

# Projet Minuto

chef de projet: Medjibe HASHIM-FAROOQI  
EL MEDIONI Lilah, ONASSER Brahim, Axel JONARD  
HUREL Constant, EL HADARY Ossama

15 janvier 2025

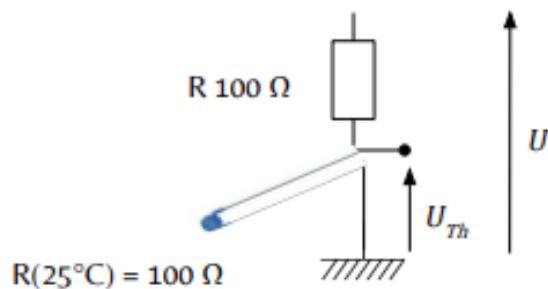
La mission technique MINUTO a pour objectif de réaliser des mesures précises d'irradiance solaire afin de mieux comprendre les variations de l'énergie solaire disponible en fonction des conditions environnementales. Ce projet vise à collecter des données fiables pour analyser les performances des systèmes photovoltaïques, évaluer leur rendement énergétique et contribuer au développement des solutions optimisées pour l'exploitation de l'énergie solaire. À travers l'utilisation d'instruments de mesure avancés et une méthodologie rigoureuse, cette mission cherche à fournir des résultats exploitables pour la recherche scientifique, ainsi que pour des applications industrielles et environnementales. Elle s'inscrit dans une démarche globale de transition énergétique et d'adaptation aux défis climatiques.

## 1 Etalonnage de la thermistance :

Une thermistance (ou résistance thermique) est un composant électronique dont la résistance électrique varie avec la température.



### 1.1 But de l'étalonnage :



$$U_{Th} = f_2(R_{Th}) = f_3(T)$$

A travers l'utilisasion d'un pont diviseur : On va tracer le courbe de  $U_{The}$  au borne de thermistance à étalonner en foncton de la température  $T$

## 1.2 Protocole de l'étalonnage :

### 1.2.1 Matériel utilisé :

- La thermistance (à étalonner)
- Le capteur de température TMP117
- Une résistance  $R=100 \Omega$
- L'Arduino UNO R4
- Une boîte en polystyrène
- Un ventilateur
- Des blocs de glace
- Une ampoule

### 1.2.2 Préparation de l'étalonnage :

L'étalonnage repose sur la construction d'un circuit en pont diviseur de tension, conçu en soudant soigneusement les différentes composantes conformément au schéma électrique prévu. Ce circuit est alimenté par une carte Arduino.

Le capteur de température *TMP117*, qui fait partie intégrante du circuit, est connecté à l'Arduino et mesure la température ambiante en temps réel. Simultanément, la borne de la thermistance de potentiel  $[U_{th}]$  est reliée à une entrée analogique de l'Arduino. L'Arduino enregistre ainsi la valeur de  $[U_{th}]$  en fonction de la température mesurée par le capteur.

### 1.2.3 L'étalonnage :

Une boîte en polystyrène fermée est utilisée comme enceinte isolée. Initialement, de la glace est placée à l'intérieur pour abaisser la température, accompagnée d'un ventilateur qui reste actif tandis qu'une ampoule reste éteinte. L'activation du ventilateur garantit une homogénéisation de la température à l'intérieur de la boîte. Cette étape permet d'atteindre une température basse et stable, correspondant dans notre cas à environ 3.5 °C, qui reflète les conditions froides désirées, similaires à celles observées à Brest.

Une fois cette température basse atteinte, la glace est retirée et l'ampoule est allumée, tandis que le ventilateur reste actif pour maintenir une répartition uniforme de la chaleur. L'ampoule joue alors un rôle de source de chaleur, permettant de réchauffer progressivement l'air à l'intérieur de la boîte. A ce niveau là Le circuit est placé à l'intérieur de l'enceinte, et l'enregistrement des données débute. La durée de cette phase est fixée à environ 15 minutes.

