



PSL 



SORBONNE
UNIVERSITÉ

université
PARIS-SACLAY

Centre interuniversitaire de préparation à l'agrégation de Montrouge

PHYSIQUE POUR LES CHIMISTES - PHÉNOMÈNES DE TRANSPORT

2022-2023

Bibliographie :

Table des matières

1	Phénomènes de transport - Expériences qualitatives	3
1.1	Diffusion thermique	3
1.2	Diffusion particulaire	3
1.3	Convection	4
1.4	Rayonnement	4
2	Phénomènes de transport - Expériences quantitatives	5
2.1	Mesure de la conductivité thermique du cuivre	5
2.2	Mesure du coefficient de diffusion du glycérol dans l'eau (facultatif)	5
2.3	Transfert thermique par rayonnement - loi de Stefan (facultatif)	7

Remarque préliminaire : la mesure du coefficient de **diffusion du glycérol** dans l'eau (présentée à la fin de ce polycopié) est une belle expérience, mais délicate à mettre en place et relativement longue (le phénomène de diffusion a lieu sur un temps caractéristique de l'ordre de l'heure). Ainsi, si vous souhaitez l'effectuer, il est conseillé de la **mettre en place rapidement** pendant la séance de travaux pratiques, puis de prendre des points en parallèle des autres expériences afin de gagner du temps.

1 Phénomènes de transport - Expériences qualitatives

1.1 Diffusion thermique

Le transport thermique par diffusion est régi par l'équation différentielle classique :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \Delta T \quad (1)$$

Le coefficient D est la diffusivité thermique, qui a la dimension d'une longueur au carré divisée par un temps. On rappelle que ce coefficient est relié à la conductivité thermique λ , à la masse volumique ρ et à la capacité thermique massique c par

$$D = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (2)$$

La diffusion sur une échelle L se fait donc en un temps caractéristique L^2/D . On donne, pour différents métaux (Al, Cu, Fe, Zn), les valeurs suivantes :

- Aluminium : $D = 99.10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
- Cuivre : $D = 117.10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
- Fer : $D = 23.10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
- Zinc : $D = 44.10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$

Expérience : On dispose d'une "étoile" possédant quatre branches, chacune constituée de l'un de ces différents métaux. Placer quatre morceaux de paraffine - aussi semblables que possible - dans les creusets des différentes branches et une bougie allumée au centre, sous l'étoile. Déclencher un chronomètre et relever les instants correspondant à la fusion des morceaux de paraffine en fonction du métal où ils étaient situés. Les morceaux de paraffine vont fondre à des moments différents selon le métal dont est constituée la branche où ils sont posés. Classifier les différents métaux selon leur diffusivité thermique. Obtenir une estimation de la diffusivité de chacun des métaux (il ne faut pas espérer mieux qu'un ordre de grandeur). Si les morceaux de paraffine sont suffisamment semblables, déduire des mesures une estimation raisonnable des rapports des diffusivités de ces métaux.

Bien penser à retirer la paraffine après usage, sans gratter mais en la retirant avec un papier absorbant humidifié quand elle est encore liquide.

1.2 Diffusion particulaire

La diffusion de particules est régie par une équation similaire, portant sur la densité de particules n d'une espèce donnée.

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \Delta n \quad (3)$$

Là encore, on peut obtenir une estimation du coefficient de diffusion D en mesurant le temps caractéristique de diffusion sur une échelle donnée.

Expérience : Préparer une boîte de Petri avec de l'Agar-Agar et injecter une goutte d'encre au centre avec une seringue. Observer la diffusion de la tache d'encre au sein du gel d'Agar-Agar. Attention, la vitesse de diffusion dépend fortement de la préparation du gel en amont, mais se fait sur des échelles de temps de l'ordre de l'heure.



1.3 Convection

La convection est un phénomène de transport à l'échelle macroscopique, contrairement aux phénomènes de diffusion abordés plus haut qui se déroulent à l'échelle microscopique. La convection est présente dans l'eau chauffée par le bas dans une casserole, mais également dans le Soleil et les autres étoiles. Le fluide chauffé, moins dense, remonte sous l'effet de la poussée d'Archimède, remplacé par du fluide plus froid venu des couches supérieures. Celui-ci se réchauffe tandis que le fluide chaud se refroidit, ce qui entretient le cycle.

