

## Rapport de stage de fin d'études

Projet d'application des élèves Techniciens Supérieurs de la météorologie,

filière INSTRUMENTS ET INSTALLATIONS

n° 1534

*MOREAU Maxence*

*promotion 2023/2025*

---

***Mise en place d'une chaîne d'acquisition de mesure de température pour déterminer l'évolution de celle-ci dans un colis refroidis avec de la glace carbonique.***

---

Projet réalisé à ABM,

sous la direction de Jayzonn ALLION

2 juin - 11 juillet 2025

## **Remerciements**

La réalisation de ce rapport de stage de fin d'études est l'aboutissement d'un travail de plusieurs semaines, rendu possible grâce à l'aide et au soutien de nombreuses personnes.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à Jayzonn Allion, mon tuteur de stage au sein d'ABM. Ses conseils avisés, sa disponibilité constante et sa confiance m'ont été d'une aide précieuse tout au long de ce projet. Son expertise technique dans un environnement de mesure qui ne m'était pas familier a grandement contribué à la réussite de ma mission.

Mes remerciements s'adressent également à Stéphane Baudru et Hervé Girres pour leurs conseils techniques. Je suis également reconnaissant à l'entreprise pour la mise à disposition de l'environnement de mesure et des consommables, notamment la glace carbonique, éléments indispensables à mes expérimentations.

Je remercie Karla Negrete pour son suivi pédagogique.

Enfin, je souhaite remercier ma famille et mes proches pour leur soutien indéfectible et leur encouragement durant cette période de formation.

À toutes ces personnes, je témoigne ma sincère reconnaissance.

# Sommaire

<b>Remerciements</b>	<b>1</b>
<b>Sommaire</b>	<b>2</b>
<b>1. Introduction</b>	<b>3</b>
<b>2. Contexte et Cahier des Charges</b>	<b>5</b>
2.1 Rappels Théoriques sur la Mesure de Température	5
Capteurs PT100 à 2 fils	6
Capteurs PT100 à 3 fils	6
Capteurs PT100 à 4 fils	6
Information sur la glace carbonique	7
2.2 Spécifications du Besoin	7
2.3 Architecture Générale de la Chaîne d'Acquisition	8
<b>3. Conception et Réalisation de la Chaîne d'Acquisition</b>	<b>9</b>
3.1 Partie Matérielle	9
3.1.1 Microcontrôleur ESP32	9
3.1.2 Alimentation électrique	9
3.1.3 Protection du Matériel et Conception du Boîtier	10
3.1.4 Capteur de température PT100	10
3.1.5 Module de conditionnement de signal (Adafruit MAX31865)	10
3.2 Logicielle Embarquée (Firmware ESP32)	13
3.3 Serveur Web (PFC - Plateforme de Concentration/Collecte)	15
3.4 Base de Données (SQLite)	16
3.5 Plateforme de Visualisation	16
3.5.1 Estimation de glace carbonique	17
3.5.2 Visualiser un mesure	19
3.5.3 Comparer plusieur mesure	20
<b>4. Expérimentation et Mesures</b>	<b>20</b>
4.1 Protocole Expérimental	20
4.2 Présentation des Résultats	22
4.3 Analyse et Interprétation	23
<b>5. Critique et Évaluation de la Chaîne d'Acquisition</b>	<b>24</b>
5.1 Précision et Étalonnage	24
5.1.1 Etalonnage avec un étalon	24
5.1.2 Test d'une nouvelle méthode d'étalement	26
5.2 Robustesse et Fiabilité	26
5.3 Facilité d'Utilisation et Déploiement	27
<b>6. Conclusion et Perspectives</b>	<b>28</b>
6.1 Conclusion	28
6.2 Perspectives	29
<b>Références</b>	
<b>Annexes</b>	

## 1. Introduction

Dans un contexte global où la **maîtrise des conditions environnementales** est devenue un enjeu majeur pour de nombreux secteurs, la **chaîne du froid** représente un maillon essentiel, notamment dans le transport et le stockage de produits sensibles. Qu'il s'agisse de produits pharmaceutiques, biologiques ou même alimentaires, le maintien d'une température spécifique est critique pour garantir leur intégrité, leur efficacité et leur valeur. Toute rupture ou dérive thermique peut entraîner des pertes économiques considérables, des risques sanitaires ou une dégradation irréversible de la qualité.

Le transport de marchandises nécessitant des **températures très basses**, comme celles atteintes avec la **glace carbonique** (environ  $-78,5^{\circ}\text{C}$  lors de sa sublimation), pose des défis particulièrement complexes. Il ne s'agit plus seulement de maintenir une température négative, mais de contrôler des gradients thermiques importants et de s'assurer que le cœur du colis reste dans une plage de température très étroite, malgré les variations extérieures et le processus de sublimation du dioxyde de carbone solide.

Dans ce cadre, la capacité à **mesurer et à suivre avec précision l'évolution de la température** à l'intérieur d'un colis devient un impératif. Une chaîne d'acquisition de mesure fiable et performante est donc indispensable pour valider la conformité des conditions de transport et optimiser les solutions d'emballage isotherme.

C'est dans cette perspective que s'inscrit mon stage de fin d'études de Technicien Supérieur Instruments et Installations (TSI) au sein d'ABM (Applied Biological Materials). Cette entreprise, spécialisée dans la biotechnologie, a pour activité principale la fourniture de réactifs, de lignées cellulaires et de services de génie génétique destinés à la recherche biomédicale et moléculaire. Elle m'a offert l'opportunité de travailler au sein de leur plateforme logistique Européenne sur la mise en place d'une solution pour caractériser l'évolution thermique de colis transportés avec de la glace carbonique.

La problématique principale de ce stage peut être formulée ainsi : **Comment concevoir et mettre en œuvre une chaîne d'acquisition de mesure de température robuste et fiable, capable de caractériser précisément l'évolution thermique à l'intérieur d'un colis refroidi à la glace carbonique, et d'en visualiser les données en temps réel ?**

Pour répondre à cette problématique, ce stage s'est construit en plusieurs objectifs :

- **Concevoir et développer l'intégralité de la chaîne de mesure** : De la sélection du capteur à la mise en place d'une plateforme de visualisation des données.
- **Mettre en œuvre les composants matériels et logiciels** : Cela inclut le choix du capteur, son interface, le microcontrôleur embarqué, le développement du firmware pour l'acquisition et la transmission des données via Wi-Fi.
- **Développer une infrastructure de collecte et de visualisation** : Création d'un serveur web avec Flask pour la réception et le stockage des données dans une base SQLite, ainsi qu'une interface web dédiée pour la consultation et l'analyse des mesures.
- **Réaliser des campagnes de mesure** : Effectuer des expérimentations concrètes pour observer et analyser le comportement thermique de colis en fonction de différentes quantités de glace carbonique.
- **Évaluer et critiquer la chaîne d'acquisition mise en place** : Analyser sa précision, sa robustesse, sa fiabilité et sa pertinence pour l'application visée, en s'appuyant notamment sur un étalonnage partiel du capteur.

Ce rapport détaillera dans un premier temps le contexte théorique et le cahier des charges de la solution. Il décrira ensuite en profondeur la conception et la réalisation de chaque composant de la chaîne d'acquisition, tant matériels que logiciels. Les phases d'expérimentation et l'analyse des résultats obtenus seront ensuite présentées. Enfin, une partie sera consacrée à la critique et l'évaluation de la chaîne d'acquisition, avant de conclure sur les perspectives d'évolution du projet.

## 2. Contexte et Cahier des Charges

### 2.1 Rappels Théoriques sur la Mesure de Température

La mesure de la température est un des piliers de l'instrumentation, elle est cruciale dans des domaines variés allant de la météorologie aux processus industriels. Plusieurs technologies de capteurs existent, chacune avec ses spécificités, ses avantages et ses inconvénients. Parmi les plus courantes, on retrouve les thermocouples, les thermistances et les sondes à résistance de platine (RTD, dont fait partie la PT100).

Les **thermocouples** fonctionnent sur le principe de l'effet Seebeck, générant une tension proportionnelle à la différence de température entre deux bouts de métaux différents. Ils sont robustes et peuvent couvrir de très larges plages de température, mais leur précision peut être limitée.

Les **thermistances** (CTN pour Coefficient de Température Négatif, CTP pour Positif) sont des résistances dont la valeur varie avec la température. Elles offrent une grande sensibilité et sont économiques, mais leur réponse est non linéaire et leur plage de mesure est généralement plus restreinte et moins stable sur le long terme que d'autres capteurs.

Les **sondes à résistance de platine (RTD Resistance Temperature Detector)**, et plus particulièrement la **PT100**, sont des capteurs dont la résistance électrique varie de manière quasi linéaire avec la température. La PT100, qui possède une résistance de  $100 \Omega$  à  $0^\circ\text{C}$ , est fabriquée en platine, un métal stable et résistant à la corrosion. Ce type de sonde répond à plusieurs contraintes pour ma problématique :

- **Haute Précision et Linéarité** : Le platine offre une relation résistance-température très stable et reproductible.
- **Stabilité à Long Terme** : Les PT100 sont réputées pour leur grande stabilité et leur faible dérive au fil du temps (de l'ordre du centième de degré par an).
- **Plage de Température Étendue** : Elles peuvent mesurer des températures sur des plages très étendues plus ou moins précises selon la construction, certaines d'entre elles sont adaptées pour les basses températures induites par la glace carbonique.

