_{\text{surf}} - T_{\text{amb}}),$$

où C est la capacité thermique et G la conductance thermique avec l'extérieur. En régime permanent on obtient bien $\Delta T_{\text{surf}} = \Phi_{\text{incident}}/G$.

utilise un détecteur sensible au flux émis par le corps noir. Ce détecteur doit avoir une réponse spectrale plate, d'où le choix d'une thermopile.

Le flux mesuré par la thermopile est alors la somme du flux émis par le four et des autres sources de rayonnement captés par le récepteur, ce qui donne une tension

$$V_{\text{thermopile}} = aT^4 + b, \quad (8)$$

où a est un facteur qui dépend de la sensibilité globale de la thermopile et de la géométrie de l'expérience, et qui est proportionnel à la constante de Stefan σ .

Manipulation

Intercaler un alternostat entre le secteur et le four. **Enlever le filtre anti-thermique de la thermopile**, la placer à environ 10 cm du diaphragme, et **ne plus modifier la géométrie**. Insérer un thermocouple dans le four (sur l'arrière) afin de mesurer sa température. On effectue alors des mesures simultanées de flux sur la thermopile, et de température dans le four grâce au thermocouple. La partie avant du four est refroidie avec une circulation d'eau, pour garder son émission thermique constante (et faible) tout au long de l'expérience. L'exploitation de ces mesures permet d'illustrer la loi de rayonnement du corps noir.

Deux protocoles sont possibles. On peut soit laisser le four chauffer, et prendre des mesures à la volée pendant la descente en température, soit chauffer progressivement (par exemple de 10% en 10% sur l'alternostat) et prendre des mesures quand la température est stabilisée. Le second protocole est plus précis, puisqu'on peut s'assurer que le système est bien à l'équilibre thermodynamique (en vérifiant notamment que le signal du pyromètre reste constant), et que les temps de réponses des différents capteurs ne peuvent pas fausser la mesure. Il s'agit de la méthode conseillée. Le premier protocole est plus rapide. Il est nécessaire aussi de se poser la question de l'équilibre thermique de la thermopile.

Il est délicat et non recommandé d'essayer de déterminer la constante de Stefan, des facteurs importants dus à la géométrie du système pouvant intervenir. La constante de Stefan est obtenue avec un angle solide de 2π (demi-espace), le facteur géométrique correctif doit évaluer l'angle solide sous lequel la surface du pyromètre voit l'orifice du four par lequel est émis le rayonnement. Par ailleurs, le four utilisé n'est pas un corps noir parfait et l'émissivité thermique n'est pas exactement 1.

6 [2P] Principe du thermomètre à gaz

On utilise la relation de proportionnalité entre la pression de l'air et la température à volume constant, l'air étant assimilé à un gaz parfait. On peut ainsi mesurer une température quelconque (ici la température d'ébullition de l'eau) en la comparant à une température de référence (ici celle de la glace fondante).

Le matériel est constitué d'un ballon en verre relié à un manomètre absolu électronique. Cette expérience est faussée en cas de présence d'eau liquide dans le ballon. En effet, la pression de vapeur saturante varie très vite avec la température : une goutte d'eau, ou même un peu de buée, peut entraîner à 100°C une surpression de l'ordre de 1 bar ! On recommande donc de sécher avec un sèche-cheveux l'intérieur du ballon et son bouchon avant de procéder à la manipulation. D'autre part, pour éliminer l'erreur (faible) qui apparaît vers 0°C en raison de l'humidité de l'air ambiant, on a placé dans le flacon un peu de dessiccateur (cristaux bleus SILICAGEL).

Pour éviter les surpressions, il faut fermer le ballon à chaud. Pour cela, débrancher l'extrémité du tuyau raccordée au manomètre. Insérer le bouchon dans le ballon, et plonger ce dernier dans l'eau bouillante. Après thermalisation, le fermer en reconnectant le tuyau au manomètre. Plonger ensuite le ballon dans la glace fondante et mesurer sa pression après thermalisation (ne pas attendre trop longtemps pour éviter les fuites). Dans tous les cas, le fixer avec une pince de manière à ce qu'il soit immergé le plus possible.

On pourra estimer l'erreur systématique due au volume résiduel qui n'est pas porté à la température de mesure (volume de la sonde du manomètre (environ 0,3 ml) + volume du tuyau de liaison).

NB : dans les conditions de température et de pression accessibles à l'agreg, les écarts à l'idéalité (gaz parfait) ne peuvent être mis en évidence car ils restent en deçà de la précision des mesures.

7 Propriétés thermiques du cuivre

7.1 [1P] Mesure de la conductivité thermique du cuivre -- nouvelle version

Référence : Fruchart et al.

