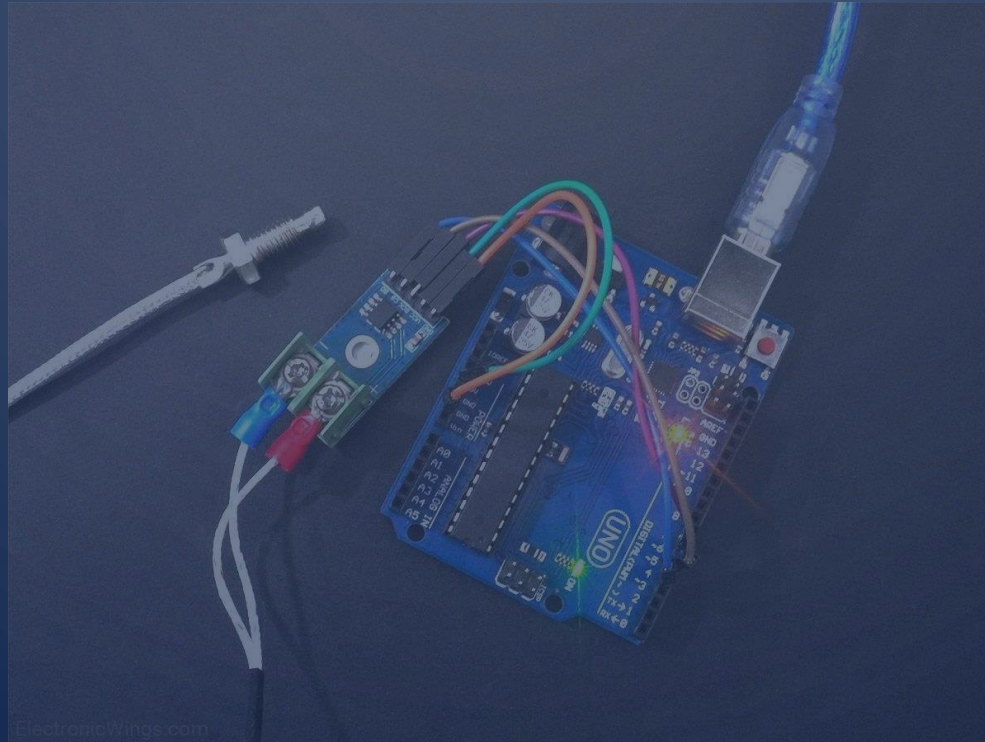


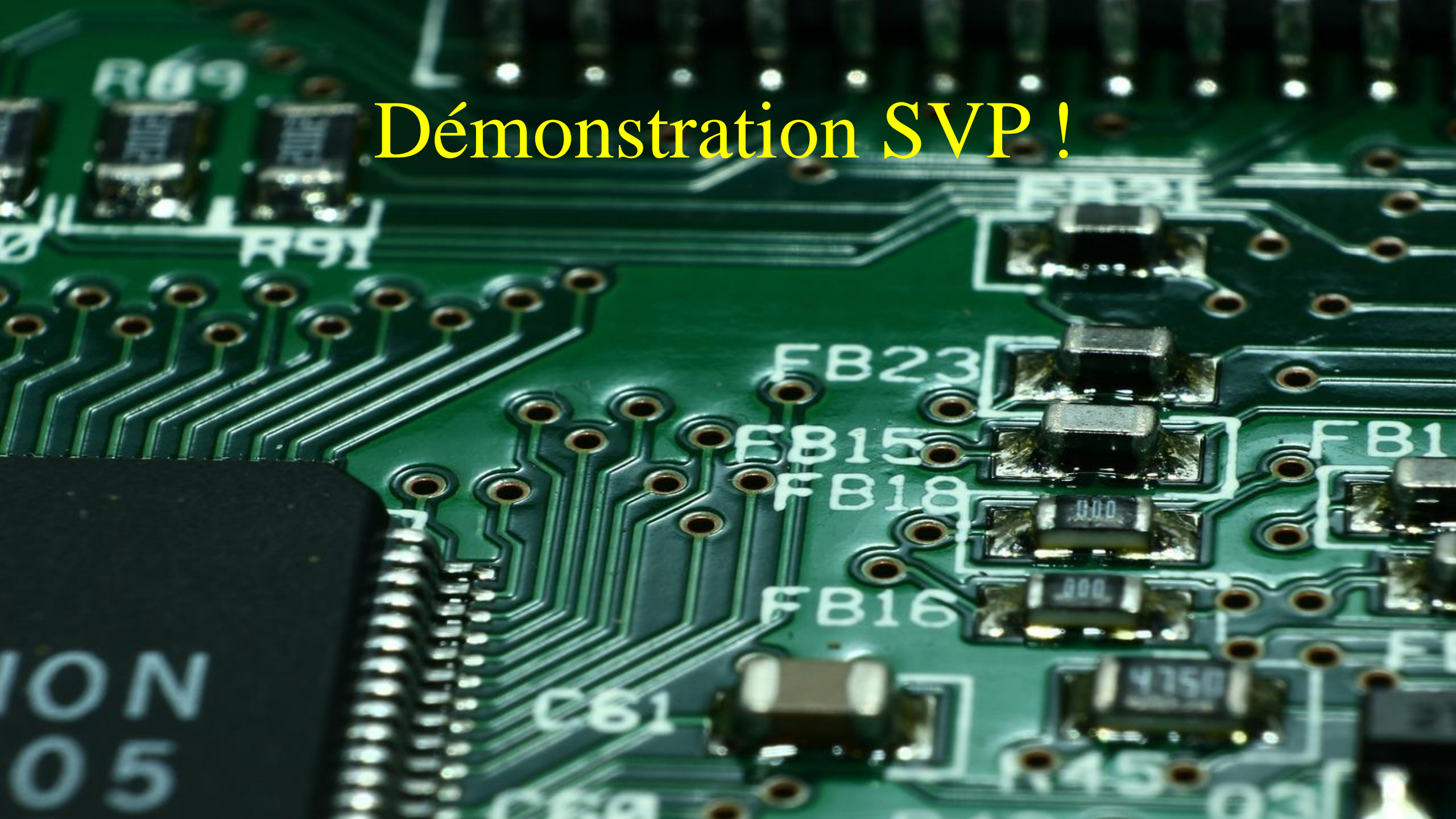
THERMOCOUPLES ET...ARDUINO



Introduction aux Thermocouples

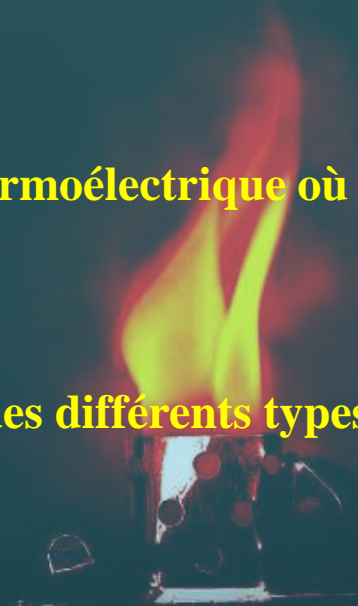
- **Définition:** Un thermocouple est un capteur de température composé de deux métaux différents joints à une extrémité, générant une tension qui varie avec la température.
- **Principe de Fonctionnement:** Basé sur l'effet Seebeck, où une différence de température entre les jonctions chaude et froide génère une tension électrique.
- **Applications:** Large utilisation dans l'industrie pour la mesure de températures élevées, dans les processus chimiques, la fabrication de métal, et les systèmes de chauffage.

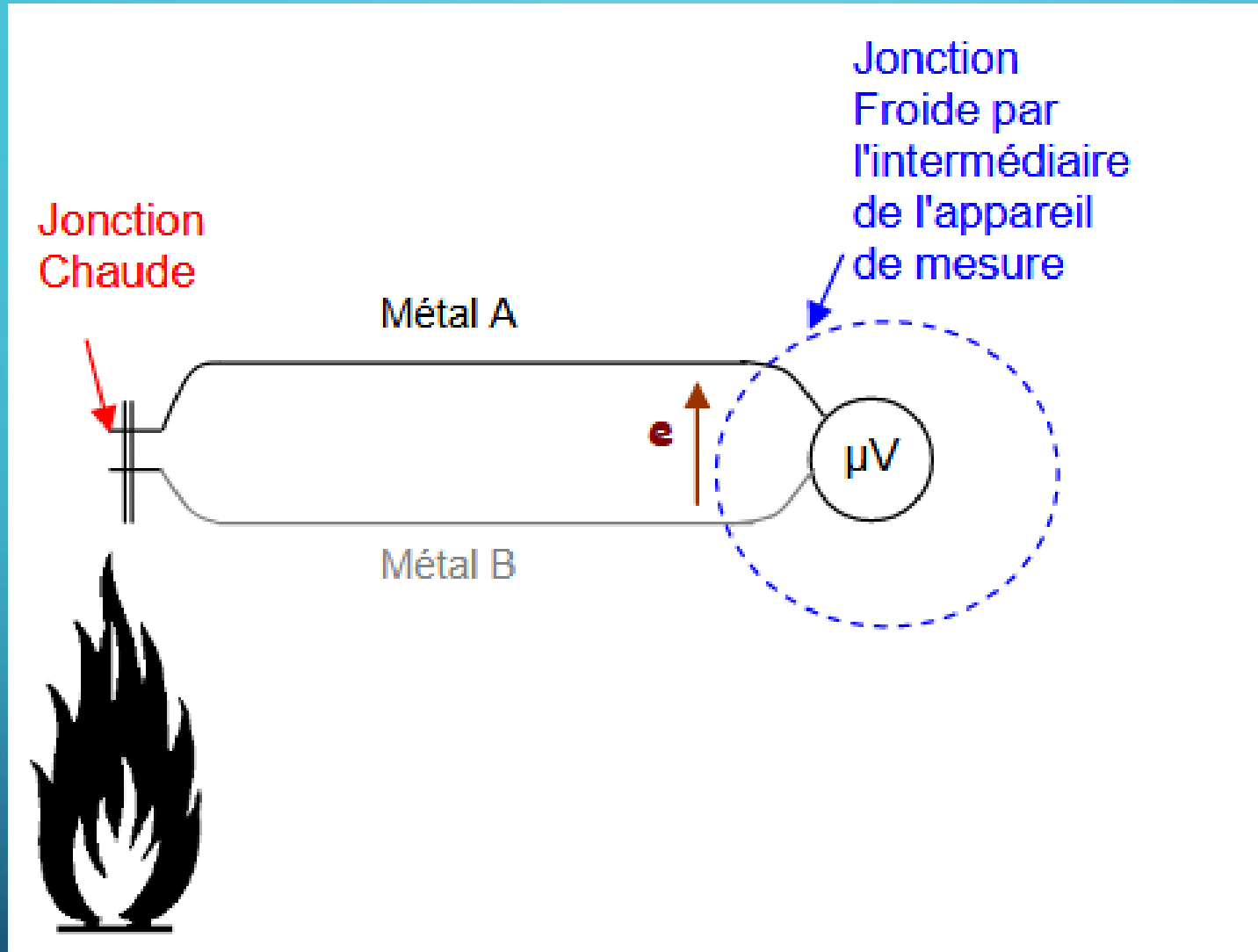
Démonstration SVP !



