RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université KASDI MERBAH OUARGLA

Institut des Sciences Appliquées et des Technologies

Département DE GÉNIE APPLIQUÉE

Mémoire fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme

LICENCE PROFESSIONNELLE

Domaine : Science et technologie

Filière : optique et mécanique de précision

Spécialité : Mesures, Métrologie et Qualité

Thème

Conception, Fabrication et Évaluation Métrologique d'un Système d'Acquisition de Données Multi-Thermocouple à Faible Coût Basé sur Arduino

---

Soutenue publiquement le : xx/xx/20xx

Réalisé par *:*

- ✓ *DELLIL anfal*
- ✓ *LAHOUADJI anfal*
- ✓ *Lichani Aya Aridj*

M	***BOULAJOUL YOUNES***	Dr	*Université de Ouargla*	*Président*
M	***HANNA HICHAME***	Dr	*Université de Ouargla*	*Examinateur*
M	***SETTOU Belkhir***	*MCB*	*Université de Ouargla*	*Encadrant*

Année Universitaire : 2025/2026

Remerciements

Avant tout, nous remercions Allah le Tout-Puissant de nous avoir donné la force, la patience et le courage nécessaires pour mener ce travail à terme.

Nous adressons nos sincères remerciements à l'ensemble du personnel de l'Institut des Sciences et Techniques Appliquées (ISTA), ainsi qu'à tous les enseignants du département Mesures, Métrologie et Qualité, pour la qualité de leur enseignement, leurs conseils précieux et leurs efforts tout au long de notre parcours universitaire.

Nous exprimons particulièrement notre profonde gratitude à :

Mr.Mahboub Abdelbasset

Mr.Mechri Mohamed El Aid

pour leurs orientations, leurs encouragements et leur disponibilité.

Nos remerciements les plus respectueux vont également à notre encadreur

Dr.Settou Belkhir

pour son accompagnement, ses conseils et son suivi durant la réalisation de ce mémoire.

Nous remercions chaleureusement toute l'administration de l'institut, depuis les plus modestes fonctions jusqu'aux plus hautes responsabilités, ainsi que le service des relations extérieures, pour leur aide, leur organisation et tous les efforts fournis au service des étudiants.

Nous tenons également à remercier nos encadreurs de stage au sein de Zergoun Green Energy :

Mr.Redouane Saadaoui

Mr.Youssef Selfaoui

Mr.Teraka Amine

pour leur accueil, leur disponibilité et les connaissances pratiques qu'ils nous ont apportées durant notre stage.

Nos sincères remerciements vont aussi à tous les travailleurs et techniciens rencontrés durant notre stage pour leur aide, leur collaboration et leur gentillesse tout au long de cette expérience.

Nous remercions également le responsable du laboratoire pour les informations, l'organisation et l'accompagnement apportés durant notre travail.

Nous adressons aussi nos remerciements à :

Mr.Djaouahi Abdeljalil

Mr.Boulaadjoul Younes

pour l'honneur qu'ils nous ont accordé en acceptant d'évaluer et de discuter ce travail.

Enfin, nous exprimons notre gratitude à tous les enseignants de l'institut pour leurs efforts, leur patience et leur contribution à notre formation académique et professionnelle

dédicace

الإهداء

أهدي ثمرة هذا العمل إلى من كانوا دائمًا سبب قوتي واستمراري…

إلى أبي الغالي على دليل، الذي علّمني معنى الصبر والتعب من أجل الوصول، وكان دائمًا سندي وفخري وأماني في هذه الحياة.

وإلى أمي الحبيبة سمان نصيرة، مصدر الحنان والدعاء والطمأنينة، التي كانت إلى جانبي في كل خطوة، فمهما كتبت لن أوفيها حقها.

وإلى غاليتي عقيلة، التي غمرتني بحبها واهتمامها، وكانت دائمًا قريبة من قلبي بدعواتها وطيبتها وحنانها، فوجودها في حياتي نعمة كبيرة أحمد الله عليها.

إلى إخوتي وأخواتي الأعزاء: إيمان، منال، محمد، أحمد، إكرام، صفاء، وفاء، وإيثار، أنتم نعمة كبيرة في حياتي، وسندي الحقيقي بعد الله، وجودكم وحده كان يمنحني القوة والراحة والسعادة.

وإلى أطفال العائلة الأحباء: بتول، حذيفة، يقين، عبيدة، وأواب، وإلى من هو في الطريق، أسأل الله أن يحفظكم ويجعل أيامكم مليئة بالفرح والنجاح.

أقدم لعائلتي كلها أسمى معاني الحب والامتنان، على معاملتهم الطيبة، واحتوائهم، ودلالهم الذي غمرني دائمًا بالمحبة والاهتمام. أنتم السبب في هذه الشخصية الدلوعة التي أعتز بها وأحبها، لأنكم صنعتم مني إنسانة مليئة بالحب، والثقة،
والفرح، بفضلكم ودفئكم ووجودكم الدائم إلى جانبي.

مهما فعلت فلن أستطيع ردّ ولو جزء صغير من فضلكم عليّ، فمكانتكم في قلبي عظيمة جدًا، وكنتم دائمًا السبب في رسم الابتسامة والسعادة داخلي.

إلى صديقاتي العزيزات، شكرًا لكل لحظة دعم، ولكل كلمة طيبة خففت عني التعب.

وكل الحب والتقدير لصديقتي وأختي التي اختارتها لي الأقدار أنفال لهواي، التي لم تكن مجرد زميلة دراسة، بل شريكة طريق وحياة. تقاسمنا التعب والراحة، الحزن والفرح، والنجاحات والذكريات التي ستبقى محفورة في القلب دائمًا. كانت
الرحلة طويلة ومتعبة، لكنها أصبحت أجمل بوجودها إلى جانبي.

ورغم أن هذا الطريق لم يكن الحلم الذي خططت له منذ البداية، إلا أن الله ساقني إليه، فوجدت نفسي فيه، وشعرت بالانتماء، وعشت فيه أجمل الذكريات، واستطعت أن أتطور وأنجح بفضل الله سبحانه ثم بفضل دعم من أحبهم.

كما أتوجه بالشكر لمعهدISTA ، الذي لم يكن مجرد مكان للدراسة، بل كان بيتًا ثانيًا، وجدنا فيه الأستاذ كالأب، والزميل كالأخ، وشعرنا فيه بالأجواء العائلية التي ستبقى من أجمل ما عشنا.

وفي الأخير، أهدي هذا العمل لكل من دعمني، آمن بي، ووقف إلى جانبي في أصعب اللحظات، فهذا النجاح يحمل جزءًا من محبتكم وفضلكم جميعًا.

انفال دليل

dédicace

إلى من كانوا النور في أيامي الصعبة،

إلى من جعلوا الطريق أخفّ بمحبتهم ووجودهم، ...إلى كل

قلب صادق ساندني ولو بكلمة

.أهدي هذا النجاح بكل حب وامتنان

إلى أمي الغالية حسيني سمية يا أعظم

نعمة وهبني الله إياها،

يا من كن ت الدعاء الذي يرافقني في كل خطوة، والحنان الذي يخفف عني تعب الأيام، صبر ت على بعدي

وتحمل ت غيابي،

فكن ت دائمًا القوة التي تدفعني لأواصل مهما تعبت. فهذا النجاح

يحمل اسمك قبل اسمي

إلى أبي العزيز لهواجي العيد

يا من كان سندي في كل خطوة من هذه الرحلة،

يا من لم تبخل عليّ يومًا بدعمك، لا معنويًا ولا ماديًا، كن ت تتحمل

الكثير لأجل راحتي ونجاحي،

وتقف إلى جانبي في أصعب الظروف دون أن أشعر أنني وحدي،

.فمهما كتبت لن أوفيك حقك، لأن هذا النجاح هو ثمرة تعبك وصبرك قبل أن يكون ثمرة جهدي إلى إخوتي: عمر

الفاروق، بسملة، رؤى، إسراء،

أنتم الراحة بعد كل تعب، والفرح وسط كل ضغط، بوجودكم

كانت الرحلة أجمل وأخفّ،

.فشكرًا لأنكم دائمًا بقربي مهما فرقتنا المسافات إلى عمي عبد

الرحمان،

يا من كن ت سندًا إضافيًا لي بعد أهلي،

ووقف ت معي في لحظات احتجت فيها للدعم والمساندة، شكرًا

لاهتمامك ومواقفك التي لن أنساها،

.فلك مني كل التقدير والاحترام إلى

أعمامي وأخوالي،

.لكم مني كل الامتنان والتقدير، وهذا النجاح إهداء لكم أيضًا إلى بنات

أعمامي: هدى، مريم، إيمان، وكوثر،

يا من أضفتن للعائلة بهجة وقربًا جميلً،

dédicace

وكان وجودكن دائمًا يملأ اللحظات دفئًا ومحبة، .فلكم مني

كل الحب والتقدير

إلى بنات أخوالي: دعاء، إبتهال، رحاب، سارة، وحياة، يا من

شاركتنني بعضًا من أجمل اللحظات العائلية،

وبقيتن جزءًا من الذكريات التي أعتز بها، .فشكرًا لكنّ

على المحبة والقرب

إلى صديقة رحلتي أنفال دليل،

تعرف ت علي ك في بداية مشواري الدراسي، وها نحن اليوم نتقاسم فرحة التخرج معًا، كن ت الونس في

أيام التعب، والسند في لحظات الضغط،

.فوجودك جعل الطريق أخفّ وأجمل، وسيبقى اسمك مرتبطًا بأجمل سنوات حياتي

إلى صديقات الإقامة الجامعية: سلسبيل بلكحل ، ياقوت زيطة، بسملة لبوز، سامية، سارة، أسماء، شيماء، حبيبة، لقاء، أميمة، ضحى، آسيا بوحادة،

يا من شاركتنني تفاصيل الأيام الجميلة والصعبة، كنتنّ العائلة الثانية

التي خففت الغربة والتعب،

.وخصوصًا إشراق زيارة ، التي لم تكن مجرد صديقة عابرة بل كان لها فهم وعمق خاص لا ينسى

إلى صديقات الطفولة: رانية، مريم، ياسمين بن حمودة، جليلة تقار، إيمان مصيطفى، بسملة عماري، دعاء مولاي إبراهيم، بلعيدي عائشة ،حنان المقبض كبرنا معًا .

وبقيت الذكريات ثابتة رغم تغيّر الأيام،

.فلكنّ مكانة لا تشبه أحدًا

إلى صديقات الدراسة: منى غباش، حاجة بن رمضانة، سلسبيل صوطي، صفية غول، ناريمان بن دراجي، ريم بعيكر، زهرة العلى معمري،

شكرًا لكل لحظة تعب وضحك ومساندة عشناها معًا، .كنتنّ الرفقة

التي جعلت النجاح أجمل

وإلى كل من دعمني، آمن بي، أو ترك أثرًا جميلًا في حياتي، .لكم مني كل

الحب والامتنان

لهواجي انفال

dédicace

Dédicace

Tout d'abord, je tiens à remercier DIEU de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

À ma mère, Abla.

Merci pour ton amour inconditionnel, ta patience infinie et ton soutien silencieux. Tu as été ma lumière dans l'ombre, ma force dans les épreuves, et chaque réussite que j'ai connue porte ton empreinte.

À mon père, Brahim.

Merci pour ta droiture, ton courage discret et la sagesse que tu m'as transmise. Tu m'as appris que la vraie valeur se construit dans l'effort, la constance et la capacité de se relever après chaque difficulté.

À mes frères et sœurs, Racha, Malak, Saleh et Anouar.

Merci pour votre soutien fidèle, vos encouragements sincères et votre présence constante. Vous avez été mes repères, ceux qui m'ont permis d'avancer avec confiance, ténacité et détermination.

À toute ma grande famille.

Merci pour votre affection et votre bienveillance. Votre soutien et vos encouragements m'ont toujours donné un sentiment d'appartenance et de force tout au long de mon parcours.

À mes enseignants et encadrants.

Je tiens à vous exprimer ma profonde gratitude pour votre accompagnement, votre disponibilité et la qualité de votre encadrement. Vos conseils précieux, votre rigueur et votre soutien ont largement contribué à la réalisation de ce travail.

À mes amies proches, Feriel, Chaima et Aya.

Merci pour vos mots, votre écoute et votre réconfort dans les moments d'incertitude et de fatigue. Votre présence m'a aidée à garder le cap et à rester fidèle à mes objectifs.

À l'équipe Wordlearning : Raid, Younes, Sara, Ilyes et Houcine.

Merci pour votre collaboration précieuse, pour l'esprit de partage et pour la belle synergie qui a animé notre travail. Ensemble, nous avons transformé les défis en opportunités d'apprentissage

dédicace

Résumé

Ce travail présente la conception, la réalisation et la validation métrologique d'un système d'acquisition de données (DAQ) multi-canaux à faible coût basé sur la plateforme Arduino. Le système est destiné à la mesure de température à l'aide de thermocouples de type K associés à des modules de conversion MAX6675, permettant l'acquisition simultanée de plusieurs points de mesure.

Dans un contexte où la précision et la traçabilité des mesures sont essentielles, notamment en métrologie industrielle et scientifique, ce projet propose une alternative économique aux systèmes de mesure commerciaux coûteux. Le système développé intègre des fonctions d'acquisition, de traitement, d'affichage et de stockage des données en temps réel via carte SD.