On s'intéresse dans ce paragraphe au phénomène de conduction thermique, avec pour objectif de mesurer la conductivité thermique d'un métal. On se place dans une situation unidimensionnelle dans une longue barre de métal où l'équation de diffusion thermique s'écrit

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (9)$$

avec $T(x, t)$ la température à la position x à l'instant t dans la barre. Le coefficient de diffusion introduit s'écrit $D = (\lambda)/(\rho c)$ avec ρ la masse volumique du métal et c sa capacité thermique massique. Il est possible de mesurer λ grâce à l'étude d'un régime stationnaire où une loi affine de température s'est installée dans le barreau. Néanmoins, nous décrivons ici une méthode en régime forcé sinusoïdal.

À partir de l'équation de diffusion, on peut montrer qu'un forçage sinusoïdal à une extrémité du métal en $x = 0$ engendre un effet de peau thermique (ou effet cave) dans la barre métallique. Le profil de température s'écrit

$$T(x, t) = T_0 + \Delta T e^{-x/\delta} \sin\left(\omega t - \frac{x}{\delta}\right), \quad (10)$$

où $\delta = \sqrt{\frac{2D}{\omega}} = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi \rho c f}}$ est l'épaisseur de peau, grandeur homogène à une longueur (f étant la fréquence de forçage). Ainsi, en regardant à différentes distances x , on observera à la fois le déphasage de l'onde, ainsi que son atténuation au cours de sa pénétration dans le métal, sur une distance caractéristique δ .

Protocole :

- On utilise l'ensemble ENSP 4496, décrit dans la notice N 325.
- Le chauffage correspond à une amplitude sinusoïdale de période 300s.
- Récupérer trois ou quatre oscillations (~20min d'expérience) sur QtiPlot.
- Afin d'en déduire l'épaisseur de peau δ , plusieurs options s'offrent à nous : 1) en mesurant l'atténuation de l'amplitude au cours de la propagation 2) en mesurant le déphasage entre différents points.
 - Une façon rapide de procéder est de repérer au réticule les valeurs $T_{\max}(x_i)$ et $T_{\min}(x_i)$ pour les cinq premiers thermocouples i (les deux derniers ayant des signaux très plats, une mesure précise est délicate) d'une oscillation donnée. Puis de tracer $\ln(T_{\max} - T_{\min})$ en fonction de x_i . Le modèle prévoit un graphe affine, de coefficient directeur $-1/\delta$.
 - On peut faire de même avec les phases à un instant donné de chacune des oscillations et tracer φ_i en fonction de x_i .
 - Une façon plus longue mais plus précise est d'ajuster chacune des courbes $T(x_i, t)$ sur les quelques oscillations et d'en retirer à la fois une valeur précise de l'amplitude et de la phase. Puis de tracer les courbes précédentes.

Données :

- Masse volumique du cuivre : $\rho = 8,96 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$.
- Capacité thermique massique du cuivre $c = 385 \text{ J/kg/K}$.
- Valeur tabulée de la conductivité thermique du cuivre à 25°C : $\lambda = 401 \text{ W/m/K}$.
- Longueur de la barre : $50.0 \pm 0.2 \text{ cm}$.
- Diamètre de la section transverse (disque) : $20.0 \pm 0.5 \text{ mm}$.
- Position des thermocouples sur la barre : voir schéma ci-dessous.
- Thermocouple : Type T (Cuivre / Constantan).

Remarques importantes

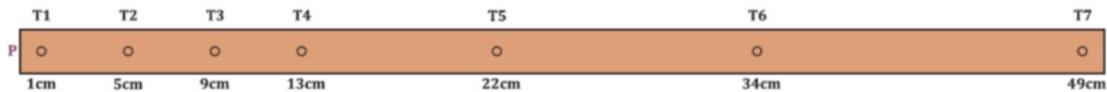


FIGURE 4 – Position des thermocouples sur la barre.

- La fréquence d'excitation est choisit telle que l'approximation sous-jacente de milieu semi-infini est validée, donc telle que la longueur de la barre est au moins 5 fois plus grande que la distance caractéristique δ . Cette hypothèse sera à vérifier a posteriori.
- Les conditions aux limites sont à bien appréhender : ici le module Peltier va imposer un flux thermique en $x = 0$.
- Les pertes latérales sont très limitées, d'abord grâce à une mousse isolante, mais aussi puisque l'amplitude ΔT est inférieure à 10 K (la situation est différente de celle décrite dans le Fruchart à cet égard).
- Le module Peltier chauffe et va donc créer un effet Joule supplémentaire. On peut lire une remarque dans le Fruchart p.390 à ce sujet. Nous sommes moins concernés ici encore une fois, puisque l'amplitude thermique est nettement plus faible.