## 1.3 Résultats étalonnage

Ainsi on récupère instantanément à partir du code arduino les valeurs de tensions aux bornes de la thermistance en fonction de la température mesurée par le capteur thermique. Les données récupérées sont stockées dans un fichier .csv pour ensuite être traitées sur excel. Voici la représentation graphique de nos résultats :



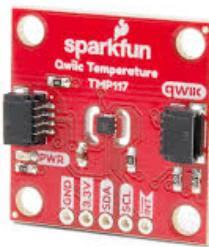
(a) La thermistance



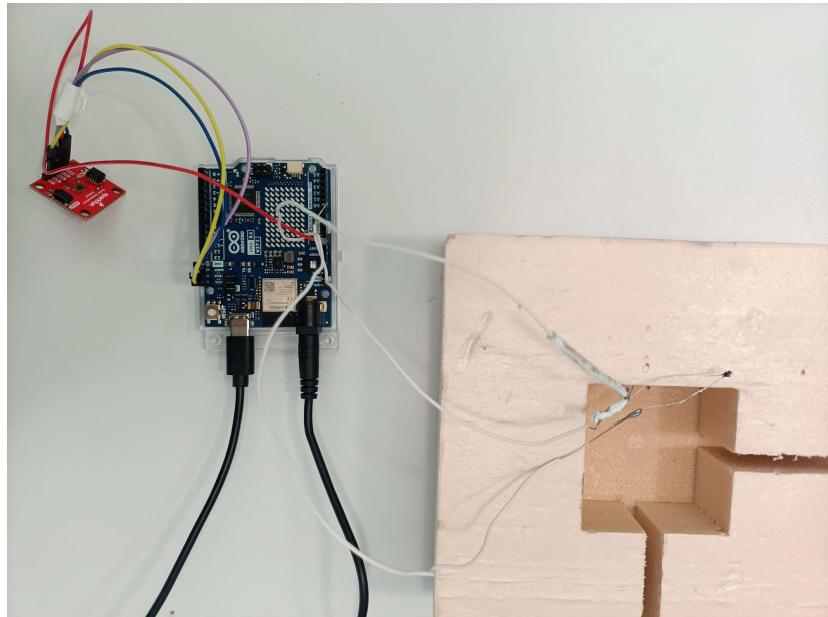
(b) L'Arduino UNO R4



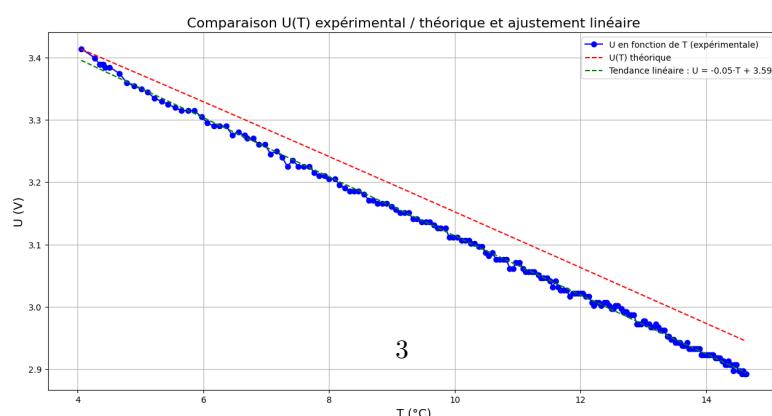
(c) La résistance 100  $\Omega$

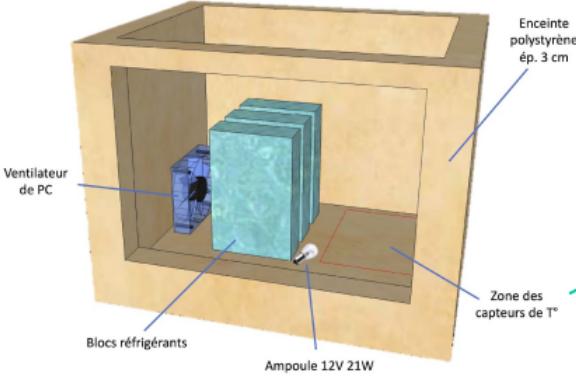


(d) Capteur TMP117



(e) Circuit d'étalonnage





Sur l'intervalle de température allant de 4°C à 14,5°C, la tension mesurée peut être approchée par une droite affine de pente négative :