Une procédure d'étalonnage a été réalisée par comparaison avec un thermocouple étalon, permettant de déterminer des modèles de correction linéaires pour chaque capteur. L'évaluation des performances a été effectuée à l'aide du coefficient de détermination (R^2), montrant une bonne corrélation entre les mesures du système et les valeurs de référence.

Les résultats expérimentaux montrent que le système offre une bonne précision, une stabilité satisfaisante et une capacité d'extension multi-capteurs. Ce travail met en évidence l'intérêt des plateformes open source pour le développement de systèmes de mesure fiables, flexibles et à faible coût, adaptés aux applications pédagogiques et industrielles.

Mots-clés (Français) :
Mesure de température, Système d'acquisition de données, Arduino, Thermocouple, Évaluation métrologique, Étalonnage, Exactitude de mesure, Traçabilité métrologique, Enregistrement des données, Système à faible coût.

Abstract

This work presents the design, fabrication, and metrological validation of a low-cost Arduino-based data acquisition (DAQ) system. The system is intended for temperature measurement using Type K thermocouples coupled with MAX6675 signal conditioning modules, enabling the simultaneous acquisition of temperature data from multiple measurement points.

In a context where measurement accuracy and metrological traceability are essential, particularly in industrial and scientific metrology, this project proposes a cost-effective alternative to expensive commercial data acquisition systems. The developed system integrates real-time data acquisition, processing, display, and storage functions using an SD card.

A calibration procedure was carried out by comparison with a reference thermocouple, allowing the determination of linear correction models for each sensor. The system performance was evaluated using the coefficient of determination (R^2), which demonstrated a strong correlation between the measured values and the reference measurements.

The experimental results show that the developed system provides good measurement accuracy, satisfactory stability, and scalability for multi-sensor applications. This work highlights the potential of open-source platforms for developing reliable, flexible, and low-cost measurement systems suitable for educational, laboratory, and industrial applications.

Keywords:

Temperature Measurement, Data Acquisition System (DAQ), Arduino, Thermocouple, Metrological Evaluation, Calibration, Measurement Accuracy, Metrological Traceability, Data Logging, Low-Cost System.

الملخص

يقدم هذا العمل تصميم وتنفيذ والتحقق المتروولوجي لنظام اقتناء بيانات متعدد القنوات منخفض التكلفة يعتمد على منصة Arduino.يهدف النظام إلى قياس درجة الحرارة باستخدام حساسات حرارية (Thermocouples) من نوع K مع وحدات تحويلMAX6675 ، مما يسمح بجمع عدة قياسات بشكل متزامن.

في ظل الحاجة إلى قياسات دقيقة وقابلة للتتبع في المجالات االصناعية والعلمية، يقترح هذا المشروع بديلا اقتصاديا عن أجهزة القياس التجارية المكلفة. حيث يدمج النظام وظائف جمع البيانات ومعالجتها وعرضها وتخزينها في الوقت الحقيقي عبر بطاقةSD.

تم إجراء عملية معايرة من خلال المقارنة مع حساس مرجعي مما سمح باستخراج نماذج تصحيح خطية لكل حساس. وتم تقييم الأداء باستخدام معامل التحديد R^2 الذي أظهر ارتباطاا جيدا بين قياسات النظام والقيم المرجعية.

أظهرت النتائج التجريبية أن النظام يتميز بدقة جيدة واستقرار مناسب وإمكانية التوسع لعدة حساسات. كما يبرز هذا العمل أهمية استخدام المنصات المفتوحة المصدر في تطوير أنظمة قياس منخفضة التكلفة ومرنة وموثوقة، مناسبة للتطبيقات التعليمية والصناعي

الكلمات المفتاحية (العربية):
قياس درجة الحرارة، نظام اقتناء البيانات، أردوينو، المزدوج الحراري (الترموكوبل)، التقييم المترولوجي، المعايرة، دقة القياس، تتبع القياس، تسجيل البيانات، نظام منخفض التكلفة

Table des matières

Liste des tableaux..... Erreur ! Signet non défini.
Liste des ABV..... Erreur ! Signet non défini.
I. Introduction.....22
1. Chapitre 1 : Généralités sur la mesure de la température et les systèmes d'acquisition de donnée.....24
1.1 Introduction 25
1.2 Fondamentaux de la mesure de température 25
1.2.1 RTD (Resistance Temperature Detector)..... 27
1.2.2 Thermistances (NTC/PTC) 27
1.2.3 Thermocouples 28
1.2.4 Comparaison des modèles.....30
1.2.5 Intégration dans les systèmes DAQ.....30
1.3 Systèmes d'acquisition de données (DAQ)..... 30
1.3.1 Architecture générale d'un système DAQ..... 30
1.3.2 Comparaison entre systèmes DAQ commerciaux et open-source.....32
1.3.3 Avantages des systèmes basés sur Arduino.....33
1.3.4 Limites des systèmes Arduino 33
1.3.5 Conclusion 34
1.4 Revue des Travaux Existants : Systèmes de Mesure Basés sur Arduino.....34
1.4.1 Aperçu des Systèmes Arduino Existants 34
1.2.4 Analyse Comparative et Critique des Systèmes Existants..... 35
1.2.5 Synthèse de la Revue 35
1.5 Objectifs de Recherche et Problématique 35
1.5.1 Problématique 35
1.5.2 Objectif Principal..... 36
1.5.3 Objectifs Spécifiques..... 36
1.6 Incertitude de mesure 36
1.6.1 Définition de l'incertitude 36
1.6.2 Sources d'incertitude..... 36
1.6.3 Évaluation de l'incertitude..... 37
1.6.4 Importance dans les systèmes DAQ 38
1.6.5 Conclusion.....39

1.7 Conclusion 39

2 Chapitre 2 : Méthodologie de conception, instrumentation et principes de métrologie 40

2.1 Introduction 41

2.2 Concept d'architecture et de conception du système 41

2.2.1 Le schéma global 41

2.2.2 Description des composants du système 42

2.2.3 Conception de l'alimentation et protection du circuit 44

2.2.4 Module de stockage (SD) et interface utilisateur (Keypad) 45

2.3 Conception 3D du prototype 46

2.3.1 Fabrication additive et impression 3D 48

2.3.2 Choix du matériau d'impression 51

2.3.3 Assemblage et intégration des composants 52

2.4 Programmation et logiciels 53

2.4.1 Structure du programme Arduino 54

2.5 Conclusion 60

3 Chapitre 3 : Présentation des résultats, analyse et discussion 61

3.1 Introduction 62

3.2 Évaluation des performances du système 62

3.2.1 Méthodologie du travail 62

3.2.2 Choix des capteurs 64

3.2.3 Préparation et vérification des thermocouples 64

3.2.4 Test de stabilité et influence des facteurs externes 66

3.2.5 Intégration du clavier matriciel et calibration du système 67

3.3 Calibration et Analyse des Résultats de Mesure 68

3.3.1 Protocole d'étalonnage et dispositif expérimental 68

3.3.2 Traitement des données et analyse statistique 70

3.3.3 Modélisation de l'étalonnage et détermination des coefficients de correction 70

3.3.4 Validation métrologique (Justesse et Fidélité) 73

3.3.5 Intégration des coefficients d'étalonnage dans le système embarqué 73

3.3.6 Discussion des résultats 73

3.4 Étape de prise de mesures et préparation des composants pour la conception 73

3.4.1 Préparation et optimisation des cartes PCB 75
3.4.2 Conception 3D du prototype 76
3.4.3 Conception et intégration des composants dans le boîtier 77
3.5 Conclusion générale et recommandations 79
3.5.1 Synthèse des résultats obtenus 79
3.5.2 Validation métrologique du système 79
3.5.3 Recommandations et perspectives d'amélioration 80
3.5.4 Applications futures 80
3.6 Conclusion 81
Conclusion générale 82

Table des matières

Liste d’abréviations

Abréviation	Signification
TC	Thermocouple
R^2	Coefficient de détermination
SD	Secure Digital
OLED / LCD	Types d’écrans d’affichage
PWM	Pulse Width Modulation
RTC	Real Time Clock
CSV	Comma-Separated Values
SPI	Serial Peripheral Interface
I2C	Inter-Integrated Circuit
DAQ	Data Acquisition System (Système d’acquisition de données)
ADC	Analog-to-Digital Converter (Convertisseur analogique-numérique)
RTD	Resistance Temperature Detector
NTC / PTC	Negative / Positive Temperature Coefficient (Thermistances)
LSB	Least Significant Bit (Plus petite variation détectable)
GUM	Guide pour l’expression de l’incertitude de mesure
FPGA	Field Programmable Gate Array
µV	Microvolt
S	Coefficient de Seebeck
5M	Matière, Matériel, Milieu, Méthode, Main-d’œuvre
TC	Thermocouple
R^2	Coefficient de détermination
SD	Secure Digital (Carte mémoire pour le stockage)
OLED / LCD	Types d’écrans utilisés pour l’affichage
R / C	Rows et Columns

Liste d'abréviations

	Abréviation / Grandeur	Nom complet / Description	Unité / Valeur / Protocole
Électronique & Informatique	IDE	Integrated Development Environment	Logiciel de programmation
	SPI	Serial Peripheral Interface	Protocole (SD, MAX6675)
	I2C	Inter-Integrated Circuit	Protocole (OLED, RTC)
	OLED	Organic Light-Emitting Diode	Affichage SSD1306
	RTC	Real Time Clock (Horloge temps réel)	Horodatage des mesures
	SD	Secure Digital (Carte mémoire)	Stockage externe
	GND	Ground (Mise à la masse)	Référence stable 0V
	CSV	Comma-Separated Values	Format de fichier (Excel)
	PWM	Pulse Width Modulation	Modulation d'impulsion
	USB	Universal Serial Bus	Téléversement du code
Conception & Impression 3D	CAD	Computer-Aided Design (SolidWorks)	Conception assistée
	STL	Stereolithography	Format de fichier standard
	FDM	Fused Deposition Modeling	Dépôt de fil fondu
	SLA	Stereolithography (Résine)	Impression haute précision
	SLS	Selective Laser Sintering (Poudre)	Frittage laser industriel
	PLA	Acide Polylactique	Matériau biodégradable
	ABS	Acrylonitrile Butadiène Styrène	Matériau robuste
	PETG	Polyéthylène Téréphtalate Glycolisé	Matériau résistant
Architecture Mémoire	SRAM	Static Random Access Memory	Variables temporaires
	EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory	Stockage (Calibration)
Grandeurs & Métrologie	Température	Grandeur mesurée (Thermocouple K)	°C (Degré Celsius)
	Tension (V)	Alimentation système	5V et 3.3V
	Résistance	Protection des LEDs	220 Ω
	Temps (t)	Temporisation (delay / millis)	ms (millisecondes)
	Vitesse	Communication série	9600 bauds
	Performance	Résolution et précision	Critères métrologiques

Liste d’abréviations

Liste d’abréviations

List de figures

Figure 1Diagramme de classification des capteurs de température..... 26
Figure 2Types de capteurs de température 26
Figure 3Différentes formes des thermistances 27
Figure 4Schéma illustrant le principe de fonctionnement d'un thermocouple 28
Figure 5Types de thermocouples et leur réponse thermique 29
Figure 6 Composants d'un système d'acquisition de données..... 31
Figure 7Le schéma global du système 41
Figure 8Module de stockage (SD) et interface utilisateur (Keypad)..... 45
Figure 9Conception CAO, modélisation 3D et préparation des plans de fabrication du prototype 47
Figure 10Principe de fonctionnement de la technologie d'impression 3D SLA..... 48
Figure 11Processus de fusion sélective de poudre dans la technologie SLS..... 49
Figure 12Principe de fonctionnement de la technologie d'impression 3D FDM..... 50
Figure 13Dépôt du filament fondu lors du procédé d'impression 3D FDM..... 51
Figure 14Comparaison des performances des matériaux thermoplastiques utilisés en impression 3D FDM (PLA, ABS et PETG)..... 51
Figure 15Utilisation des bibliothèques pour l'optimisation du pilotage des périphériques et la 53
Figure 16 Utilisation des bibliothèques pour l'optimisation du pilotage des périphériques et la communication système 55
Figure 17Déclaration et initialisation des variables dans l'environnement de programmation Arduino ID..... 55
Figure 18Schéma de la méthodologie expérimentale adoptée..... 63
Figure 19Numérotation et mesure des longueurs des thermocouples 65
Figure 20Vérification des thermocouples avec multimètre 65
Figure 21Étude de l'influence des conditions externes sur les thermocouples 67
Figure 22Protocole d'étalonnage et dispositif expérimental 69
Figure 23 Courbes des résultats de chaque thermocouple par rapport au thermocouple étalon 72
Figure 24 préparation des composants pour la conception 74
Figure 25 Étape de prise de mesures 75
Figure 26Étape de soudage des composants électroniques 76
Figure 27odélisation 3D de la structure interne du boîtier..... 78
Figure 28Vue de la façade avant du boîtier..... 78

List de figures

Liste des tableaux

Tableau 1Types de thermocouples et différences de leurs caractéristiques..... 29
Tableau 2Comparaison des caractéristiques des RTD et Thermistors et des thermocouples..... 30
Tableau 3Comparaison entre systèmes DAQ commerciaux et open-source 32
Tableau 4Synthèse des composants du système d'acquisition et de leurs caractéristiques techniques..... 43
Tableau 5 Comparaison des principales technologies d'impression 3D (FDM, SLA et SLS)..... 52
Tableau 6 Tableau récapitulatif des équations de correction et du (R^2) pour chaque thermocouple..... 71

Liste des tableaux

I. Introduction générale

La mesure de la température constitue l'un des paramètres les plus critiques dans les procédés industriels, la recherche scientifique et la surveillance environnementale. Elle joue un rôle fondamental dans l'assurance des performances des systèmes, de la qualité des produits, de la sécurité opérationnelle ainsi que de l'efficacité énergétique [1][2]. Dans les applications industrielles telles que les procédés chimiques, la production d'énergie et les systèmes de fabrication, le contrôle de la température est indispensable afin de maintenir des conditions de fonctionnement optimales et de prévenir les défaillances des systèmes [3][4]. Même de faibles variations de température peuvent avoir des conséquences significatives sur la stabilité des procédés, les propriétés des matériaux et la fiabilité globale des systèmes.