Fonctionnement détaillé des Thermocouples

- **Effet Seebeck:** Explication de l'effet thermoélectrique où une différence de température entre deux métaux produit une tension électrique.
- **Types de Thermocouples:** Description des différents types (K, J, T, etc.), leurs matériaux et leurs plages de température.
- **Avantages et Limitations:** Avantages tels que la large gamme de températures et les limites, incluant la nécessité de la compensation de la soudure froide.





Les différents types de thermocouples

- **Type K (Chromel / Alumel) :**
 - **Plage de température : -200°C à 1260°C**
 - **Utilisation : Très répandu en raison de sa large plage de température et de sa stabilité. Utilisé dans les industries chimiques, alimentaires, etc.**
- **Type J (Fer / Constantan) :**
 - **Plage de température : -210°C à 1200°C**
 - **Utilisation : Principalement utilisé dans les applications où le type K ne peut pas être utilisé en raison de son oxydation à haute température. Par exemple, dans les environnements sous vide ou à atmosphère inerte.**
- **Type T (Cuivre / Constantan) :**
 - **Plage de température : -250°C à 400°C**
 - **Utilisation : Convient aux basses températures. Utilisé dans les applications cryogéniques, les laboratoires de recherche, etc.**

- **Type E (Chromel / Constantan) :**
- **Plage de température : -270°C à 1000°C**
- **Utilisation : Convient aux environnements extrêmement froids et aux températures modérément élevées. Utilisé dans les applications de réfrigération, de congélation, etc.**

- **Type S (Platine / Rhodium-10) :**
- **Plage de température : 0°C à 1600°C**
- **Utilisation : Principalement utilisé dans les applications de haute précision, les laboratoires de métrologie, les industries aérospatiales, etc.**

- **Type R (Platine / Rhodium-13) :**
- **Plage de température : 0°C à 1600°C**
- **Utilisation : Similaire au type S, mais avec une légère différence de composition.**
- **Utilisé dans les mêmes applications de haute précision.**

Alumel 95% de Nickel, 2% Manganèse, 2% d'Aluminium et 1 % de Silicium

Chromel 90% de Nickel et 10% de Chrome

Constantan 55% de Cuivre et 45% de Nickel

Rhodium – 10, 90% de Platine et 10% de Rhodium

Avantages et inconvénients

Avantages :

- 1.Plage de température étendue :** Les thermocouples peuvent mesurer une large gamme de températures, allant des températures cryogéniques aux températures extrêmement élevées, en fonction du type de thermocouple utilisé.
- 2.Rapidité de réponse :** Les thermocouples peuvent fournir des mesures de température en temps réel, ce qui les rend adaptés aux applications où une réponse rapide est nécessaire.
- 3.Robustesse :** Les thermocouples sont généralement assez robustes et peuvent résister à des environnements difficiles, tels que les vibrations, les chocs mécaniques, les atmosphères corrosives, etc.
- 4.Coût :** Comparés à d'autres types de capteurs de température, les thermocouples sont souvent plus abordables, ce qui en fait un choix économique pour de nombreuses applications.
- 5.Facilité d'utilisation :** Les thermocouples sont relativement simples à installer et à utiliser, et ils ne nécessitent généralement pas de circuit d'excitation complexe.

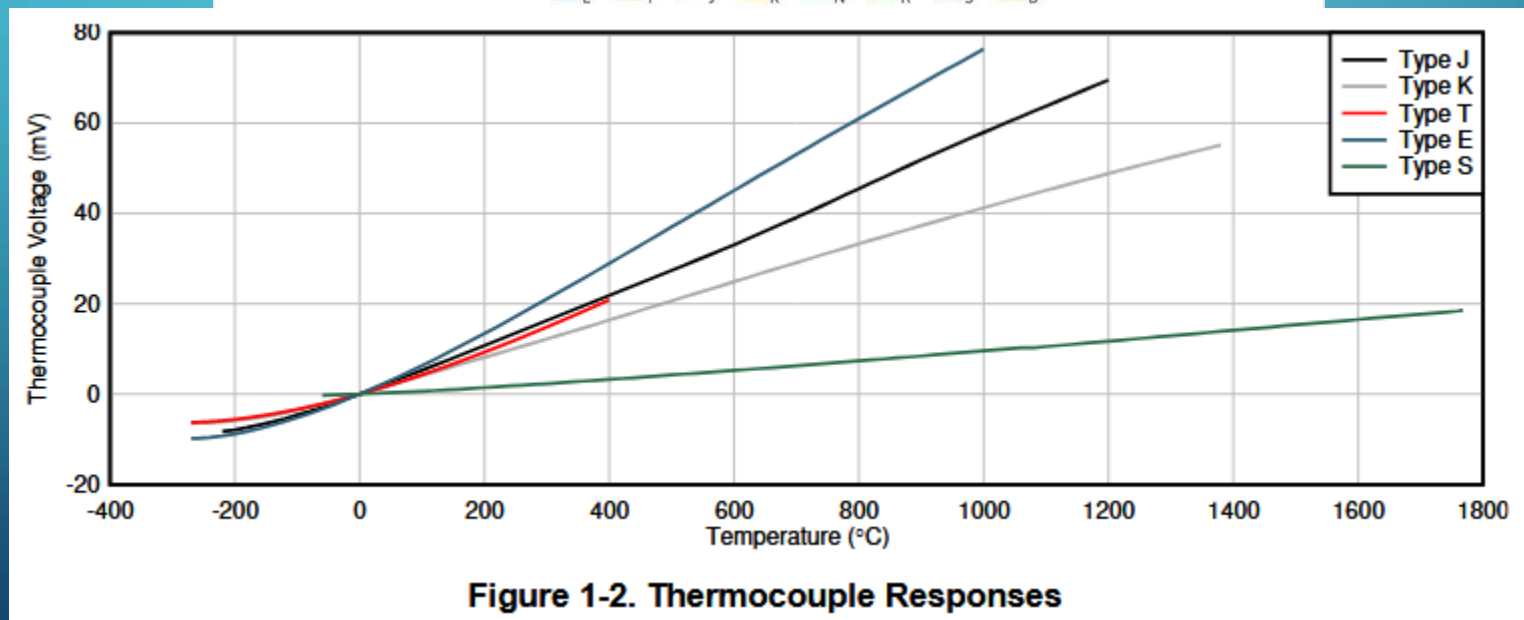
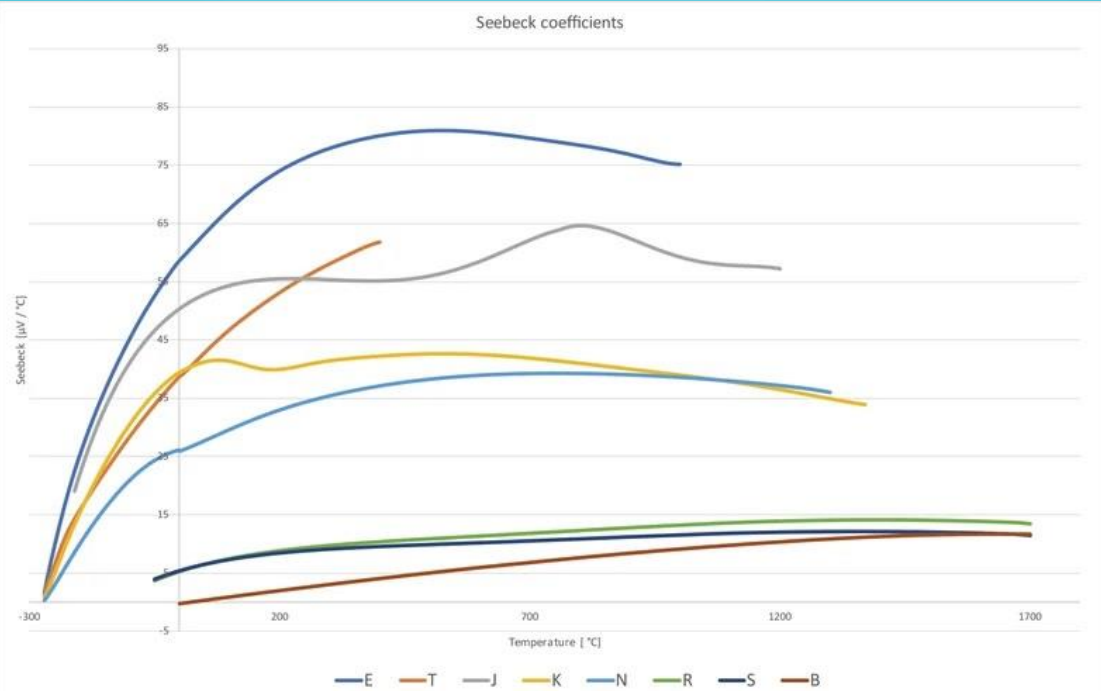


Figure 1-2. Thermocouple Responses

Inconvénients :

1.Précision limitée : Bien que les thermocouples offrent une bonne précision dans de nombreuses situations, leur précision absolue peut être inférieure à celle d'autres types de capteurs de température, comme les résistances de platine.

2.Effets de dérive : Les thermocouples peuvent subir des effets de dérive au fil du temps, ce qui peut nécessiter un étalonnage régulier pour maintenir la précision des mesures.

3.Effets de soudure froide : Les thermocouples sont sensibles aux variations de température à la jonction de référence (souvent appelée soudure froide), ce qui peut introduire des erreurs de mesure si elle n'est pas correctement compensée.

4.Non-linéarité : La réponse des thermocouples à la température n'est pas linéaire, ce qui peut nécessiter l'utilisation de courbes de correction pour obtenir des mesures précises sur toute la plage de température.