$$U_{Th} = -0.05T + 3.59.$$

Nous comparons ensuite ces mesures à la tension théorique (voir figure 2), que l'on calcule à partir de la résistance de la thermistance (équation 1) et de la formule du pont diviseur (équation 2).

$$R_{th}(T) = R(T_0) \exp\left(\beta\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right), \quad (1)$$

où  $\beta = 3096$  et  $T_0 = 298$  K. La tension théorique s'obtient alors via :

$$U_{th}(T) = \frac{4.97 \times R_{th}(T)}{100 + R_{th}(T)}. \quad (2)$$

On constate que les courbes théoriques et réelles suivent la même tendance ce qui confirme la validité du protocole suivi. Il y a cependant un écart de valeurs qui apparaît entre les deux courbes et s'élargit à mesure que la température augmente, on a chercher à quantifier cette écart en calculant la racine de l'erreur quadratique moyenne et on obtient :  $REQM \approx 0.16\%$ , valeur très faible qui nous rassure sur la précision des résultats.

Toutefois pour s'assurer de la fidélité de nos mesures, nous avons tracé l'évolution de la résistance expérimentale (voir l'équation 1) sous forme de logarithme népérien, à savoir :

$$\ln\left(\frac{R_{exp}}{R_0}\right) = \beta\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right), \text{ en fonction de la température.}$$

Les valeurs réelles de la résistance de la thermistance ont préalablement été déterminées en recourant à la loi d'Ohm et au pont diviseur de tension :  $R_{exp} = \frac{U_{Th} \times R_{shunt}}{U_{shunt}}$  avec  $R_{shunt} = 100\Omega$ . On obtient le graphique suivant :

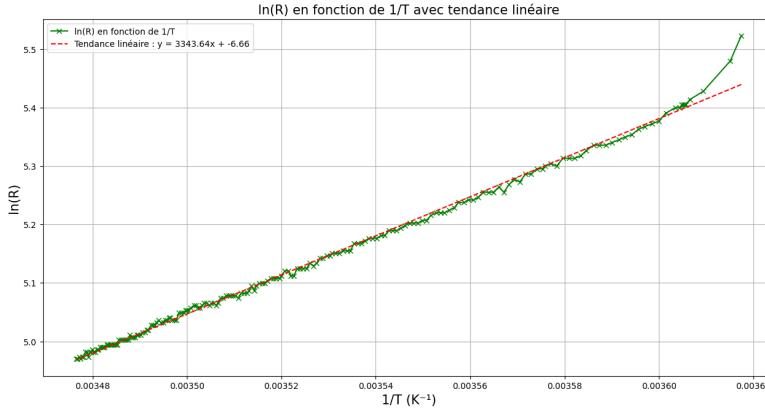


FIGURE 3 – Graphique du logarithme népérien de la résistance R de la thermistance en fonction de l'inverse de la température T

La valeur de  $\beta$  expérimentale obtenue est 3343.64 et l'erreur relative par rapport à la valeur théorique est de 8.19%.

Une différence significative qui peut s'expliquer par des pertes de tension dû au soudage, et par la résolution en bit de l'arduino qui peut manquer de précision pour la mesure de la tension aux bornes de la thermistance.