Dans les environnements de recherche, la mesure de la température revêt également une importance majeure, notamment dans les études expérimentales nécessitant un contrôle thermique précis. Des domaines tels que l'électronique, la science des matériaux et le génie biomédical dépendent fortement de données de température précises afin de valider les modèles théoriques et garantir la reproductibilité des résultats [2][5]. Par conséquent, la demande en systèmes de mesure de température fiables et précis a considérablement augmenté.

Une exigence essentielle en métrologie moderne est le concept de traçabilité des mesures, qui garantit que les résultats de mesure sont reliés aux étalons internationaux à travers une chaîne continue et documentée d'étalonnage [5][6]. La traçabilité assure la comparabilité et la crédibilité des résultats de mesure entre différents laboratoires et applications. Sans une traçabilité adéquate, les données de mesure peuvent perdre leur valeur scientifique et industrielle, les rendant inadaptées aux processus critiques de prise de décision.

Cependant, l'obtention d'une grande précision et d'une bonne traçabilité nécessite souvent des instruments sophistiqués et coûteux, tels que les systèmes professionnels d'acquisition de données et les capteurs étalonnés [7]. Bien que ces systèmes soient hautement fiables, ils ne sont pas toujours accessibles dans les laboratoires pédagogiques ou les environnements de recherche à faible budget. Cela crée un écart important entre le besoin de mesures précises et la disponibilité de solutions abordables.

Afin de surmonter cette limitation, un intérêt croissant s'est développé pour la conception de systèmes d'acquisition de données (DAQ) à faible coût, basés sur des plateformes open source telles qu'Arduino. Ces systèmes offrent une alternative flexible, évolutive et économique pour la surveillance de la température, tout en maintenant des niveaux de précision acceptables pour de nombreuses applications [8].

Les systèmes DAQ basés sur Arduino présentent un intérêt particulier dans les contextes éducatifs, car ils permettent aux étudiants et aux chercheurs de concevoir, de mettre en œuvre et d'analyser des systèmes de mesure avec des contraintes financières réduites [9][10].

La motivation principale de ce travail est donc de concevoir et de développer un système d'acquisition de données de température multivoie à faible coût, capable de mesurer les données provenant de plusieurs thermocouples, d'assurer un enregistrement fiable des données et de fournir une précision de mesure acceptable. Cette approche vise à réduire l'écart entre les systèmes professionnels coûteux et les solutions expérimentales accessibles, tout en introduisant des concepts métrologiques tels que l'étalonnage et l'évaluation des incertitudes

1. Chapitre 1 : Généralités sur la mesure de la température et les systèmes d'acquisition de donnée

1.1 Introduction

La mesure de la température constitue un élément fondamental dans de nombreux domaines scientifiques, industriels et technologiques. Elle intervient dans le contrôle des procédés industriels, la surveillance des systèmes énergétiques, les applications électroniques ainsi que dans les laboratoires de recherche. Une mesure précise de la température permet d'assurer la qualité des produits, la sécurité des installations et l'optimisation des performances des systèmes.

Avec le développement des technologies de mesure et de l'instrumentation, les systèmes d'acquisition de données sont devenus indispensables pour collecter, traiter et enregistrer les grandeurs physiques en temps réel. Ces systèmes offrent la possibilité de surveiller plusieurs paramètres simultanément avec une meilleure précision et une grande flexibilité d'utilisation. Dans le domaine de la mesure thermique, l'utilisation de capteurs tels que les thermocouples associée aux systèmes d'acquisition de données permet d'obtenir des mesures fiables adaptées aux applications expérimentales et industrielles.

Par ailleurs, les plateformes open source comme Arduino ont contribué au développement de systèmes d'acquisition de données à faible coût, capables de répondre aux besoins pédagogiques et expérimentaux tout en réduisant les contraintes financières liées aux équipements professionnels.

Ce chapitre présente les notions générales relatives à la mesure de la température et aux systèmes d'acquisition de données. Il aborde également les principes de fonctionnement des principaux capteurs de température, les concepts fondamentaux de la métrologie ainsi que les caractéristiques des systèmes DAQ utilisés dans les applications de mesure thermique.

1.2 Fondamentaux de la mesure de température

Température et signification physique

La température est une grandeur physique fondamentale qui caractérise l'état thermique d'un système. Elle est liée à l'énergie cinétique moyenne des particules microscopiques constituant la matière [1]. Une augmentation de la température correspond à une intensification de l'agitation thermique des particules.

Dans le domaine de la thermodynamique, la température détermine le sens des échanges de chaleur, celle-ci se transférant spontanément du corps le plus chaud vers le plus froid jusqu'à l'équilibre thermique [2]. Ainsi, la mesure de température est essentielle pour le contrôle et la régulation des systèmes industriels et expérimentaux [3].

Classification des capteurs de température

Les capteurs de température sont classés selon leur principe de fonctionnement en plusieurs catégories principales [2], [3] :

- Capteurs thermoélectriques (thermocouples)
- Capteurs résistifs (RTD)

- Thermistances (NTC/PTC)
- Capteurs numériques

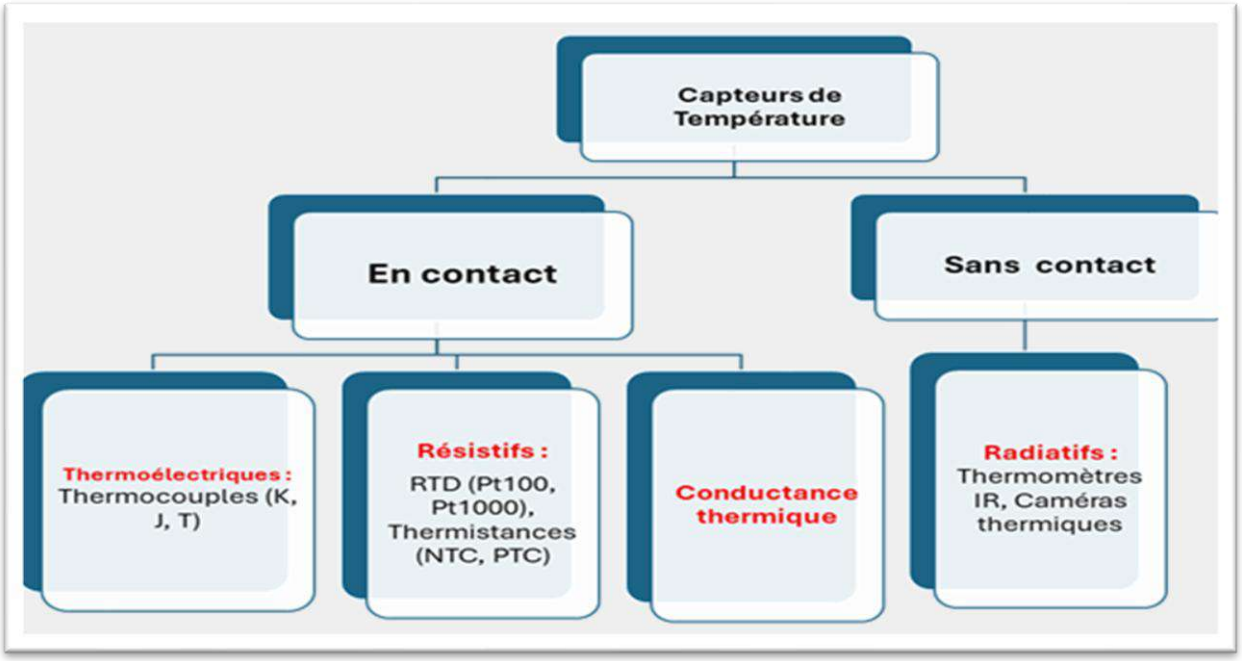


Figure 1Diagramme de classification des capteurs de température

Le choix du capteur dépend de la précision requise, de la plage de température et des contraintes de l'application [3].

Modélisation mathématique des capteurs de température

La relation entre la température et la grandeur mesurée (tension ou résistance) est décrite par des modèles mathématiques spécifiques à chaque type de capteur.

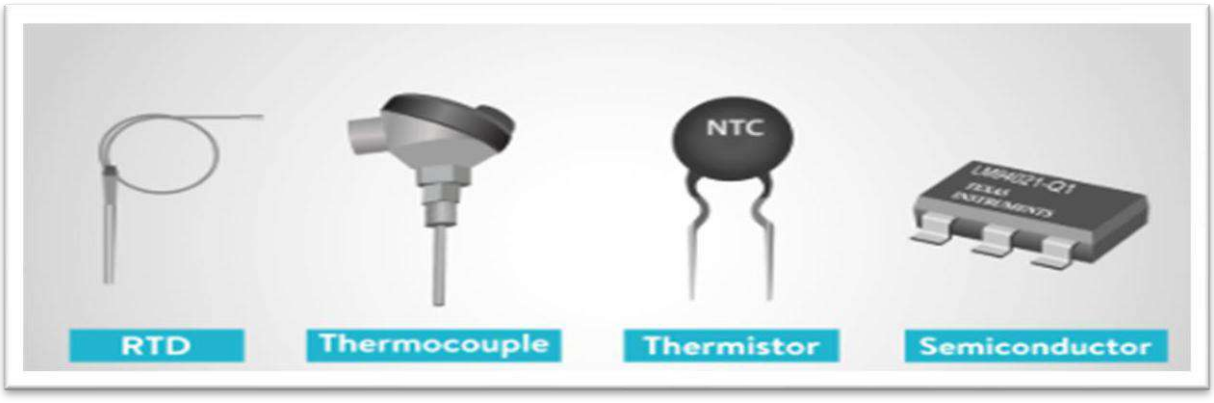


Figure 2Types de capteurs de température

1.2.1 RTD (Resistance Temperature Detector)

Les capteurs RTD, notamment le Pt100, reposent sur la variation quasi linéaire de la résistance en fonction de la température [2].

$$R(T) = R_0(1 + \alpha T)$$

où :

$R(T)$: résistance à la température T

R_0: résistance à 0°C

α: coefficient thermique du matériau

Pour une précision élevée, on utilise l'équation de Callendar–Van Dusen :

$$R(T) = R_0(1 + AT + BT^2 + C(T - 100)T^3)$$

Cette relation permet de modéliser avec précision le comportement du capteur sur une large plage de température [4].

1.2.2 Thermistances (NTC/PTC)

Les thermistances présentent une relation fortement non linéaire entre la résistance et la température [5].

Le modèle le plus utilisé est :

$$R(T) = R_0 e^{\beta(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})}$$

où :

β: constante du thermistor

T: température en Kelvin



Figure 3Différentes formes des thermistances

Pour une meilleure précision, la relation de Steinhart–Hart est utilisée :

$$\frac{1}{T} = A + B\ln(R) + C(\ln(R))^3$$

Ce modèle est particulièrement adapté aux applications nécessitant une grande précision dans un intervalle réduit de température.

1.2.3 Thermocouples

1.2.3.1 Principes des thermocouples

Les thermocouples figurent parmi les capteurs de température les plus utilisés dans les environnements industriels en raison de leur robustesse, de leur simplicité de mise en œuvre et de leur capacité à mesurer des températures élevées [6].