Types de thermocouples les plus courants

| Type | Métal A (+) | Métal B (-) | Limites théoriques | Coef. Seebeck α ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$) à $T^\circ\text{C}$ | Erreur standard | Erreur Mini |
|------|------------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------|-------------|
| B | Platine 30% Rhodium | Platine 6% Rhodium | 0 à 1820°C | 5,96 μV à 600°C | 0,5% | 0,25% |
| E | Nickel 10% Chrome | Constantan | -270 à 1000°C | 58,67 μV à 0°C | 1,7% à 0,5% | 1% à 0,4% |
| J | Fer | Constantan | -210 à 1200°C | 50,38 μV à 0°C | 2,2% à 0,75% | 1,1% à 0,4% |
| K | Chromel | Alumel | -270 à 1372°C | 39,45 μV à 0°C | 2,2% à 0,75% | 1,1% à 0,2% |
| N | Nicrosil | Nisil | -270 à 1300°C | 25,93 μV à 0°C | 2,2% à 0,75% | 1,1% à 0,4% |
| R | Platine 13% Rhodium | Platine | -50 à 1768°C | 11,36 μV à 600°C | 1,5% à 0,25% | 0,6% à 0,1% |
| S | Platine 10% Rhodium | Platine | -50 à 1768°C | 10,21 μV à 600°C | 1,5% à 0,25% | 0,6% à 0,1% |
| T | Cuivre | Constantan | -270 à 400°C | 38,75 μV à 0°C | 1% à 0,75% | 0,5% à 0,4% |

isation

◀ Précédent Accueil ▲ Haut



Le Concept de Soudure Froide

- **Problématique de la Soudure Froide:** La mesure de température par thermocouple nécessite une référence de température à la jonction froide, souvent à température ambiante, introduisant des erreurs potentielles.
- **Impact sur les Mesures:** La température de la soudure froide affecte directement la précision des mesures de température, nécessitant des méthodes de compensation précises.

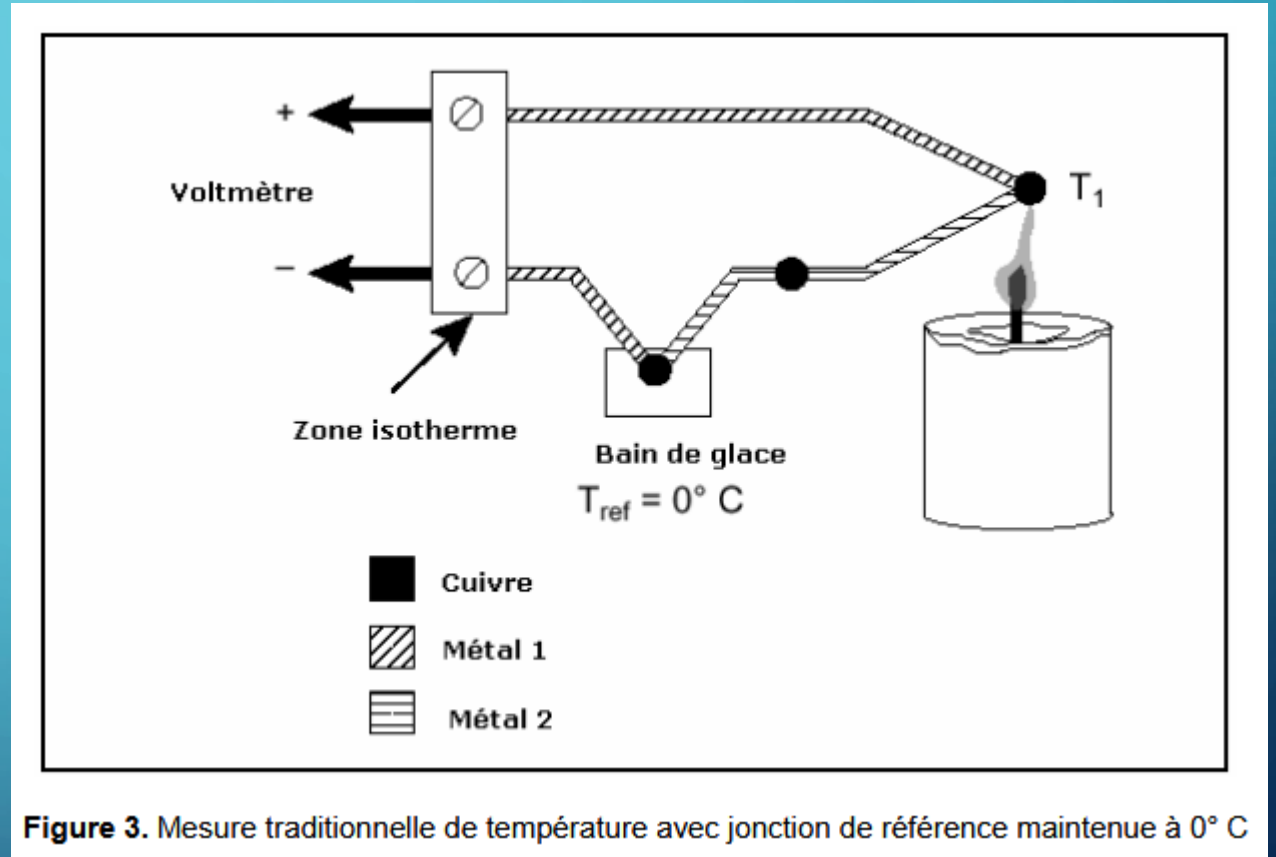
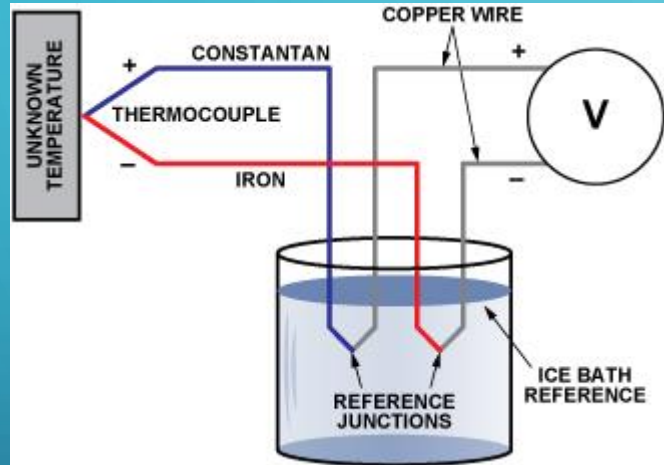
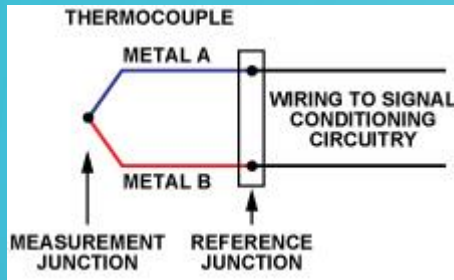
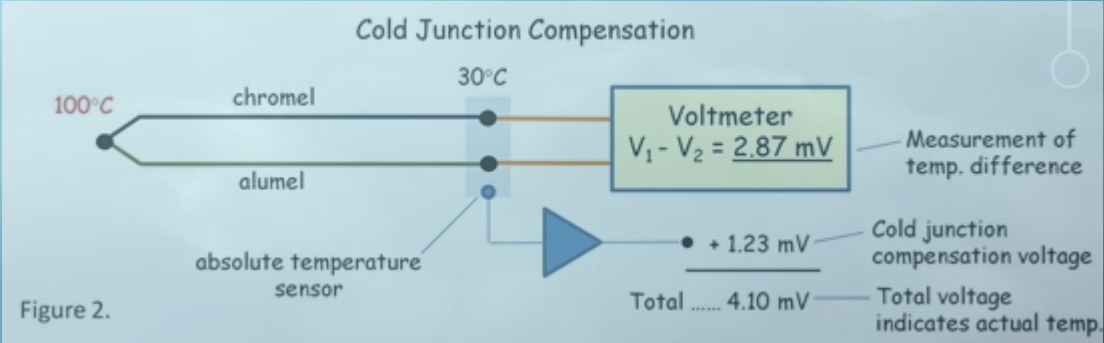
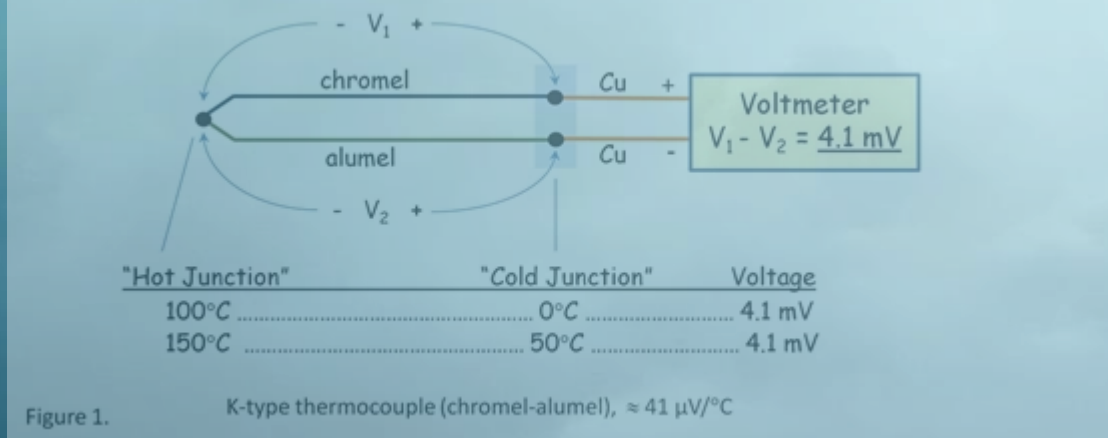


Figure 3. Mesure traditionnelle de température avec jonction de référence maintenue à 0° C





Démonstration SVP !

Compensation de la Soudure Froide

- **Méthodes de Compensation:** Utilisation de circuits intégrés spécifiques pour simuler la température de la jonction froide ou l'ajustement numérique des lectures de température.
- **Importance de la Compensation:** Assure la précision des mesures de température, particulièrement dans les applications critiques où les erreurs de mesure peuvent avoir des conséquences graves.

