

Étude d'un chauffe-eau solaire au laboratoire

par Anaïs ABRAMIAN⁽¹⁾

Institut Jean le Rond d'Alembert
Sorbonne Université

75005 Paris

anaisabramian@gmail.com

Cyril STURTZ⁽¹⁾, Alexandre FOURNIER, Daniel RICHARD,
Pascal GODEFROY et Édouard KAMINSKI

Institut de physique du globe de Paris (IPGP) - CNRS

Université de Paris - 75005 Paris

cyril.sturtz@gmail.com

DANS CE TP, proposé à des étudiants de licence 2 (L2) en géophysique, nous étudions le fonctionnement d'un chauffe-eau solaire qui alimente une habitation en eau chaude sanitaire. Pour ce faire, nous reproduisons un chauffe-eau au laboratoire : le soleil est modélisé par une lampe, et le capteur solaire est un boîtier en silicone dans lequel circule de l'eau. Une fois chauffée, l'eau rejoint un ballon de stockage. À l'aide de bilans, nous caractérisons les transferts énergétiques au sein du capteur, et nous en déduisons son rendement.

INTRODUCTION

Face à l'épuisement des énergies fossiles, les énergies que l'on appelle « renouvelables » constituent un enjeu majeur dans notre consommation énergétique. On considère qu'une énergie est renouvelable si elle est inépuisable à l'échelle du temps humain, ou se régénère plus rapidement que notre consommation. Parmi elles, se trouvent par exemple la force du vent, de l'eau, ou bien le rayonnement solaire.

L'énergie solaire est essentiellement utilisée pour deux usages : la production d'électricité, en général à l'aide de panneaux photovoltaïques, ou la production de chaleur. La chaleur ainsi récupérée peut ensuite être utilisée pour le chauffage domestique ou la production d'eau chaude sanitaire, par exemple. Dans les habitats domestiques, un chauffe-eau solaire individuel (CESI) peut couvrir de 50 % à 80 % des besoins en eau chaude sanitaire par an, en fonction de la zone géographique [1]. Son fonctionnement, schématisé sur la figure 1 (cf. page ci-après), est le suivant : un fluide caloporteur, souvent un mélange d'eau et d'antigel, circule dans le serpentin d'un capteur solaire qui se trouve sur le toit de la maison. Ce capteur est généralement noir pour capter au maxi-

(1) Ces deux auteurs ont contribué de manière égale à la réalisation de ce travail.

mun l'énergie solaire, et surmonté d'une vitre pour maximiser l'effet de serre et minimiser les pertes de chaleur. Une fois que ce fluide est chaud, il réchauffe à son tour l'eau présente dans un ballon de stockage, qui peut être installé sur le toit ou à l'intérieur de la maison. Ce dispositif est souvent associé à un dispositif d'appoint pour prendre le relais en cas de besoin et peut être perfectionné selon les demandes du consommateur.

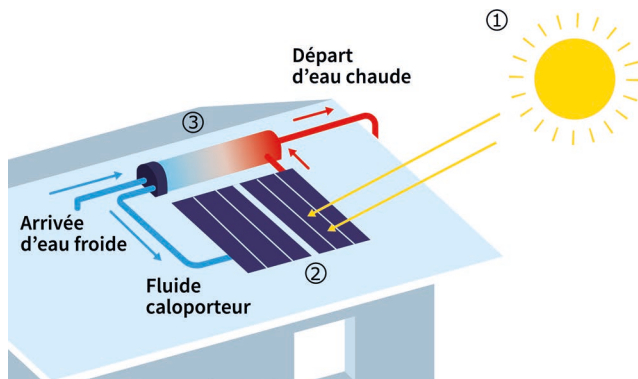


Figure 1 - Schéma d'un chauffe-eau solaire individuel (CESI) monobloc à thermosiphon. Le système se décompose en trois parties : ① Source de lumière - ② Capteur solaire - ③ Ballon de stockage. Source : *le guide pratique du chauffage et de l'eau chaude solaire de l'ADEME [1] (ministère de la Transition écologique).*

Dans cet article, nous proposons de reproduire au laboratoire un chauffe-eau solaire simplifié et d'étudier son fonctionnement. Ces travaux pratiques sont l'occasion de discuter des énergies renouvelables avec les étudiants et de calculer le rendement d'un appareil domestique. De plus, il s'agit d'un exercice d'application de thermodynamique sur un système réel, où l'on peut insister sur les propriétés du rayonnement solaire.

Dans un premier temps, nous décrivons et caractérisons la source d'énergie lumineuse que nous utilisons dans le dispositif. Dans un deuxième temps, nous mettons en place le chauffe-eau solaire miniature, puis nous calculons son rendement à l'aide de bilans énergétiques.

1. SOURCE LUMINEUSE

1.1. Description du rayonnement solaire

Nous souhaitons reproduire au laboratoire le rayonnement solaire reçu sur Terre. Pour commencer, nous estimons la puissance lumineuse émise par le soleil, aussi appelée

émittance⁽²⁾ (cf. glossaire donné en annexe, paragraphe 1). D'après le modèle du corps noir, l'émittance M (en W/m^2) émise par le soleil suit la loi de Stefan-Boltzmann :

$$M = \sigma T_s^4,$$

avec $\sigma = 5,7 \times 10^{-8} \text{W}/\text{m}^2/\text{K}^4$ la constante de Stefan-Boltzmann, et T_s la température de surface du corps noir considéré. En prenant la température à la surface du soleil égale à $T_s = 5777 \text{K}$, on obtient $M = 63 \text{MW}/\text{m}^2$. En considérant que cette émittance est rayonnée de manière isotrope dans l'espace, on peut exprimer la puissance lumineuse totale rayonnée par le Soleil :

$$\mathcal{P} = 4\pi R_s^2 \times \sigma T_s^4,$$

où le rayon du Soleil est $R_s = 70 \times 10^5 \text{km}$. On en déduit alors que le soleil rayonne une puissance égale à $3,9 \times 10^{26} \text{W}$. Créer une telle source de puissance en laboratoire est évidemment impossible. En réalité, ce n'est pas la puissance totale émise par le Soleil qui importe, mais la fraction de cette puissance surfacique qui arrive sur Terre, que l'on appelle éclairement (cf. note 2).

