

Tribologie et mesures d'effusivité avec une caméra thermique

par **André DOMPS**

Lycée Henri Poincaré - 54000 Nancy
domps.andre@ac-nancy-metz.fr

ON PROPOSE UNE MÉTHODE facilement exploitable en travaux pratiques pour étudier quantitativement l'échauffement produit par le frottement entre deux solides. Après un exposé succinct du modèle théorique, on décrit en détail le protocole expérimental, qui repose sur l'utilisation d'une caméra thermique. L'analyse des images permet d'accéder à l'effusivité des matériaux choisis (bois et granite), faisant le lien avec le concept de température de contact.

1. EFFET THERMIQUE DES FROTTEMENTS

Les frottements entre solides sont généralement abordés, dans le cadre pédagogique, au sein de chapitres consacrés exclusivement à la mécanique. C'est à ce titre que les lois phénoménologiques de Coulomb figurent au programme officiel des CPGE (Classes préparatoires aux grandes écoles) scientifiques de type PCSI (Physique, chimie et sciences de l'ingénieur) et MP/MP* (Maths-physique), sous leur aspect théorique mais aussi au travers des travaux pratiques. L'aspect dissipatif de ces forces est souvent souligné et les élèves établissent naturellement un lien qualitatif avec l'échauffement qu'elles provoquent, sans doute parce que l'expérience en est assez commune : qui ne s'est jamais réchauffé les mains en les frottant l'une contre l'autre, qui n'a jamais tenté, selon la technique héritée du paléolithique, de faire naître le feu par friction de morceaux de bois ? Pour analyser quantitativement cet échauffement, le passage à la thermodynamique s'avère indispensable et conduit à un enrichissement indéniable des rudiments de tribologie enseignés [1]. L'application rigoureuse du premier principe permet de lier la puissance $-P$ (avec $P > 0$) des forces de frottement s'exerçant entre deux solides S_1 et S_2 aux flux thermiques Φ_1 et Φ_2 reçus par chacun d'eux au travers de la surface par laquelle ils entrent en contact :

$$\Phi_1 + \Phi_2 = P$$

À partir de cette création locale de chaleur, l'évolution du champ de température T dans les deux solides résulte de la diffusion thermique en leur sein. Pour étudier ce phénomène, plaçons-nous dans les hypothèses les plus simples :

- ◆ les deux matériaux en contact sont identiques et semi-infinis ;

- ◆ ils présentent initialement une même température uniforme T_0 ;
- ◆ leur interface d'aire S est incluse dans le plan $z = 0$ et la diffusion s'effectue dans la direction perpendiculaire à cette interface (cf. figure 1) ;
- ◆ tout autre échange thermique est négligé.

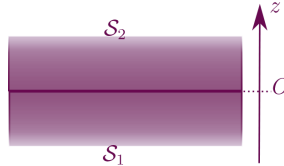


Figure 1- Deux solides en contact par le plan $z = 0$.

Dans ce cadre [2-3], la résolution de l'équation de la chaleur fournit l'élévation de température

$$\theta(z, t) = \frac{P\sqrt{t}}{Se\sqrt{\pi}} f\left(\frac{z}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad \text{où} \quad f(q) = e^{-q^2} + \sqrt{\pi} q (\operatorname{erf}(q) - 1) \quad (1).$$

Dans cette expression, D représente la diffusivité thermique des solides et $e = \lambda/\sqrt{D} = \sqrt{\lambda\rho c_p}$ leur effusivité, elle-même liée à la conductivité λ , la masse volumique ρ et la capacité calorifique massique c_p . Comme $f(0) = 1$, la température de surface, objet de toute notre attention dans la partie 2, est donnée par

$$\theta(0, t) = \frac{P\sqrt{t}}{Se\sqrt{\pi}} \quad (2).$$

En ordre de grandeur, l'épaisseur δ de la zone notablement échauffée de part et d'autre de l'interface peut être définie par $\theta(\delta, t) = \theta(0, t)/2$, ce qui conduit à

$$f\left(\frac{\delta}{2\sqrt{Dt}}\right) = \frac{1}{2} \quad \text{puis à} \quad \delta \simeq 0,7 \sqrt{Dt} \quad (3).$$

On retrouve l'échelle de longueur \sqrt{Dt} traditionnelle des phénomènes de diffusion.