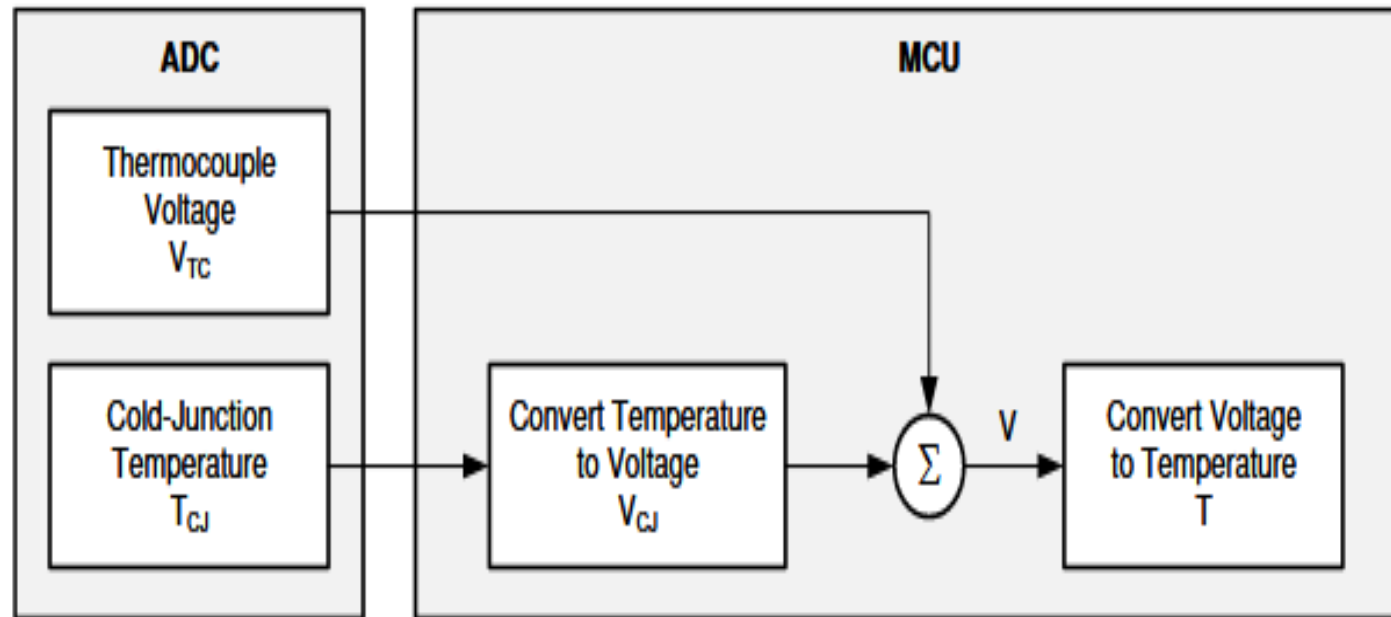
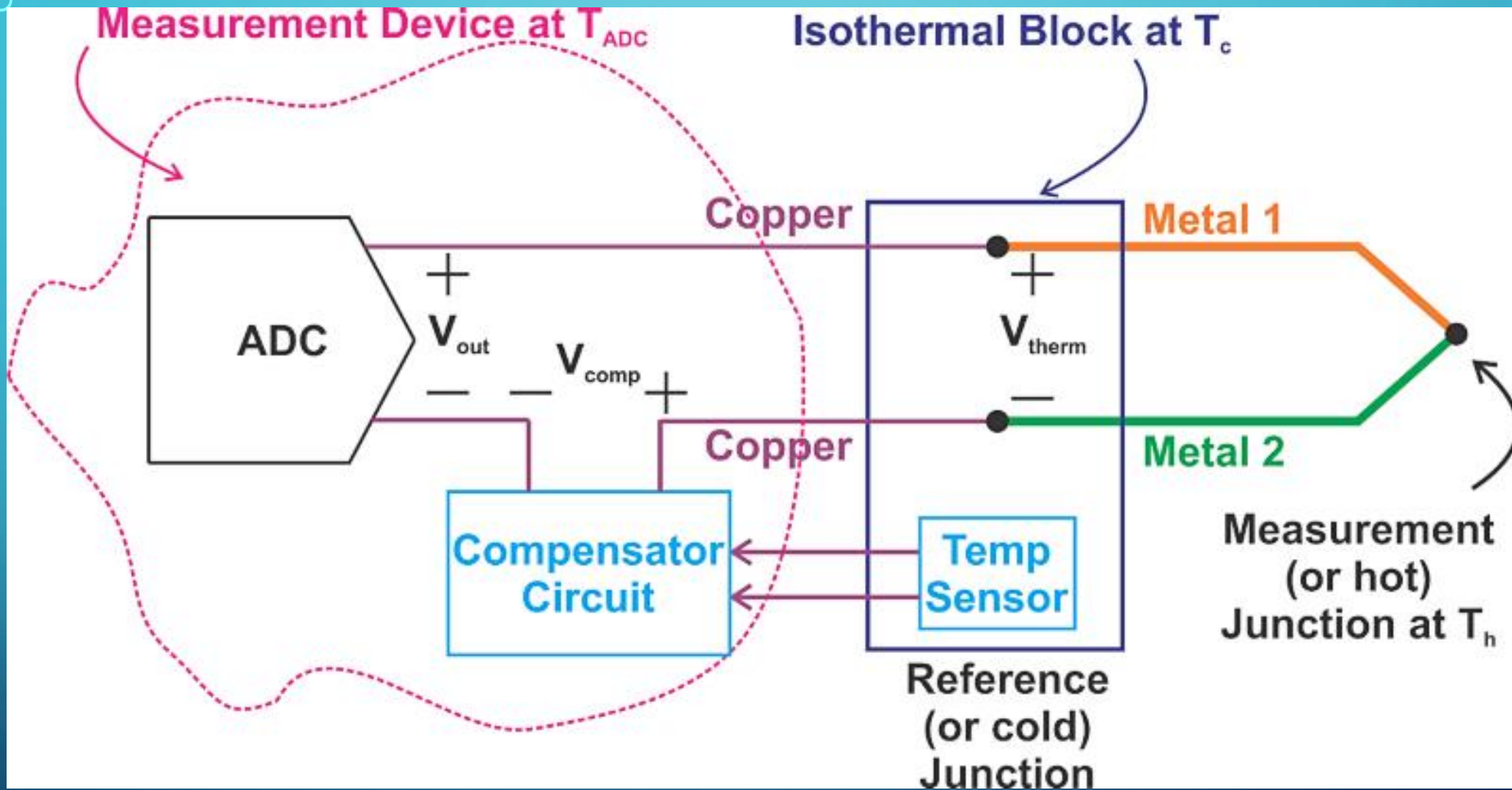


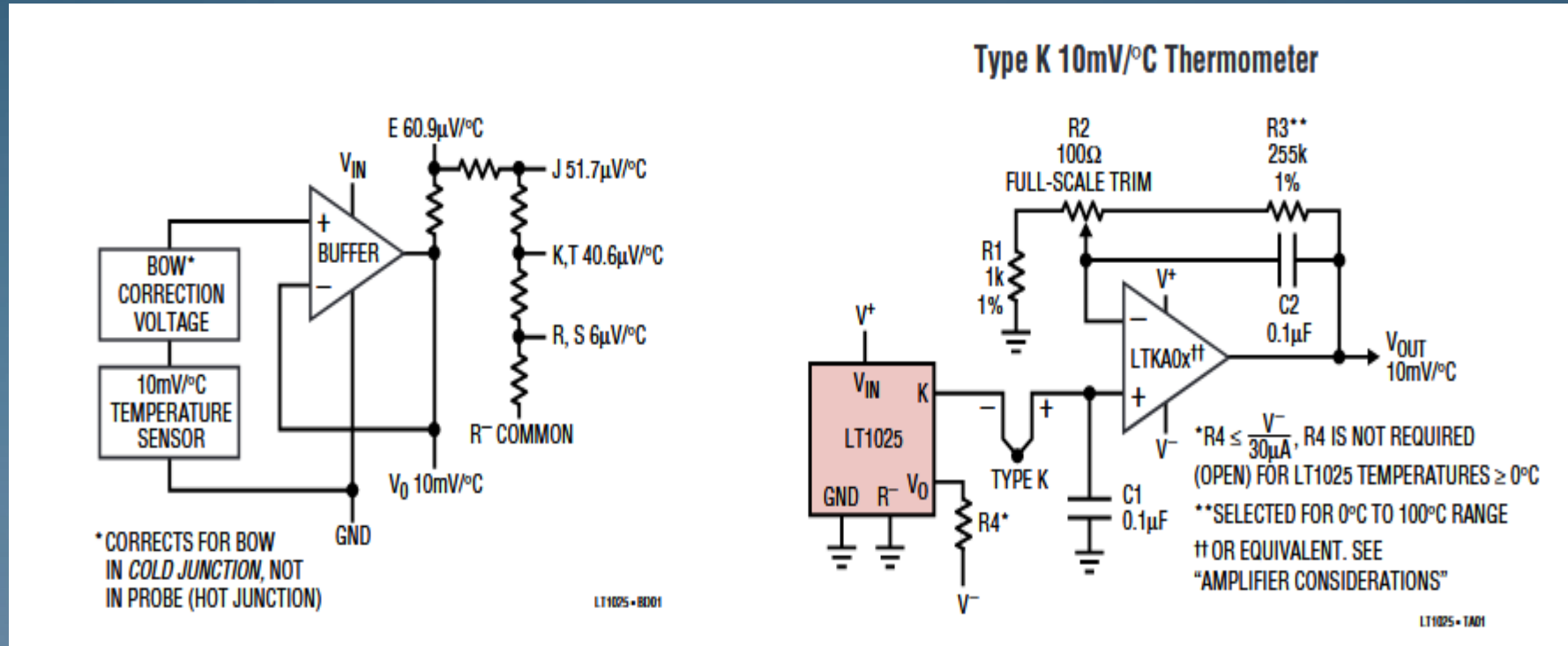
Figure 1-7. Thermocouple and Cold-Junction Measurement Conversion to Temperature



Les tout en 1 !