Les RTD suivent l'**équation de résistance** suivante avec :

$R_t$  = résistance à  $t^\circ\text{C}$

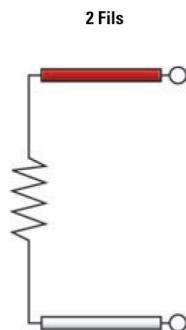
$R_0$  = résistance à  $0^\circ\text{C}$  ( $100 \Omega$  pour une PT100)

$\alpha$  = coefficient de température de la sonde (0,00385)

$T$  = la température en  $^\circ\text{C}$  :

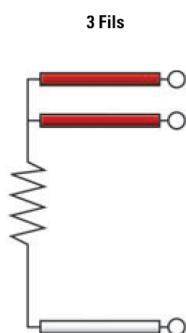
$$R_t = R_0(1 + \alpha \cdot T) \quad \text{soit} \quad T = \frac{\frac{R_t}{R_0} - 1}{\alpha}$$

Il existe 3 types de montages pour une sondes PT100 :



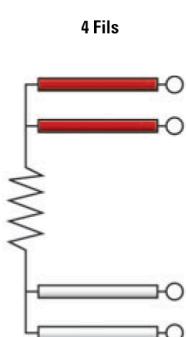
### Capteurs PT100 à 2 fils

Un capteur Pt100 à 2 fils est la configuration la plus simple : il ne comporte que deux fils connectés à l'élément de détection. Cependant, la résistance de ces fils s'ajoute à la résistance totale mesurée, introduisant des erreurs dans les relevés de température. Cette configuration convient aux applications où une précision élevée n'est pas requise, où le capteur est proche de l'appareil de mesure ou bien où la résistance du fil conducteur est négligeable.



### Capteurs PT100 à 3 fils

Un capteur Pt100 à 3 fils permet de compenser la résistance du fil conducteur. Ceci est réalisé grâce à l'utilisation d'un troisième fil, ce qui permet au système de mesure d'estimer et d'annuler la majeure partie de la résistance introduite par les fils conducteurs. C'est la configuration la plus couramment utilisée dans les applications industrielles, car elle offre un bon compromis entre précision et coût. Cependant, pour des performances optimales, les trois fils doivent être de longueur et de résistance égales.



### Capteurs PT100 à 4 fils

Un capteur Pt100 à 4 fils offre une précision optimale en éliminant complètement l'effet de la résistance du fil conducteur. Deux fils fournissent le courant de mesure, tandis que les deux autres mesurent la chute de tension aux bornes de l'élément Pt100, permettant ainsi de déterminer la résistance exacte. Cette méthode est couramment utilisée en laboratoire et dans les applications de précision où même les plus petites erreurs doivent être éliminées.

© Extrait "Schémas de Connexion RTD Pt100" / <https://www.tcsa.fr>

Dans le cadre de mon projet, la PT100 s'est révélée comme le choix le plus pertinent pour garantir la mesure à des températures très basses dû à la présence de glace carbonique.

## Information sur la glace carbonique

La **glace carbonique** possède un propriété particulière appelée **sublimation** : elle passe directement de l'état solide à l'état gazeux sans passer par la phase liquide, à une température de **-78,5°C** sous pression atmosphérique. Cette propriété en fait un agent de refroidissement extrêmement efficace pour le transport de produits nécessitant des températures cryogéniques.

Comprendre ce phénomène est crucial, car la température de la glace carbonique elle-même est une constante tant qu'il y a sublimation, mais la température à l'intérieur du colis variera en fonction de l'isolation et de la quantité de glace. Plus il y a de glace carbonique, plus longtemps la température sera maintenue. Le comportement de la température quand la glace vient à manquer est le plus intéressant dans le cas de l'étude. Les variations de la température extérieure sont négligées par manque de temps.

## 2.2 Spécifications du Besoin

Pour la conception de la chaîne d'acquisition, un ensemble de spécifications a été défini pour répondre aux exigences de l'étude de l'évolution thermique d'un colis refroidi à la glace carbonique.

Ces exigences ont guidé la sélection des composants et l'architecture logicielle :

- **Plage de température à mesurer** : Le système doit être capable de mesurer des températures s'étendant d'au moins -80°C à +30°C, afin de couvrir aussi bien la température de la glace carbonique que la température ambiante au réchauffement.
- **Précision et résolution requises** : Une résolution de mesure de l'ordre du degré Celsius est jugée suffisante pour l'étude des courbes de température, mais une résolution plus fine (0,1°C) est souhaitée pour observer les nuances et micro-variations potentielles.
- **Fréquence d'acquisition des données** : Une mesure toutes les minutes pour suivre l'évolution thermique du colis sur plusieurs jours.
- **Connectivité** : Le système doit pouvoir transmettre les données sans fil, via **Wi-Fi**, pour permettre une surveillance à distance sans contrainte de câblage, et faciliter la mise en place d'expériences dans des environnements variés.
- **Autonomie** : Le module d'acquisition doit être autonome en énergie pour permettre des campagnes de mesure de plusieurs jours, sans intervention humaine.

- **Protection de l'électronique** : Le module électronique (microcontrôleur et interface du capteur) doit être protégé de l'environnement immédiat du colis (froid, humidité, condensation). Seule la sonde du capteur doit être insérée dans le volume à mesurer.
- **Stockage et visualisation des données** : Les données acquises doivent être centralisées sur un serveur et stockées dans une base de données. Une interface web conviviale est requise pour visualiser les données sous forme graphique (courbes de température) et permettre leur analyse historique.
- **Robustesse logicielle** : Le système doit être capable de gérer les pertes de connexion avec le serveur en stockant les données localement et en les transmettant dès que la connexion est rétablie, assurant ainsi l'intégrité de la série temporelle des mesures.

### **2.3 Architecture Générale de la Chaîne d'Acquisition**

La chaîne se décompose comme suit :

- **Le Capteur PT100**
- **Un convertisseur analogique numérique**
- **Le Microcontrôleur et la Communication**
- **La Plateforme de Concentration/Collecte (PFC)**
- **La Base de Données**
- **La Plateforme de Visualisation**

### 3. Conception et Réalisation de la Chaîne d'Acquisition

#### 3.1 Partie Matérielle

La mise en œuvre physique de la chaîne de mesure a nécessité une bonne sélection des composants et une attention particulière à leur interconnexion.

##### 3.1.1 Microcontrôleur ESP32

Le **microcontrôleur ESP32** s'est avéré optimal pour ce projet, offrant un compromis idéal entre performance, connectivité et coût. Voici les avantages clés :



- **Rapport Qualité/Prix** : L'ESP32 offre une bonne puissance de calcul et des fonctionnalités avancées à un coût très abordable.
- **Wi-Fi Intégré** : L'intégration native d'un module Wi-Fi, qui a grandement simplifié la conception matérielle. Cela évite l'ajout d'un module Wi-Fi externe.
- **Faible Encombrement** : Sa taille compacte facilite son insertion dans un boîtier.
- **Interfaces** : Il dispose de nombreuses broches GPIO, de multiples interfaces (SPI, I2C, UART) et d'une mémoire suffisante pour le firmware et le stockage temporaire des données.

##### 3.1.2 Alimentation électrique

L'alimentation de l'ESP32 est assurée par une **Power Bank USB de 20000mAh 120W**. Cette solution a permis de rendre le module d'acquisition entièrement **autonome et portable**, facilitant son déploiement dans le laboratoire. La Powerbank est placée à l'extérieur du colis pour ne pas être soumise aux températures extrêmes, assurant ainsi une alimentation stable. L'autonomie estimée du système avec cette configuration est d'environ 4 jours, suffisante pour couvrir la durée d'une mesure de 3 jours.

### 3.1.3 Protection du Matériel et Conception du Boîtier

Pour protéger l'électronique sensible j'ai conçu et fabriqué un **boîtier artisanal**. Ce boîtier a été réalisé en plastique en creusant une boîte déjà existante. L'objectif principal était d'isoler physiquement les composants électroniques, tout en permettant le passage de la sonde.

Il est important de noter que ce boîtier est un prototype. Sa conception a privilégié la fonctionnalité et la protection élémentaire des circuits. Seule la sonde PT100 a été directement plongée dans le colis, tandis que le boîtier contenant l'électronique est resté à l'extérieur.

### 3.1.4 Capteur de température PT100

Pour ce projet, j'ai choisi une sonde PT100 de chez GUILCOR, une compagnie reconnue pour ses sondes de bonne qualité. La sonde que j'ai utilisé a les caractéristiques suivantes :

- PT100 classe A
- Précision  $\pm 0,15^\circ\text{C}$   $\pm 0,2 \%$
- Plage  $-100^\circ\text{C}$  à  $200^\circ\text{C}$
- Temps de réponse < 4 secondes



Le raccordement de la PT100 a été réalisé en **montage 2 fils**. Ce choix, comme expliqué plus tôt, présente une sensibilité due à la **résistance des fils de connexion**. Pour minimiser cette source d'erreur, une attention particulière a été portée à la **longueur des câbles (les plus courts possibles)**. Bien que les montages 3 ou 4 fils soient préférables pour des applications de haute précision, le montage 2 fils a été retenu pour sa simplicité d'intégration dans le prototype.