## 2 Détermination de Ct

### 2.1 Mesure de Ct

**Expérience effectuée :**

On applique tension initiale de 4.97V (tension délivrée par la carte Arduino) qui fera chauffer le fil vert de NiCr. Le fil vert est dans l'un des trous du bloc de laiton prévu à cet effet. Cela fera chauffer le bloc. Parrallèlement, on introduit la thermistance dans le 2ème trou du bloc prévu à cet effet et on mesure la variation de tension aux bornes de la thermistance précédemment étalonnée. Cela nous donne accès à la valeur de résistance donc à la variation de la température. A l'aide du premier principe cité ci-après on pourra en déterminer une valeur de Ct. Ce qui a été intéressant lors de la mise en place de cette expérience c'est le soudage, qui était quelque chose de nouveau pour nous. Nous avons fortement apprécié le côté ludique de cette tâche.

**A l'aide du montage suivant et des formules d'électrocinétiques :**

$$Pj = U_{fil} * I = R * I^2 = R * (Ush/Rsh)^2$$

Selon le premier principe de la thermodynamique, si l'on néglige toutes les pertes de chaleur en supposant que le polystyrène empêche les transferts thermiques avec l'extérieur, la chaleur produite par effet Joule reste intégralement contenue dans le système. Pour un système électrique, on sait que cette chaleur est directement proportionnelle à l'énergie dissipée :

$$\Delta Q = m * Ct * \Delta T = Pj * \Delta t$$

On en déduit donc la formule :

$$Ct = \frac{(R * (Ush/Rsh)^2 * \Delta t)}{m * \Delta T}$$

$$\text{AN : } Ct = \frac{(9,1 * (0,48)^2 * 300)}{0,622 * 2,7} \approx 374 \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

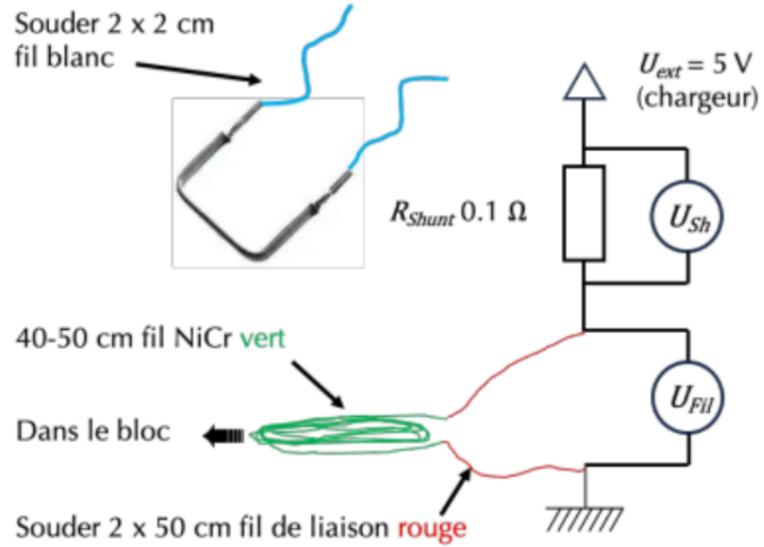


FIGURE 4 – Montage de l’expérience

## 2.2 Incertitude sur la mesure de $C_T$

On rappelle la formule de la capacité thermique massique où l’on note  $P$  la puissance thermique fourni par le circuit.

$$C_T = \frac{P \Delta t}{m \Delta T}$$

On peut désormais s’intéresser à incertitude sur  $C_T$ . En effet, notre système reste approximatif dans les grandeurs que l’on emploie. D’une part, comme vu précédemment, on suppose que toute l’énergie thermique produite par l’échauffement du fil chauffant dans le circuit électrique est entièrement récupéré en transfert thermique et que la seule variation de température de ce dernier entraîne la variation de température de la thermistance, et donc de la résistance de cette dernière. Etant donné le nombre de mesure réalisé, on utilise un modèle d’incertitude composé :

$$\Delta C_T = C_T \sqrt{\left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2}$$

Comme vu précédemment, la puissance  $P$  est déterminé par la tension aux bornes du fil chauffant par lecture avec le multimètre. De plus, l’intensité est obtenu par :

$$I = \frac{U_{\text{shunt}}}{R_{\text{shunt}}}$$

$$\Delta U = U \sqrt{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2}$$

On a de même mesurer la tension  $U_{\text{shunt}}$  au multimètre avec une incertitude sur la mesure de l’ordre de 0.01 V.