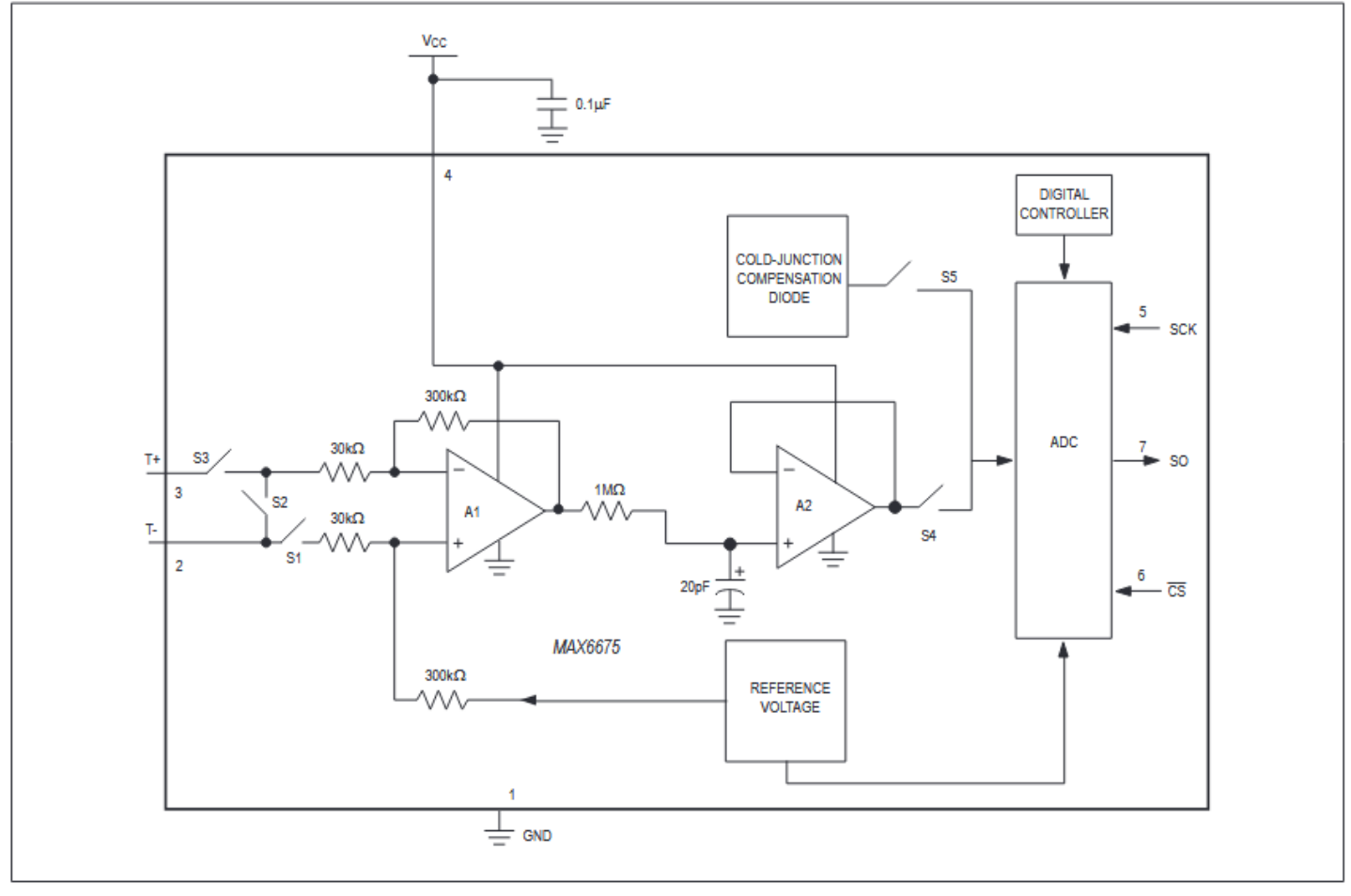


Le LT1025 de Linear Technology

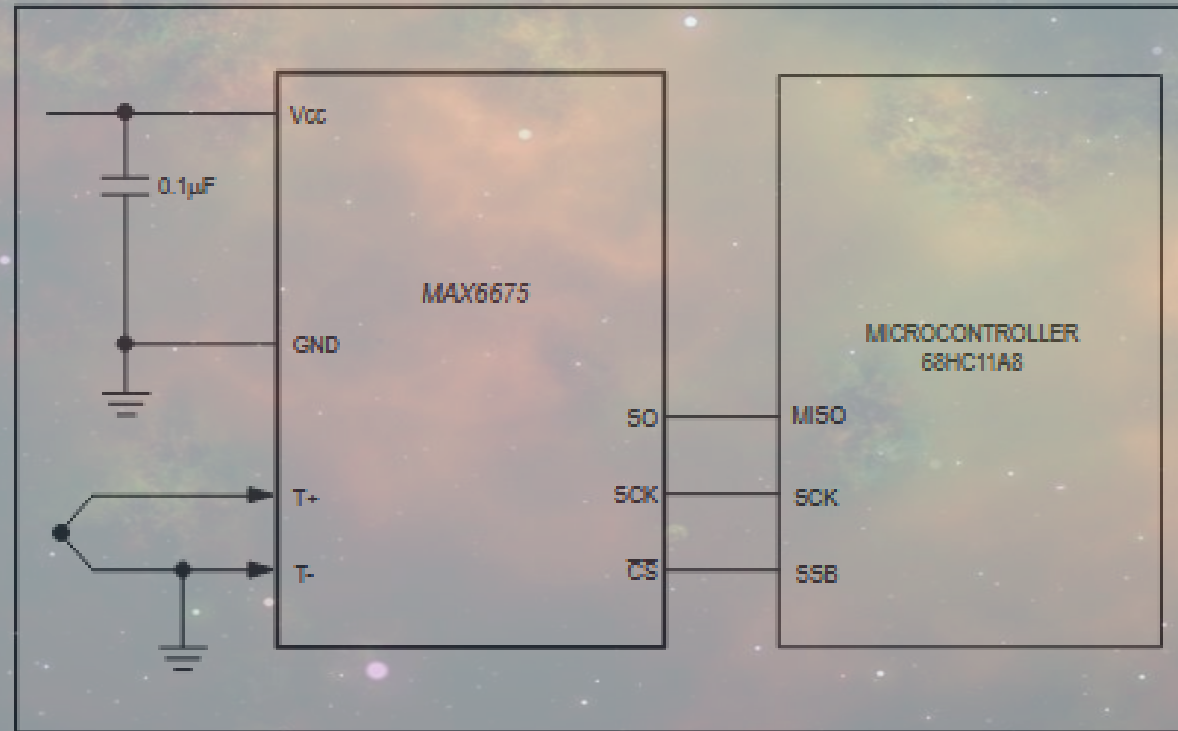


Le MAX6675 de Maxim Integrated

Block Diagram



Typical Application Circuit



Caractéristiques électriques du MAX6675

Electrical Characteristics

($V_{CC} = +3.0V$ to $+5.5V$, $T_A = -20^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$, unless otherwise noted. Typical values specified at $+25^{\circ}C$.) (Note 1)

| PARAMETER | SYMBOL | CONDITIONS | MIN | TYP | MAX | UNITS | |
|----------------------------------|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-------|-----|-------------|-------------|
| Temperature Error | | $T_{THERMOCOUPLE} = +700^{\circ}C$, $T_A = +25^{\circ}C$ (Note 2) | $V_{CC} = +3.3V$ | -5 | | +5 | LSB |
| | | | $V_{CC} = +5V$ | -6 | | +6 | |
| | | $T_{THERMOCOUPLE} = 0^{\circ}C$ to $+700^{\circ}C$, $T_A = +25^{\circ}C$ (Note 2) | $V_{CC} = +3.3V$ | -8 | | +8 | |
| | | | $V_{CC} = +5V$ | -9 | | +9 | |
| | | $T_{THERMOCOUPLE} = +700^{\circ}C$ to $+1000^{\circ}C$, $T_A = +25^{\circ}C$ (Note 2) | $V_{CC} = +3.3V$ | -17 | | +17 | |
| | | | $V_{CC} = +5V$ | -19 | | +19 | |
| Thermocouple Conversion Constant | | | | 10.25 | | $\mu V/LSB$ | |
| Cold-Junction Compensation Error | | $T_A = -20^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$ (Note 2) | $V_{CC} = +3.3V$ | -3.0 | | +3.0 | $^{\circ}C$ |
| | | | $V_{CC} = +5V$ | -3.0 | | +3.0 | |
| Resolution | | | | 0.25 | | $^{\circ}C$ | |

Calcul de Température via une Équation Polynomiale

- **Relation Tension-Température:** Introduction à la relation non linéaire entre la tension générée par un thermocouple et la température mesurée.
- **Équation Polynomiale:** Présentation de l'équation polynomiale typique utilisée pour modéliser cette relation, incluant les coefficients spécifiques au type de thermocouple.
- **Avantages de la Méthode:** Précision élevée, possibilité de compenser les non-linéarités inhérentes au thermocouple, et application facile avec des outils de calcul numérique.

Calcul par équation polynomiale

Il est possible de calculer la température à partir de la tension thermoélectrique en ayant recours à une équation polynomiale :