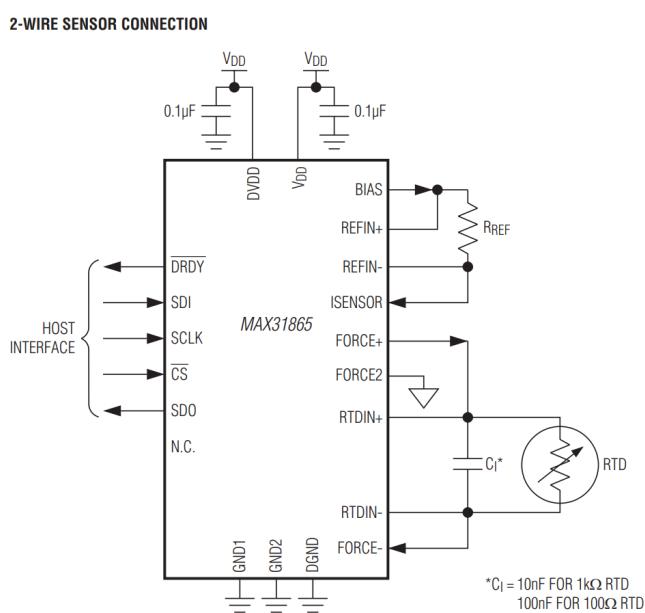
### 3.1.5 Module de conditionnement de signal (Adafruit MAX31865)

Afin de convertir la variation de résistance de la PT100 en un signal numérique exploitable par le microcontrôleur, le module **Adafruit MAX31865** a été intégré. Ce convertisseur analogique-numérique (CAN) spécifique aux RTD (Resistance Temperature Detector) est un bon choix pour plusieurs raisons :

- **Compatibilité PT100** : Il est nativement conçu pour interfaçer les sondes PT100, et gère la conversion de la résistance en température.
- **Précision** : Le MAX31865 intègre un CAN de haute résolution (15 bits sans bruit pour la résistance) et des circuits minimisant le bruit et les erreurs.
- **Interface SPI** : Sa communication avec le microcontrôleur se fait via le protocole SPI (Serial Peripheral Interface), un bus commun pour le transfert de données.

Le fonctionnement du MAX31865 repose sur le principe de la mesure ratiométrique (ou par rapport). Pour déterminer la résistance de la RTD ( $R_{RTD}$ ), le circuit mesure la tension aux bornes de la RTD lorsqu'un courant constant la traverse, et compare cette tension à la tension aux bornes d'une résistance de référence de précision connue ( $R_{REF}$ ).

Ce schéma simplifié montre le circuit électronique d'une MAX31865 en configuration pour une PT100 2 fils :



La tension aux bornes de la RTD ( $V_{RTD}$ ) est donnée par la loi d'Ohm :

$$V_{RTD} = I_{EXC} \cdot R_{RTD}$$

La tension aux bornes de la résistance de référence ( $V_{REF}$ ) est :

$$V_{REF} = I_{EXC} \cdot R_{REF}$$

Le MAX31865 mesure le rapport de ces deux tensions. En éliminant le courant d'excitation ( $I_{EXC}$ ), la résistance de la RTD peut être déterminée précisément :

$$\frac{V_{RTD}}{V_{REF}} = \frac{I_{EXC} \cdot R_{RTD}}{I_{EXC} \cdot R_{REF}} = \frac{R_{RTD}}{R_{REF}}$$

Par conséquent, la résistance de la RTD est calculée comme suit :

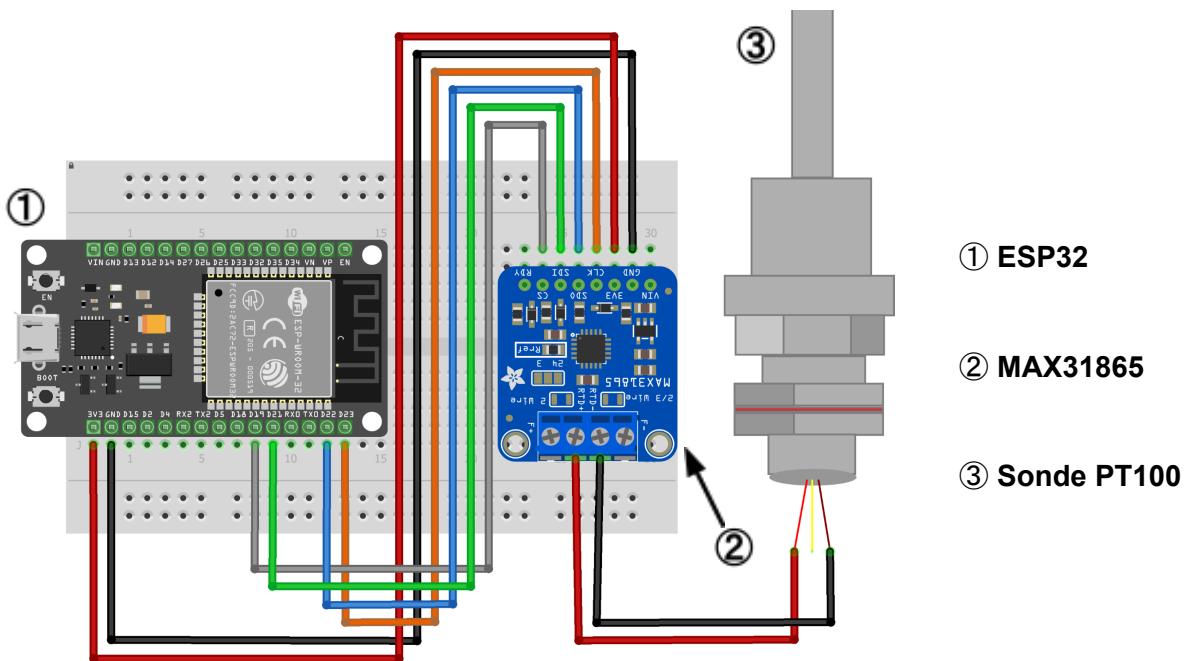
$$R_{RTD} = R_{REF} \cdot \frac{V_{RTD}}{V_{REF}}$$

La résistance de référence de précision étant de 400Ω on obtient la formule finale :

$$R_{RTD} = 400 \cdot \frac{V_{RTD}}{V_{REF}} \quad \text{soit avec la formule donné plus tôt : } T = \frac{\frac{400 \cdot \frac{V_{RTD}}{V_{REF}}}{100} - 1}{0,00385}$$

Selon le constructeur, la **fiabilité** de la conversion est de **± 0.5°C**

Le câblage entre la PT100, le MAX31865 et l'ESP32 a été réalisé selon le montage suivant :



Pour faciliter le branchement de la sonde **PT100** avec la carte **MAX31865**, j'ai placé un **connecteur GX12 5 pins**.

Ce connecteur est généralement utilisé dans la radiocommunication aérienne et possède une faible résistance de contact (environ **0,005 ohm**).



Dans le cas d'un montage 2 fils, on peut calculer l'erreur sur la température par la formule :

$$\text{Erreur Température} = \frac{R_{contact}}{0,385 \Omega/\text{°C}} = \frac{0,005 \Omega}{0,385 \Omega/\text{°C}} \approx 0.013 \text{ °C}$$

Cette erreur est très largement tolérable.

### 3.2 Logicielle Embarquée (Firmware ESP32)

Le firmware de l'ESP32 constitue le cœur intelligent de la partie embarquée de la chaîne d'acquisition. Développé dans l'environnement **Arduino IDE** en langage **C++**, il gère la lecture du capteur, la connectivité Wi-Fi et assure la transmission fiable et sécurisée des données vers la plateforme de concentration.

La conception logicielle a priorisé la **robustesse et la persistance des données**, éléments critiques pour la fiabilité d'une chaîne de mesure en instrumentation. Le programme embarqué s'articule autour d'un cycle d'opérations défini :

- **Initialisation du Système** : Au démarrage, le microcontrôleur prépare son environnement de travail. Cela inclut la configuration des interfaces de communication (SPI pour le capteur, série pour le débogage et la configuration), et l'activation du système de fichiers LittleFS. Ce choix est fondamental car il permet d'exploiter la mémoire flash interne de l'ESP32 comme un espace de stockage dit non-volatile.  
Un répertoire spécifique est dédié à la mise en file d'attente des requêtes en attente d'envoi. Les paramètres de configuration essentiels (nom de la mesure, identifiant de la sonde, index, informations de connexion Wi-Fi, URL du serveur) sont chargés depuis cette mémoire, garantissant la conservation de la configuration même après un redémarrage.  
Une tentative de connexion au réseau Wi-Fi est alors initiée.
- **Cycle d'Acquisition et de Transmission** : La **boucle principale** orchestre les tâches à intervalles réguliers. Toutes les **60 secondes**, une mesure est effectuée et traitée. J'ai choisi cet intervalle pour suivre efficacement l'évolution thermique du colis sans surcharger le système ni le réseau.
  - La **lecture de la température** se fait en interrogeant le module MAX31865, qui se charge de convertir la résistance de la PT100 en une valeur de température en degrés Celsius, intégrant ses propres algorithmes de linéarisation et de compensation.
  - La donnée de température est ensuite associée à un **horodatage incrémental** (représentant le nombre de minutes écoulé depuis le début de la mesure) et des identifiants (nom de la mesure, ID de la sonde), puis formatée en un **JSON**, un format standard pour la transmission web.
- **Gestion Intelligente de la Connectivité et Sauvegarde** : Un point fort du firmware est sa capacité à gérer les aléas de la connexion réseau. Avant chaque tentative d'envoi de données :

- **Si la connexion Wi-Fi est active et stable :** Les données JSON sont immédiatement transmises au serveur de collecte (PFC) via une requête **HTTPS POST sécurisée**.  
En cas de succès d'envoi, le système procède au **renvoi des requêtes précédemment stockées**. Cela assure que toutes les données accumulées hors ligne sont progressivement transmises et supprimées du stockage local.
  - **Si la connexion Wi-Fi est absente ou échoue :** La requête JSON actuelle n'est pas perdue. Elle est **sauvegardée localement et de manière persistante sur le système de fichiers LittleFS**.  
Chaque mesure est enregistrée dans un fichier distinct au sein du répertoire dédié. Une vérification de l'espace disque disponible est effectuée avant chaque écriture pour éviter toute saturation.
- **Fonctionnalités de configuration et de diagnostic :** Le firmware intègre également une interface utilisateur simple, accessible via une liaison série. Ce **menu de configuration** permet à l'opérateur de :
    - Réinitialiser le compteur de mesures.
    - Modifier les paramètres cruciaux comme l'URL du serveur PFC, les identifiants Wi-Fi, le nom de la mesure et l'ID de la sonde.
    - Accéder à des informations de diagnostic, telles que la température actuellement lue, les codes d'erreur du **MAX31865**, l'état de la connexion Wi-Fi, et la cause du dernier redémarrage de l'ESP32. Ces outils sont précieux pour la maintenance et le débogage.