Pour déterminer cet éclairement sur Terre, nous étudions comment le rayonnement évolue avec la distance parcourue. À la surface du soleil, la puissance lumineuse se répartit sur une sphère de rayon moyen R_s . Cette sphère se propage ensuite de manière isotrope dans l'espace jusqu'à une distance d . La conservation de l'énergie sur les deux sphères de rayon R_s et de rayon $R_s + d$ nous permet d'exprimer l'éclairement $F_s(d)$ à une distance d (en W/m^2) :

$$F_s(d) = \frac{\mathcal{P}}{4\pi (R_s + d)^2} \approx \frac{\sigma T_s^4 R_s^2}{d^2}, \quad (1)$$

où l'on considère des distances $d \gg R_s$.

Ainsi, l'éclairement $F_s(d)$ décroît fortement avec la distance parcourue, en $1/d^2$. L'application numérique de cette formule en prenant la distance Terre-Soleil égale à :

$$d_{TS} = 150 \times 10^6 \text{km}$$

donne

$$F_s(d = d_{TS}) = 1383 \text{W}/\text{m}^2.$$

Cette valeur représente l'éclairement moyen arrivant sur Terre au niveau de la haute atmosphère par unité de surface et perpendiculairement à l'axe Terre-Soleil ; elle est considérée comme une référence, appelée « constante solaire ».

On peut comparer cette constante solaire théorique avec des mesures effectuées par satellite. Ainsi, nous avons représenté l'éclairement reçu en haute atmosphère en fonction de la longueur d'onde (en rouge, cf. figure 2, page ci-après) [2].

Cette puissance admet un maximum pour des longueurs d'ondes vertes

(2) Dans tout l'article, nous ne considérons que des émittances et des éclaircements énergétiques (en W/m^2) et non pas lumineux (en lux/m^2).

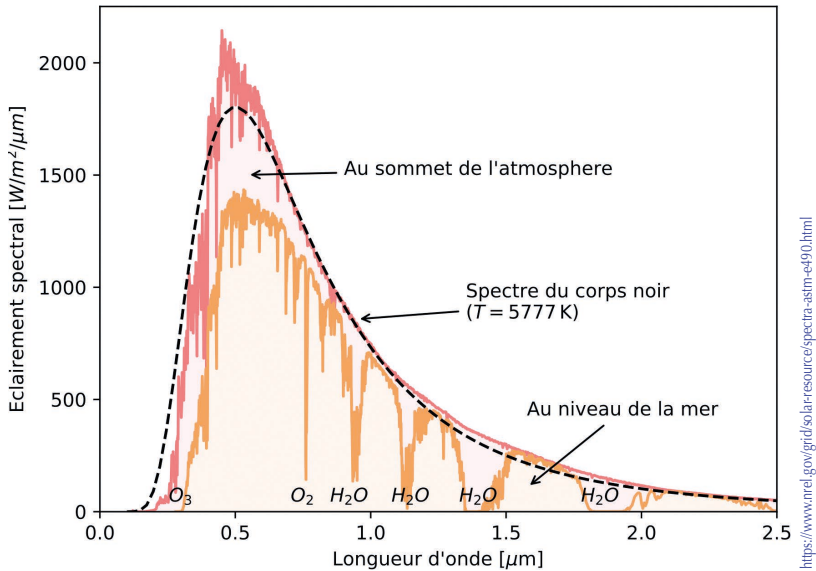


Figure 2 - Spectre d'émission du soleil. *En rouge* : mesure au sommet de l'atmosphère. *En orange* : mesure au niveau de la mer. *Ligne pointillée* : modèle du corps noir.

($\lambda = 504 \text{ nm}$), puis décroît rapidement avec la longueur d'onde. Elle est bien caractéristique du rayonnement du corps noir, en prenant toujours une température T_s de la surface du soleil égale à 5777 K . L'intégrale de ce spectre correspond à la mesure de la constante solaire et est égale à $1366,1 \text{ W/m}^2$, ce qui est en accord avec le modèle du corps noir. Cependant, avant d'arriver au niveau du toit d'une maison, le rayonnement a traversé l'atmosphère, ce qui diminue encore sa puissance, comme le montre la courbe orange de la figure 2. En particulier, des bandes d'absorption caractéristiques apparaissent, correspondant à l'interaction du rayonnement avec l'ozone, le dioxygène ou la vapeur d'eau. L'intégrale de ce spectre diminue et vaut, dans ce cas précis, 900 W/m^2 à la surface de la Terre. Cependant, cette valeur varie en fonction des conditions météorologiques, de l'alternance jour/nuit et des saisons notamment.

Pour simplifier l'étude, nous souhaitons reproduire un éclairement stationnaire. Par conséquent, nous devons faire un choix et fixer la valeur de l'éclairement incident. Nous allons le prendre arbitrairement égal à la constante solaire de référence 1370 W/m^2 , valeur qui présente l'avantage d'être assez élevée pour obtenir des variations de température significatives et donc mesurables. Elle est comparable à la valeur utilisée par les constructeurs de panneaux solaires (1000 W/m^2 en conditions standards de test (STC, pour *Standard Test Conditions* en anglais)). Cependant, ce choix est discutable, d'une part car il ne prend pas en compte l'absorption de l'atmosphère, mais aussi

du fait que l'éclairement moyen au sol peut être divisé par un facteur 4 à cause d'un effet de dilution géométrique (cf. annexe, paragraphe 2). En somme, cette valeur peut être adaptée selon le choix des étudiants, mais la méthodologie qui suit restera identique. L'objectif est maintenant de reproduire cet éclairement au laboratoire.

1.2. Caractérisation de la lampe au laboratoire

Pour obtenir l'éclairement souhaité, nous utilisons une lampe à incandescence (de marque Philips, 150 W) que nous allons étalonner pour nous assurer qu'elle puisse être une source assimilable au soleil. Nous déterminons en particulier à quelle distance du capteur nous devons la placer pour qu'il reçoive un éclairement égal à la constante solaire, soit à 1370 W/m^2 , et de manière homogène.

Pour vérifier que la source éclaire bien de manière homogène, et pour calibrer l'éclairement F_s reçu à une distance d de la source, nous utilisons les propriétés de rayonnement des sources isotropes. On peut démontrer, dans ce cas, que F_s décroît en $1/d^2$ (cf. annexe, paragraphe 3, [3-4]). Pour vérifier que cela est bien le cas en laboratoire, nous mesurons l'éclairement à l'aide d'une photopile (marque : Kipp & Zonen), que nous plaçons à une distance d de la lampe (cf. figure 3). Cette photopile convertit l'éclairement énergétique en une tension U qui lui est proportionnelle, telle que : $U = \xi F_s$.