$$T_{90} = c_0 + c_1x + c_2x^2 + c_3x^3 + c_4x^4 + \dots + c_nx^n$$

T_{90} = Température en °C

x = Tension thermoélectrique en mV

c = Coefficients polynomiaux

n = Ordre maximum de l'équation polynomiale

Exemple de coefficients pour les thermocouples de type K

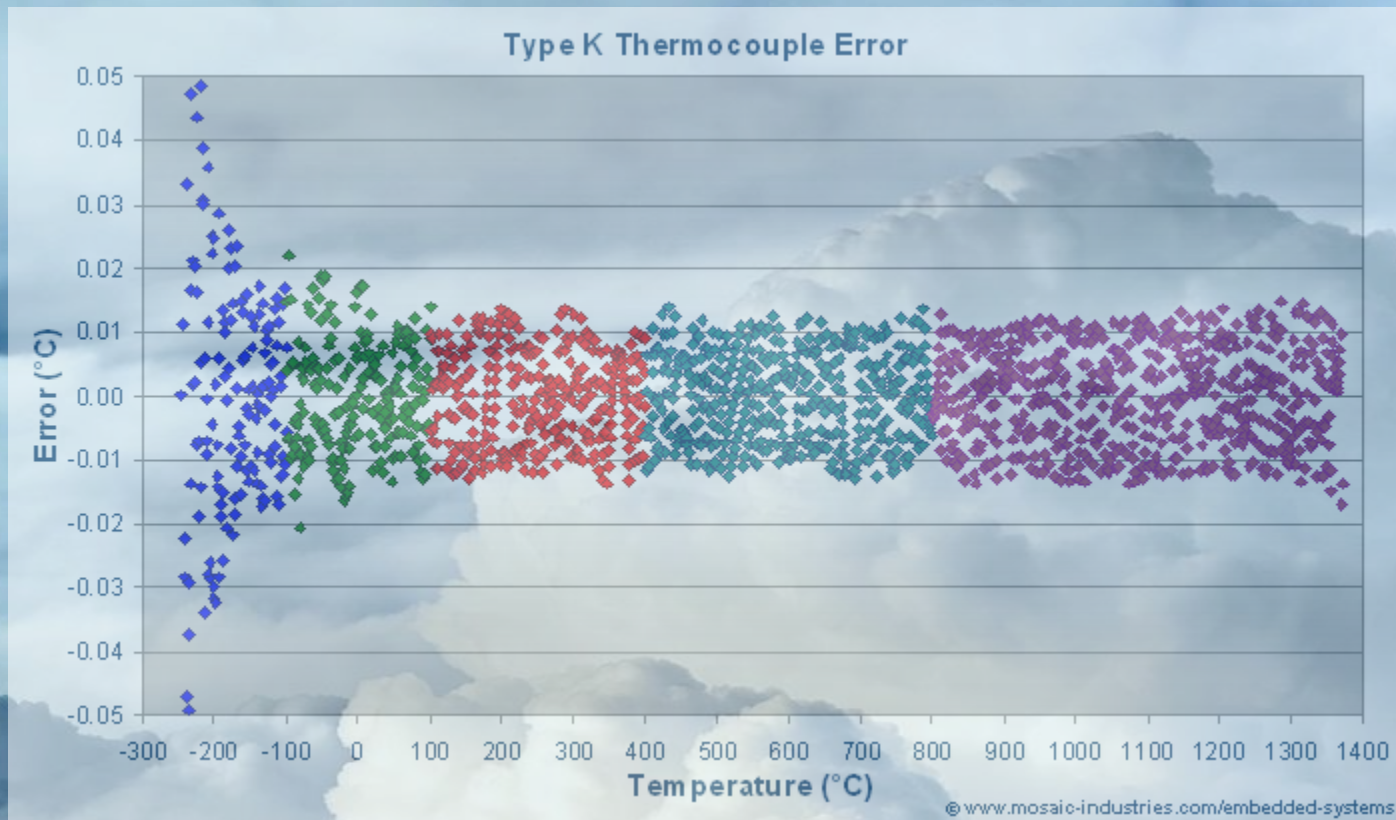
| Température (°C) | -200 à 0 | 0 à 500 | 500 à 1372 |
|------------------|----------------|----------------|-----------------|
| Tension (mV) | -5.891 à 0.000 | 0.000 à 20.644 | 20.644 à 54.886 |
| c_0 | 0 | 0.000000E+00 | -1.318058E+02 |
| c_1 | 2.5173462E+01 | 2.508355E+01 | 4.830222E+01 |
| c_2 | -1.1662878E+00 | 7.860106E-02 | -1.646031E+00 |
| c_3 | -1.0833638E+00 | -2.503131E-01 | 5.464731E-02 |
| c_4 | -8.9773540E-01 | 8.315270E-02 | -9.650715E-04 |
| c_5 | -3.7342377E-01 | -1.228034E-02 | 8.802193E-06 |
| c_6 | -8.6632643E-02 | 9.804036E-04 | -3.110810E-08 |
| c_7 | -1.0450598E-02 | -4.413030E-05 | 0 |
| c_8 | -5.1920577E-04 | 1.057734E-06 | 0 |
| c_9 | 0 | -1.052755E-08 | 0 |
| Erreur (°C) | -0.02 à 0.04 | -0.05 à 0.04 | -0.05 à 0.06 |

Les coefficients des autres types de thermocouples sont indiqués à la fin des tables ITS-90 en annexes

Au lieu d'utiliser l'équation polynomiale et ainsi éviter les exponentielles, on peut recourir à une transposition par la méthode de Horner sous forme d'imbrication des coefficients, comme l'exemple de quatrième ordre ci-dessous :

$$T_{90} = c_0 + x(c_1 + x(c_2 + x(c_3 + c_4x)))$$

Reprenons la valeur de tension utilisée précédemment, soit **8.35687 mV**, et calculons la température correspondante par l'équation avec les coefficients du type K ci-dessus, le résultat est : **205,441 °C** (205.471 °C à partir des tables).



Visualisation de l'erreur dans le cadre d'une approximation polynomiale

La majeure partie de l'erreur résiduelle dans le graphique ci-dessus résulte de l'arrondissement des valeurs de tension fournies par le NIST au microvolt le plus proche. Les erreurs d'arrondi sont visibles sous la forme d'un repliement ou d'un motif de moiré dans les données.

L'approximation de la fonction rationnelle interpole bien les données, de sorte que les valeurs calculées de la température sont plus précises que ne le laissent supposer les tracés des résidus.

Le point de Curie du fer (770 °C) utilisé dans le thermocouple de type J (fer-constantan) est à l'origine de l'erreur excessive apparaissant dans le graphique ci-dessus à 770 °C. Malgré cela, la fonction rationnelle donne une bonne approximation de la courbe et les erreurs qui en résultent sont encore assez faibles pour la plupart des applications.

Sur la base de qui précède, il est patent que l'électronique gérant la mesure de température doit être d'une qualité exceptionnelle. Ceci bien sûr dans le cas où l'on souhaite une précision de l'ordre d'un degré Celsius !

Pour ce faire, il faut disposer d'ampli op ayant une tension d'offset inférieure à $5 \mu\text{V}$ et une dérive en température idoine. Si l'on prend l'exemple d'un thermocouple générant une tension de $50 \mu\text{V} / ^\circ\text{C}$ et que l'on souhaite une tension de sortie soit de $10 \text{ mV} / ^\circ\text{C}$, le gain de la chaine d'amplification doit être de $10 \text{ mV} / 50 \mu\text{V} = 200$

Avec un tel gain, l'offset génère une erreur de 1 mV , soit $20 ^\circ\text{C}$. Mais, ledit offset, pourra être facilement annulé avec les procédés idoines déjà vus ici.

**Il existe, aujourd'hui, un circuit qui fait tout le boulot, il s'agit
MCP6V01 de Microchip !**

Voyons donc...

La conception de référence MCP6V01 Thermocouple Auto-Zeroed démontre comment utiliser un système d'amplificateur de différence pour mesurer la tension de force électromotrice (EMF) à la jonction froide du thermocouple afin de mesurer avec précision la température à la jonction chaude. Ceci peut être réalisé en utilisant l'amplificateur opérationnel à remise à zéro automatique MCP6V01 en raison de sa tension de décalage ultra basse (VOS) et de son rapport de réjection de mode commun élevé (CMRR).

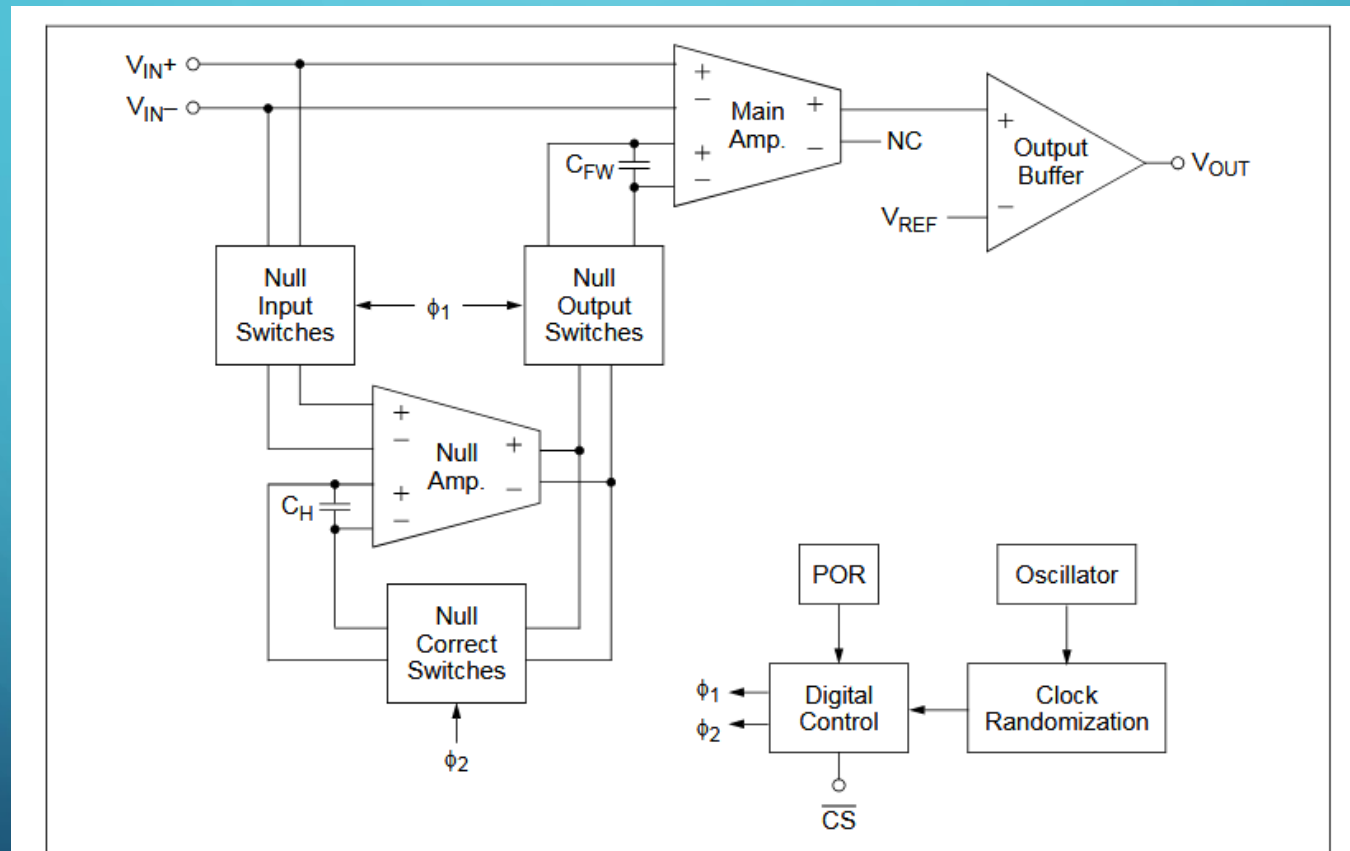


FIGURE 4-1: Simplified Auto-zeroed Op Amp Functional Diagram.