Le stockage temporaire sur LittleFS garantit une grande fiabilité de l'acquisition, assurant l'intégrité de la série temporelle des mesures, même en cas de coupure réseau prolongée ou intermittente. Les données sont conservées de manière "non-volatile", ce qui les protège même en cas de coupure d'alimentation de la Power Bank. Ce mécanisme est indispensable et prévient des environnements potentiellement instables ou de problèmes du côté du système de collecte.

Pour cette implémentation incluent j'ai utilisées les bibliothèques suivante :

*Adafruit\_MAX31865* pour l'interface capteur,  
*Preferences* pour la gestion de la configuration, et les bibliothèques,  
*WiFi*, *HTTPClient*, *WiFiClientSecure* pour la connectivité réseau,  
*LittleFS* pour le stockage embarqué.

Un guide d'utilisation est disponible en Annexe 1.

### 3.3 Serveur Web (PFC - Plateforme de Concentration/Collecte)

La **Plateforme de Concentration (PFC)** constitue le maillon central de la chaîne d'acquisition, c'est le point de collecte pour toutes les données de température transmises par le(s) cartes d'acquisition. La PFC est développée en **Python** à l'aide du framework web **Flask**, elle assure la réception, la validation, le stockage des données et leur mise à disposition pour la plateforme de visualisation.

Rôle et Fonctionnalités de la PFC :

1. **Réception des Données d'Acquisition** : La PFC est dotée d'une **route API dédiée /api/data**, configurée pour écouter et traiter les **requêtes HTTP POST** entrantes. C'est par ce biais que l'ESP32 envoie les mesures de température sous forme de JSON.
2. **Validation et Traitement des Données** : Lors de la réception d'une requête, la PFC procède à une **validation de la structure JSON**. Elle s'assure que toutes les informations nécessaires – telles que le nom de la mesure, un indice temporel, et les données de température incluant l'identifiant de la sonde et sa valeur – sont présentes et correctement formatées. Cette étape est essentielle pour maintenir l'intégrité de la base de données et prévenir l'insertion de données corrompues. Chaque point de donnée validé est ensuite préparé pour le stockage.
3. **Stockage des Données** : Après validation, les données de température sont insérées dans la **base de données SQLite**. Chaque enregistrement contient le nom de la mesure, l'identifiant de la sonde, l'indice temporel et la valeur de la température.
4. **Interface d'Interrogation pour la visualisation** : La PFC expose également une **interface de programmation (API)** permettant d'interroger la base de données, celle-ci n'est pas exposée publiquement et est conçue pour une utilisation sur un réseau commun entre la PFC et la plateforme de visualisation.
5. **Notification en Temps Réel (WebSockets)** : Une fonctionnalité intéressante de la PFC est l'implémentation d'un **canal WebSocket /api/data\_ws**. Ce protocole de communication bidirectionnel permet à la PFC de notifier les clients de visualisation (navigateurs web) dès l'arrivée de nouvelles données. Lorsqu'une nouvelle mesure est enregistrée, la PFC envoie un message aux clients WebSocket connectés. Cela permet à l'interface de visualisation de se rafraîchir sans avoir besoin d'interroger constamment le serveur, améliorant ainsi l'expérience utilisateur et l'efficacité de la communication.

### 3.4 Base de Données (SQLite)

Pour le stockage des données de température, le choix s'est porté sur **SQLite**. Ce système de gestion de base de données est particulièrement adapté aux projets de petite et moyenne envergure, ainsi qu'aux prototypes, pour les raisons suivantes :

- **Légèreté et Simplicité** : SQLite est une base de données sans serveur, entièrement contenue dans un seul fichier sur le disque. Cela simplifie grandement son déploiement et sa maintenance, ne nécessitant aucune installation de serveur de base de données distinct.
- **Portabilité** : Le fichier de base de données peut être facilement déplacé ou sauvegardé.
- **Facilité d'Intégration** : Il s'intègre naturellement avec Python via le module `sqlite3` standard, facilitant son interaction avec l'application Flask.

**Schéma de la Base de Données** : La base de données est structurée autour d'une table unique nommée `Donnees`, conçue pour stocker chaque mesure de température. Cette table contient les champs suivants :

- `measure_name` (VARCHAR(10)) : Identifie le nom spécifique de l'expérience (par exemple, "Colis - 5kg Glace"). Ce champ permet de regrouper les mesures par campagne.
- `sensor_id` (VARCHAR(10)) : Identifiant unique de la sonde PT100 qui a réalisé la mesure (par exemple, "sonde 1").
- `time` (NUMBER) : Représente l'horodatage de la mesure. Il s'agit d'un compteur incrémental envoyé par l'ESP32, assurant l'ordre chronologique des points de données.
- `T` (FLOAT) : La valeur de température mesurée en degrés Celsius.

Cette structure permet une organisation claire des données et facilite les requêtes pour l'analyse et la visualisation. Pour un déploiement à plus grande échelle ou avec un volume de données très important, des systèmes comme PostgreSQL ou MySQL seraient à considérer pour leurs performances et leur gestion de la concurrence.

### 3.5 Plateforme de Visualisation

La plateforme de visualisation est un site web qui se décompose en 3 grandes pages.

### 3.5.1 Estimation de glace carbonique



Cette page est la page d'accueil du site et donne des indications sur les quantités de glaces carboniques à employer pour que les colis restent sous cette température de 1 à 3 jours. Il est également possible d'estimer la courbe de température pour un poids précis.

J'ai conçu le système de prédiction de température en procédant par étapes :

#### 1. Identification des relations par l'observation

Le point de départ a été l'examen des données expérimentales. Ces observations ont permis de dégager deux relations fondamentales, directement liées au poids initial de glace carbonique:

- **La durée du plateau de température** : la période durant laquelle la température reste stable à un niveau très bas, caractéristique de la sublimation de la glace carbonique (environ -78°C).
- **La vitesse de remontée en température** : la rapidité avec laquelle la température augmente une fois le plateau terminé et donc la majeure partie de la glace consommée.

## 2. La modélisation mathématique

Pour traduire ces observations en un modèle prédictif, j'ai utilisé des modèles de régression linéaire. Cette méthode à la capacité d'établir des relations directes entre les variables mesurées.

**Mise en œuvre avec Python** : En Python j'ai codé ma propre implémentation d'un modèle de régression linéaire, j'ai ainsi calculé les coefficients qui définissent ces modèles linéaires. Ces coefficients sont devenus les "règles" qui décrivent comment le poids de la glace influence la durée du plateau et la vitesse de remontée.

Soit la formule de la régression :  $Y = a \cdot X + b$

Où :  $Y$  représente la valeur prédite de la variable dépendante (par exemple, la durée du plateau en minutes) pour une valeur donnée de  $X$ .

- $X$  est dans mon cas, le poids initial de glace carbonique en kg
- $a$  est la pente de droite. Il indique de combien  $Y$  varie en moyenne pour chaque unité d'augmentation de  $X$ .
- $b$  est l'ordonnée à l'origine. C'est la valeur prédite de  $Y$  lorsque  $X$  est égal à zéro.

## 3. Construction du modèle de prédiction

À partir des modèles pour la durée du plateau et la vitesse de remontée, j'ai élaboré une fonction de prédiction de température. Cette fonction combine les deux aspects :

- Tant que la durée simulée ne dépasse pas la durée du plateau prédite (calculée en fonction de la masse de glace), la température est maintenue à la valeur du plateau.
- Au-delà du plateau, la température est calculée en ajoutant à la température du plateau l'augmentation liée à la vitesse de remontée prédite (dépendante de la masse de glace), multipliée par le temps écoulé depuis la fin du plateau.

## 4. Résolution du problème inverse : l'estimation de la masse nécessaire

Pour déterminer la masse de glace requise pour atteindre une température cible sur une période donnée, j'ai implanté un algorithme de recherche par dichotomie. Cet algorithme ajuste de manière itérative la masse de glace testée jusqu'à trouver la quantité optimale qui satisfait les critères de température et de durée.

### 3.5.2 Visualiser un mesure

Via le menu de navigation **Mesures** il est possible de choisir une mesure que l'on souhaite visualiser. La page tel que la suivante s'ouvre alors :



Les données de la mesure apparaissent alors sous forme de graphiques. Il est également possible de les visualiser sous forme de tableau en cliquant sur ce bouton



Il est aussi possible d'imprimer ou de télécharger en PDF un rapport de l'expérience. Un exemple de rapport est disponible en Annexe 2.

### 3.5.3 Comparer plusieurs mesures

Via le menu de navigation [Temperature](#) il est possible de comparer plusieurs mesures entre elles.