1.2.3.2 Effet Seebeck

Le principe de fonctionnement des thermocouples repose sur l'effet Seebeck, découvert en 1821, qui décrit l'apparition d'une force électromotrice dans un circuit constitué de deux conducteurs métalliques différents lorsque leurs jonctions sont soumises à une différence de température [6], [7].

$$V = S \cdot \Delta T$$

où :

V: tension thermoélectrique générée

S: coefficient de Seebeck

ΔT: différence de température

Un thermocouple est constitué de deux jonctions :

une **jonction chaude**, exposée à la température à mesurer

une **jonction de référence (froide)**

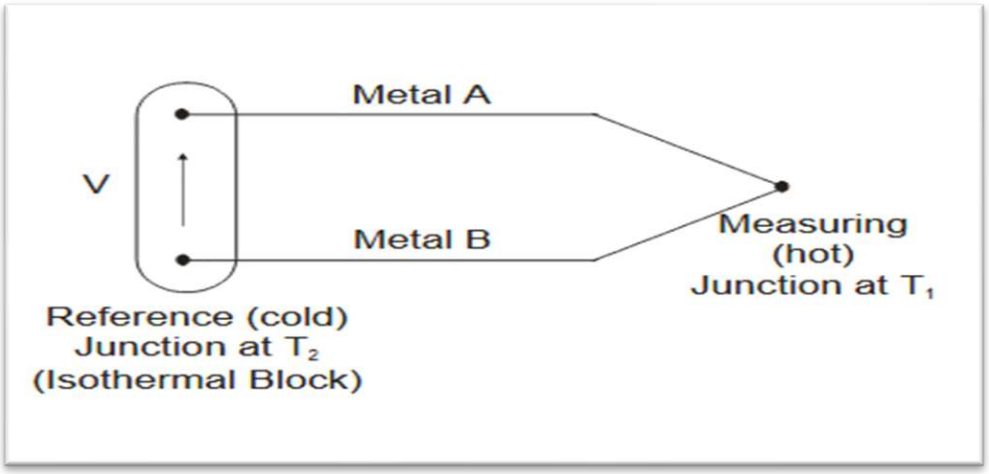


Figure 4Schéma illustrant le principe de fonctionnement d'un thermocouple

La précision de la mesure dépend fortement de la compensation de la jonction froide (Cold Junction Compensation) [8].

1.2.3.3 Types de thermocouples

Les thermocouples sont classés en différents types selon les matériaux utilisés, chacun ayant des caractéristiques spécifiques [9] :

Tableau 1Types de thermocouples et différences de leurs caractéristiques

Type	Composition	Plage de température	Application
K	Chromel – Alumel	-200 à 1200°C	Usage général
J	Fer – Constantan	-40 à 750°C	Industriel
T	Cuivre – Constantan	-200 à 350°C	Haute précision
E	Chromel – Constantan	-200 à 900°C	Haute sensibilité

Le thermocouple de type K est le plus utilisé grâce à son bon compromis entre coût, robustesse et performance[9].

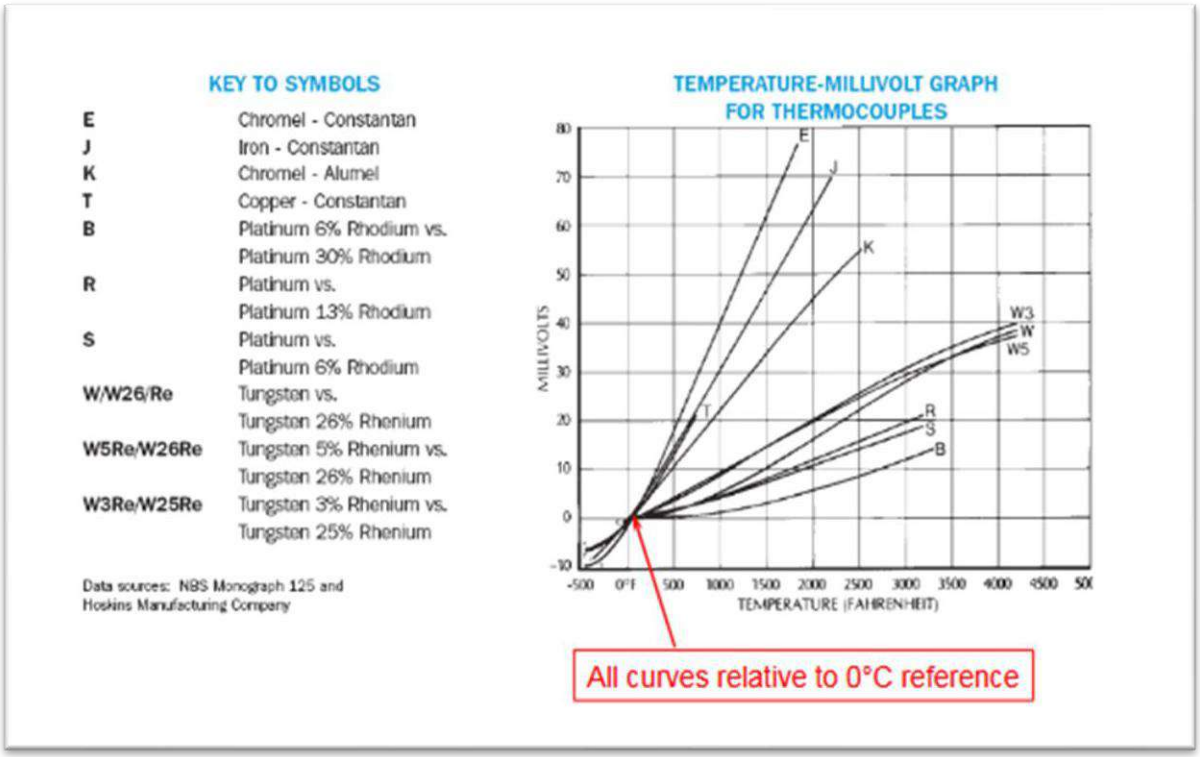


Figure 5Types de thermocouples et leur réponse thermique

1.2.3.4 Caractéristiques des thermocouples

Avantages

Large plage de mesure (jusqu'à plus de 1000°C) [9]

Temps de réponse rapide [7]

Bonne robustesse mécanique [6]

Adaptation aux environnements sévères

Inconvénients

Précision inférieure aux capteurs RTD[9]

Sensibilité aux perturbations électromagnétiques[10]

Nécessité de compensation de la jonction froide [8]

Relation non linéaire entre tension et température

1.2.4 Comparaison des modèles

Tableau 2Comparaison des caractéristiques des RTD et Thermistors et des thermocouples

Capteur	Grandeur mesurée	Relation	Linéarité
RTD	Résistance	Linéaire	oui
Thermistor	Résistance	Exponentielle	non
Thermocouple	Tension	Quasi linéaire	non

1.2.5 Intégration dans les systèmes DAQ

Dans les systèmes d'acquisition de données, les capteurs de température doivent être associés à des circuits de conditionnement et à des convertisseurs analogique-numérique (ADC).

Dans le cas des thermocouples :

signal très faible (µV)

nécessite amplification et filtrage

influence directe sur l'incertitude globale [10]

1.3 Systèmes d'acquisition de données (DAQ)

1.3.1 Architecture générale d'un système DAQ

Un système d'acquisition de données (Data Acquisition System, DAQ) est un ensemble de dispositifs permettant de mesurer des grandeurs physiques, de les convertir en signaux numériques et de les exploiter pour l'analyse ou le stockage[11] [12]. Il constitue une interface essentielle entre le monde physique et les systèmes informatiques.

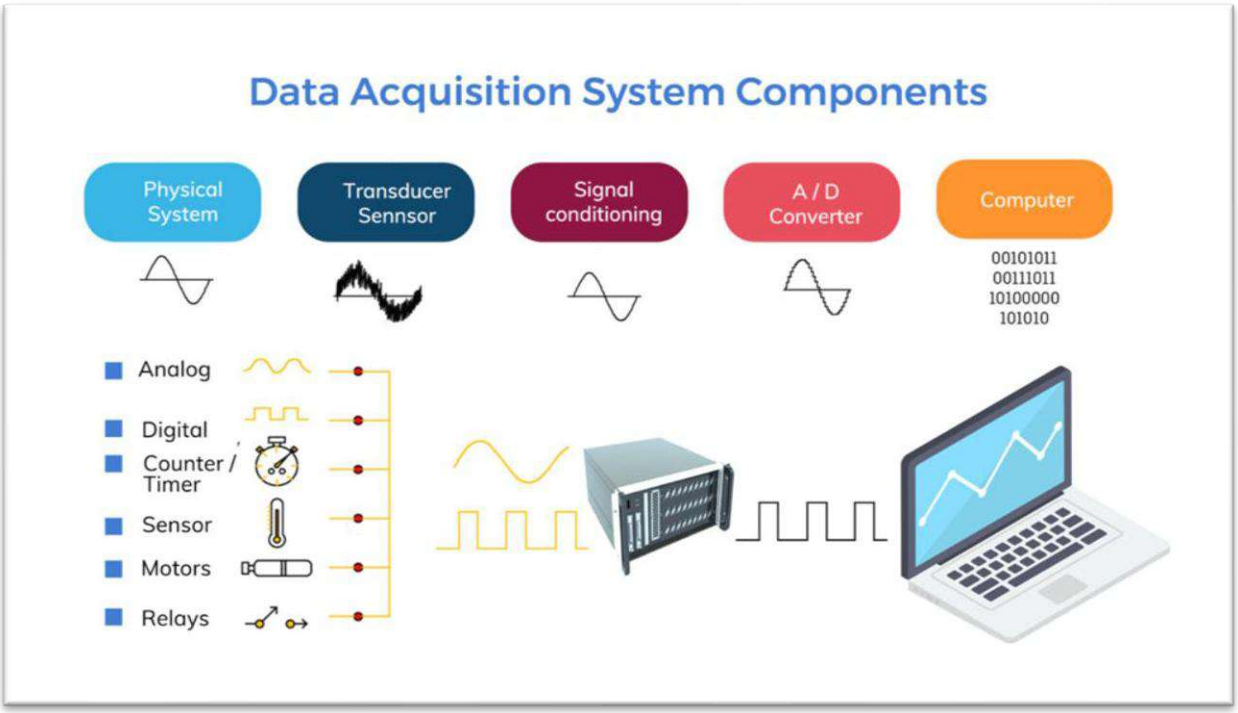


Figure 6 Composants d'un système d'acquisition de données

L'architecture générale d'un système DAQ comprend plusieurs blocs fonctionnels interconnectés [12] [12] :

1) Capteurs (Sensors)

Les capteurs assurent la conversion des grandeurs physiques (température, pression, etc.) en signaux électriques. Dans le cadre de ce travail, les thermocouples sont utilisés comme capteurs de température [6].

2) Conditionnement du signal (Signal Conditioning)

Le signal fourni par les capteurs est généralement de faible amplitude et sensible au bruit. Il nécessite donc un conditionnement0 comprenant :

amplification

filtrage

compensation (notamment la compensation de jonction froide pour les thermocouples) [10]

Cette étape est essentielle pour améliorer la qualité du signal et garantir la précision des mesures.

3) Conversion analogique-numérique (ADC)

Le convertisseur analogique-numérique transforme le signal analogique en une représentation numérique exploitable [13][14], [15].

L'incertitude liée à la quantification peut être estimée par :

$$u_{ADC} = \frac{LSB}{\sqrt{12}}$$

où LSBreprésente la plus petite variation détectable par le convertisseur.

4) Unité de traitement (Microcontrôleur)

Le microcontrôleur, tel que Arduino, assure :

l'acquisition des données

leur traitement

la gestion des périphériques

Il constitue le cœur du système DAQ [31].

5) Système de stockage (Data Logging)

Les données acquises sont stockées pour une analyse ultérieure. Les solutions courantes incluent :

carte SD

mémoire interne

transmission vers un ordinateur

Le stockage fiable des données est indispensable dans les applications expérimentales [16].

1.3.2 Comparaison entre systèmes DAQ commerciaux et open-source

Les systèmes DAQ peuvent être classés en deux catégories principales : les systèmes commerciaux et les systèmes open-source[15].

Tableau 3Comparaison entre systèmes DAQ commerciaux et open-source

Critère	Systèmes commerciaux	Systèmes open-source
Coût	Élevé	Faible
Précision	Très élevée	Modérée
Flexibilité	Limitée	Élevée
Accessibilité	Restreinte	Large

Les systèmes commerciaux offrent des performances élevées et une grande fiabilité, mais leur coût élevé limite leur accessibilité [10].

En revanche, les systèmes open-source, tels que ceux basés sur Arduino, permettent de concevoir des solutions économiques et personnalisables adaptées aux besoins spécifiques des utilisateurs [31][17].

1.3.3 Avantages des systèmes basés sur Arduino

Les plateformes Arduino sont largement utilisées dans le développement de systèmes DAQ à faible coût, notamment dans les domaines de l'enseignement et de la recherche [31].

- **Faible coût**

Arduino permet de développer des systèmes d'acquisition à un coût réduit par rapport aux solutions commerciales[17].

- **Facilité de programmation**

L'environnement de développement Arduino est simple et accessible, ce qui facilite la mise en œuvre rapide des applications [31].

- **Compatibilité matérielle**

Arduino est compatible avec une large variété de capteurs et de modules :

- thermocouples (via MAX6675, MAX31855)
- modules de stockage (carte SD)
- interfaces utilisateur

- **Flexibilité et évolutivité**

Les systèmes Arduino peuvent être facilement modifiés et étendus en fonction des besoins, ce qui les rend particulièrement adaptés aux projets expérimentaux [18].

- **Application en métrologie et en enseignement**

Dans les laboratoires pédagogiques, Arduino constitue un outil efficace pour :

- comprendre les principes de mesure
- mettre en œuvre des systèmes DAQ
- introduire des notions telles que la calibration et l'incertitude

Plusieurs études ont confirmé son intérêt dans l'enseignement de l'instrumentation et de la métrologie [12], [19], [20].

1.3.4 Limites des systèmes Arduino

Malgré leurs nombreux avantages, les systèmes Arduino présentent certaines limitations :

- résolution ADC limitée
- sensibilité aux perturbations électromagnétiques
- précision inférieure aux systèmes professionnels
- nécessité d'une calibration rigoureuse

Ces limitations doivent être prises en compte lors de la conception du système afin d'améliorer la fiabilité des mesures [10].