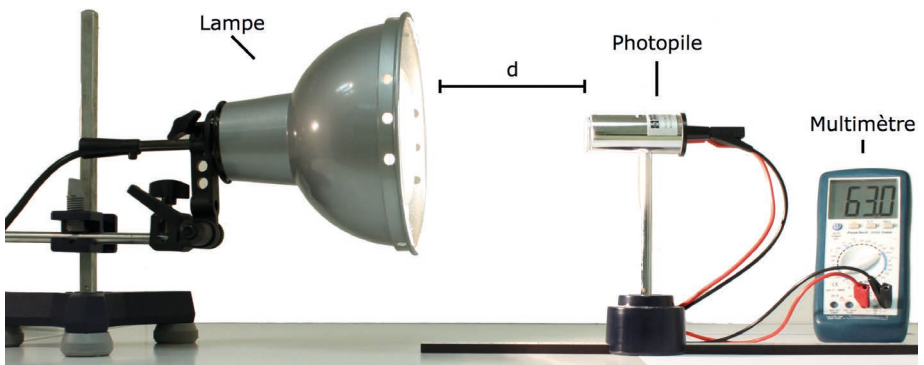


Figure 3 - Dispositif expérimental pour caractériser l'éclairement en fonction de la distance à la lampe.

Dans notre cas, le facteur de conversion est $\xi = 28,0 \mu\text{V} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^2$ (données constructeur). En faisant varier la distance entre la photopile et la lampe, nous pouvons tracer l'éclairement en fonction de $1/d^2$ (cf. figure 4, page ci-après).

L'éclairement reçu par la photopile est bien proportionnel à $1/d^2$, ce qui signifie que le rayonnement est isotrope pour des distances supérieures à 8 cm de la lampe.

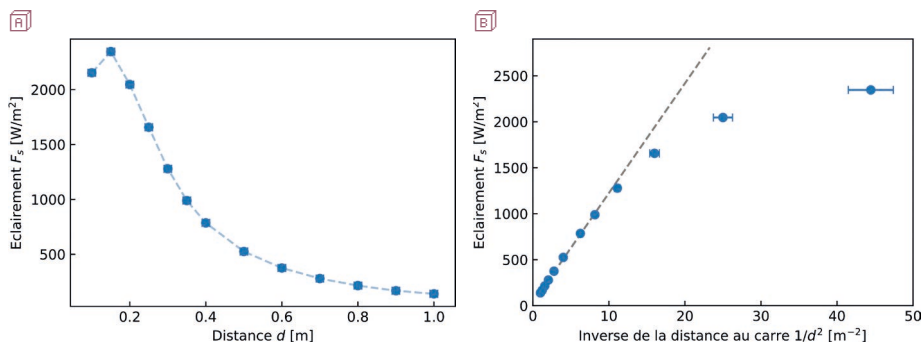


Figure 4 - Mesures d'éclaircements en fonction de la distance à la lampe. **A** Mesures expérimentales de l'éclaircissement en fonction de la distance à la lampe. *Ligne pointillée bleue* : aide visuelle reliant les points de mesure - **B** Mesures expérimentales de l'éclaircissement en fonction de l'inverse de la distance au carré. *Ligne pointillée grise* : ajustement linéaire sur les huit premiers points.

Cependant, lorsque la photopile est trop proche de la source, elle ne peut plus être considérée comme une source isotrope. L'écart à cette loi peut provenir de la géométrie de la lampe. En effet, celle-ci a un dôme de verre courbé agissant comme un dioptré et donc focalisant la lumière. Enfin, la mesure de la distance est entachée d'une incertitude liée à la position du filament, que nous avons estimée à 1 cm.

À l'aide de cette courbe, nous déterminons finalement la distance à laquelle elle fournit un rayonnement surfacique équivalent à celui reçu sur Terre en haute atmosphère. Ainsi, en plaçant le capteur solaire à $d = 29 \pm 1$ cm de la lampe, nous recréons des conditions d'ensoleillement idéales sur le toit d'une maison individuelle.

2. CONCEPTION DU CHAUFFE-EAU

Après avoir caractérisé la source lumineuse, nous mettons en place le reste du dispositif, c'est-à-dire le capteur plan solaire et son circuit d'eau⁽³⁾.

2.1. Capteur solaire

Le capteur solaire est constitué d'une première surface absorbante dont le but est de capter la chaleur apportée par rayonnement (cf. figure 5A, pages ci-après). Cette surface doit donc être constituée d'un matériau à forte conductivité thermique, comme le cuivre, dont la conductivité est vingt fois supérieure à celle de l'aluminium (cf. tableau 1, page ci-contre). De plus, ce métal résiste particulièrement bien à la corrosion,

(3) Le dispositif a été conçu initialement dans le cadre d'un projet industriel de Master Pro 1^{ère} année GEI (Master Sciences de la Terre et des planètes, environnement (STPE) - Université de Paris - Institut de physique du globe de Paris (IPGP)) réalisé par Victorien Liesse et Mathieu Mutel.

ce qui justifie son utilisation massive dans ce domaine. C'est également le matériau que nous avons choisi au laboratoire. Pour des raisons pratiques, la plaque mesure 20 cm × 10 cm × 1 mm (cf. tableau 2).

Matériau	C_p (J/K/kg)	λ (W/m/K)
Cuivre (Cu)	385	401
Fer (Fe)	449	80,2
Aluminium (Al)	897	24,3
Silicone	800	0,8
Eau (H ₂ O)	4185	0,6

Tableau 1 - Capacité thermique et conductivité thermique de différents matériaux.

Matériau	λ (W/m/K)	Dimensions (cm)
Absorbeur en cuivre	401	20 × 10 × 0,1
Serpentin en cuivre	401	Diamètre : 0,4
Moule silicone	0,8	21,5 × 11,5
Plaque de plâtre	0,3	21,5 × 11,5 × 0,13
Plaque d'aluminium	24,3	21,5 × 11,5
Polystyrène	0,03	Épaisseur : 0,75
Cuve PMMA	0,2	24 × 14 × 10 Épaisseur : 1

Tableau 2 - Conductivité thermique et dimensions des matériaux utilisés pour le capteur solaire.