Sur cette interface, un menu déroulant à gauche permet de choisir individuellement les sondes par mesure que l'on veut comparer (dans le cas où plusieurs sondes seraient utilisées, ce qui est le cas de l'étalonnage par exemple). Le graphique et le tableau se mettent alors à jour avec une couleur pour chaque courbe.

## 4. Expérimentation et Mesures

Dans cette section je décris les campagnes de mesure réalisées avec la chaîne d'acquisition développée. Je détaille le protocole expérimental, présente les résultats obtenus sous forme de graphiques et donne une première analyse.

### 4.1 Protocole Expérimental

Afin d'évaluer la performance de la chaîne d'acquisition et de caractériser l'évolution thermique des colis refroidis à la glace carbonique, j'ai mis en place un protocole expérimental. L'objectif étant de simuler les conditions de transport et de stockage, en observant l'évolution de la température à l'intérieur du colis.

#### Matériel Utilisé :

- **Colis isotherme** : Une caisse isotherme en polyuréthane.
- **Glace carbonique** : Des quantités variables de glace carbonique sous forme de pellets.

- **Sonde PT100 et module d'acquisition** : La chaîne d'acquisition développée (PT100, MAX31865, ESP32).
- **Power Bank** : Pour l'alimentation de l'ESP32.
- **Environnement de test** : Les expériences sont menées à une température ambiante contrôlée à environ 26°C.

**Préparation des Colis** : Pour chaque expérience, le colis est préparé de la manière suivante :

1. **Placement de la sonde** : La sonde PT100 est positionnée au fond **du colis**, là où les produits sont placés habituellement. Seule la sonde est immergée, le boîtier de l'électronique reste à l'extérieur.
2. **Disposition de la glace carbonique** : Une quantité mesurée de glace carbonique est placée par dessus et autour de la sonde.
3. **Fermeture du colis** : Le colis a été scellé pour simuler les conditions de transport.

**Déroulement des expériences** : Chaque campagne de mesure se distingue par la quantité initiale de glace carbonique. Pour chaque expérience :

- L'ESP32 est configuré avec un nom de mesure unique (*measure\_name*) et un identifiant de sonde (*sensor\_id*).
- Le système d'acquisition est mis en marche et enregistre la température toutes les 1 minutes.
- Les données étaient envoyées à la PFC, stockées dans la base de données et visualisables en temps quasi réel via l'interface web.
- Chaque expérience a duré environ 3 jours (72h), permettant d'observer la phase de refroidissement rapide, le maintien à basse température (plateau de sublimation), et la phase de réchauffement progressive après la sublimation complète de la glace.

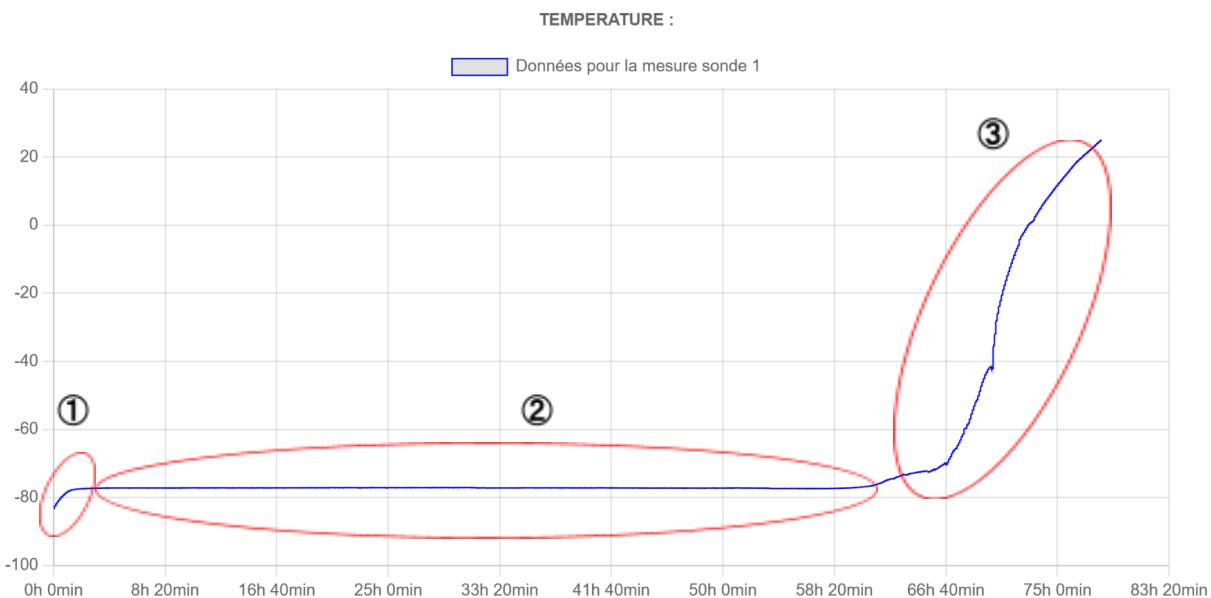
**Gestion des Données** : La fonctionnalité de stockage local du firmware de l'ESP 32 s'est avérée utile. Suite à une perte de connexion Wi-Fi (due à une coupure électrique), les données furent automatiquement sauvegardées sur la mémoire flash du microcontrôleur et retransmises au serveur dès le rétablissement de la connexion. Ce mécanisme a assuré la **continuité de l'acquisition et l'intégrité des séries temporelles de mesures**, sans aucune perte de données, ce qui est essentiel pour une analyse fiable de l'évolution thermique.

## 4.2 Présentation des Résultats

Les campagnes de mesure ont permis de générer une quantité significative de données, offrant un aperçu précis du comportement thermique des colis. Les résultats sont présentés sous forme graphique, illustrant l'évolution de la température en fonction du temps pour différentes configurations expérimentales.

### Résultat 1 : Courbe de température typique avec glace carbonique

Ce graphique présente une courbe de température caractéristique obtenue à l'intérieur d'un colis contenant 10 kg de glace carbonique.



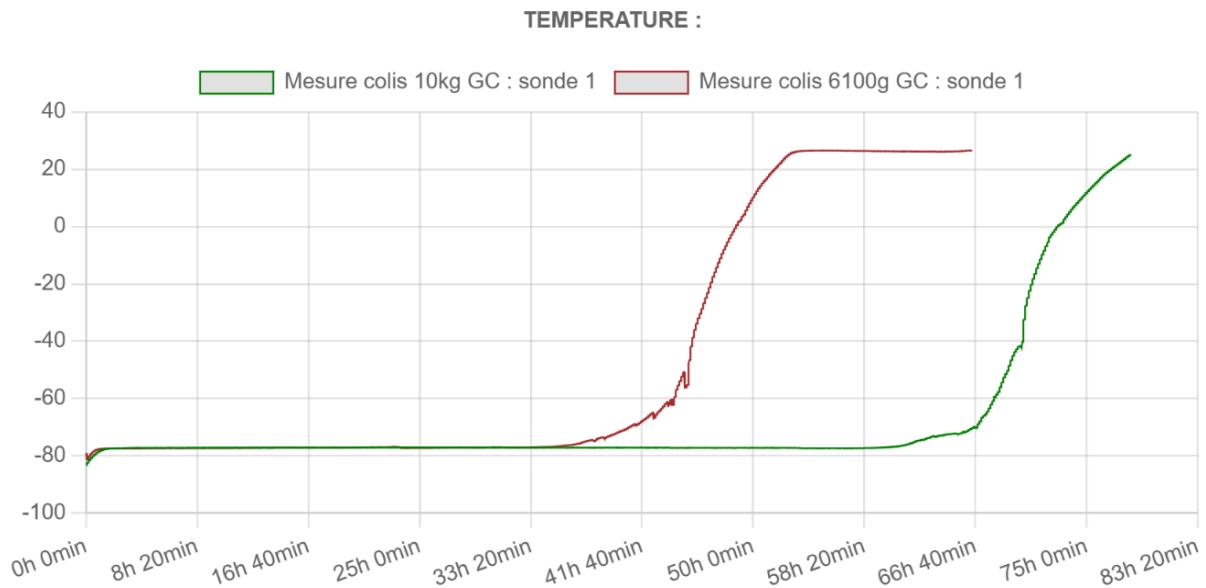
On observe :

① **Phase de stabilisation initiale** : Une stabilisation de la température dès le début de l'expérience, atteignant la température de sublimation de la glace carbonique.

② **Plateau de sublimation** : La température se stabilise autour de **-78,5°C** (température de sublimation du CO<sub>2</sub> solide). La durée de ce plateau est directement liée à la quantité de glace carbonique et à l'isolation du colis.

③ **Phase de réchauffement** : Une fois la glace carbonique entièrement sublimée, la température remonte progressivement vers la température ambiante, à une vitesse dépendante de l'isolation du colis et des échanges thermiques avec l'extérieur.

Le graphique suivant compare l'évolution de la température pour des colis contenant **10 Kg** et **6.1Kg** de glace carbonique.



- Cette comparaison met en évidence l'impact direct de la quantité de glace sur la **durée du plateau de maintien à très basse température**. Une quantité plus importante de glace prolonge significativement la période pendant laquelle le colis reste à des températures cryogéniques, un critère essentiel pour le transport de certains produits.
- Les pentes de remontée de la température semblent être similaires.