1.3.5 Conclusion partielle

Les systèmes d'acquisition de données jouent un rôle fondamental dans la mesure et l'analyse des grandeurs physiques.
Les solutions open-source basées sur Arduino offrent une alternative économique et flexible aux systèmes commerciaux, particulièrement adaptée aux environnements académiques.

Toutefois, l'amélioration des performances nécessite une attention particulière au conditionnement du signal, à la calibration et à l'analyse de l'incertitude.

1.4 Revue des Travaux Existants : Systèmes de Mesure Basés sur Arduino

1.4.1 Aperçu des Systèmes Arduino Existants

Les systèmes d'acquisition de données (DAQ) basés sur Arduino ont connu une évolution significative au cours des dernières années [5], [21], en raison de leur faible coût, de leur flexibilité et de leur facilité d'intégration dans divers domaines scientifiques, industriels et éducatifs. Cette évolution a permis l'émergence de solutions variées couvrant un large spectre d'applications.

Dans le domaine de la mesure de température, plusieurs travaux ont été développés, notamment dans les tunnels aérodynamiques[5], [22], les tours de refroidissement [23], ainsi que dans les systèmes de transfert et de flux thermique [24], [25]. De plus, des applications dans les collecteurs solaires thermiques [26], [27]et la surveillance environnementale intérieure [28], [29] ont démontré la capacité des systèmes Arduino à assurer des mesures fiables dans différents contextes expérimentaux.

Par ailleurs, certains travaux se sont orientés vers l'acquisition de grandeurs électriques et mécaniques, telles que la déformation et la tension [30], [31], tandis que d'autres ont porté sur le suivi de systèmes énergétiques, notamment les installations photovoltaïques [32] et les dispositifs calorimétriques [33].

En outre, des approches plus avancées ont été proposées, incluant des systèmes multi-canaux basés sur FPGA permettant d'augmenter le nombre de capteurs [34], des plateformes DAQ open-source [21], ainsi que des dispositifs de calibration thermique et d'analyse d'incertitude [35]. D'autres contributions concernent les systèmes de contrôle thermique [36], les dispositifs combinant température et courant [37], ainsi que les systèmes ultrasoniques [38].

Ces travaux montrent une évolution progressive des systèmes Arduino, passant de solutions simples mono-capteur vers des architectures plus complexes intégrant des systèmes multi-capteurs, des fonctions de traitement et de stockage des données, et parfois des capacités de communication avancées.

Cependant, malgré ces avancées, plusieurs limitations persistent, notamment en termes de capacité multi-canaux, d'intégration globale et de robustesse des systèmes.

1.2.4 Analyse Comparative et Critique des Systèmes Existants

Afin d'évaluer les performances des systèmes étudiés, ceux-ci sont classés selon leurs domaines d'application.

1.2.4.1 Systèmes de température (applications expérimentales)

Les systèmes utilisés dans les tunnels aérodynamiques, les tours de refroidissement et les études de transfert thermique [5], [22], [24], [25] présentent généralement une architecture simple basée sur des thermocouples. Toutefois, le nombre limité de canaux constitue une contrainte majeure, empêchant la réalisation de mesures multipoints dans des systèmes thermiques complexes. De plus, l'intégration reste souvent partielle, avec une absence d'interface utilisateur avancée et de protection mécanique adaptée.

1.2.4.2 Systèmes énergétiques et environnementaux

Les systèmes dédiés aux applications solaires, environnementales et calorimétriques, [26], [27], [39], [40] offrent une meilleure diversité de mesures, incluant plusieurs paramètres physiques. Cependant, leur précision dépend fortement des procédures de calibration, souvent insuffisamment développées. Par ailleurs, l'intégration des fonctions (acquisition, stockage, affichage) reste limitée, ce qui réduit leur exploitation dans des environnements industriels.

1.2.4.3 Systèmes spécialisés et avancés

Les architectures basées sur FPGA, les systèmes open-source et les plateformes intégrant LabVIEW [21], [31], [34], [35] permettent d'atteindre des performances élevées en termes de précision et de capacité multi-canaux. Néanmoins, leur complexité technique et leur coût potentiel limitent leur accessibilité. De plus, certains systèmes restent fortement spécialisés [30], [38], [41], réduisant leur flexibilité pour des applications générales.

1.2.5 Synthèse de la Revue

L'analyse globale des met en évidence plusieurs limitations majeures :

- Une capacité multi-canaux insuffisante pour les mesures multipoints [5], [41]
- Une intégration partielle des différentes fonctions du système [32], [37], [39]
- Une forte dépendance à des applications spécifiques [41], [42], [43]
- Une robustesse mécanique limitée
- Un manque de validation métrologique rigoureuse [26], [40]

Ces limitations identifiées dans la littérature motivent la définition de la problématique de recherche présentée dans la section suivante.

1.5 Objectifs de Recherche et Problématique

1.5.1 Problématique

Malgré les avancées significatives des systèmes d'acquisition de données basés sur Arduino, plusieurs défis techniques et scientifiques persistent. En particulier, la capacité limitée en nombre de canaux [5], [41] restreint leur utilisation dans les systèmes nécessitant des mesures simultanées en plusieurs points.

De plus, l'architecture de ces systèmes reste souvent fragmentée, avec une séparation entre les fonctions d'acquisition, de traitement et de stockage des données [32], [37], [39], ce qui réduit leur efficacité globale.

Par ailleurs, la précision des mesures est fortement influencée par l'absence de procédures de calibration rigoureuses [40], [44], ce qui constitue un enjeu majeur dans le domaine de la métrologie. Enfin, le manque de conception mécanique robuste limite leur utilisation dans des conditions réelles.

1.5.2 Objectif Principal

Concevoir, implémenter et valider métrologiquement un système d'acquisition de données multi-thermocouples basé sur Arduino, caractérisé par un faible coût, une grande flexibilité et une haute fiabilité.

1.5.3 Objectifs Spécifiques

Développer un système de mesure basé sur 12 thermocouples pour l'acquisition multi-points

Intégrer un système de data logging via carte microSD

Concevoir une interface utilisateur simple (boutons et/ou écran LCD)

Réaliser un boîtier de protection imprimé en 3D

Effectuer une validation expérimentale par comparaison avec un système de référence professionnel

1.6 Incertitude de mesure

1.6.1 Définition de l'incertitude

L'incertitude de mesure est un paramètre associé au résultat d'une mesure, qui caractérise la dispersion des valeurs pouvant raisonnablement être attribuées à la grandeur mesurée [12][10][45].

Contrairement à l'erreur, qui représente l'écart par rapport à la valeur vraie, l'incertitude exprime un intervalle de confiance autour du résultat [12].

1.6.2 Sources d'incertitude

Dans un système d'acquisition de température basé sur des thermocouples, plusieurs sources d'incertitude peuvent être identifiées [6], [10] :

- **Capteur (thermocouple)** : tolérance, dérive thermique [6]
- **Conditionnement du signal** : bruit, amplification [13]
- **Convertisseur ADC** : erreur de quantification [13]
- **Environnement** : température ambiante, interférences [17]
- **Calibration** : imprécision de l'étalonnage [10], [12]

1.6.3 Évaluation de l'incertitude

1) Incertitude combinée

L'incertitude totale est obtenue en combinant toutes les sources :

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \cdots + u_n^2}$$

[13][12]

2) Incertitude élargie

Pour exprimer un intervalle de confiance (généralement 95 %), on définit l'incertitude élargie :

$$U = k \cdot u_c$$

[12]

où $k$est le facteur de couverture (souvent $k = 2$) [13].

L'analyse statistique permet de quantifier la dispersion des mesures expérimentales à l'aide d'outils mathématiques reconnus en métrologie [12/[19].

- La moyenne des mesures est donnée par :

$$\bar{T} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} T_i$$

[13][19]

- L'écart-type expérimental s'écrit :

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(T_i - \bar{T})^2}$$

[19]

- Coefficient de détermination R^2

Le coefficient de détermination R^2est calculé selon la relation suivante :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}$$

Où :

- y_i: valeur mesurée (observée) ;
- $\hat{y}_i$: valeur prédite par le modèle de régression ;
- $\bar{y}$: moyenne des valeurs mesurées ;
- $\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2$: somme des carrés des résidus (**SSE : Sum of Squared Errors**) ;
- $\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2$: somme totale des carrés (**SST : Total Sum of Squares**).

Le coefficient de détermination R^2représente la proportion de la variance des données expérimentales expliquée par le modèle de régression. Sa valeur est comprise entre 0 et 1. Plus R^2est proche de 1, meilleure est la qualité de l'ajustement et plus le modèle représente fidèlement les données expérimentales. [19] [13]

- L'incertitude de type A est définie par :

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

[13][19]

- L'incertitude de type B est estimée à partir des données non statistiques :

$$u_B = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

[13]

3) Propagation des incertitudes

Les différentes sources d'incertitude sont combinées selon la loi de propagation :

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} u_i^2}$$

Cette relation est recommandée par le Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM) dans le cas de grandeurs indépendantes [13].

1.6.4 Importance dans les systèmes DAQ

L'analyse de l'incertitude est essentielle pour :

- garantir la fiabilité des mesures [10]

- comparer les résultats avec un système de référence [12]
- valider les performances du système développé [17]

Dans le cadre de ce projet, l'incertitude permet d'évaluer la précision du système DAQ basé sur Arduino et de vérifier sa conformité par rapport aux instruments professionnels [31][17].

1.6.5 Conclusion

La prise en compte de l'incertitude de mesure est indispensable en métrologie. Elle permet d'interpréter correctement les résultats et d'assurer la crédibilité des données expérimentales [13] [10].

1.7 Conclusion

Ce chapitre a présenté les bases théoriques nécessaires à la compréhension des systèmes de mesure de température et des systèmes d'acquisition de données. L'importance de la mesure de température dans les domaines industriels, scientifiques et métrologiques a été mise en évidence, notamment en raison de son rôle essentiel dans le contrôle des procédés, la sécurité et l'évaluation des performances des systèmes.

Les principaux capteurs de température ont été étudiés, en particulier les thermocouples, les RTD et les thermistances. Leurs principes de fonctionnement, leurs caractéristiques, leurs avantages ainsi que leurs limites ont été analysés afin de justifier le choix du thermocouple de type K dans cette étude.

Par ailleurs, les architectures générales des systèmes DAQ ont été présentées à travers leurs différents composants : capteurs, conditionnement du signal, conversion analogique-numérique, stockage et traitement des données. Une comparaison entre les systèmes commerciaux et les solutions open-source a montré que les plateformes basées sur Arduino constituent une alternative économique, flexible et adaptée aux applications pédagogiques et expérimentales.

Une analyse des travaux antérieurs a également permis d'identifier plusieurs limitations dans les systèmes existants, notamment le nombre réduit de voies de mesure, les limitations de calibration et les fonctions de stockage parfois insuffisantes.

Enfin, ce chapitre a introduit les notions fondamentales liées à l'incertitude de mesure et à son évaluation statistique, qui représentent une étape indispensable dans toute démarche métrologique. L'analyse des sources d'incertitude permettra, dans la suite de ce travail, d'évaluer la fiabilité et les performances du système DAQ développé.

Le chapitre suivant sera consacré à la conception matérielle et logicielle du système d'acquisition multi-thermocouple basé sur Arduino, ainsi qu'à la description détaillée des différents composants utilisés.

2 Chapitre 2 : Méthodologie de conception, instrumentation et principes de métrologie

2.1 Introduction

Ce deuxième chapitre est consacré à la méthodologie de conception, aux outils technologiques et à l'implémentation pratique du système de mesure de température développé. L'objectif est de présenter de manière détaillée l'architecture globale du prototype, en intégrant les dimensions matérielle (Hardware), mécanique (conception 3D) et logicielle (Software).

Dans un premier temps, nous décrivons la structure de la chaîne de mesure métrologique ainsi que les caractéristiques techniques des composants sélectionnés. Ensuite, nous détaillons le processus de conception tridimensionnelle du boîtier sous SolidWorks et le choix des technologies de fabrication additive pour assurer une intégration physique optimale. Enfin, nous présentons l'architecture logicielle développée sous l'environnement Arduino IDE, en mettant l'accent sur les algorithmes de traitement, de calibration et de stockage des données

2.2 Concept d'architecture et de conception du système

2.2.1 Le schéma global

Le schéma global du système repose sur une chaîne de mesure métrologique complète, où chaque bloc fonctionnel contribue directement à la qualité et à la fiabilité des mesures.