300 μ A, Auto-Zeroed Op Amps

Features

- High DC Precision:
 - V_{OS} Drift: ± 50 nV/ $^{\circ}$ C (maximum)
 - V_{OS} : ± 2 μ V (maximum)
 - A_{OL} : 130 dB (minimum)
 - PSRR: 130 dB (minimum)
 - CMRR: 130 dB (minimum)
 - E_{ni} : 2.5 μ V_{P-P} (typical), $f = 0.1$ Hz to 10 Hz
 - E_{ni} : 0.79 μ V_{P-P} (typical), $f = 0.01$ Hz to 1 Hz
- Low Power and Supply Voltages:
 - I_Q : 300 μ A/amplifier (typical)
 - Wide Supply Voltage Range: 1.8V to 5.5V
- Easy to Use:
 - Rail-to-Rail Input/Output
 - Gain Bandwidth Product: 1.3 MHz (typical)
 - Unity Gain Stable
 - Available in Single and Dual
 - Single with Chip Select (\overline{CS}): MCP6V03
- Extended Temperature Range: -40 $^{\circ}$ C to +125 $^{\circ}$ C

Typical Applications

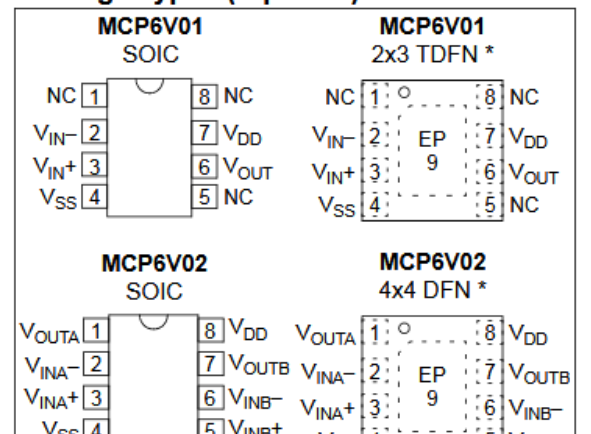
- Portable Instrumentation
- Sensor Conditioning
- Temperature Measurement
- DC Offset Correction
- Medical Instrumentation

Description

The Microchip Technology Inc. MCP6V01/2/3 family of operational amplifiers has input offset voltage correction for very low offset and offset drift. These devices have a wide gain bandwidth product (1.3 MHz, typical) and strongly reject switching noise. They are unity gain stable, have no 1/f noise, and have good PSRR and CMRR. These products operate with a single supply voltage as low as 1.8V, while drawing 300 μ A/amplifier (typical) of quiescent current.

The Microchip Technology Inc. MCP6V01/2/3 op amps are offered in single (MCP6V01), single with Chip Select (\overline{CS}) (MCP6V03), and dual (MCP6V02). They are designed in an advanced CMOS process.

Package Types (top view)



$$V_1 \approx T_{HJ}(40 \mu V/^{\circ}C)$$

$$V_2 = (1.00V)$$

$$V_3 = T_{CJ}(10 \text{ mV}/^{\circ}C) + (0.50V)$$

$$V_4 = 250V_1 + (V_2 - V_3)$$

$$\approx (10 \text{ mV}/^{\circ}C) (T_{HJ} - T_{CJ}) + (0.50V)$$

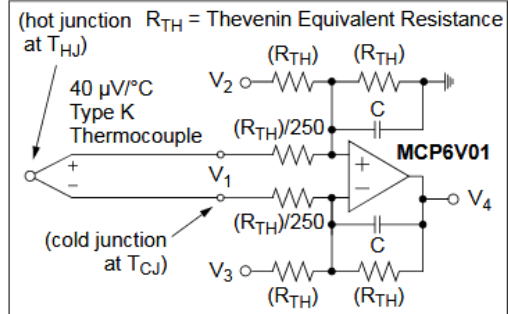


FIGURE 4-18: Thermocouple Sensor, Simplified Circuit.

Figure 4-19 shows a more complete implementation of this circuit. The dashed red arrow indicates a thermally conductive connection between the thermocouple and the MCP9700A; it needs to be very short and have low thermal resistance.

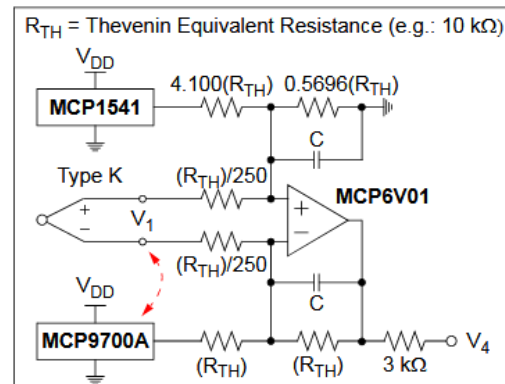


FIGURE 4-19: Thermocouple Sensor.

MCP1541 as its voltage reference. Alternately, an absolute reference inside a PICmicro[®] can be used instead of the MCP1541.

4.4.4 OFFSET VOLTAGE CORRECTION

Figure 4-20 shows a MCP6V01 correcting the input offset voltage of another op amp. R_2 and C_2 integrate the offset error seen at the other op amp's input; the integration needs to be slow enough to be stable (with the feedback provided by R_1 and R_3).

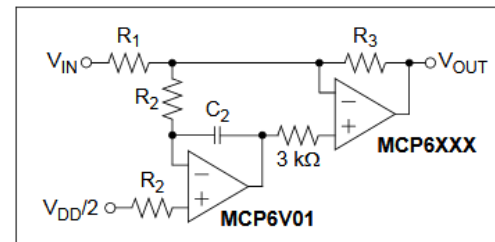


FIGURE 4-20: Offset Correction.

4.4.5 PRECISION COMPARATOR

Use high gain before a comparator to improve the latter's performance. Do not use MCP6V01/2/3 as a comparator by itself; the V_{OS} correction circuitry does not operate properly without a feedback loop.

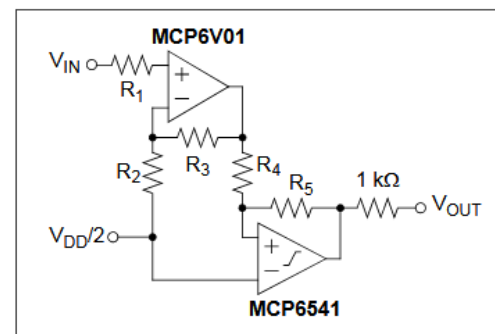


FIGURE 4-21: Precision Comparator.

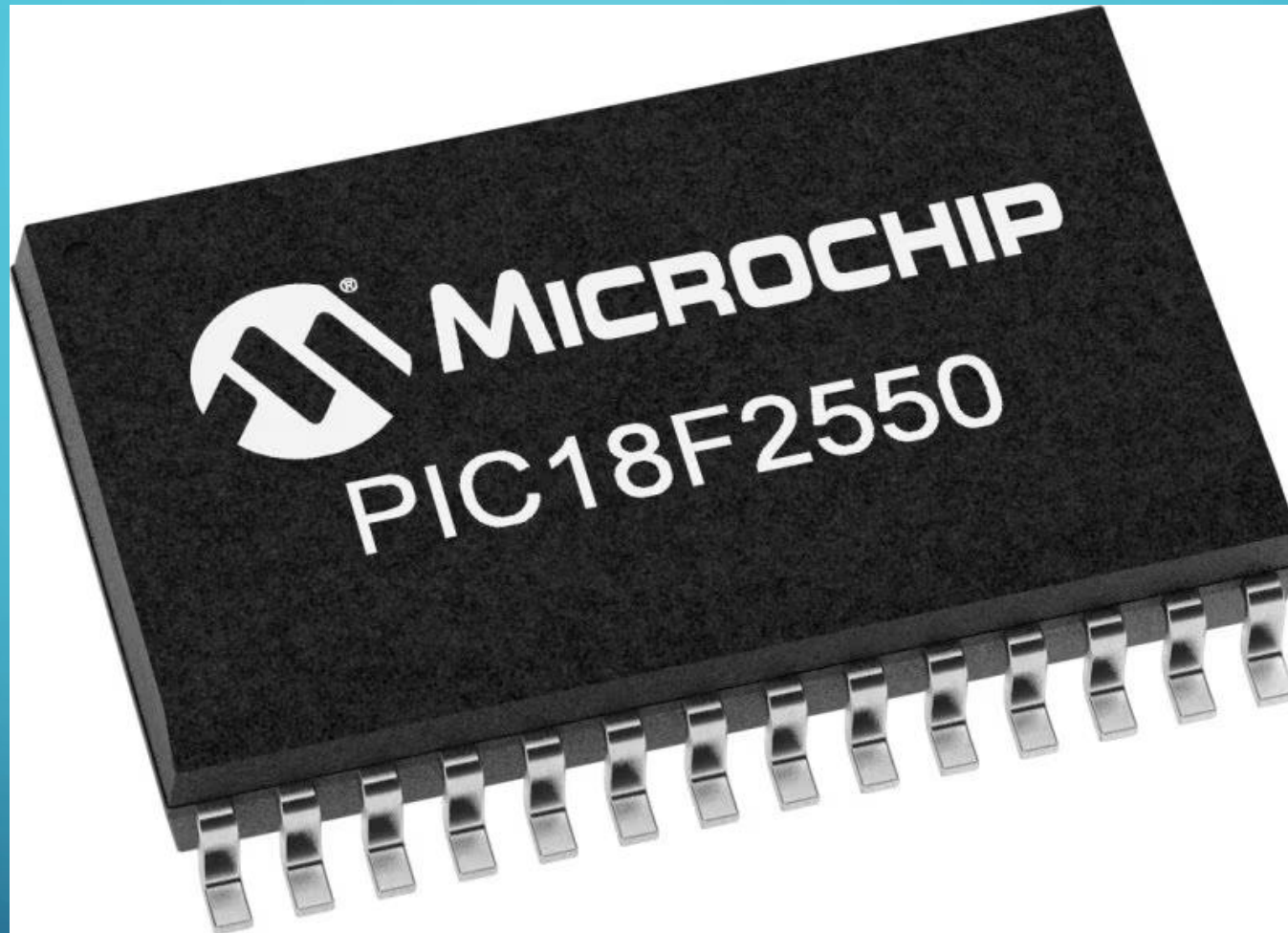
Qu'en est-il de la pratique avec ce genre de circuit ?

Une perle!!!