### 4.3 Analyse et Interprétation

L'analyse des courbes de température obtenues permet de tirer plusieurs conclusions quant à la performance des colis et de la chaîne d'acquisition :

- **Validation du concept** : Les expériences ont clairement démontré la capacité de la chaîne d'acquisition à suivre avec précision les variations de température, de la température de sublimation jusqu'à ambiante, confirmant le bon fonctionnement de la sonde PT100 et du module MAX31865.
- **Impact de la quantité de glace** : La relation entre la quantité de glace carbonique et la durée de maintien à très basse température est directement observable. Le modèle de régression linéaire a ainsi pu établir la relation suivante :  

$$\text{Durée du plateau en min} = 374.62 \cdot \text{masse de glace carbonique en Kg} - 65.15$$
- **Dynamique thermique du colis** : Les courbes permettent d'identifier clairement les différentes phases du processus de refroidissement et de réchauffement, offrant des données précieuses pour la conception ou l'amélioration des emballages isothermes.

- **Robustesse du système :** La fonctionnalité de stockage local des données sur l'ESP32 a prouvé son efficacité en assurant la collecte continue des mesures même suite à une rupture de connexion avec le serveur. Ce mécanisme est fondamental pour la fiabilité des données collectées sur des périodes prolongées.
- **Limites observées :** La fonctionnalité de stockage local des données et des paramètres se réinitialise à chaque mise à jour du code, il faut alors re-configurer les paramètres.

Les données collectées et les observations effectuées constituent une base solide pour de futures études et l'optimisation des solutions de transport sous froid intense.

## 5. Critique et Évaluation de la Chaîne d'Acquisition

Dans cette section je vais apporter un regard critique sur le système développé, évaluer ses performances par rapport aux objectifs fixés, identifier ses limites et proposer des pistes d'amélioration.

### 5.1 Précision et Étalonnage

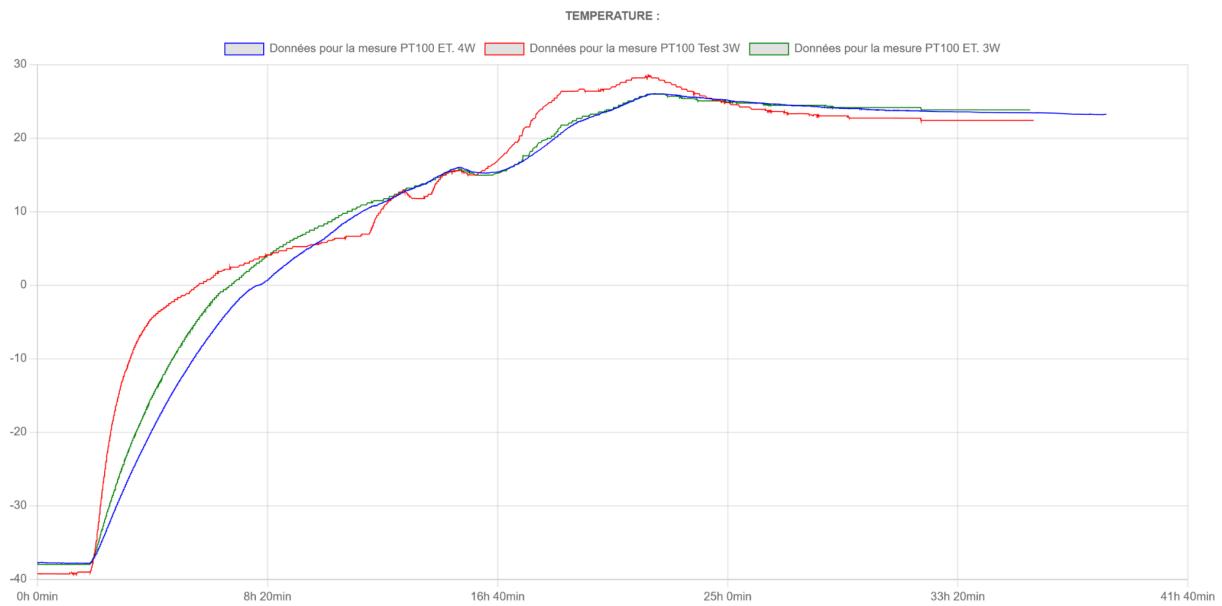
Pour valider la fiabilité de la sonde, un étalonnage de celle-ci est essentiel et ce même si le fabricant fournit un certificat de conformité attestant de sa validité. Ce certificat est disponible en **Annexe 3**.

#### 5.1.1 Etalonnage avec un étalon

J'ai mis en œuvre la méthode d'étalement par comparaison. Cette approche consiste à placer simultanément la sonde à étailler et un thermomètre de référence (étalon), dont la précision est documentée et traçable à des étalons nationaux, dans un environnement thermique stable et uniforme.

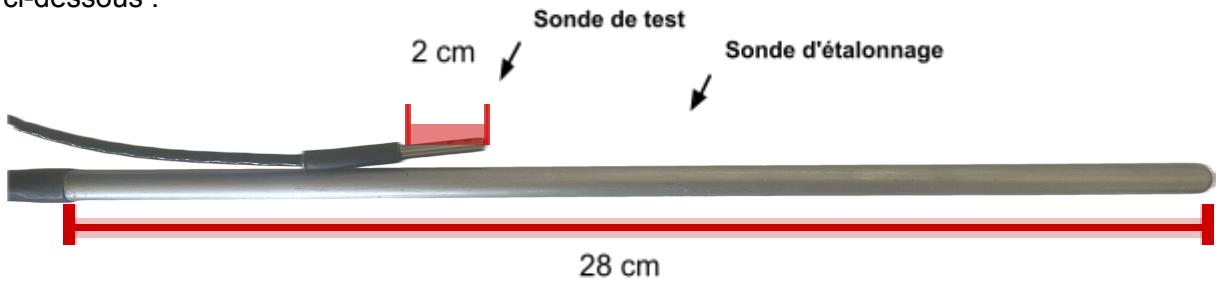
Pour recréer un tel environnement j'ai utilisé une étuve disponible à l'ENM. Deux PT100 provenant aussi de l'ENM ayant leur étalonnage valide ont servi d'étalon. Pour avoir le même système d'acquisition les 3 sondes étaient acquises par une campbell CR1000.

Voici un graphique présentant les courbes de température lors de l'étalonnage.



En vert et bleu sont les courbes des sondes d'étalonnage et en rouge la courbe pour la sonde à tester.

J'ai pu observer qu'à température ambiante, il y avait un écart très faible entre les trois sondes ( $<0,5^{\circ}\text{C}$ ). Néanmoins entre -40 et -35 la fonde de test **sous estime** systématiquement la température d'environ  $1,5^{\circ}\text{C}$ . Cela suggère probablement, non pas un offset mais un comportement en basse température lié au format de la sonde (courte et fine sur la mienne et longue et épaisse sur celle de MF) où la formation de givres pourrait être plus ou moins impactant au vu de la différence de surface de contact comme on peut le voir ci-dessous :



### 5.1.2 Test d'une nouvelle méthode d'étalonnage

N'étant pas satisfait de l'opération d'étalonnage réalisée, j'ai cherché un moyen différent de valider ma sonde et plus globalement ma chaîne d'acquisition dans son ensemble.

M'inspirant de la méthode d'étalonnage des sondes d'humidité (à base de solution saline saturé), j'ai eu l'idée de profiter de la propriété de sublimation de la glace carbonique pour créer un environnement où la température serait forcément au niveau de la température de sublimation de celle-ci soit 78,5°C.

Selon mes relevés, la sonde affiche une température stable d'environ -77,20°C. Cette méthode suggère donc une erreur du système d'acquisition de +1,3 °C.

Cette erreur étant stable on peut donc la combiner à l'étalonnage précédent pour en déduire une incertitude de **±0,5°C** à température ambiante et **+1,3 °C** à température de sublimation de la glace carbonique.

## 5.2 Robustesse et Fiabilité

La robustesse et la fiabilité de la chaîne d'acquisition ont été des critères de conception majeurs, particulièrement au regard des conditions d'utilisation (températures extrêmes, humidité potentielle, environnement de réseau variable).

- **Gestion de la connectivité Wi-Fi et persistance des données** : Le mécanisme de stockage des données sur le système de fichiers LittleFS de l'ESP32 en cas de perte de connexion Wi-Fi s'est avéré **extrêmement efficace**. Toutes les données ont été conservées et transmises avec succès dès le rétablissement du réseau, garantissant **l'intégrité des séries temporelles** de mesures. Cette fonctionnalité est un atout majeur pour les déploiements en conditions réelles où la stabilité du réseau ne peut être garantie. C'est une garantie contre la perte de données vitales pour l'analyse.
- **Protection physique du matériel** : La conception et la fabrication du boîtier ont permis de protéger efficacement l'électronique de l'ESP32 et du MAX31865. Bien que n'ayant pas d'indice IP certifié, cette protection a été suffisante pour la durée des expérimentations, prévenant tout dysfonctionnement lié à la condensation ou aux chocs légers.
- **Stabilité du firmware** : Le logiciel embarqué a montré une bonne stabilité durant les longues périodes de mesure. Les mécanismes de gestion d'erreurs (erreurs de capteur, échecs HTTP) ont permis au système de continuer à fonctionner sans nécessiter de redémarrage manuel.
- **Fiabilité des composants** : Les composants industriels (PT100, MAX31865) ont démontré leur fiabilité, fournissant des mesures cohérentes sur la durée des tests.

### 5.3 Facilité d'Utilisation et Déploiement

La chaîne d'acquisition a été conçue pour être relativement simple à déployer et à utiliser pour des non-spécialistes, après une configuration initiale.