Expérience : On dispose pour cette expérience de deux tubes reliés par deux tiges permettant la circulation de fluide d'un tube à l'autre. Commencer par bien relier ces tubes et **vérifier leur étanchéité avec de l'eau froide sans colorant**. On prépare ensuite une solution d'eau à température ambiante que l'on colorera très légèrement en bleu (2-3 gouttes de colorant devraient suffire) et une solution d'eau plus chaude (de température de l'ordre de 40°C, ce n'est pas la peine d'avoir recours à des températures plus élevées) que l'on colorera légèrement en rouge. Il faut alors placer en même temps la première solution dans le tube de gauche et la seconde dans le tube de droite afin que tout ne se mélange pas dès le début. Ne pas hésiter à pencher légèrement le dispositif, en particulier si des bulles d'air se sont formées au sein des tiges centrales et empêchent la circulation de liquide. La convection devrait alors rapidement s'installer, le liquide chaud (rouge) passant par la tige supérieure et le liquide froid (bleu) passant par la tige inférieure. Observer le phénomène. On peut également boucher les deux tubes avec les bouchons percés et suivre l'évolution de la température en y plaçant deux thermocouples jusqu'à homogénéisation.



FIGURE 1 – Observation du déplacement des fluides chaud (rouge) et froid (bleu) avec une situation initiale où le fluide chaud était entièrement à gauche et le fluide froid entièrement à droite

1.4 Rayonnement

Le rayonnement constitue le troisième mode de transport de l'énergie thermique, avec la diffusion et la convection. Il n'y a cette fois pas de transfert d'agitation thermique au niveau microscopique entre les constituants d'un système (conduction), ni transport global de matière emportant avec elle son énergie thermique (convection), mais un transport d'énergie par les photons. On se propose ici d'illustrer les transferts thermiques par rayonnement en comparant deux systèmes presque identiques si ce n'est que l'un absorbe mieux le rayonnement que l'autre.

Expérience : Placer deux tubes à essai identiques, l'un peint en noir et l'autre peint en blanc (ou avec une peinture métallisée) à la même distance d'une lampe quartz-iodure équipée d'un condenseur. On utilisera pour ce dernier une focale permettant que le faisceau soit le plus parallèle possible pour que l'éclairage des deux tubes soit suffisant et identique pour les deux systèmes. Utiliser des potences et des pinces plates pour assurer une géométrie semblable pour les deux tubes à essai vis-à-vis de l'éclairage. Mesurer la température à l'intérieur de chacun des deux tubes, un écart en température devrait être observable après quelques minutes. Interpréter qualitativement cet écart.



2 Phénomènes de transport - Expériences quantitatives

2.1 Mesure de la conductivité thermique du cuivre

On dispose d'un montage contenant un barreau de cuivre calorifugé dont la température est fixée à une extrémité par une circulation d'eau froide, et à l'autre par une résistance chauffante de 47Ω . Deux résistances de platine sont insérées dans le barreau, distantes de 100 mm, et permettent de mesurer la température en ces deux points (consultez les tables de conversion température-résistance). L'équation de la diffusion thermique en régime permanent, dans un modèle unidimensionnel et où l'on néglige les pertes thermiques, a pour solution

$$T(x) = \frac{T_2 - T_1}{L}x + T_1 \quad (4)$$

où L est la distance entre les deux points de mesure auxquels la température vaut respectivement T_1 et T_2 . Le flux de chaleur Φ est uniforme en régime permanent, et égal à la puissance Joule fournie par la résistance chauffante, et donc à la puissance électrique fournie. La loi de Fourier permet également de l'écrire sous la forme

$$\Phi = j_{\text{th}} \cdot S = \lambda |\nabla T| S = \frac{\lambda(T_2 - T_1)S}{L} \quad (5)$$

où λ est la conductivité thermique du matériau. Pour le cuivre, on a $\lambda \simeq 390 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. La résistance thermique est alors définie comme

$$R = \frac{\Delta T}{\Phi} = \frac{T_2 - T_1}{\Phi} = \frac{L}{\lambda S} \quad (6)$$