2. MESURES AVEC UNE CAMÉRA THERMIQUE

2.1. Principe des mesures

Depuis quelques années, les caméras thermiques ne sont plus réservées aux laboratoires spécialisés ni à la thermographie en milieu industriel. Elles ont fait leur apparition dans nos établissements et trouvent naturellement des applications pour l'enseignement des transferts thermiques, permettant par exemple d'observer en temps réel l'évolution d'un champ de température. Le côté spectaculaire et visuellement parlant des images obtenues a sa contrepartie : par rapport aux sondes de température usuelles (thermistance, sonde de platine, capteur intégré au silicium), l'utilisation d'une

caméra thermique complique certainement l'acquisition informatique des résultats et leur suivi dans le temps. Mais dès qu'il s'agit de mettre en évidence un effet de surface, l'imagerie infrarouge s'avère par nature l'outil idéal. Diverses applications pédagogiques sont proposées dans l'article de Klaus-Peter Möllmann et de Michael Vollmer [4], dans des domaines aussi variés que la physique quantique, l'optique, l'électromagnétisme et la mécanique. C'est bien entendu ce dernier registre qui nous occupe ici.

Pour mettre en évidence le phénomène d'échauffement décrit dans la partie 1, nous avons eu recours à un dispositif rudimentaire (cf. figure 2) qui peut être reproduit à peu de frais. Une épaisse pièce de bois de pin (longueur 19,5 cm) constitue le solide S_1 qui demeure immobile pendant l'opération. Une rainure pratiquée à sa surface, sur une largeur de 2,1 cm, joue le rôle d'une glissière dans laquelle on peut faire coulisser S_2 , tasseau légèrement plus étroit (2,0 cm) que la rainure et découpé dans le même bois. Deux considérations ont suggéré le choix de ce matériau : d'une part il est facile à obtenir et à travailler, d'autre part sa faible effusivité thermique permet d'atteindre un échauffement significatif en ne déployant qu'une puissance modérée. La manipulation consiste à placer S_2 dans la glissière puis à l'y faire coulisser dans un mouvement de va-et-vient, tout en exerçant un effort perpendiculaire à l'interface. Après quelques secondes, une prise de vue avec la caméra thermique (modèle FLIR E5) révèle l'échauffement de la zone de contact (cf. figure 3, page ci-après). La température n'y est bien sûr pas uniforme et ses variations reflètent la répartition des contraintes tout le long de l'interface, correspondant à une puissance P inégalement répartie. Pour nous affranchir de cette difficulté, nous interprétons l'échauffement $\theta(0, t)$ de la relation (2) comme une moyenne sur la zone de contact. Le logiciel fourni avec la caméra pour l'exploitation des images thermiques possède une fonction de moyennage sur une zone rectangulaire qui s'avère ici particulièrement commode.

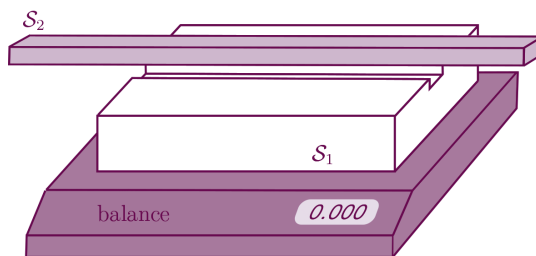


Figure 2 - Dispositif expérimental.

Pour une exploitation quantitative, il est nécessaire d'accéder à la puissance P des forces dissipatives. Pour l'obtenir, on détermine de manière préalable le coefficient de frottement dynamique μ_d . Divers protocoles sont pour cela envisageables et nous avons choisi le plus rapide afin que l'attention des élèves ne se focalise pas sur ce point. Le

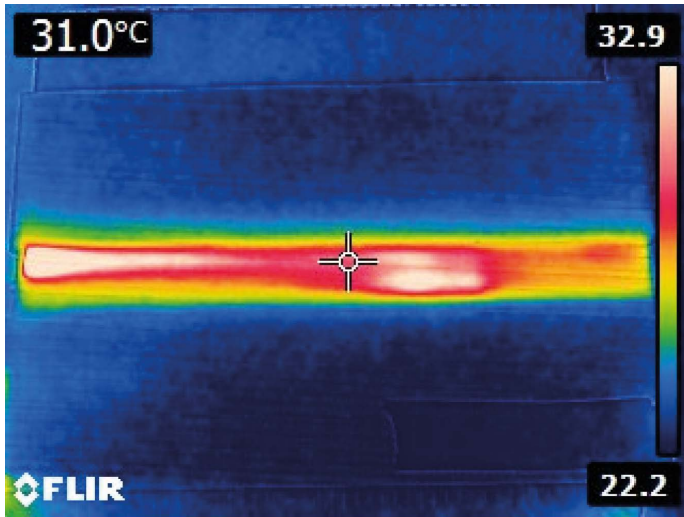


Figure 3 - Image thermique typique de la pièce de bois S_1 après quelques dizaines de secondes de frottement. On distingue nettement la rainure échauffée sur le fond froid.