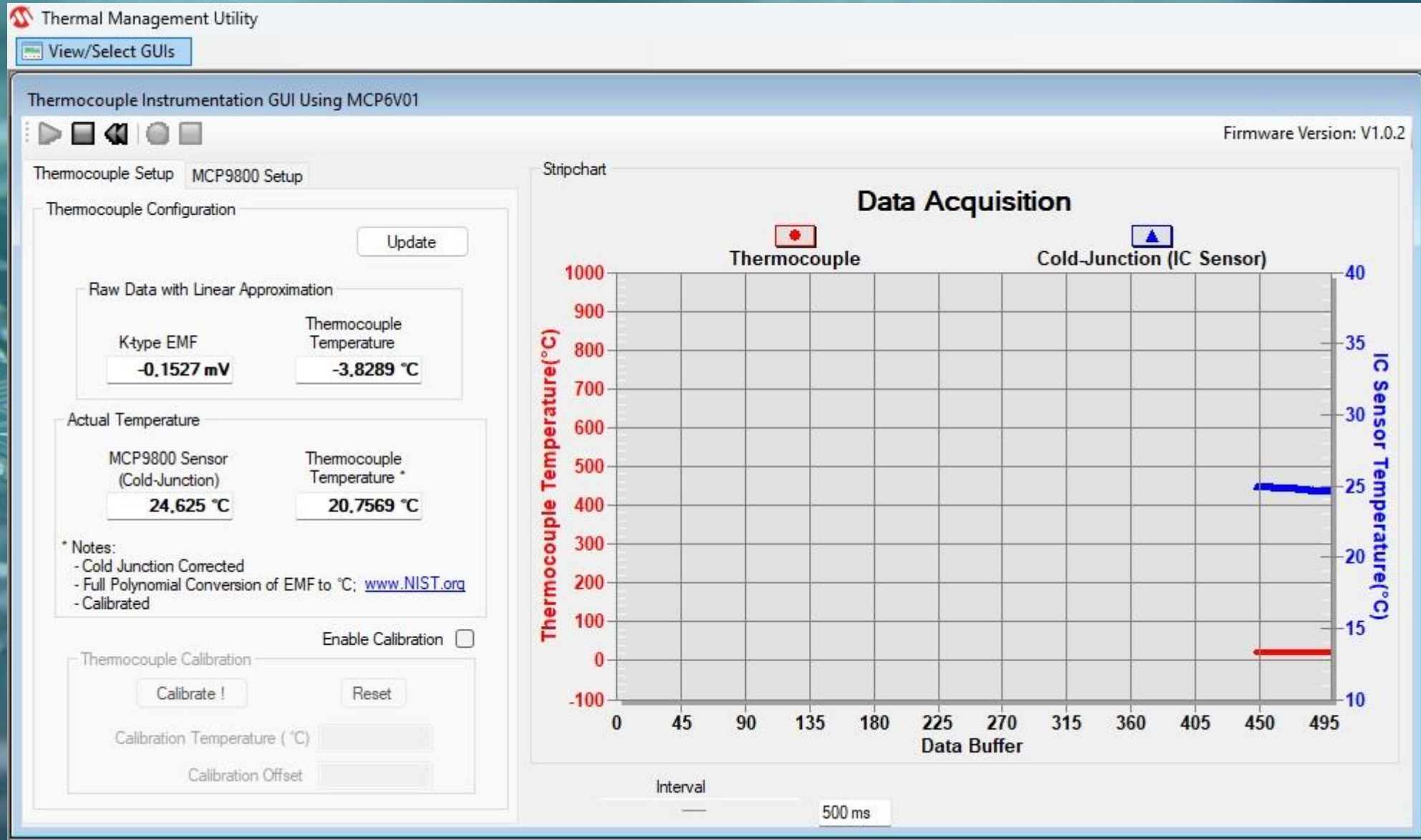


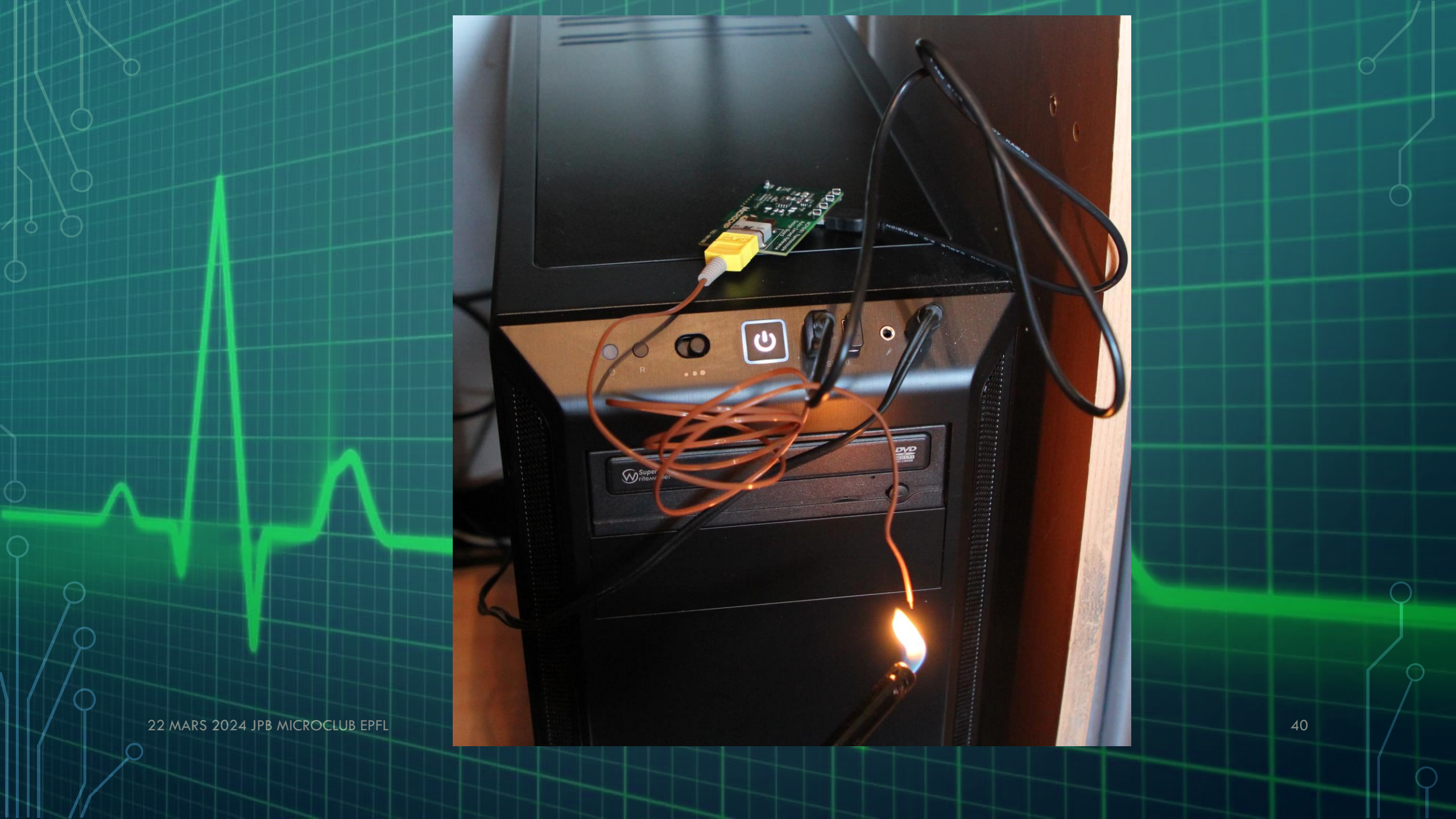
- Digitize Thermocouples
- User programmable digital filter
- 0.0625 C measurement resolution
- 4 user programmable alert limits
- Multiple power save modes

La précision est 0.5 °C sur toute la gamme

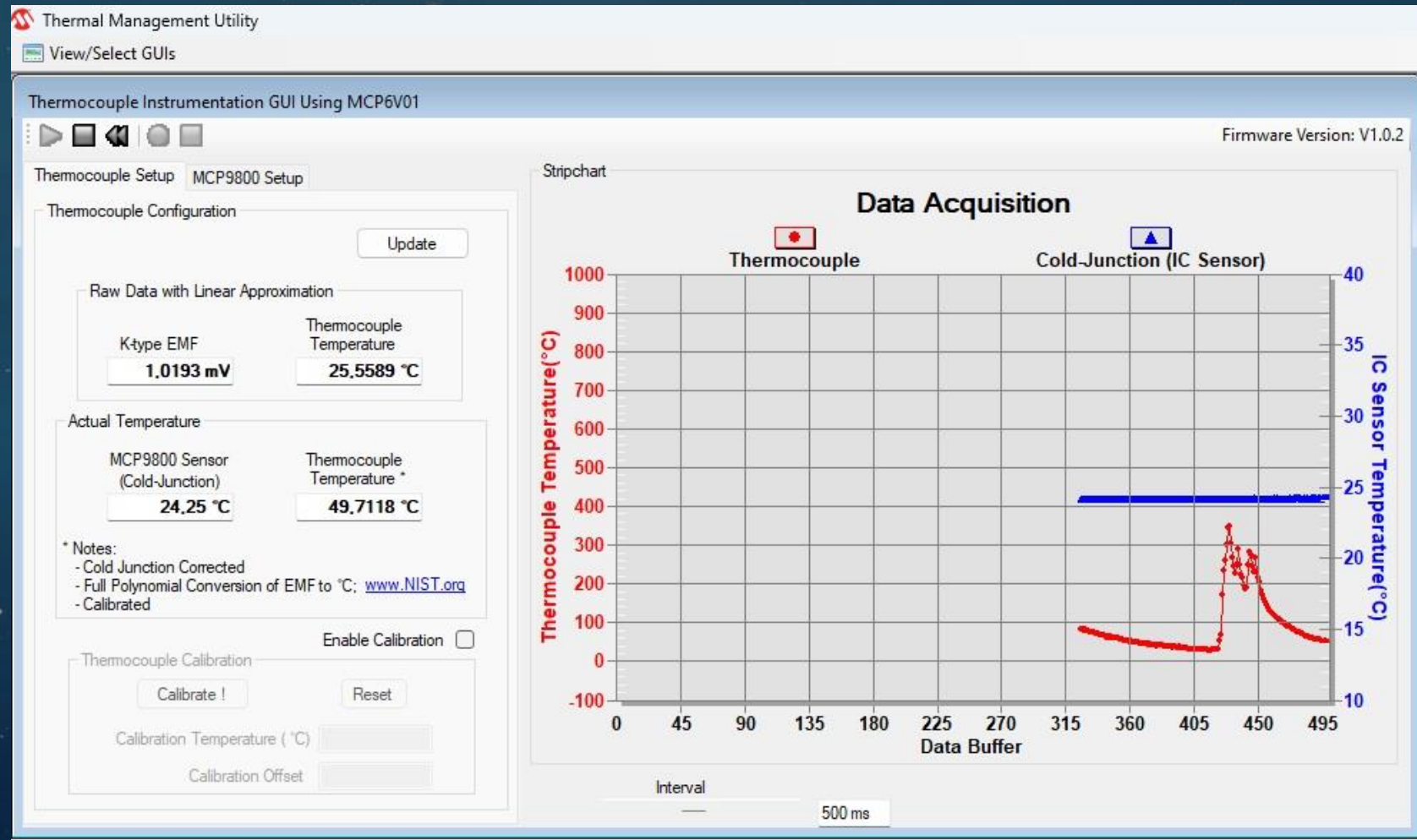


Logiciel exploitation du MCP6V01, Auro-Zero RD Board





Suite au coup de briquet, on constate que la température du thermocouple a bondi!



Mon cher Rolf, et Arduino là-dedans ?