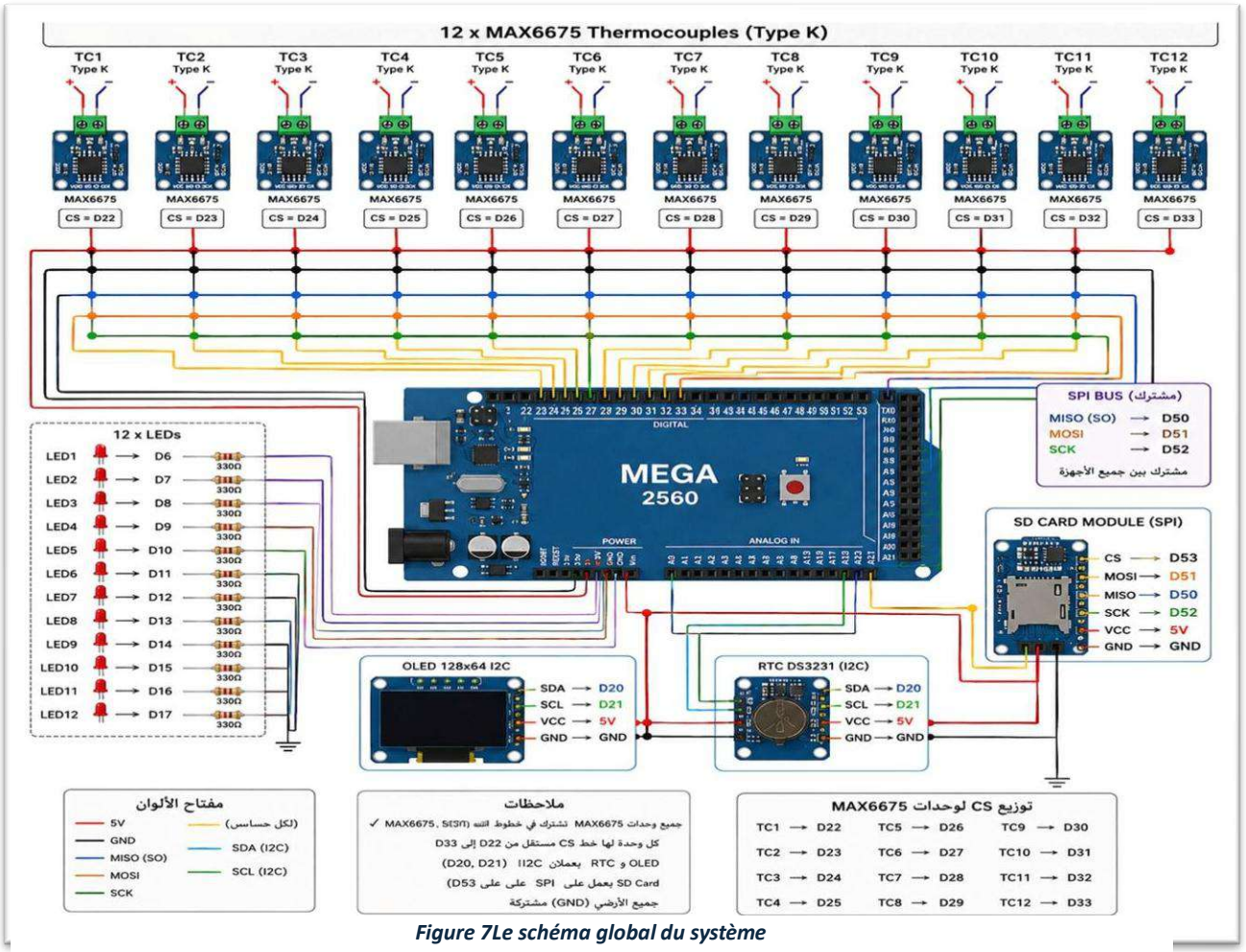


Figure 7Le schéma global du système

Tout d'abord, l'unité de capteurs (thermocouples) constitue l'élément de base de la mesure. Ses caractéristiques influencent directement la sensibilité ainsi que le temps de réponse, ce qui détermine la capacité du système à détecter les variations de température. **[47]**

Ensuite, l'unité de conditionnement du signal (MAX6675) assure la conversion du signal analogique en signal numérique. Cette étape joue un rôle essentiel dans la résolution du système et permet de réduire l'effet du bruit, améliorant ainsi la qualité des données acquises. **[48]**

Par ailleurs, l'unité de traitement (Arduino MEGA) constitue le cœur du système. Elle permet d'appliquer des algorithmes de traitement, notamment la calibration (étalonnage) à l'aide d'un modèle linéaire (A et B), afin de réduire l'erreur et d'améliorer la précision (exactitude). Elle assure également l'analyse de la stabilité en comparant les mesures successives. **[46]**

En ce qui concerne l'unité d'affichage (OLED), elle permet une visualisation en temps réel des valeurs mesurées, facilitant ainsi l'évaluation de la répétabilité et la détection d'éventuelles anomalies. **[50]**

De plus, l'unité de stockage (carte SD) permet l'enregistrement des données expérimentales, offrant la possibilité d'effectuer des analyses ultérieures afin d'évaluer la reproductibilité et d'estimer l'incertitude de mesure. **[49]**

Concernant l'unité d'alerte (LEDs), elle assure une détection immédiate des situations anormales, telles que le dépassement des seuils ou l'instabilité des mesures, ce qui renforce la fiabilité globale du système. **[46]**

Par ailleurs, l'unité de gestion du temps (DS3231) joue un rôle essentiel dans la synchronisation des mesures. Ce module d'horloge temps réel (RTC) permet d'horodater précisément chaque acquisition de données avec une grande stabilité, grâce à sa compensation interne de température. Cela garantit une traçabilité temporelle fiable des mesures, ce qui est indispensable pour l'analyse des variations dans le temps **[56]**

Enfin, les résistances électriques jouent un rôle de protection et de régulation du courant, contribuant indirectement à la stabilité du système et à la réduction des perturbations électriques. **[46]**

Ainsi, l'intégration de ces différents blocs fonctionnels, associée aux concepts fondamentaux de la métrologie, permet de considérer le système proposé comme une chaîne de mesure fiable, précise et conforme aux exigences scientifiques.

2.2.2 Description des composants du système

Le tableau suivant présente une synthèse des différents composants du système ainsi que leurs caractéristiques techniques et leur contribution dans la chaîne de mesure.

Le choix de ces composants repose sur des critères de performance, de fiabilité et de compatibilité, afin d'assurer un système de mesure précis et adapté aux exigences métrologiques.

Tableau 4Synthèse des composants du système d'acquisition et de leurs caractéristiques techniques

Composant	Rôle dans le système	Caractéristiques techniques	Contribution métrologique
Arduino Mega 2560	Unité de traitement et de contrôle	- Microcontrôleur ATmega2560 - Plusieurs entrées/sorties - Support des protocoles SPI et I2C	Traitement des données et amélioration de la précision grâce aux procédures de calibration
Thermocouple Type K	Capteur de température	- Large plage de mesure - Temps de réponse rapide - Grande robustesse	Sensibilité thermique, rapidité de réponse et acquisition des grandeurs physiques
Module MAX6675	Conditionnement et conversion du signal	- Conversion analogique-numérique - Interface SPI - Compensation de jonction froide	Amélioration de la résolution de mesure et réduction du bruit
Écran OLED SSD1306	Affichage des données mesurées	- Interface I2C - Faible consommation énergétique - Haute résolution d'affichage	Visualisation des mesures et évaluation de la stabilité et de la répétabilité
Keypad 4×4	Interface utilisateur	- Clavier matriciel 4×4 - Entrées digitales	Interaction avec l'utilisateur et saisie des coefficients d'étalonnage
Module Micro SD Card	Stockage des données	- Interface SPI - Sauvegarde au format CSV - Mémoire externe	Archivage des données pour l'analyse de la reproductibilité et de l'incertitude
LEDs	Système d'alerte et d'indication	- Indicateurs lumineux - Réponse instantanée	Détection des dépassements de seuil et contrôle de la stabilité du système
DS3231 (RTC)	Gestion du temps et horodatage	- Interface I2C - Haute précision - Capteur de température intégré	Assure la traçabilité temporelle et la synchronisation des mesures

Résistances	Protection et stabilisation du circuit	- Limitation du courant - Protection des composants électroniques	Réduction des erreurs électriques et amélioration de la stabilité globale du système

2.2.3 Conception de l'alimentation et protection du circuit

Le système proposé repose sur une alimentation principale de 5V fournie par la carte Arduino, permettant d'assurer le fonctionnement des différents modules électroniques conformément aux recommandations du constructeur [46].

1) Distribution de l'alimentation

La gestion de l'alimentation a été conçue en tenant compte des exigences spécifiques de chaque composant :

- Les modules Arduino, MAX6675 et OLED sont alimentés en 5V, conformément à leurs spécifications techniques [46][48].
- Le module carte SD est alimenté en 3.3V, afin d'éviter tout risque de détérioration lié à une surtension. [49]

Cette séparation des niveaux de tension permet d'assurer une meilleure fiabilité du système.

2) Mise à la masse (GND)

Tous les composants partagent une masse commune (GND), ce qui constitue un principe fondamental en électronique:

- Assurer une référence de tension stable pour l'ensemble du système
- éviter les différences de potentiel parasites
- Améliorer l'intégrité des signaux transmis entre les modules

Ce principe est indispensable pour garantir la précision des mesures et la cohérence du système embarqué [46].

3) Protection des composants

Afin d'assurer la sécurité et la durabilité du système, plusieurs dispositifs de protection ont été intégrés :

- **Résistances (220Ω) :** utilisées pour limiter le courant traversant les LED, conformément à la loi d'Ohm, afin d'éviter leur détérioration [46].
- **Fusible (Fuse)** : permet de protéger le circuit contre les surintensités et les courts-circuits, en interrompant automatiquement l'alimentation en cas d'anomalie [46].
- **Diode de protection :** utilisée pour éviter les inversions de polarité et protéger les composants sensibles contre les tensions inverses [46].

4) Stabilité et fiabilité du système

La conception de l'alimentation joue un rôle direct dans la performance globale du système en :

- Réduisant les perturbations électriques (bruit)
- Améliorant la stabilité des mesures
- Limitant les risques d'erreurs et de défaillance des composants

Une alimentation correctement dimensionnée et protégée constitue donc un élément essentiel pour garantir la fiabilité, la précision et la robustesse du système de mesure.

2.2.4 Module de stockage (SD) et interface utilisateur (Keypad)

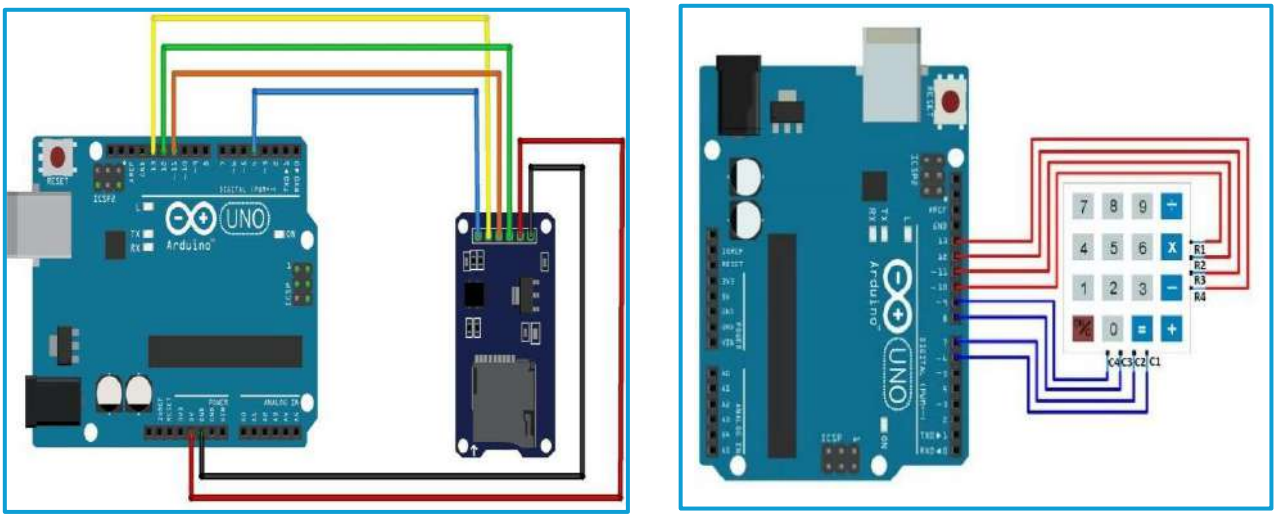


Figure 8Module de stockage (SD) et interface utilisateur (Keypad)

1) Module de stockage (SD)

Le module de carte SD constitue une solution efficace pour le stockage des données acquises. Il repose sur le protocole de communication SPI (Serial Peripheral Interface), permettant un échange rapide et fiable avec le microcontrôleur. [49]

Dans ce système, la carte SD est utilisée pour :

- Enregistrer les mesures de température sous format CSV (Comma-Separated Values) .
- Assurer un stockage périodique des données pour une exploitation ultérieure .
- Faciliter l'analyse des résultats à l'aide d'outils externes tels que Excel. [49]

D'un point de vue métrologique, cette unité joue un rôle essentiel dans :

- L'évaluation de la reproductibilité des mesures .
- L'analyse de la stabilité sur une longue durée .
- L'estimation de l'incertitude à partir des données enregistrées.

2) Interface utilisateur : Keypad

Le clavier matriciel (Keypad) constitue l'interface principale entre l'utilisateur et le système. Il permet une interaction simple et efficace pour le contrôle des différentes fonctionnalités. [46]

Les commandes implémentées permettent de gérer les modes de fonctionnement suivants :

- **Start (Démarrage)** :
  Activation du processus de mesure et de l'enregistrement des données .
- **Stop (Arrêt)** :
  Suspension temporaire de l'acquisition et du stockage .
- **Reset (Réinitialisation)** :
  Réentrée des coefficients d'étalonnage (A et B)
- **Mode (Changement de mode)** :
  Permet de basculer entre :
  - Le mode affichage des valeurs mesurées .
  - Le mode calibration.