Pour augmenter l'absorption de chaleur et limiter la réflexion, le côté de la plaque exposé à la lumière est peint en noir. Nous avons également construit un autre capteur témoin peint en blanc pour étudier l'influence de la couleur de surface sur le rendement du capteur. De l'autre côté de la plaque, nous avons soudé un circuit en forme de deux serpentins, également en cuivre, dans lequel circule le fluide caloporteur (cf. figure 5b, page ci-après). Une connexion en T relie les deux serpentins, où l'on place une thermistance pour mesurer la température de l'eau au niveau du capteur. Le diamètre des tubes est de 4 mm, ce qui permet d'assurer une vitesse d'écoulement raisonnable dans le circuit et maximiser les transferts de chaleur. La durée moyenne de circulation de l'eau dans le capteur est d'une dizaine de secondes. L'ensemble doit être entouré d'un isolant thermique afin de limiter les déperditions énergétiques lors des transferts de chaleur. Nous avons donc coulé du silicone autour du circuit. Ce silicone, dont les caractéristiques sont données dans les tableaux 1 et 2, a une faible conductivité thermique ce qui justifie son utilisation en tant qu'isolant thermique.

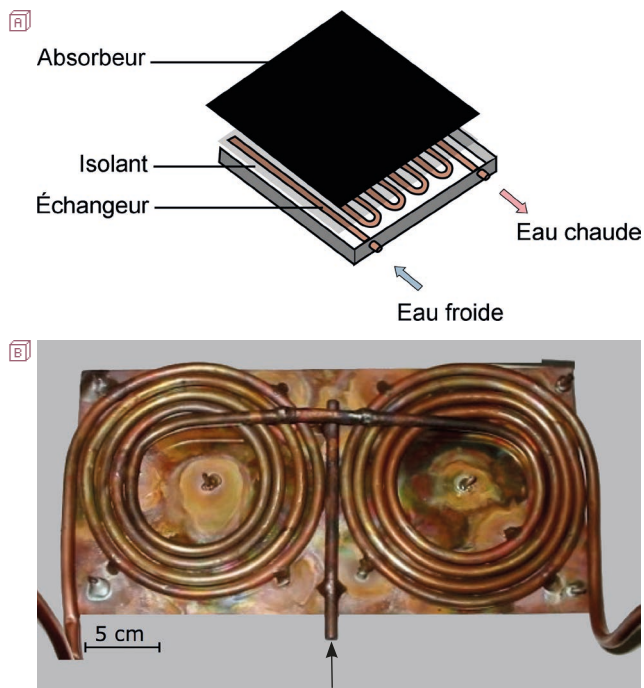


Figure 5 - Capteur plan solaire. (A) Schéma éclaté du capteur plan solaire. Le serpentin en cuivre est enrobé d'isolant en silicone blanc et surmonté d'une plaque de cuivre peinte en noir - (B) Photo du serpentin en cuivre dans lequel circule le fluide caloporteur. Un branchement en T permet d'insérer une thermistance (voir flèche, photo extraite du rapport [3]).

Enfin, ce capteur est placé dans une cuve en plexiglas®, d'environ 10 cm de hauteur, dont les rebords sont recouverts de plaques de polystyrène de quelques centimètres d'épaisseur. Ces plaques nous permettent d'isoler au mieux le capteur solaire. Pour améliorer encore l'isolation thermique, on peut ajouter des plaques de plâtre entre le polystyrène et le capteur.

2.2. Circuit hydraulique

Dans la plupart des chauffe-eaux du commerce, le fluide circulant dans le capteur solaire n'est pas directement l'eau domestique qui pourrait geler en hiver et détériorerait les canalisations. Il s'agit d'un fluide caloporteur, qui capture et transporte la chaleur jusqu'au ballon de stockage, où il réchauffe l'eau par contact *via* des échangeurs thermiques. Ce fluide caloporteur est souvent un mélange d'eau et d'antigel qui présente l'avantage de ne pas geler l'hiver, mais aussi l'inconvénient d'être plus visqueux et donc d'augmenter les frottements aux parois, dissipant ainsi de l'énergie. Enfin, sa capacité

calorifique est plus petite que celle de l'eau, ce qui le rend moins efficace. En général, il faut donc trouver un compromis pour les fractions d'eau et d'antigel dans le mélange.

Ici, comme nous n'avons pas de problème de gel, nous choisissons de simplifier le système et d'avoir un unique circuit d'eau pour la réchauffer directement. On met en place un circuit fermé où l'eau circule, à l'aide d'une pompe, du ballon de stockage vers le capteur à travers le serpentin. Comme il s'agit d'un excellent fluide caloporteur, ce montage rend le chauffe-eau plus efficace.

2.3. Dispositif expérimental

À présent, nous mettons en place le dispositif expérimental complet pour reproduire le chauffe-eau de laboratoire (cf. figure 6A). Nous installons la lampe à une distance $d = 29 \pm 1$ cm du capteur, comme mesuré dans le paragraphe 1. Nous plaçons une masse $m_{eau} = 500$ g d'eau dans une enceinte calorifugée qui sert de réservoir. Ce réservoir correspond au ballon de stockage d'eau sanitaire dans une maison. À l'intérieur de ce réservoir, une pompe hydraulique assure la circulation de l'eau (Jebao AP333, débit : 250 L/h). L'eau suit un circuit fermé : elle sort du réservoir pour rejoindre le capteur solaire, où est transférée la chaleur, puis ressort du capteur pour rejoindre le ballon de stockage.

Pour suivre la température de l'eau au cours du temps, on place une thermistance CTN (Coefficient de température négatif) au niveau du capteur (température T_1), et une autre dans le réservoir (température T_2). Chaque thermistance a été préalablement

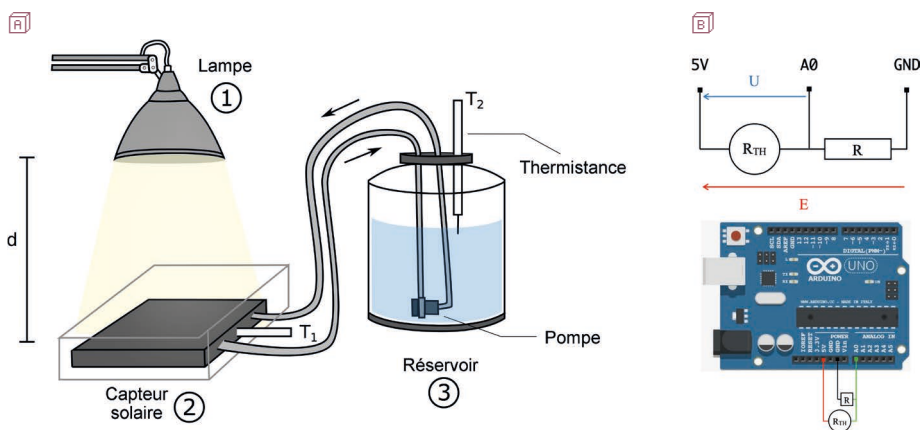


Figure 6 - Dispositif expérimental. (A) Schéma du chauffe-eau solaire de laboratoire (voir liste complète du matériel donnée en annexe, paragraphe 4) - (B) Montage électronique reliant la thermistance à la carte *Arduino*, et permettant l'acquisition de la température au cours du temps.