Loi de Wiedemann-Franz Rapprocher la valeur trouvée pour la conductivité *thermique* λ de celle trouvée pour la conductivité *électrique* σ (cf. TP *Mesures électriques*). La loi de Wiedemann-Franz (cf. Kittel, *Physique de l'état solide*) indique que : « pour les métaux à des températures pas trop basses, le rapport de la conductivité thermique à la conductivité électrique est directement proportionnel à la température, la valeur de la constante de proportionnalité étant indépendante du métal considéré. » Ce résultat fut très important dans la théorie des métaux car il fut l'une des preuves du modèle du gaz d'électrons. Comparer vos mesures à la valeur attendue pour le rapport

$$\frac{\lambda}{\sigma T} = \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{k_B}{e} \right)^2 = 2.44 \times 10^{-8} \text{ S.I.} \quad (11)$$

7.2 [1P] Dilatation thermique d'un barreau de cuivre

Un objet métallique se dilate lorsqu'on le chauffe. Le but de cette expérience est de mesurer le coefficient de dilatation thermique du cuivre, défini par : $\alpha_L = \frac{1}{L} \left(\frac{dL}{dT} \right)_P$, où L est la longueur du barreau, T la température, et P la pression. Les valeurs tabulées pour le cuivre (valides entre 10 °C et 90 °C) sont $\alpha_L = \alpha_L^0 + 2\alpha_L^1(T - 273.5)$ avec $\alpha_L^0 = 0.1596 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ et $\alpha_L^1 = 0.102 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}$.

Pour réaliser l'expérience, il y a deux règles à respecter impérativement : avoir une température homogène le long du barreau, ce qu'on vérifie grâce à deux thermocouples (placés au centre du barreau et à une extrémité), et minimiser les vibrations durant toute l'expérience, le dispositif permettant de mesurer la longueur du barreau étant **très** sensible (attention, toucher la table de mesure peut perturber les instruments). En pratique, avoir une température homogène impose de travailler pendant le refroidissement du barreau.

L'élément chauffant pouvant supporter une intensité considérable (jusqu'à 12 A), c'est l'alimentation électrique qui est en pratique le facteur limitant. Par ailleurs, à ces intensités l'élément est porté au rouge, et il n'est pas question d'aller jusqu'à des températures aussi hautes. Un bon compromis est de ne pas dépasser 5A. On peut atteindre rapidement une température d'environ 250°C (en 15min). Il faut alors compter 45 min pour redescendre à 100°C. On gagne nettement sur le temps de manipulation en partant d'une température moins élevée.

Protocole expérimental :

Placer les détecteurs en contact avec le barreau lorsqu'il est froid. Commencer à chauffer, sans dépasser 250°C jusqu'à observer une dilatation suffisante, mais sans faire de vraies mesures. Couper le chauffage et attendre l'homogénéisation de la température (à quelques % près). Procéder aux mesures en température décroissante.

(Voir aussi l'expérience « Diffusion de charge à une dimension » -- et le BUP 929, p. 95.)

8 Annexes

8.1 Principe d'un thermocouple

Le potentiel électrochimique des porteurs de charge q dans le champ de température $T(\mathbf{r})$ et de potentiel $V(\mathbf{r})$ vaut :

$$\mu(\mathbf{r}) = \mu(T(\mathbf{r}), V(\mathbf{r})) = \mu^0(T(\mathbf{r})) + qV(\mathbf{r}). \quad (12)$$

Il est uniforme à l'équilibre. Toutefois, hors équilibre, un gradient de température et/ou de potentiel chimique induit un courant de porteurs. La présence d'un voltmètre idéal dans le circuit impose que ce courant est nul. Au voisinage de l'équilibre (théorie de la réponse linéaire), on a :

$$\mathbf{grad} \mu_i = q \varepsilon_i \mathbf{grad} T \quad (13)$$

ce qui définit les coefficients thermoélectriques ε_i des métaux i . On suppose dans la suite que ces coefficients ne dépendent pas significativement de la température (pour plus d'explications voir Callen ou Rocard). Dans le métal 1, aux bornes du voltmètre, supposé isotherme à la température T_{amb} , on a :

$$\mu_A^0 = \mu_D^0. \quad (14)$$

On en déduit :

$$q(V_A - V_D) = \mu_A - \mu_D = (\mu_A - \mu_B) + (\mu_B - \mu_C) + (\mu_C - \mu_D) \quad (15)$$

$$= q\varepsilon_1(T_{\text{amb}} - T) + q\varepsilon_2(T - T_R) + q\varepsilon_1(T_R - T_{\text{amb}}) = q(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)(T_R - T), \quad (16)$$

c'est-à-dire :

$$\Delta V = V_A - V_D = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)(T_R - T) \quad (17)$$