- **Configuration flexible** : Le menu de configuration via la console série de l'ESP32 permet de modifier facilement les paramètres clés (réseau Wi-Fi, nom de la mesure, ID de la sonde) sans avoir à reprogrammer le microcontrôleur. C'est un avantage significatif pour l'opérabilité sur le terrain.
- **Portabilité** : L'alimentation par Power Bank et le boîtier compact rendent le module d'acquisition facilement transportable et déployable dans différents colis ou environnements.
- **Visualisation intuitive** : L'interface web offre une visualisation claire et graphique des données, rendant l'interprétation des courbes de température accessible même aux utilisateurs sans expertise technique approfondie. Le WebSocket améliore considérablement l'expérience en fournissant des mises à jour en temps quasi réel.
- **Accessibilité des données** : La centralisation des données sur un serveur et l'accès via une interface web permettent la consultation des mesures depuis n'importe quel appareil connecté au réseau, offrant une grande flexibilité de surveillance.

## 6. Conclusion et Perspectives

### 6.1 Conclusion

Ce projet a permis la conception, la réalisation et l'expérimentation d'une **chaîne d'acquisition de température complète et autonome**, spécifiquement adaptée à l'étude de l'évolution thermique de colis refroidis à la glace carbonique. De l'intégration matérielle d'une sonde PT100 avec un microcontrôleur ESP32, jusqu'à la mise en place d'une plateforme de visualisation web interactive, chaque maillon de la chaîne a été développé avec un souci de **fiabilité**.

Les objectifs fixés en début de projet ont été pleinement atteints :

- **Acquisition de données précises** : Le choix de la sonde PT100 et du module MAX31865 a permis des mesures fiables sur une plage de température étendue, incluant les très basses températures de la glace carbonique (autour de  $-78,5^{\circ}\text{C}$ ).
- **Connectivité sans fil robuste** : L'utilisation de l'ESP32 et la mise en œuvre d'un mécanisme de stockage local des données sur LittleFS ont garanti la **continuité de l'acquisition même en cas de perte de connexion Wi-Fi**, assurant ainsi l'intégrité de toutes les séries temporelles de mesures collectées. Cette résilience est un atout majeur pour les applications en conditions réelles.
- **Centralisation et visualisation des données** : Le développement de la Plateforme de Concentration (PFC) basée sur Flask et SQLite, couplée à une interface de visualisation web réactive (notamment grâce aux WebSockets pour du temps quasi réel), a permis de transformer des données brutes en graphiques exploitables, offrant une compréhension claire et immédiate de la dynamique thermique des colis.
- **Autonomie énergétique** : L'alimentation par Power Bank a rendu le module d'acquisition portable et autonome pour les durées d'expérimentation envisagées.

Les campagnes de mesure ont validé l'efficacité du système à caractériser les phases de stabilisation, de plateau de sublimation et de réchauffement. Les résultats obtenus fournissent des informations précieuses pour l'optimisation des emballages isothermes et des protocoles logistiques de transport sous froid intense. Ce projet a démontré qu'il est possible de créer une chaîne d'instrumentation fiable et accessible pour des applications d'ingénierie concrètes.

## 6.2 Perspectives

Ce projet ouvre la voie à de nombreuses évolutions, transformant ce prototype fonctionnel en une solution encore plus robuste et polyvalente, potentiellement applicable à des contextes industriels plus grands. Plusieurs pistes d'amélioration seraient alors à envisager.

### 1. Amélioration de la performance et de la précision :

- **Instrumentation :** L'intégration de sondes PT100 avec un **câblage 3 ou 4 fils** serait la prochaine étape logique pour éliminer l'erreur induite par la résistance des fils et atteindre une précision métrologique supérieure.
- **Consommation énergétique :** Optimiser le firmware de l'ESP32 pour tirer parti des modes de veille profonde (Deep Sleep) permettrait d'étendre considérablement l'autonomie du module, rendant les campagnes de mesure de très longue durée plus viables.

### 2. Industrialisation et robustesse :

- **Boîtier certifié :** Concevoir un boîtier avec un **indice de protection (IP)** adapté aux environnements difficiles (humidité, chocs, variations de température) est essentiel pour une utilisation industrielle. L'utilisation de matériaux plus durables et de connecteurs industriels garantirait une plus grande longévité.
- **Alimentation :** L'intégration d'une **gestion de l'alimentation plus avancée** (mesure du niveau de batterie, recharge pendant l'utilisation) augmenterait la fiabilité et la facilité de déploiement à long terme.

### 3. Évolution des logicielles :

- **Horodatage précis embarqué :** L'ajout d'un module RTC (Real Time Clock) sur l'ESP32 permettrait d'horodater plus précisément les mesures.
- **Fonctionnalités analytiques avancées :** La plateforme de visualisation pourrait être enrichie avec des capacités d'exportation de données supplémentaires (CSV, Excel).
- **Alertes et Notifications :** La mise en place de systèmes d'alerte en cas de dépassement de seuils de température dans la cas d'une application pour de la surveillance.

- **Sécurité accrue** : L'ajout de mécanismes d'authentification et d'autorisation pour l'accès à la PFC et à la plateforme de visualisation renforcerait la sécurité des données.

#### 4. Améliorer le protocole :

- Prendre en compte la température extérieure pour déterminer l'impact de celle sur le gradient de température dans le colis.
- Prendre le format du colis en compte pour déterminer son impact sur l'évolution de la température.
- Prendre en compte la pression dans le colis.

Ce projet a posé les bases d'un système de mesure de température mais m'a aussi permis d'en apprendre plus sur les défis que représente l'élaboration d'une chaîne d'acquisition et sur les technologies qui l'entourent. Il me permet également de prendre conscience encore plus de la qualité du travail fourni dans l'ombre des stations qu'en tant que TSI je vais manipuler tous les jours et me motive à toujours fournir un travail de qualité.

## Références

Site web de l'entreprise ABM : <https://www.abmgood.com/aboutus>

Information sur les PT110 : <https://www.tcsa.fr/rtd-pt100-reference/rtd-connexion.html>

Site fournisseur de la PT110 :

<https://www.thermometre.fr/collections/sondes-pt100/products/sonde-dambiance-pt100-cable-e-sonde-a-fil-air-gaz>

Cours de l'université de Paris Ouest Nanterre La Défense sur les régressions linéaire :  
<https://fermin.perso.math.cnrs.fr/Files/Chap3.pdf>

Aide de l'IA Google Gemini pour implémenter le modèle de régressions linéaires.

Fournisseur de l'ESP32 et autres câbles et connecteurs : Aliexpress

Fournisseur du MAX31865 : <https://www.adafruit.com/product/3328>

Documentation technique du MAX31865 :

[http://www.datasheet.hk/view\\_download.php?id=1967758&file=0485%5Cmax31865\\_7109632.pdf](http://www.datasheet.hk/view_download.php?id=1967758&file=0485%5Cmax31865_7109632.pdf)

Documentation technique de connecteur GX12 :

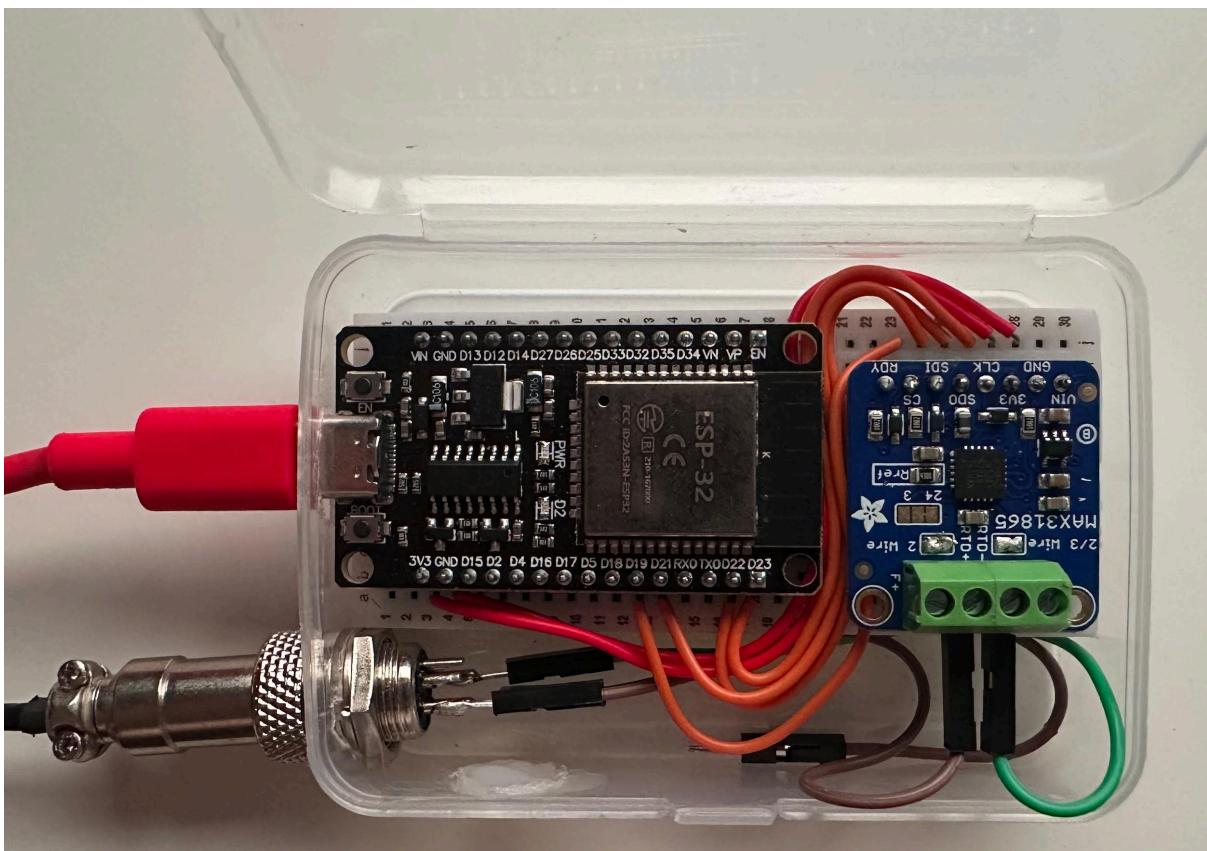
<https://ampul.eu/fr/connecteurs/5423-gx12-connecteur-de-connexion-de-panneau-metal>

Librairie CSS pour l'estétique du site : flowbite.com

Outil de dessin des composants : Fritzing

## Annexe 1: Guide de configuration

Pour configurer la carte d'acquisition, brancher la carte via le câble de connexion série à un ordinateur (en rouge sur la photo). Une fois branché, une LED rouge s'allumera, pour activer le mode de configuration, appuyer sur le bouton « BOOT » (en 1 sur la photo), une LED bleu s'allumera de façon statique pour signaler que le mode configuration est activé. Noter qu'en mode configuration le système n'envoie pas les données.