Finalement :

$$\Delta U = 4.37 \sqrt{\left(\frac{0.01}{0.48}\right)^2 + \left(\frac{0.01}{9.2}\right)^2} \approx 9.12 \times 10^{-2} \text{ V}$$

De plus, on a estimé l'incertitude sur la masse à 1 mg étant donné la balance employé. Pour le temps, une incertitude de l'ordre de la seconde et pour la température à la plus petite décimale de la mesure de tension fourni par la carte arduino, soit de 0.001 K.

On obtient :

$$\Delta C_T = C_T \sqrt{\left(\frac{\Delta U}{4.37}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{0.48}\right)^2 + \left(\frac{1}{622}\right)^2 + \left(\frac{0.001}{0.135}\right)^2 + \left(\frac{1}{300}\right)^2} \approx 11.2 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

Finalement, on peut écrire :

$$C_t = 374.7 \pm 11.2 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

Par ailleurs, il existe également d'autres sources d'incertitudes plus compliquées à estimer et donc à introduire dans notre calcul. D'une part, le quadripôle qui contient la résistance de shunt est alimenté par l'intermédiaire d'un chargeur dont la tension n'est pas précisément celle annoncée". Nous nous sommes donc basés sur une valeur approximative. De même pour le quadripôle comportant le fil chauffant alimenté par la carte arduino avec supposément 5.00 V. Or l'erreur que nous avons fait est de ne pas mesurer préalablement la tension à l'aide d'un multimètre pour éviter ces approximations.

De plus, au fur et à mesure que le temps et les manipulations passaient, le trou dans le bloc de laiton avec le fil chauffant perdait sa pâte thermique. De même pour le trou avec la thermistance. Ainsi, l'hypothèse de conservation de l'énergie thermique au sein du bloc entre les deux trous n'est pas réellement respectée. Ainsi, les pertes augmentent et donc l'énergie nécessaire pour faire varier la température au sein du bloc augmente. Donc la puissance fournie est en réalité inférieure à celle nécessaire pour l'hypothèse. Finalement, d'après la formule de la capacité thermique massique  $C_T$ , nous l'avons sous-estimée lors de notre mesure.

### 3. Mesure de l'irradiance

Désormais, après avoir déterminé la capacité thermique massique  $C_T$ , on peut s'intéresser à la mesure d'irradiance solaire.

Dans le cadre de cette expérience, nous avons respecté certains critères suivants pour pouvoir obtenir les mesures les plus précises possibles.

#### 3.1 Protocole

- Laisser le cube de laiton dehors à l'abri du soleil jusqu'à ce qu'il se stabilise à température ambiante.
- Placer la face concernée du cube à la normale des rayons du soleil à l'aide de l'ombre du bâton fourni.
- Lancer le programme et relever les valeurs.
- Calculer la valeur de l'irradiance solaire.

La première étape du protocole permet d'obtenir une élévation de température du bloc de laiton uniquement causée par l'irradiance solaire. Nous avons réalisé deux mesures sans corrélation particulière

sous un soleil conséquent.

Une le 09 janvier débutant aux alentours de 9h00 ainsi que le 12 janvier vers 13h00.

Nos expériences ont durés 10 minutes. Ainsi, sur cette durée nous obtenons une certaine variation de tension donnée par la carte arduino. De plus, grâce à la courbe d'étalonnage de la thermistance figure(1) de la tension en fonction de la température, on en déduit la variation de température correspondantes  $\Delta T$ .