8.2 [AP] Propriétés thermodynamiques du caoutchouc

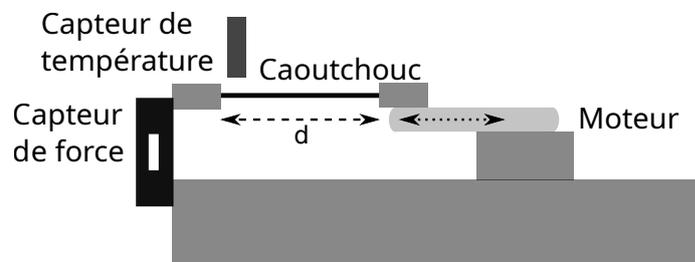


FIGURE 5 – Schéma du dispositif de mesure des propriétés thermodynamiques du caoutchouc.

Introduction La température d'un échantillon de caoutchouc augmente lorsqu'il est étiré et diminue lorsqu'on le détend. Cet effet est appelé effet élastocalorique. À cause des échanges thermiques avec le milieu environnant, notamment l'air, la température de l'échantillon étiré tend vers la température du milieu ambiant si on attend suffisamment.

L'expérience présentée ici permet de mesurer le coefficient élastocalorique du caoutchouc, et d'estimer le coefficient conducto-convectif. La température est mesurée à l'aide d'un thermomètre infrarouge, ce qui permet une mesure sans contact.

Le dispositif expérimental consiste en une bande de caoutchouc (ballon de baudruche en latex naturel) qu'il ne faut pas défaire, d'un moteur pour allonger la bande de caoutchouc, d'un capteur de force qui permet de mesurer la force exercée par le caoutchouc. La température est mesurée à l'aide d'un thermomètre infrarouge relié à un boîtier.

On appelle d la distance entre les mors (plaques qui maintiennent le caoutchouc), et ℓ la longueur de la bande de caoutchouc. Lorsque le caoutchouc est étiré, on a $\ell = d$. Pour une transformation adiabatique réversible, un

allongement $d\ell$ de la bande de caoutchouc provoque un changement de température dT telle que : $dT = (\gamma T / C)d\ell$, où γ est appelé coefficient élastocalorique et C est la capacité thermique de l'échantillon de caoutchouc. Dans la limite des faibles variations de température, mais en prenant en compte les transferts thermiques, on admet que la température du caoutchouc vérifie :

$$C \frac{dT}{dt} - \gamma T_a \frac{d\ell}{dt} = hS(T_a - T) \quad (18)$$

où t est le temps, T_a la température ambiante, S la surface de l'échantillon et où h le coefficient conducto-convectif.

Expériences Commencer par **alimenter le moteur**. Il est ensuite possible d'appliquer une tension continue de consigne (entre 0V et 5V) pour provoquer le déplacement du moteur (regarder la notice). Les mesures de bases consistent à appliquer un échelon de position (déplacement brusque puis arrêt). Pour cela, le plus simple est d'utiliser le bouton on/off situé sur le boîtier du moteur, afin de pouvoir modifier la tension jusqu'à la valeur souhaitée, puis seulement d'appliquer le déplacement.

Placer le capteur infrarouge au-dessus du caoutchouc, près du capteur de force. Le capteur doit être placé le plus proche possible du caoutchouc, tout en évitant que le capteur puisse être touché par le mors lorsque ce dernier se déplace. Brancher le câble du capteur infrarouge sur le boîtier correspondant, et brancher ce boîtier à l'ordinateur en utilisant le câble USB (il n'est pas nécessaire d'ajouter une alimentation externe). Utiliser le programme Python (voir la notice) pour acquérir les données (temps d'acquisition de l'ordre de quelques dizaines de secondes).

Mesurer le coefficient élastocalorique γ . On étudiera la réponse à des excitations aussi proches que possible d'un échelon de position (passage rapide d'une position à une autre). On vérifiera que le signe du changement de température dépend du signe du déplacement.

Remarque : le capteur de température est très sensible, et les changements de température à mesurer sont assez faibles. Il est normal que le capteur réagisse si on approche sa main. Il est conseillé de bouger le moins possible pendant une mesure.

À partir de ces expériences, on peut estimer le coefficient conducto-convectif à partir du temps de décroissance de la perturbation de température.

Autres expériences Avec ce dispositif expérimental, il est aussi possible :

- vérifier la relation de Maxwell $\gamma = \partial F / \partial T|_l$. Pour cela, il faut mesurer la variation de force à distance fixée (par exemple 3,5cm) en fonction de la température. On peut utiliser une lampe pour chauffer le caoutchouc.
- mesurer la raideur du caoutchouc, et mettre en évidence le caractère non-linéaire, et surtout hystérétique de la réponse.