calibrée à l'aide d'un thermomètre à Mercure⁽⁴⁾, donnant une relation entre la température et leur résistance :

$$T = \frac{1}{A \times \log_{10}(R_{TH}) + B},$$

avec T la température (en K) et R_{TH} la résistance du capteur (en $k\Omega$). Dans notre cas précis :

$$A = 60 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1} \quad \text{et} \quad B = 2,76 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}.$$

Nous mesurons ensuite cette résistance à l'aide d'un pont diviseur de tension connecté à une carte *Arduino*⁽⁵⁾ (cf. figure 6B, page précédente). La thermistance est branchée entre l'entrée analogique A0 et la sortie 5 V de la carte. De plus, une résistance R est placée en série avec la thermistance, et est reliée à la masse de la carte. Nous en déduisons la résistance R_{TH} en fonction de la tension mesurée U :

$$R_{TH} = \frac{R}{E/U - 1},$$

où $E = 5 \text{ V}$ est la tension de référence, et $R = 7,49 \text{ k}\Omega$. Ces données sont acquises chaque seconde (fréquence d'acquisition : 1 Hz) par un code *Python* disponible en ligne⁽⁶⁾. Le montage est prêt, nous pouvons maintenant étudier le fonctionnement de ce chauffe-eau.

3. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

3.1. Évolution thermique

Dans un premier temps, nous démarrons la pompe pour faire circuler l'eau du réservoir au capteur solaire, le tout à température ambiante (21 °C dans le cas de la figure 7A, page ci-contre). Ensuite, l'acquisition commence lorsqu'on allume la lampe qui se trouve au-dessus du capteur (correspondant à l'instant de date $t = 0$). Le programme *Python* préalablement codé permet aux étudiants de visualiser les données en direct, et de les enregistrer (code disponible en ligne, cf. note 6). On arrête l'expérience au bout d'une trentaine de minutes.

On trace maintenant la température de l'eau au niveau du capteur (T_1) et du réservoir (T_2) (cf. figure 7, page ci-contre). Ces deux températures augmentent progressivement avec le temps, ce qui signifie que le rayonnement de la lampe chauffe bien l'eau qui circule, comme attendu. Les températures sont susceptibles de saturer au bout d'un certain temps, car le système n'est pas idéalement calorifugé, mais nous arrêtons l'expérience avant d'observer cet effet.

(4) Il est préférable d'utiliser un capteur de température plus précis pour l'étalonnage.

(5) Site d'*Arduino* : <https://www.arduino.cc>

(6) Code de commande de l'interface *Arduino* : <https://github.com/odevauchelle/CapteurPlanSolaire>

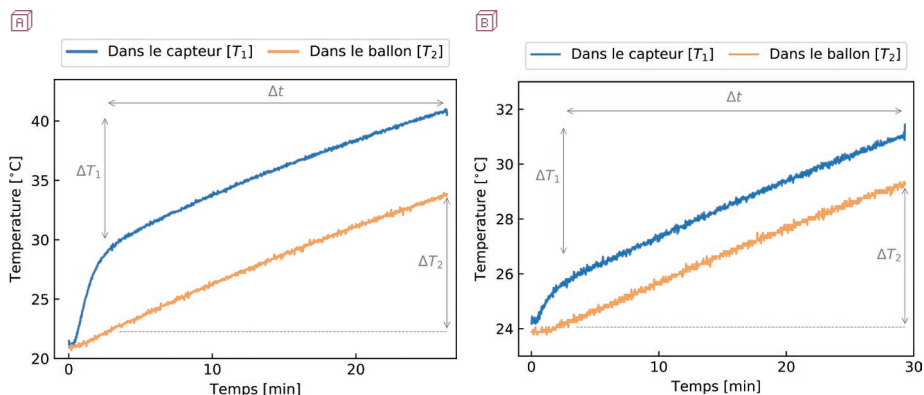


Figure 7 - Étude des variations temporelles de température capteur/réservoir. Évolution temporelle de la température de l'eau dans le capteur (T_1) et dans le réservoir (T_2) au cours d'une expérience d'environ trente minutes pour le capteur noir **A**) et le capteur blanc **B**).

Pendant les cinq premières minutes, la température du capteur croît plus rapidement, car il est directement exposé à la lumière. Ensuite, les deux températures tendent vers un régime permanent, où elles semblent croître linéairement avec le temps. En trente minutes, l'eau au niveau du capteur est passée de 21 à 40 °C, et celle dans le réservoir a atteint 33 °C. À présent, nous allons expliquer l'évolution temporelle des températures et calculer le rendement de cette installation.

3.2. Température au sein du réservoir

Pour déterminer comment évolue la température au sein du réservoir, nous pouvons réaliser un bilan d'énergie sur l'eau en appliquant le premier principe de la thermodynamique. Pour cela, on définit le flux de chaleur reçu par l'eau par unité de surface du capteur F_{eau} (W/m^2) (cf. figure 8). On applique ensuite le premier principe

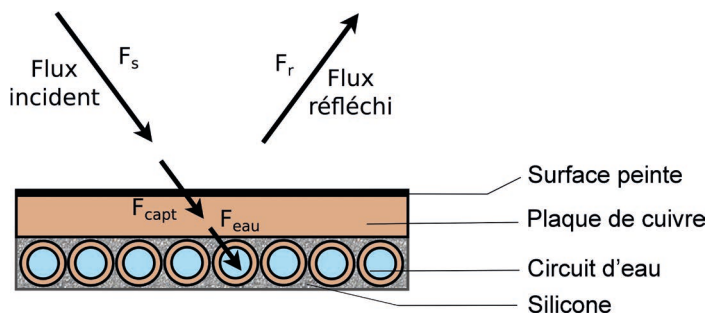


Figure 8 - Bilan énergétique au niveau du capteur plan. Vue en coupe du capteur solaire. Les flèches décrivent les différents transferts thermiques au sein du capteur.

de la thermodynamique sur l'eau se trouvant dans le réservoir. En considérant le travail mécanique reçu par l'eau négligeable par rapport au transfert de thermique reçu, on peut écrire $dU = q$, où dU est la variation d'énergie interne de l'eau sur une durée dt , et q est la chaleur reçue pendant cette durée. D'une part, la variation d'énergie interne de l'eau dans le réservoir est $dU = m_{\text{eau}} c_{p, \text{eau}} \times dT_2$. D'autre part, la chaleur reçue par l'eau correspond à $q = F_{\text{eau}} \times S dt$, où S est la surface absorbante du capteur.