tasseau S_2 , lesté par quelques kilogrammes de masses marquées, est tiré à la main sur S_1 horizontal par l'intermédiaire d'un dynamomètre. Lorsque sa vitesse est constante, la tension du dynamomètre s'identifie à la force de frottement T et $\mu_d = T/(mg)$ s'en déduit. On obtient dans notre cas $\mu_d = 0,20$. Puis le solide S_1 est placé sur une balance et taré. L'opérateur entame alors les va-et-vient décrits plus haut en contrôlant ses efforts de manière à maintenir l'indication de la balance près d'une valeur particulière m , de l'ordre de 3 kg dans nos manipulations. Tout en développant son effort, il compte mentalement le nombre n des aller-retours qu'il effectue avec le tasseau S_2 . La course L de ces mouvements est contrôlée par deux butées placées sur S_2 (non représentées sur la figure 2). L'opération étant chronométrée sur une durée t , la puissance P dissipée, de l'ordre de quelques watts, s'en déduit par

$$P = \mu_d m g n L / t.$$

En répétant cette opération pour plusieurs valeurs de t , on est en mesure de mettre à l'épreuve le modèle théorique de la partie 1. Comme il n'est pas possible de reproduire exactement la même valeur de P d'une mesure à l'autre, on introduit la variable $r = \theta(0, t)/P$ et on exprime la relation (2) sous la forme

$$r = \frac{\sqrt{t}}{Se\sqrt{\pi}} \quad (4).$$

La conformité des résultats au modèle sera jugée en observant les variations de r en fonction de \sqrt{t} , pour lesquelles un comportement linéaire est attendu. De la valeur de

la pente correspondante, on déduira aisément l'effusivité thermique e . Alors que cette grandeur demeurerait difficilement mesurable avec les moyens jusqu'ici disponibles dans un lycée, l'introduction des caméras thermiques y donne naturellement accès.

Signalons dès maintenant les principales sources d'incertitudes intervenant dans ce protocole :

- ◆ Il y a tout d'abord celles associées à la mesure de température par la caméra elle-même. Elles ont été minimisées en ajustant soigneusement le paramètre d'émissivité ε du bois selon un protocole normalisé [5]. L'échauffement θ , nettement supérieur à la résolution de mesure de la caméra FLIR E5⁽¹⁾, a été obtenu comme la différence de température entre la zone chaude et la zone froide d'une même photographie, faisant disparaître un éventuel décalage systématique. Par ailleurs, il n'est pas toujours aisé de délimiter la zone échauffée afin d'obtenir la valeur moyenne de θ sur sa surface : il en résulte une incertitude de l'ordre de 0,1 °C, faible devant celles qui suivent.
- ◆ Pour maintenir constante l'indication m de la balance, l'opérateur la surveille attentivement et ajuste son effort en fonction de sa lecture. Malgré tout le soin que l'on apporte à cet asservissement, m fluctue inévitablement lors des mouvements de S_2 , dans des proportions allant jusqu'à 15 %. La valeur finalement retenue, de l'ordre de 3 kg, est une moyenne grossièrement estimée et la valeur vraie se situe certainement dans un intervalle de $\pm 0,2$ kg.
- ◆ Enfin, le coefficient de frottement μ_d préalablement mesuré est lui aussi entaché d'une forte incertitude que nous caractérisons par l'incertitude-type $u(\mu_d) = 0,03$.

Aux yeux des étudiants, ces incertitudes paraîtront peut-être élevées en comparaison de celles qu'ils rencontrent usuellement en travaux pratiques d'électricité ou d'optique. Cela tient bien entendu à la rusticité du mode opératoire mais aussi à la nature même des grandeurs mesurées qui, relevant de lois phénoménologiques de la mécanique et de la thermique, sont d'ordinaire connues avec une précision assez faible. Plutôt qu'un inconvénient, nous y voyons un atout didactique de ce travail à l'heure où le traitement des incertitudes de mesure est mis à l'honneur dans notre enseignement. Il prend ici un sens concret dans un cadre motivant.