Expérience : Alimenter la résistance avec une tension constante. On mesurera qualitativement, en suivant l'évolution de la température mesurée aux deux points, la durée d'établissement du régime stationnaire. Lorsque ce régime est atteint, relever les deux températures associées. Répéter cette expérience pour plusieurs valeurs de la puissance électrique fournie à la résistance. Tracer la différence de température en fonction de cette puissance, et en déduire la résistance thermique du barreau entre les deux sondes. En déduire alors une estimation de la conductivité thermique. Enfin, à l'aide de cette valeur, calculer le coefficient de diffusion thermique du cuivre et retrouver l'ordre de grandeur de la durée d'établissement du régime stationnaire. Il est possible que vous trouviez une valeur de la conductivité thermique sensiblement différente de la valeur attendue, en raison des pertes thermiques.

Référence : Notice + Donnini & Quaranta, Dictionnaire de physique expérimentale, Tome II, Thermodynamique et applications (à l'entrée "Conduction thermique")

2.2 Mesure du coefficient de diffusion du glycérol dans l'eau (facultatif)

Cette expérience, assez délicate à mettre en place et surtout longue, peut être lancée en parallèle des autres pour gagner du temps. Elle met en évidence le phénomène de diffusion moléculaire et permet la mesure d'un coefficient de diffusion, en étudiant le mélange au cours du temps d'une couche de glycérol (en réalité un mélange homogène eau-glycérol) déposée initialement en dessous d'une couche d'eau. Ce suivi se fait à l'aide d'une méthode optique. En effet, l'eau et le glycérol ayant des indices optiques différents, la diffusion de l'un dans l'autre crée un gradient d'indice dans la zone de mélange, ce qui dévie les rayons lumineux (comme dans un mirage). Ainsi, on exploite la déviation d'un faisceau lumineux dans la cuve pour mesurer la diffusivité du glycérol dans l'eau.

Les lois de l'optique dans un milieu d'indice inhomogène permettent de montrer que, si la déviation α du rayon est faible, celle-ci est reliée à l'épaisseur d de la cuve et au gradient d'indice au point de traversée du rayon lumineux par

$$\alpha = d \frac{dn}{dx} \quad (7)$$

Par ailleurs la concentration $c(x, t)$ de glycérol est solution de l'équation de diffusion

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (8)$$



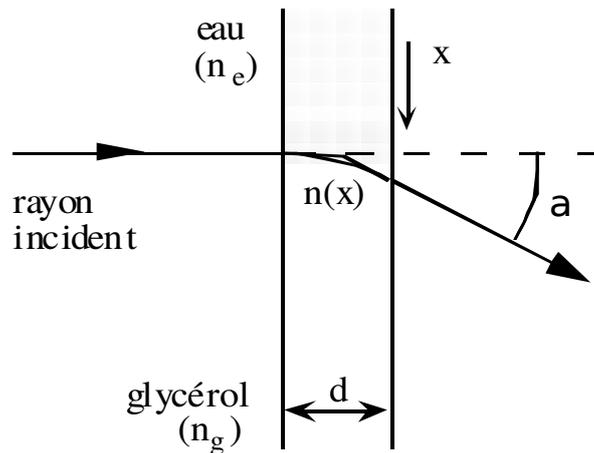


FIGURE 2 – Déviation d'un faisceau lumineux dans un gradient d'indice

où D est le coefficient de diffusion. On peut résoudre cette équation en supposant qu'à l'instant "initial" $t = 0$ la diffusion n'a pas commencé. On a donc, à cet instant, $c = 0$ pour $x < 0$ (dans l'eau) et c constant positif pour $x > 0$ (dans le mélange homogène eau-glycérol). En supposant de plus que l'indice optique n est une fonction affine de la concentration de glycérol dans l'eau, on montre que la déviation angulaire maximum vaut, en fonction du temps :

$$\alpha_{\max}(t) = \frac{C_0(n_g - n_e)d}{2\sqrt{\pi Dt}} \quad (9)$$

et se produit en $x = 0$, c'est-à-dire au point où se situe initialement l'interface entre les deux liquides. n_g et n_e désignent les indices optiques du glycérol pur et de l'eau, et $C_0 = 0,5$ est la fraction volumique du glycérol dans le mélange eau-glycérol utilisé. La déflexion maximum sur l'écran situé à la distance L de la cuve est alors, en supposant l'angle de déviation faible, $h_{\max}(t) = L\alpha_{\max}(t)$.