Sur le plan fonctionnel, cette interface contribue à :

- Améliorer l'ergonomie du système .
- Assurer un contrôle en temps réel des opérations .
- Réduire les erreurs de manipulation. [46]

L'intégration du module de stockage et de l'interface utilisateur permet d'assurer à la fois la traçabilité des données et une interaction efficace avec le système, renforçant ainsi la fiabilité globale de la chaîne de mesure.

2.3 Conception 3D du prototype

La conception tridimensionnelle du boîtier a été réalisée à l'aide du logiciel de CAO SolidWorks. Ce logiciel est largement utilisé dans les domaines de l'ingénierie mécanique et de la conception industrielle grâce à ses outils avancés de modélisation paramétrique et d'assemblage [51] . Selon le guide officiel de SolidWorks, le logiciel permet la création de modèles numériques précis à travers différentes étapes comprenant les esquisses 2D, la modélisation volumique 3D, l'assemblage des composants ainsi que la génération de plans techniques destinés à la fabrication [52].

La modélisation paramétrique constitue l'un des principes fondamentaux de SolidWorks. Chaque dimension, contrainte géométrique ou relation mathématique appliquée au modèle peut être modifiée dynamiquement, ce qui facilite les corrections et les optimisations durant le processus de conception [52]. Cette approche améliore considérablement la précision du modèle et réduit les erreurs lors de l'intégration des composants électroniques et mécaniques.

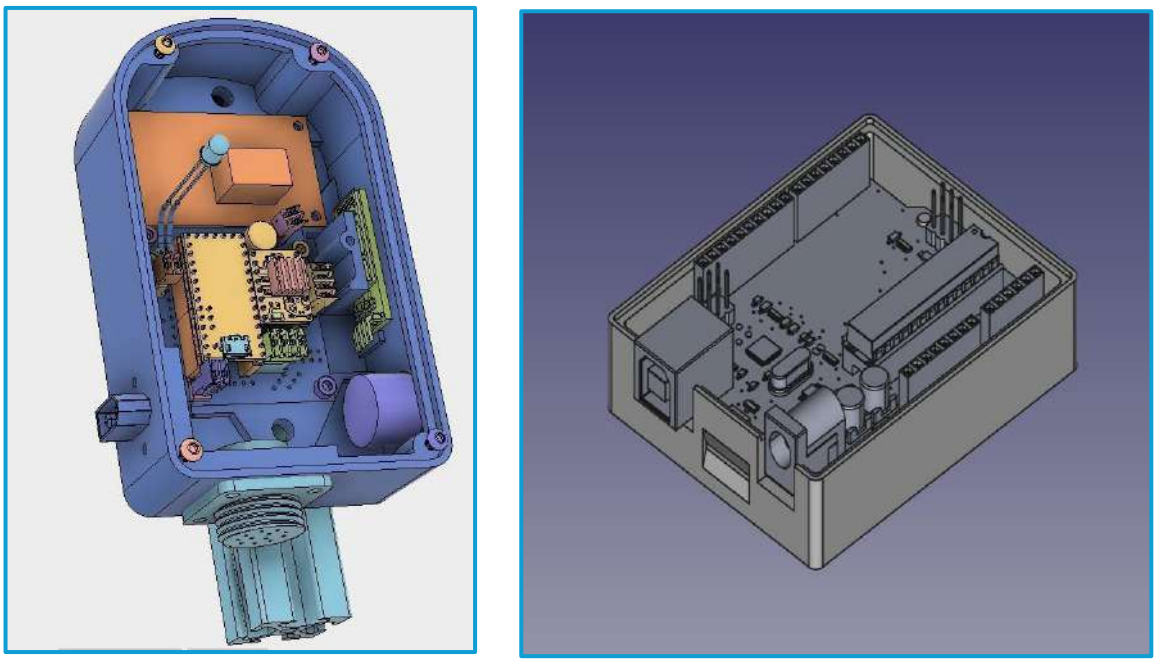


Figure 9Conception CAO, modélisation 3D et préparation des plans de fabrication du prototype

Dans ce projet, la conception du boîtier a pris en considération plusieurs contraintes techniques, notamment :

- L'intégration des composants électroniques .
- La disposition interne du câblage .
- La facilité d'assemblage et de maintenance .
- La dissipation thermique .
- La résistance mécanique du boîtier .
- L'ergonomie et l'aspect esthétique du prototype.

Le processus de conception a commencé par la réalisation de sketches 2D définissant les dimensions principales du système. Ces esquisses ont ensuite été transformées en géométries tridimensionnelles à l'aide des fonctions d'extrusion, de révolution et d'enlèvement de matière [52]. Une étape d'assemblage virtuel a ensuite été effectuée afin de vérifier les interférences mécaniques entre les différentes pièces et garantir la compatibilité globale du système avant fabrication [55].

Le modèle final a été exporté au format STL (Stereolithography), qui représente le format standard utilisé dans les procédés de fabrication additive et d'impression 3D [52].

2.3.1 Fabrication additive et impression 3D

L'impression 3D, également appelée fabrication additive, est une technologie de prototypage rapide permettant de produire des objets physiques à partir d'un modèle numérique tridimensionnel [53]. Contrairement aux méthodes de fabrication soustractives, la fabrication additive consiste à déposer ou solidifier la matière couche par couche jusqu'à l'obtention de la géométrie finale.

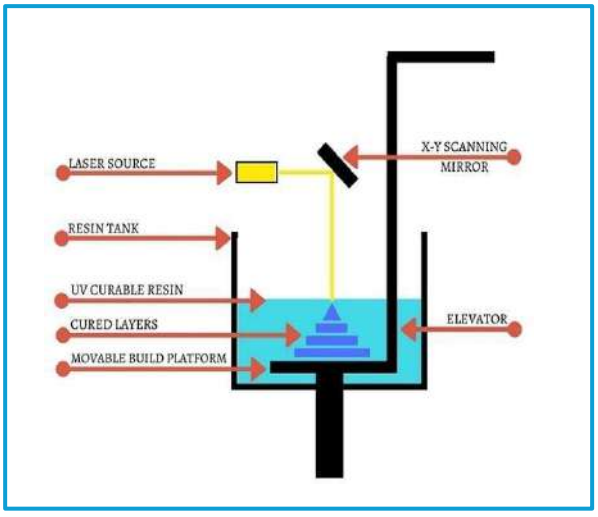
Cette technologie présente plusieurs avantages dans le domaine de la conception de prototypes :

- réduction des coûts de fabrication .
- rapidité de production .
- possibilité de réaliser des formes complexes .
- personnalisation des pièces .
- réduction des pertes de matière.

Les principales technologies d'impression 3D utilisées dans l'industrie et le prototypage sont les suivantes :

1) SLA (Stereolithography) :

La technologie SLA utilise une résine photosensible liquide polymérisée par un faisceau laser ultraviolet. Chaque couche est solidifiée progressivement afin de construire la pièce finale avec une très grande précision.



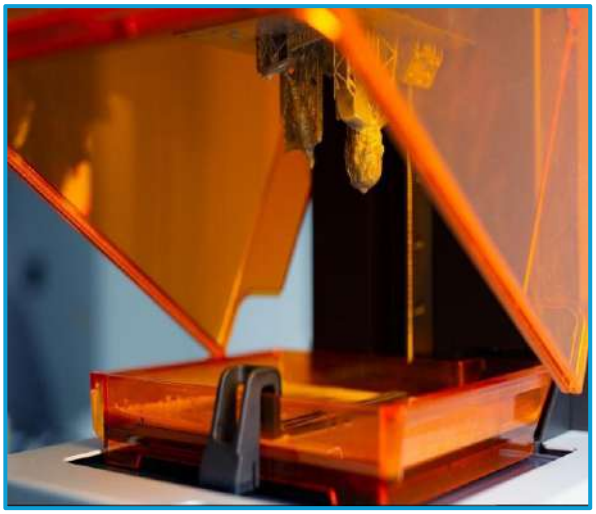


Figure 10Principe de fonctionnement de la technologie d'impression 3D SLA

Les avantages principaux de cette technologie sont :

- une excellente qualité de surface ;
- une très haute précision dimensionnelle ;
- la possibilité de produire des géométries complexes avec des détails fins.

Néanmoins, cette méthode nécessite des opérations de post-traitement telles que le nettoyage et la polymérisation UV des pièces imprimées. De plus, le coût des résines et des équipements reste relativement élevé [53].

2) SLS (Selective Laser Sintering):

La technologie SLS fonctionne à partir d'un matériau en poudre, généralement du nylon ou des polymères techniques. Un laser haute puissance fusionne les particules de poudre couche par couche afin de former la pièce.

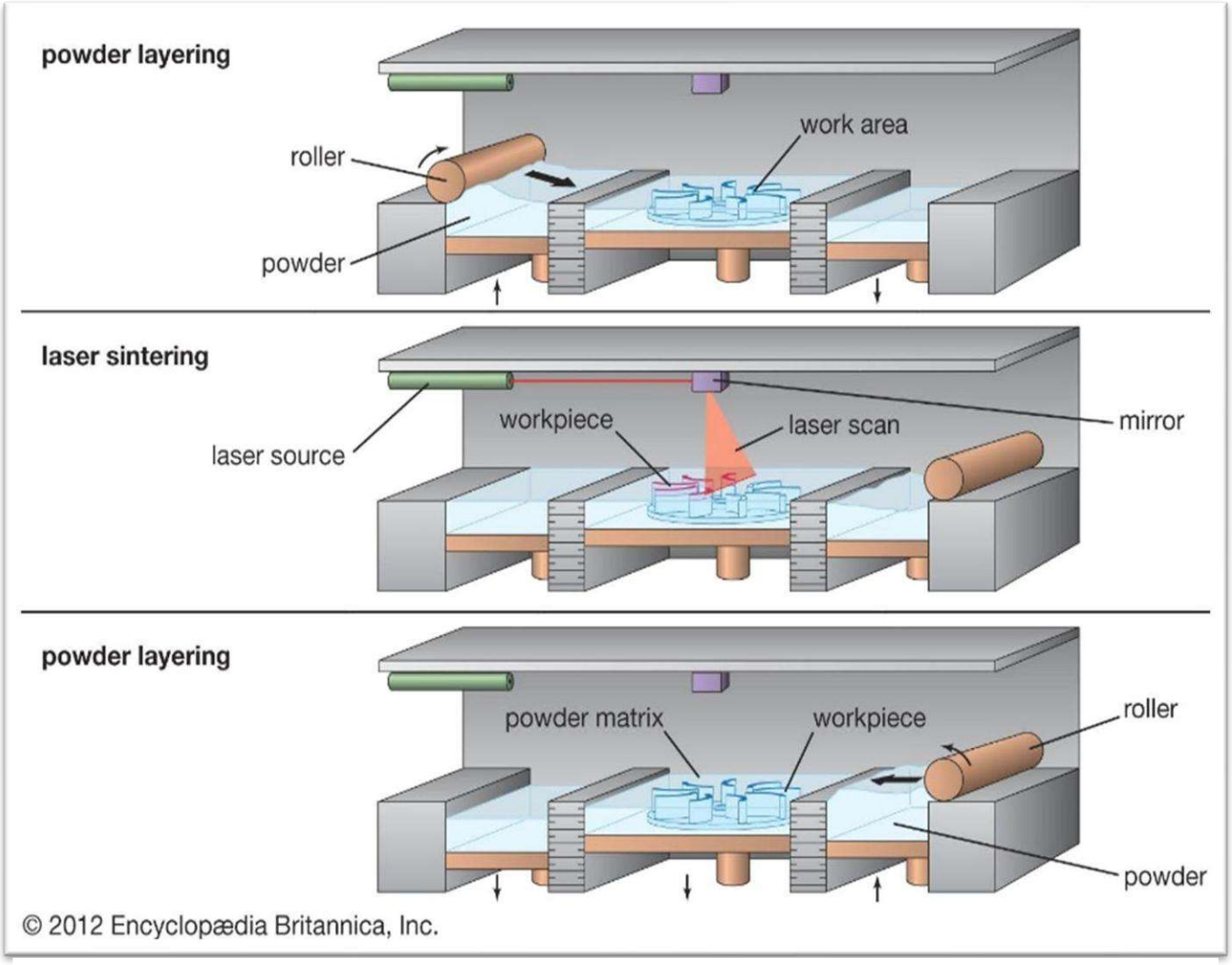


Figure 11Processus de fusion sélective de poudre dans la technologie SLS

Cette méthode offre :

- d'excellentes propriétés mécaniques ;

- une bonne résistance thermique ;
- la possibilité de produire des pièces sans structures de support.

La poudre non fusionnée agit naturellement comme support pendant l'impression. Toutefois, cette technologie est principalement réservée aux applications industrielles en raison du coût important des équipements et de la complexité du procédé [53].

3) FDM (Fused Deposition Modeling) :

La technologie FDM repose sur l'extrusion d'un filament thermoplastique chauffé jusqu'à son point de fusion. Le matériau fondu est déposé couche par couche suivant une trajectoire définie par un logiciel de tranchage.