2.2. Résultats et discussion

La figure 4 (cf. page ci-après) montre l'évolution du paramètre r en fonction de \sqrt{t} , pour des durées de frottement s'étageant de quinze secondes à quatre minutes. L'accord au modèle est satisfaisant et la régression linéaire fournit une pente égale à $0,261 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{s}^{-1/2}$ avec une incertitude-type égale à $0,015 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{s}^{-1/2}$, condui-

(1) Le constructeur donne une résolution thermique de mesure de 0,15 K.

sant, avec $S = 39 \text{ cm}^2$, à

$$e = 5,6 \cdot 10^2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{1/2} \quad \text{et} \quad u(e) = 0,3 \cdot 10^2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{1/2}.$$

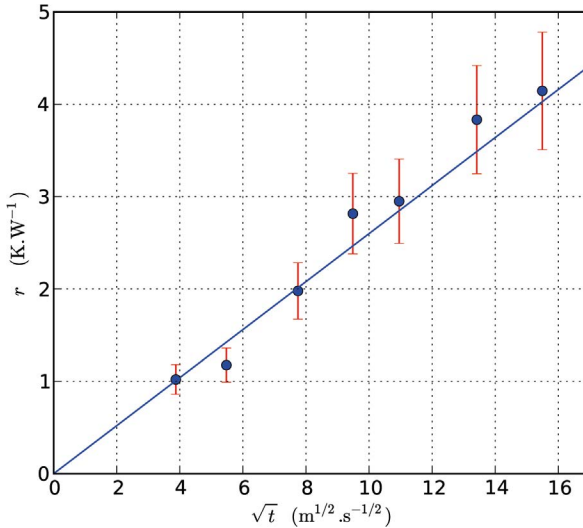


Figure 4 - Courbe d'échauffement du bois de pin. L'ordonnée est le quotient $r = \theta/P$. Une régression linéaire de la forme $r = p\sqrt{t}$ donne $p = 0,261 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{s}^{-1/2}$.

La comparaison de ces résultats à des valeurs de référence n'est pas aisée car les propriétés du bois présentent une grande variabilité en fonction son essence, de son taux d'humidité et encore de l'orientation du plan de sciage par rapport aux fibres [6]. Alors que les valeurs fournies par [7] conduisent à $e = 5,1 \cdot 10^2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{1/2}$, celles d'un industriel du bois [8] donnent $e = 4,0 \cdot 10^2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{1/2}$ (cf. tableau 1). Il semble donc que le protocole utilisé ici, tout en donnant un ordre de grandeur satisfaisant, tende à surestimer l'effusivité, ce qui revient à sous-estimer l'échauffement. Peut-

	Matériau		
	Pin	Pin	Granite
Référence	[7]	[8]	[7]
$\lambda \text{ (W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}\text{)}$	0,147	0,14	1,73-3,98
$\rho \text{ (kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{)}$	640	370-550	2640
$c_p \text{ (J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{)}$	2800	2300	820
$e \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{1/2}\text{)}$	513	345-420	$1,9 \cdot 10^3 - 3,0 \cdot 10^3$

Tableau 1 - Propriétés thermiques du bois de pin et du granite d'après deux références.

être est-ce dû au fait qu'à chaque oscillation, les extrémités du tasseau S_2 « débordent » de S_1 et se trouvent momentanément en contact avec l'air. Elles se refroidissent alors, ce qui contribue à fausser à la baisse la valeur mesurée pour θ et introduit une erreur systématique. Pour la corriger, il faudrait remettre en cause le modèle de la partie 1 pour y introduire le caractère intermittent du contact sur certaines zones, abandonner la symétrie des champs de température entre S_1 et S_2 , caractériser les échanges conducto-convectifs avec l'air, etc. Peut-être devrait-on aussi tenir compte du fait que la diffusion thermique n'est pas purement unidimensionnelle en raison des gradients de température orthogonaux à la direction principale de diffusion (Oz). De tels raffinements ne pourraient se faire qu'au prix d'une complexité accrue et au détriment de la compréhension du phénomène par les élèves ; ils ne semblent pas souhaitables dans un cadre pédagogique.

Avec les durées d'échauffement choisies, l'épaisseur δ définie par la relation (3) est de l'ordre de deux ou trois millimètres au maximum. Elle demeure toujours très inférieure à l'épaisseur totale des pièces de bois, justifiant à la fois qu'on les traite comme des domaines semi-infinis et que l'on néglige l'échange thermique au niveau de leur surface libre, qui se trouve en contact isotherme avec l'air ambiant.