Expérience : Suivant le schéma de la figure ci-dessous, élargir un faisceau laser avec une lentille cylindrique pour réaliser une nappe, inclinée à environ 45 degrés par rapport aux côtés de la cuve. On fera les observations sur un écran recouvert d'un papier millimétré situé à environ 50 cm de la cuve. Quand la cuve est vide, la trace de la nappe sur l'écran est une ligne inclinée à 45 degrés (trait pointillé sur la figure). Repérer cette trace sur le papier. Remplir la cuve à moitié d'eau, puis verser doucement le mélange eau-glycérol dans le fond de la cuve à l'aide de la burette. Bien s'assurer, avant de verser, que tout est prêt car la diffusion est un phénomène irréversible, et donc en cas de fausse manœuvre, il faut tout recommencer après avoir bien nettoyé la cuve. On recommande en particulier que l'extrémité de la burette soit sur le côté de la cuve et qu'elle plonge jusqu'au fond pour limiter au maximum le mélange des deux liquides par convection. Pour faciliter la visualisation, il est aussi recommandé de placer la cuve sur le bord du boy, pour que ce dernier ne coupe pas la nappe laser. Une fois le mélange eau-glycérol versé de telle manière que la forte déformation de la nappe laser apparaisse centrée sur l'écran, refermer le robinet doucement mais ne surtout pas essayer de retirer la burette. Relever alors la déflexion maximum $h_{\max}(t)$ en fonction du temps. Il est souhaitable de prendre des points pendant au moins une vingtaine de minutes, en particulier au début de l'expérience. En traçant $1/h_{\max}^2$ en fonction du temps, en déduire une mesure du coefficient de diffusion D . On donne les valeurs numériques des indices de l'eau $n_e = 1,33$ et du glycérol pur $n_g = 1,47$, ainsi que le coefficient de diffusion attendu $D \approx 4.0 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Référence : Notice + Donnini & Quaranta, Dictionnaire de physique expérimentale, Tome II, Thermodynamique et applications (à l'entrée "Transport (phénomènes de)")

Remarques

- On utilise un mélange eau-glycérol (50-50) plutôt que du glycérol pur, dont l'indice est trop différent de celui de l'eau ; la déviation est alors très importante et on sort du domaine de validité des formules données. Ce mélange doit être bien homogène.
- La formule rapportée dans le Quaranta est légèrement différente (et fautive), et remplace $\sqrt{\pi} \simeq 1.77$ par $2\sqrt{\ln(2)} \simeq 1.66$, sans conséquence pour l'étude.



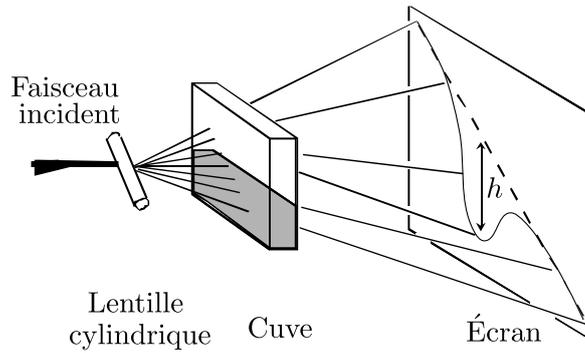


FIGURE 3 – Schéma de la déviation du faisceau laser

2.3 Transfert thermique par rayonnement - loi de Stefan (facultatif)

On propose d'effectuer ici une mesure relative de la température d'un corps noir à l'aide du montage présenté figure 3.