On rappelle l'expression de l'irradiance solaire en fonction des données précédentes, obtenus par le premier principe de la thermodynamique appliquée au bloc de laiton en considérant comme travail extérieur celui de la puissance radiative du soleil, ainsi que le socle en polystyrène adiabatique :

$$F = \frac{m C_T \Delta T}{S \Delta t}$$

Ensuite, à l'aide d'un code python, on peut tracer la température de la thermistance en fonction du temps. Pour cela, on déduit la température en fonction de la tension à l'aide de la fonction donnée par la courbe d'étalonnage. On lit ainsi la pente de cette courbe qui correspond directement au rapport  $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ .

Dans notre cas, pour le 12 janvier, on obtient :

$$F = \frac{0.622 \times 374.67}{0.0025} \times 6.29 \times 10^{-3} \approx 587 \text{ W.m}^{-2}$$

Pour le 09 janvier, on obtient

$$F \approx 131 \text{ W.m}^{-2}$$

On obtient bien une irradiance supérieure pour la mesure en milieu de journée que pour le matin, ce qui est assez intuitif.

### 3.2 Incertitude sur la mesure de $F$

De la même façon que précédemment, on utilise la méthode des incertitudes composées. Cette fois si on ne recompte pas la masse dans la formule étant donné que son incertitude dans la mesure de  $C_t$  égale celle dans cette expérience.

Ainsi, la nouvelle source d'incertitude est la surface que l'on mesure à la règle avec donc une incertitude de 1 mm.

On a donc :

$$\Delta F = F \sqrt{\left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S}{S}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C_T}{C_T}\right)^2} \approx 9.17 \text{ W.m}^{-2}$$

On peut donc écrire :

$$F = 587 \pm 9.17 \text{ W.m}^{-2}$$

Par ailleurs, il existe des incertitudes supplémentaires telle que le fait que l'inclinaison de la surface du bloc ne soit pas parfaitement normale au soleil ou encore que la température extérieure peut varier et donc faire varier la température de la thermistance à l'intérieur du bloc bien qu'il soit isolé thermiquement. Ainsi, l'irradiance mesurée n'est pas exactement celle réelle.

De plus, notre approximation d'incertitude reste insuffisante. En effet, dans un premier temps, il aurait fallu prolonger l'acquisition pour atteindre la saturation en température pour avoir des mesures plus exploitable. Par ailleurs, une approximation linéaire de la courbe aurait été plus précise. En effet, on peut utiliser la méthode des moindres carrés. En minimisant la fonction :

$$S(a, b) = \sum_{i=1}^n (T_i - (at_i + b))^2$$

Les solutions pour  $a$  et  $b$  sont :

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n t_i T_i - (\sum_{i=1}^n t_i) (\sum_{i=1}^n T_i)}{n \sum_{i=1}^n t_i^2 - (\sum_{i=1}^n t_i)^2}$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n T_i - a \sum_{i=1}^n t_i}{n}$$

Ainsi, on a eu l'ordre de grandeur réel de nos incertitudes.

## Conclusion :

À l'issue de notre mission technique, nous avons mesuré l'irradiance solaire à différents moments de la journée, obtenant des résultats représentatifs des variations naturelles en fonction de l'angle solaire. À 8h, l'irradiance mesurée était de 131 W/m<sup>2</sup>, tandis qu'à 13h, elle atteignait 587 W/m<sup>2</sup>, avec une incertitude associée de 9,17 W/m<sup>2</sup>. Ces résultats confirment l'impact de la position du soleil, plus élevé dans le ciel à 13h qu'à 8h, sur l'énergie reçue au sol. Ces valeurs peuvent être directement exploitées pour estimer les performances d'équipements solaires. Par exemple, une irradiance de 587 W/m<sup>2</sup> permettrait, sur un panneau solaire standard d'un mètre carré avec un rendement de 20%, de produire environ 117 W, ce qui suffirait à alimenter deux ampoules LED de 60 W ou plusieurs appareils de faible consommation. Ces résultats sont également utiles pour des applications variées, comme l'évaluation du potentiel énergétique de sites, la planification de l'autonomie énergétique des bâtiments ou encore le dimensionnement de systèmes solaires pour l'agriculture ou l'industrie.