D'après le premier principe, on obtient donc la loi d'évolution de la température de l'eau au sein du réservoir T_2 :

$$\frac{m_{\text{eau}} c_{p, \text{eau}}}{S} \times \frac{dT_2}{dt} = F_{\text{eau}}, \quad (2)$$

où m_{eau} la masse d'eau et $c_{p, \text{eau}}$ la capacité calorifique massique de l'eau. En mesurant précisément la masse d'eau introduite dans le réservoir, $m_{\text{eau}} = 500 \pm 1$ g, on en déduit $m_{\text{eau}} c_{p, \text{eau}} = 2090 \pm 6$ J/K. La valeur de F_{eau} est inconnue, mais on peut la considérer constante en régime permanent, ce qui expliquerait l'évolution linéaire de cette température en fonction du temps :

$$T_2(t) = T_0 + \frac{F_{\text{eau}} S}{m_{\text{eau}} c_{p, \text{eau}}} t.$$

3.3. Température au sein du capteur

Pour estimer la température au sein du capteur solaire (T_1), nous allons aussi effectuer un bilan d'énergie, mais sur un autre système : l'ensemble {silicone + éléments de cuivre}. Pour cela, on définit un autre flux de chaleur surfacique F_{capt} qui est la chaleur absorbée par le capteur. Ainsi, en appliquant encore une fois le premier principe de la thermodynamique, sachant que $dU = m_c c_{p, c} \times dT_1$ et $q = (F_{\text{capt}} - F_{\text{eau}}) \times S dt$, on obtient une expression pour la variation temporelle de la température :

$$\frac{m_c c_{p, c}}{S} \times \frac{dT_1}{dt} = F_{\text{capt}} - F_{\text{eau}}, \quad (3)$$

où S est la surface absorbante du capteur, et $m_c c_{p, c}$ est la capacité calorifique moyenne de l'ensemble du capteur. L'extensivité de la capacité calorifique nous permet d'écrire que :

$$m_c c_{p, c} = m_{\text{silicone}} c_{p, \text{silicone}} + m_{\text{Cu}} c_{p, \text{Cu}}.$$

En utilisant les masses mesurées lors de la fabrication du capteur (cf. tableau 3), et les capacités calorifiques tabulées (cf. tableau 1), on trouve $m_c c_{p, c} = 573 \pm 1$ J/K.

Matériau	Masse, capteur noir (g)	Masse, capteur blanc (g)
Cuivre	206	232
Silicone	412	464

Tableau 3 - Masse totale de cuivre et de silicone dans chacun des capteurs.

Maintenant, en considérant les flux F_{eau} et F_{capt} constants, on obtient bien une évolution linéaire de la température du capteur avec le temps en régime permanent :

$$T_1(t) = T_0 + \frac{S}{m_c c_{P,c}} \times (F_{capt} - F_{eau}) \times t.$$

Pour l'instant, nous ne connaissons ni F_{eau} , ni F_{capt} . Nous allons les estimer à partir du flux incident provenant de la lampe F_s . Pour cela, nous devons dans un premier temps évaluer le flux réfléchi par le capteur.

3.4. Estimation du flux réfléchi

La lampe est placée de telle sorte que le capteur plan reçoive un éclairage égal à $F_s = 1370 \text{ W/m}^2$. Cependant, une partie de cette puissance est réfléchi par la surface. On définit généralement l'albédo d'une surface comme la fraction d'énergie réfléchi, de sorte que $F_r = \alpha F_s$. L'ensemble du capteur absorbe alors un flux :

$$F_{capt} = (1 - \alpha) \times F_s. \quad (4)$$

Pour connaître la valeur de l'albédo, on peut exprimer F_{capt} en additionnant les équations (2) et (3) des sous-paragraphes 2.1. et 2.2. :

$$F_{capt} = \frac{m_c c_{P,c}}{S} \times \frac{dT_1}{dt} + \frac{m_c c_{P,eau}}{S} \times \frac{dT_2}{dt}.$$

Ainsi, en remplaçant cette expression dans l'équation (4), on obtient :

$$\frac{m_c c_{P,c}}{S} \times \frac{dT_1}{dt} + \frac{m_c c_{P,eau}}{S} \times \frac{dT_2}{dt} = (1 - \alpha) \times F_s(d).$$

En intégrant cette équation entre le début du régime permanent et la fin de l'expérience (cf. annotations sur la figure 8, pages précédentes), on obtient :

$$m c_{P,eau} \times \Delta T_2 + m_c c_{P,c} \times \Delta T_1 = (1 - \alpha) \times F_s(d) \times S \Delta t,$$

où ΔT_1 et ΔT_2 sont les variations de température au niveau du capteur et du réservoir respectivement, entre le début du régime permanent et la fin de l'expérience. À l'aide des données tracées sur la figure 7A (cf. pages précédentes), on mesure : $\Delta T_1 = 9,6 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ et $\Delta T_2 = 10,1 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ pour le capteur noir, ce qui nous permet de calculer l'albédo α du capteur :

$$\alpha = 1 - \frac{m_{eau} c_{P,eau} \times \Delta T_2 + m_c c_{P,c} \times \Delta T_1}{F_s(d) \times S \Delta t}.$$

On estime donc cet albédo à 23 % pour le capteur noir. Il s'agit de la fraction d'énergie perdue par réflexion, ce qui montre que, bien que le capteur soit noir, l'absorption n'est pas parfaite. En effet, l'albédo dépend aussi de l'état de la surface ; il sera par exemple plus grand si la surface est parfaitement lisse.

En reproduisant cette expérience avec le capteur peint en blanc, nous obtenons un albédo égal à 67 %. Cette valeur, bien supérieure à celle du capteur noir, montre qu'il est primordial de peindre la surface du capteur en noir pour augmenter l'efficacité du chauffe-eau.