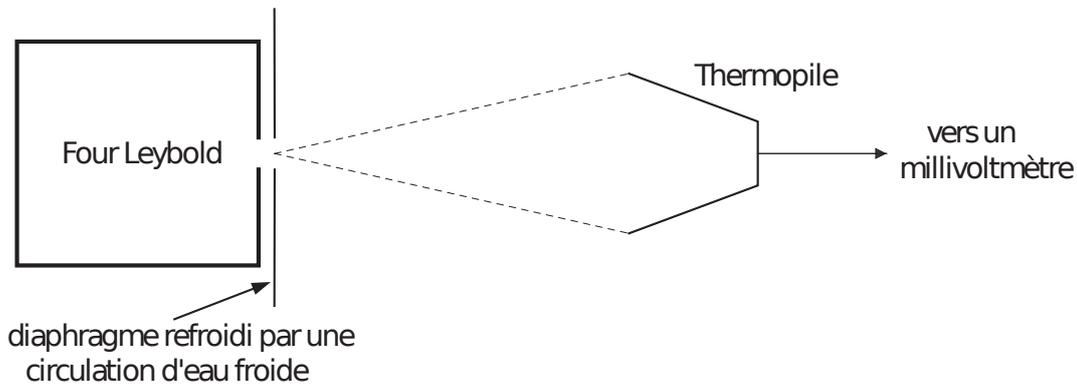


FIGURE 4 – Principe d'utilisation du pyromètre optique.

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. A 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 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 ¹

$$V_{\text{thermopile}} = aT^4 + b, \quad (10)$$

où a est un facteur qui dépend de la sensibilité globale de la thermopile (sensibilité de 0,16 mV/mW) 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

1. Une formulation parfois rencontrée est

$$V_{\text{thermopile}} = K(T^4 - T_{\text{amb}}^4),$$

qui sous-entend que la thermopile devrait renvoyer une tension nulle si l'orifice du four émettait à T_{amb} . Cette condition se retrouve cependant difficilement en pratique.

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. 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). 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. Un facteur correctif (lié à l'angle solide sous lequel la surface du pyromètre voit l'orifice du four) peut entrer en jeu. Par ailleurs, le four utilisé n'est pas un corps noir parfait et l'émissivité thermique n'est pas exactement 1.

Cette expérience montre qu'il est possible de mesurer, une fois le détecteur étalonné, à une température à partir d'une mesure de flux thermique (en admettant que le corps émetteur est un corps noir). C'est le principe utilisé par les thermomètres laser infrarouge.

Remarques au sujet de la thermopile

Le détecteur pour mesurer le flux thermique est une thermopile dont on a 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.

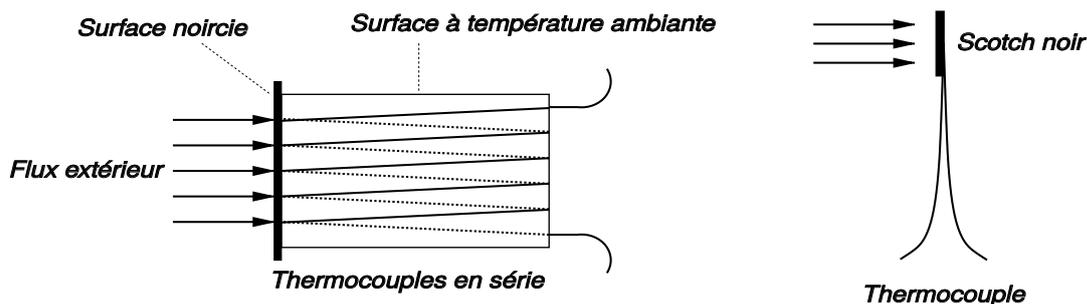


FIGURE 5 – A gauche : schéma de principe de la thermopile ; à droite : illustration expérimentale.

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 liée à cette différence de température, et les relier en série électriquement permet de sommer leurs tensions, donnant :

$$V_{\text{thermopile}} \propto \Delta T_{\text{surf}} \propto \Phi_{\text{incident}}, \quad (11)$$

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

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 $\Delta T_{\text{surf}} = \Phi_{\text{incident}}/G$.