Sur l'ordinateur, utiliser un client de communication série (ex. Teraterm, Putty,...).

Pour la liaison, utiliser les paramètres suivant :

Port	Vitesse de comm	Données	Parité	Bit de stop
	115200 Bds/s	8 bits	None	1

**Astuce:** activer l'écho local pour voir les caractères saisis.

Une fois la connexion initialisée, le menu suivant devrait s'afficher :



The screenshot shows a terminal window titled "COM3 - PuTTY". The window displays a menu configuration screen with a decorative header consisting of asterisks and a grid of symbols. Below the header, the text "==== MENU CONFIGURATION ====" is printed. A numbered list of options follows, each with a colon and a value or placeholder. The last line shows "Votre choix : " followed by a green square cursor.

```
*****
*   / \   [ ]  [V]  [ ]  [ ]  [ ]  [ ]  *
*  / \ \ [ ]  [ ]  [ ]  [ ]  [ ]  [ ]  *
*  / \ \ [ ]  [ ]  [ ]  [ ]  [ ]  [ ]  *
*  / \ \ [ ]  [ ]  [ ]  [ ]  [ ]  [ ]  *
*  / \ \ [ ]  [ ]  [ ]  [ ]  [ ]  [ ]  *
*****  
==== MENU CONFIGURATION ====  
1. Reset timer  
2. PFC  
3. Nom de la mesure      : colis 6100g  
4. Nom de la sonde       : sonde 1  
5. Wi-Fi SSID            :  
6. Wi-Fi mot de passe    : XXXXXXXXXX  
7. Info carte             :  
8. Trigger upload         :  
9. Quitter le menu        :  
Votre choix : █
```

Il est possible de sélectionner une option en saisissant son numéro.

- 1) Reset timer : remet les compteurs de la mesure à 0 et supprime les mesures encore sauvegardées dans le système de stockage.
- 2) PFC : ouvre un menu dédié à la configuration de informations pour la PFC
- 3) Nom de la mesure : permet de modifier le nom de la mesure faite. C'est sous ce nom qu'apparaît la mesure sur l'outil de visualisation.
- 4) Nom de la sonde : permet de donner un nom à la sonde utilisée, utile dans le cas où plusieurs sondes sont utilisées en même temps.
- 5) WI-FI SSID : permet de configurer le nom du WIFI auquel se connecter
- 6) WI-FI mot de passe : permet de configurer le mot de passe du WIFI
- 7) Info carte : ouvre un menu dédié à afficher les statuts des différents éléments du système.
- 8) Forcer un envoie de température à la PFC (utile pour faire des tests)
- 9) Quitte et relance le fonctionnement normal du système.

Le menu PFC se présente comme suit :



```
COM3 - PuTTY
*****
*   /\ \  | \ ) | \ V /| | \ / | \ ( - ) | | \ / | | \ / |
*   / \ \ \ | / \ ) | | \ V /| | \ / | | \ / | | \ / |
*   / \ \ \ | . | | / \ ) | | \ V /| | \ / | | \ / |
*   / \ \ \ | | \ \ | | / \ ) | | \ V /| | \ / | | \ / |
*****
==== MENU PFC ====
1) URL PFC : https://abm.galtech.cc/api/data
```

Une seule option est disponible et permet de régler la route web pour envoyer des données à la PFC. Saisir « esc » pour revenir au menu principal.

Le menu Info carte se présente comme suit :



```
COM3 - PuTTY
*****
*   /\ \  | \ ) | \ V /| | \ / | \ ( - ) | | \ / | | \ / |
*   / \ \ \ | / \ ) | | \ V /| | \ / | | \ / | | \ / |
*   / \ \ \ | . | | / \ ) | | \ V /| | \ / | | \ / |
*   / \ \ \ | | \ \ | | / \ ) | | \ V /| | \ / | | \ / |
*****
==== MENU INFO ====
* Temperature : 29.70 °C
* Fault :
* Wifi :
Connecté au réseau Wi-Fi
- SSID      :
- Adresse IP : 192.168.1
- MAC       : 68:25:DD:
- RSSI      : -67 dBm
- Canal     : 6
* Compteur de relevés (timerCount) : 3983
* Dernier timerCount envoyé : 3983
```

On retrouve dans ce menu

La température actuellement lu par la MAX31865

Les messages d'erreurs de la MAX31865 (vide si rien à signaler)

Les informations sur la connexion WIFI (adresse IP, adresse MAC, force du signal, canal)

Le compteur de mesure représente le nombre de minutes écoulées depuis le début de la mesure.

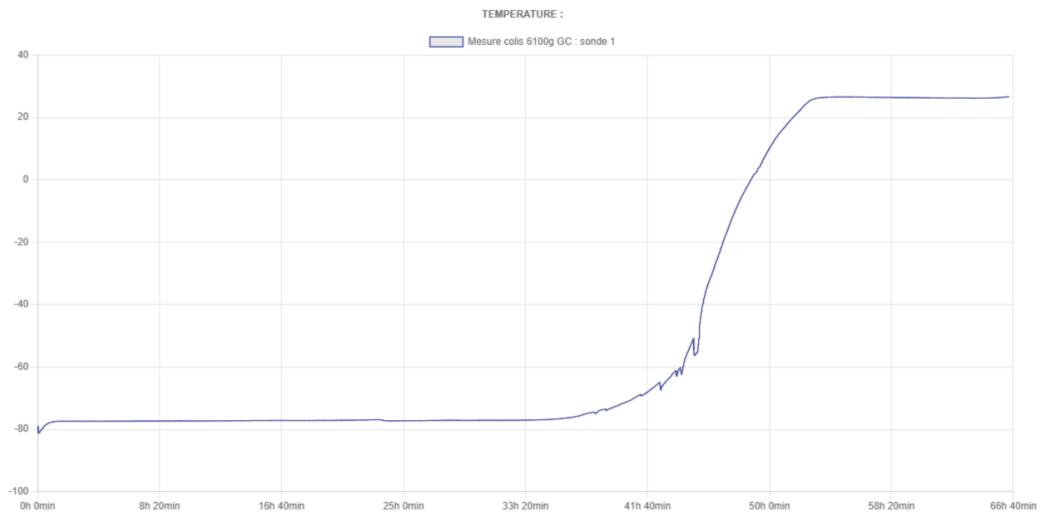
## Annexe 2 :Exemple de rapport



### Rapport de mesure

Généré le: 11/07/2025

Mesure: colis 6100g GC



Notes :

## Annexe 3 : Certificat de conformité fournisseur



ELECTRONIC  
TEMPERATURE  
INSTRUMENTS LTD.

### CERTIFICAT DE CONFORMITÉ

Code de commande : 160-372

Sonde Filaire Air ou Gaz PT100

Ø3.7 x 30mm avec câble FEP 1000mm

Plage : -50 à 200°C (pointe de sonde uniquement)

Résolution : dépend de l'indicateur

Précision : ±0,15°C ±0,2% entre -200 à 600°C

Fabriqué en Grande-Bretagne

Conforme à la législation RoHS et REACH

Conforme au règlement CE 1935/2004 et au règlement UE 10/2011

#### DÉCLARATION DE CONFORMITÉ

Nous certifions que les marchandises indiquées sur ce certificat sont fabriquées, testées, inspectées et stockées, pour être conformes à tous égards aux spécifications indiquées et conformément au système qualité d'ETI Limited, accrédité BS EN ISO 9001, tel qu'approuvé et audité par la British Standards Institution.

Nous confirmons également que lorsqu'ils sont utilisés de manière appropriée, les instruments sont adaptés à une utilisation dans l'industrie alimentaire et également, le cas échéant et requis, conformes aux directives CEE en ce qui concerne la législation européenne et les exigences de marquage CE.

Y compris le règlement CE n° 1935/2004 sur les matériaux et objets destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires ; & Règlement (UE) n° 10/2011 de la Commission concernant les matériaux et objets en matière plastique destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires.

Tous les instruments fournis par ETI sont adaptés à une utilisation dans le cadre des plans HACCP où les spécifications citées pour les points de contrôle critiques correspondent aux performances de l'instrument.

Signé, au nom de Electronic Temperature Instruments Ltd

Andy Reid

Responsable Qualité

Valable à compter de la date d'achat.

Easting Close  
Worthing  
West Sussex  
BN14 8HQ  
T +44 (0)1903 202151  
E sales@etiltd.com  
W etiltd.com