3.5. Échanges thermiques dans le capteur

On comprend que toute l'énergie arrivant sur le capteur ne sera pas intégralement utilisée pour chauffer l'eau du réservoir. L'énergie absorbée par le capteur est $m_C c_{p,c} \times \Delta T_1$, alors que celle effectivement absorbée par le fluide est $m_{eau} c_{p,eau} \times \Delta T_2$. Le rapport entre ces deux énergies correspond au coefficient de transfert :

$$\epsilon = \frac{m_{eau} c_{p,eau} \times \frac{\Delta T_2}{\Delta t}}{m_C c_{p,c} \times \frac{\Delta T_1}{\Delta t}}.$$

Ce coefficient ϵ est assimilable à un coefficient de transfert énergétique conducto-convectif entre le capteur solide et l'eau qui circule dans les serpentins et rend compte de l'efficacité des transferts énergétiques entre le capteur et le fluide. Il dépend du mode de transfert, de l'état de surface des tuyaux, de leur composition, du régime d'écoulement (laminaire ou turbulent), de la nature du fluide...

Les évolutions temporelles des températures étant linéaires en régime permanent, ce coefficient de transfert est constant. On peut en tirer les valeurs suivantes pour les deux capteurs :

$$\epsilon_{blanc} = 4,7 \pm 0,3 \quad \text{et} \quad \epsilon_{noir} = 5,3 \pm 0,3.$$

Ces valeurs sont proches, ceci étant dû au fait que les échanges thermiques entre le fluide et le capteur ne dépendent pas de la manière dont le capteur est éclairé, mais de la configuration intrinsèque du système. Dans notre situation, les réseaux de canaux sont relativement identiques dans les deux capteurs, et le débit d'eau est le même.

3.6. Efficacité du chauffe-eau

On calcule à présent l'efficacité totale du chauffe-eau. Cette efficacité est définie comme le rapport entre l'énergie fournie par la lampe et celle emmagasinée par l'eau, soit :

$$\eta = \frac{m_{eau} c_{p,eau} \times \Delta T_2}{F_s(d) \times S \Delta t},$$

où Δt est la durée de fonctionnement du chauffe-eau en régime permanent, temps durant lequel l'eau s'est échauffée de ΔT_2 . Cette grandeur peut se réécrire en fonction de l'albédo et du coefficient de transfert défini précédemment :

$$\eta = \frac{1 - \alpha}{1 + \epsilon^{-1}}.$$

L'efficacité rend compte de la capacité du capteur à absorber l'énergie solaire, ainsi que des pertes dans le transfert de chaleur entre le capteur et le réservoir. Expérimentalement, on trouve les valeurs numériques suivantes pour les deux capteurs : $\eta_{noir} = 63\%$, $\eta_{blanc} = 27\%$. Cette différence provient principalement de la différence d'albédo des deux absorbeurs. On en déduit des valeurs des coefficients de transfert $\epsilon_{noir} = 4,9$, et

$\epsilon_{\text{blanc}} = 5,5$, ce qui est cohérent avec les estimations précédentes.

CONCLUSION

Dans cet article, nous avons conçu un chauffe-eau solaire simplifié et nous avons étudié son rendement en travaux pratiques. Ce système permet de réaliser une étude complète des transferts thermiques au sein d'un capteur solaire et d'établir des bilans thermodynamiques. En particulier, nous avons montré qu'un capteur peint en noir fournit un rendement de 63 %, qui est nettement supérieur au même capteur peint en blanc, dont le rendement est seulement de 27 %. Dans les systèmes réels, les capteurs sont ainsi bien peints en noir, mais nous nous attendons à un rendement plus faible, car des pertes énergétiques supplémentaires ont lieu lors du transfert de chaleur entre le fluide caloporteur et l'eau du réservoir. En maintenant une source de chaleur constante, nous avons maximisé le rendement.

À l'avenir, il pourrait être intéressant de moduler la luminosité de la lampe pour prendre en compte la variation de lumière naturelle, et notamment l'alternance jour/nuit. Ceci requiert alors d'étudier la dynamique du chauffe-eau et son régime transitoire. Enfin, d'autres paramètres sont susceptibles d'influencer le rendement du chauffe-eau, comme par exemple le débit d'eau circulant dans le capteur.

REMERCIEMENTS

Nous remercions Olivier Devauchelle pour la mise en place de la carte *Arduino*, ainsi qu'Édouard Kaminski qui a été responsable des travaux pratiques (TP).

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Guide pratique du chauffage et de l'eau chaude solaires de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME, ministère de la transition écologique).
- [2] C. A. Gueymard, "The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models", *Solar energy*, 76 (4), p. 423–453, 2004.
- [3] G. Bruhat, *Thermodynamique, cours de physique générale*, 1947.
- [4] S. Olivier et H. Gié, *Thermodynamique 1^{ère} et 2^e année*, Tec&Doc, 1998.
- [5] Le dispositif a été conçu initialement dans le cadre d'un projet industriel de Master Pro 1^{ère} année GEI (Master STPE, Université de Paris, IPGP) réalisé par Victorien Liesse et Mathieu Mutel.

Annexe

Étude d'un chauffe-eau solaire au laboratoire

1. GLOSSAIRE DE PHOTOMÉTRIE

Nous faisons ici un rappel de quelques notions utilisées dans l'article. Les grandeurs définies ci-dessous sont toutes des grandeurs énergétiques, et globales (on ne s'intéresse donc pas à la répartition spectrale de puissance, nous raisonnons en bilans énergétiques globaux).

Considérons une source de lumière de surface S_{source} . Cette source émet une puissance totale $\phi_{émise}$ (en W). On définit l'émittance (ou l'exittance) de la source M (en W/m^2) comme la puissance émise par la source par unité de surface de l'émetteur :

$$M = \frac{d\phi_{émise}}{dS_{source}}.$$

Cette grandeur ne dépend que des caractéristiques de l'émetteur.

Considérons à présent un récepteur de lumière, de surface S_{rec} qui reçoit une puissance lumineuse $\phi_{reçue}$. Nous pouvons alors définir la puissance reçue par unité de surface du récepteur, que l'on appelle éclairement (ou irradiance):

$$F = \frac{d\phi_{reçu}}{dS_{rec}}.$$

Les notions d'émittance et d'éclairement sont à utiliser selon le point de vue utilisé : la première caractérise l'émetteur, alors que la seconde caractérise le récepteur.