Le protocole mis en œuvre ici exige de laisser les deux solides retrouver la température ambiante T_0 entre deux mesures. Il en découle de longues minutes d'attente pendant lesquelles on pourra demander aux étudiants d'exploiter les images thermiques déjà prises ou de réfléchir au modèle. Pour éviter toute perte de temps, une autre organisation du travail est possible pour des élèves constitués en binôme. Elle consiste à prendre toutes les mesures en une seule fois, pour t allant de 0 à 240 s. À chacune des dates t_i à placer dans le tableau de mesures, l'opérateur manœuvrant S_2 s'interrompt brièvement. Son camarade prend prestement la photographie puis la friction est relancée aussi vite que possible. Avec ce protocole accéléré, la corrélation linéaire des points obtenus se révèle tout aussi convaincante et conduit à $e = 6,2 \cdot 10^2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{1/2}$. Cette surestimation aggravée de l'effusivité s'explique facilement par le fait qu'à chaque interruption, le temps d'imager l'interface, la surface des solides se refroidit au contact de l'air ambiant, éloignant l'expérience de l'échauffement continu décrit par le modèle. Comme plus haut, le professeur pourra tolérer cette imprécision si elle est la contrepartie d'une plus grande efficacité pédagogique.

Le concept d'effusivité thermique e , central dans cette étude, est aussi lié à celui de température de contact [7]. On peut qualitativement en avoir une approche tactile. Parmi deux corps de même température inférieure à 37 °C, celui qui présente l'effusivité la plus grande paraît le plus froid au toucher. Il semble donc intéressant de comparer le bois, souvent vanté pour le doux confort thermique que procurent les menuiseries et parquets, à des matériaux d'effusivité plus élevée. Les métaux, pour lesquels $e \simeq 10^4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{1/2}$, semblent de bons candidats. Cependant, avec des

coefficients de frottement de l'ordre de 0,2, ils donneraient dans les conditions de nos expériences des échauffements faibles et peu significatifs. Nous avons donc opté pour le granite qui diffère suffisamment du bois pour être intéressant tout en subissant, avec une simple friction manuelle, un échauffement bien détectable. La croissance de θ en \sqrt{t} ayant été précédemment validée, il semble ici superflu de procéder comme plus haut à de multiples mesures. Le même protocole, appliqué pour la seule durée $t = 120$ s, a conduit à la valeur $\theta = 3,6$ °C. Compte-tenu des autres paramètres de l'expérience ($n = 139$, $L = 0,4$ m, $\mu_d = 0,6$, $S = 30$ cm²), on en déduit $e_{\text{granite}} = 3,8 \cdot 10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{1/2}$.

Comme pour le bois, la comparaison à des valeurs déjà publiées est mal commode en raison de la diversité des types de granite. Selon [7], la valeur attendue se trouve entre $2 \cdot 10^3$ et $3 \cdot 10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{1/2}$. On obtient à nouveau une valeur surestimée, mais l'ordre de grandeur tout à fait correct permet de comprendre pourquoi le granite à température ambiante donne au toucher une sensation de fraîcheur bien plus intense que le bois.

REMERCIEMENTS

L'auteur remercie l'équipe technique du laboratoire de physique du lycée Henri Poincaré pour son aide dans la fabrication du dispositif expérimental et la réalisation des premiers essais.

BIBLIOGRAPHIE ET NETOGRAPHIE

- [1] L. Dettwiller, «Création de chaleur et échanges énergétiques : I. Application à l'étude thermodynamique du contact de deux solides avec frottement et de l'effet Joule», *Bull. Un. Phys.*, vol. 89, n° 775 (1), p. 1057-1078, juin 1995.
- [2] Énoncé de l'épreuve de physique du concours Centrale-Supélec, filière PSI, 2013.
- [3] B.N.J. Persson, *Sliding friction, Physical Principles and Applications*, Springer, Berlin New-York, 2000, chapitre 8.8.
- [4] K.-P. Möllmann and M. Vollmer, "Infrared thermal imaging as a tool in university physics education", *European Journal of Physics*, vol. 28, n° 3, S37-S50, mai 2007.
- [5] On trouve facilement les détails de ce protocole en ligne, par exemple à l'URL (page consultée le 19 octobre 2015) : http://www.chauvin-arnoux.at/download/ca1875/ba_ca1875.pdf
- [6] W. Simpson and A. Ten Wolde, *Physical Properties and Moisture Relations of Wood* : http://www.woodweb.com/Resources/wood_eng_handbook/Ch03.pdf

- [7] J. Taine, E. Iacona et J.-P. Petit, *Transferts thermiques - Introduction aux transferts d'énergie*, Dunod, 2008.
- [8] Les propriétés thermiques du bois (page consultée le 19 octobre 2015) :
<http://www.woodproducts.fi/fr/content/les-proprietes-thermiques-du-bois>



André DOMPS

*Professeur de physique en classe de PC**

Lycée Henri Poincaré

Nancy (Meurthe-et-Moselle)