2. CONSTANTE SOLAIRE

Comme démontré dans l'article (sous-paragraphe 1.1.), l'éclairement reçu dans la haute atmosphère terrestre, perpendiculairement à l'axe Terre-Soleil, est donné par la constante solaire :

$$F_s = \sigma T_s^4 \times \left(\frac{R_s}{R_s + d} \right)^2$$

avec σ la constante de Stefan-Boltzmann, T_s la température de surface du Soleil, R_s le rayon du Soleil, et d la distance Terre-Soleil. La puissance totale passant à travers le diaphragme de rayon R_T vaut donc $P_T = F_s \times \pi R_T^2$ (cf. figure 9, page ci-contre). Ainsi, l'éclairement réel à la surface de la Terre F_{sol} correspond à la puissance totale reçue P_T qui se répartit sur la surface de la demi-sphère terrestre éclairée par le soleil :

$$F_{sol} = \frac{P_T}{2\pi R_T^2}.$$

On remarque qu'alors $F_{sol} = F_S/2$, c'est-à-dire que l'éclairement reçu au sol est dilué par rapport à celui mesuré en haute atmosphère. Cet effet est purement géométrique. Lorsque la planète tourne assez vite, comme c'est le cas pour la Terre, on peut même considérer que la puissance incidente P_T se répartie sur l'intégralité de la surface planétaire, soit $4\pi R_T^2$. Dans ce cas, l'éclairement au sol est dilué d'un facteur 4 : $F_{sol} = F_S/4$. Il peut être intéressant, lors du choix de l'éclairement du capteur plan, de discuter avec les étudiants des différents aspects influençant l'éclairement à la surface d'une planète. Il conviendra de distinguer les effets de dilution géométrique (propagation depuis le soleil, et répartition de la puissance sur une sphère) des effets de dissipation (diffusion, absorption par l'atmosphère).

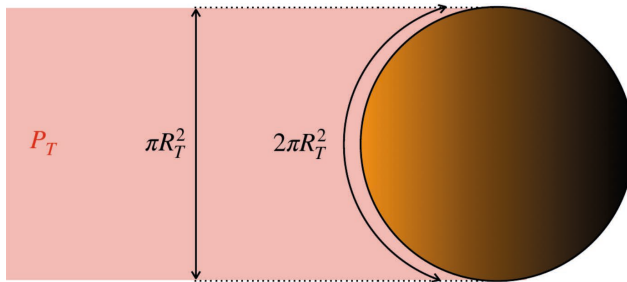


Figure 9 - Éclairement de la Terre. Schéma de principe pour la mise en évidence de la dilution géométrique de l'éclairement de la Terre.

3. RAYONNEMENT ISOTROPE

Considérons une source ponctuelle émettant une puissance totale ϕ (en W) dans une direction caractérisée par le vecteur \mathbf{n} . On considère un récepteur (comme la photopile) de surface (S_r) perpendiculaire à l'axe de visée (OO') porté par \mathbf{n} (cf. figure 10). Depuis la source, le récepteur est vu sous un angle solide $d\Omega = \frac{dS_r}{d^2}$ (en stéradian). Cet angle solide représente le cône reliant le point source à un élément de

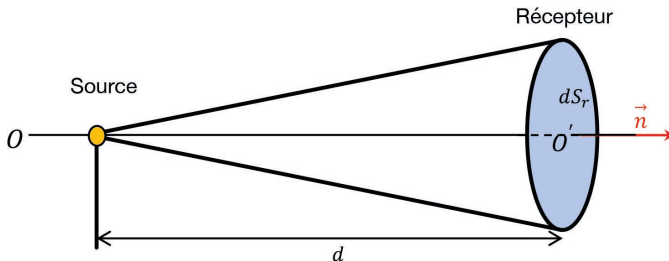


Figure 10 - Flux d'un rayonnement isotrope. Schéma de principe pour le calcul de la puissance reçue par un capteur placé perpendiculairement à l'axe de visée d'une source ponctuelle.

surface dS_r du récepteur. On définit alors l'intensité de la source dans la direction \mathbf{n} comme la puissance allant de la source vers le récepteur selon la direction \mathbf{n} à travers le cône de hauteur d , éclairant l'élément de surface dS_r :

$$I(\mathbf{n}) = \frac{d\phi}{d\Omega}.$$

En remplaçant ensuite l'angle solide par son expression, on obtient :

$$I(\mathbf{n}) = d^2 \frac{d\phi}{dS_r},$$

où l'on reconnaît l'éclairement $F_s = \frac{d\phi}{dS_r}$ (en W/m^2).

Dans le cas d'une source isotrope, l'intensité rayonnée par la source est indépendante de la direction \mathbf{n} : $I(\mathbf{n}) = I_0$, et on a la relation suivante entre l'éclairement et la distance entre la source et le récepteur :

$$F_s = \frac{I_0}{d^2}.$$

Cette démonstration peut être généralisée dans le cas d'une source étendue et d'un capteur ayant une orientation quelconque par rapport à cette source, en utilisant la notion de luminance [1-2]. Le résultat est identique, et l'éclairement reçu par le capteur varie toujours en $\frac{1}{d^2}$.

4. LISTE DU MATÉRIEL

Pour la caractérisation et l'étalonnage de la source : lampe de puissance ♦ règle graduée ♦ photopile mesurant un éclairement énergétique (en W/m^2) ♦ multimètre.

Pour l'étude du capteur plan : capteur plan solaire de laboratoire ♦ lampe de puissance ♦ potence ♦ tuyau de raccord ♦ vase calorifugé pour le réservoir d'eau chaude ♦ pompe hydraulique ♦ carte Arduino ♦ résistance électrique (ici $R = 7,49 \text{ k}\Omega$) ♦ câble de raccord analogique/numérique ♦ thermistances CTN 10 $\text{k}\Omega$ ($\times 2$).



Anaïs ABRAMIAN
 Post doctorante
 Agrégée de physique
 Institut Jean le Rond d'Alembert
 Sorbonne Université
 Paris



Cyril STURTZ
 Doctorant
 Agrégé de physique
 Institut de physique du globe de Paris
 Université de Paris
 Paris



Alexandre FOURNIER
Enseignant-chercheur
Agrégé de physique
Institut de physique du globe de Paris
Université de Paris
Paris



Daniel RICHARD
Enseignant-chercheur
Institut de physique du globe de Paris
Université de Paris
Paris



Pascal GODEFROY
Responsable technique
Institut de physique du globe de Paris
Université de Paris
Paris



Édouard KAMINSKI
Enseignant-chercheur
Institut de physique du globe de Paris
Université de Paris
Paris