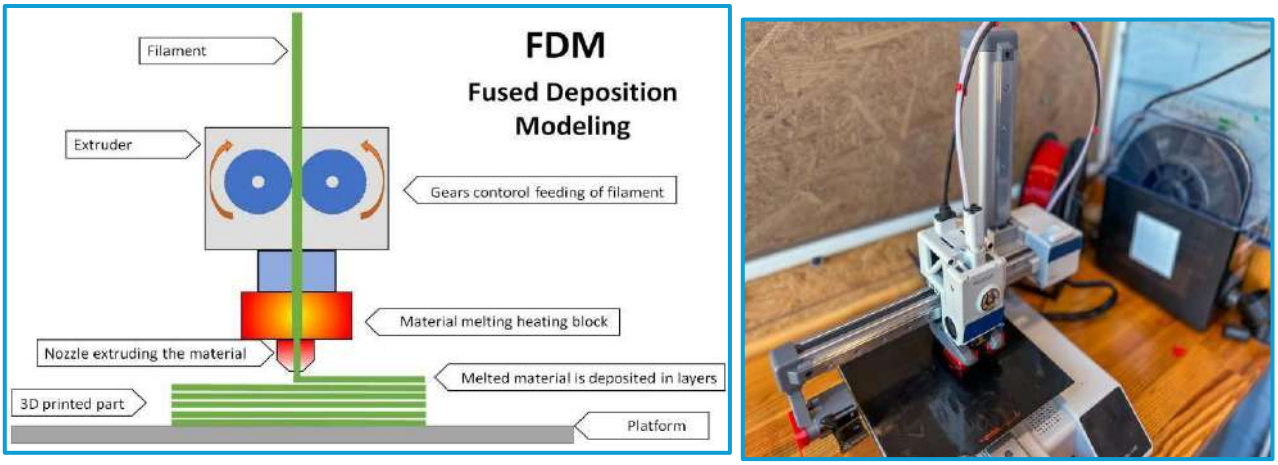


Figure 12Principe de fonctionnement de la technologie d'impression 3D FDM

Cette technologie est la plus répandue dans les projets académiques et les systèmes embarqués en raison de :

- son faible coût ;
- sa simplicité d'utilisation ;
- la disponibilité des matériaux ;
- la facilité de maintenance des imprimantes.

Cependant, les pièces obtenues présentent généralement une résolution moyenne et des lignes de couches visibles sur la surface extérieure. [53]

Les matériaux les plus utilisés avec cette technologie sont :

- le PLA ;
- l'ABS ;
- le PETG.

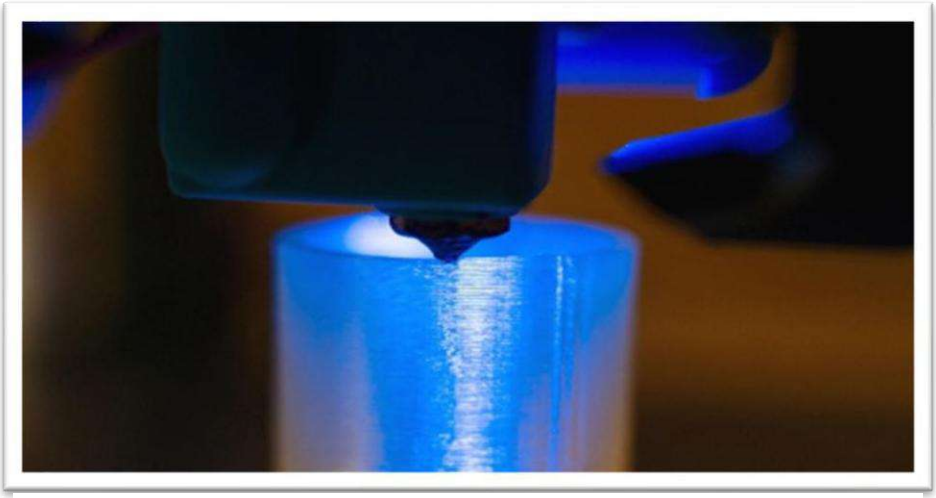


Figure 13Dépôt du filament fondu lors du procédé d'impression 3D FDM

2.3.2 Choix du matériau d'impression

Le choix du matériau dépend des contraintes mécaniques, thermiques et environnementales du prototype. [54]

- **PLA (Acide Polylactique)** : matériau biodégradable, facile à imprimer, faible déformation thermique et bonne qualité visuelle. Il est particulièrement adapté au prototypage rapide et aux applications éducatives. [53]
- **ABS (Acrylonitrile Butadiène Styrène)** : matériau présentant une bonne résistance mécanique et thermique. Il est souvent utilisé pour des applications nécessitant une meilleure robustesse, mais son impression nécessite un plateau chauffant et un contrôle de température plus précis. [53]
- **PETG (Polyéthylène Téréphtalate Glycolisé)** : matériau intermédiaire combinant la facilité d'impression du PLA et la résistance mécanique de l'ABS. Il présente également une bonne résistance à l'humidité et aux produits chimiques. [53]

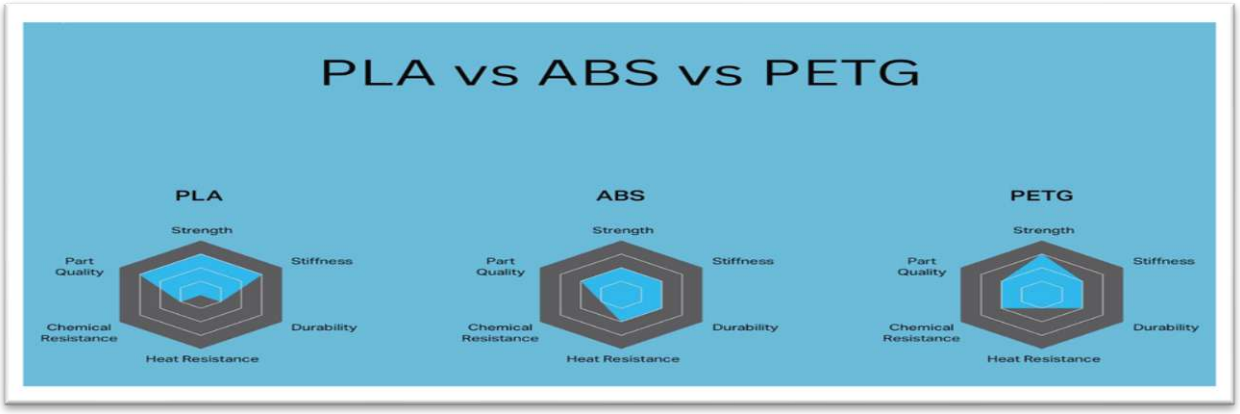


Figure 14Comparaison des performances des matériaux thermoplastiques utilisés en impression 3D FDM (PLA, ABS et PETG)

Selon les exigences du projet, la combinaison entre la conception sous SolidWorks et la fabrication additive constitue une solution efficace pour développer rapidement un prototype fonctionnel, économique et facilement modifiable durant les différentes phases de développement. [51] [53] .

Tableau 5 Comparaison des principales technologies d'impression 3D (FDM, SLA et SLS)

Critère	FDM (Fused Deposition Modeling)	SLA (Stereolithography)	SLS (Selective Laser Sintering)
Principe de fonctionnement	Extrusion d'un filament thermoplastique fondu couche par couche	Polymérisation d'une résine liquide par laser UV	Fusion d'une poudre par laser haute puissance
Matériau utilisé	PLA, ABS, PETG	Résine photosensible	Nylon, polymères techniques
Précision	Moyenne	Très élevée	Élevée
Qualité de surface	Surface avec lignes visibles	Surface lisse et détaillée	Bonne qualité de surface
Résistance mécanique	Moyenne	Moyenne	Très bonne
Structures de support	Nécessaires	Nécessaires	Non nécessaires
Coût des équipements	Faible	Moyen à élevé	Très élevé
Facilité d'utilisation	Simple	Moyenne	Complexe
Applications principales	Prototypage rapide et projets académiques	Pièces détaillées, médecine et bijouterie	Industrie, aéronautique et automobile
Avantages	Faible coût, simplicité et disponibilité des matériaux	Haute précision et excellente finition	Pièces solides et géométries complexes
Inconvénients	Résolution limitée et couches visibles	Post-traitement nécessaire et coût élevé	Équipements coûteux et procédé complexe

[8].

2.3.3 Assemblage et intégration des composants

Après la fabrication des différentes pièces du boîtier par impression 3D, une étape d'assemblage a été réalisée afin d'intégrer l'ensemble des composants électroniques et mécaniques du système. Cette phase comprend l'installation de la carte Arduino, des capteurs, des modules d'alimentation, du câblage ainsi que des éléments de fixation. [55].

L'intégration des composants a nécessité une organisation interne optimisée afin de :

- Réduire l'encombrement .
- Faciliter la circulation des câbles .
- Améliorer la dissipation thermique .
- Garantir la stabilité mécanique du système.

Ces considérations constituent des éléments importants dans la conception des systèmes embarqués et l'intégration mécanique des composants [51][55]**.**

Des ouvertures et supports spécifiques ont été prévus lors de la phase de conception 3D afin de permettre le passage des connecteurs, la fixation des cartes électroniques et l'accessibilité des différents composants pour les opérations de maintenance et de calibration. [52][55]**.**

L'assemblage final a permis d'obtenir un prototype fonctionnel combinant les aspects mécaniques, électroniques et ergonomiques du système développé. [51].

2.4 Programmation et logiciels

Le développement logiciel du système a été réalisé à l'aide de Arduino IDE, un environnement de développement intégré permettant l'écriture, la compilation et le téléversement des programmes vers les cartes Arduino. Cet environnement repose sur les langages C et C++ et offre une bibliothèque importante de fonctions facilitant le développement des systèmes embarqués et des applications d'acquisition de données. [57]

Selon la documentation officielle d'Arduino, un programme Arduino, appelé « sketch », possède une structure organisée permettant d'assurer le fonctionnement continu du système embarqué. [58] L'architecture logicielle développée dans ce projet comprend plusieurs modules fonctionnels assurant l'acquisition, le traitement, l'affichage et l'enregistrement des données.

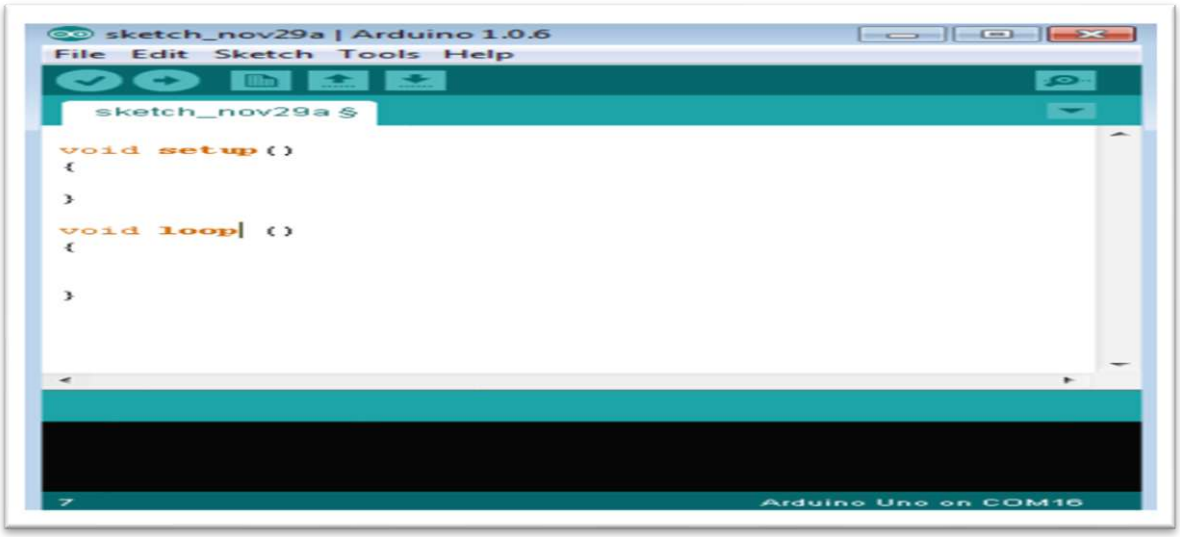


Figure 15Utilisation des bibliothèques pour l'optimisation du pilotage des périphériques et la

2.4.1 Structure du programme Arduino

Le programme développé sous Arduino IDE repose sur une architecture logicielle organisée permettant d'assurer la communication entre les différents composants matériels ainsi que le traitement, l'affichage et l'enregistrement des données [58]. L'environnement Arduino IDE fournit un ensemble d'outils logiciels, de bibliothèques et de fonctions intégrées facilitant le développement des systèmes embarqués et des applications d'acquisition de données.

Un programme Arduino, appelé « sketch », est généralement constitué de plusieurs parties assurant chacune une fonction spécifique dans le fonctionnement global du système. La structure du programme repose principalement sur les fonctions setup() et loop(), auxquelles s'ajoutent des bibliothèques, des variables globales, des fonctions utilisateur et des modules de gestion des périphériques. [58] [59]

1) Bibliothèques (Libraries)

Les bibliothèques permettent d'ajouter des fonctionnalités avancées sans développer manuellement l'ensemble du code nécessaire au pilotage des périphériques. Elles simplifient considérablement la communication avec les composants externes et améliorent la modularité du programme. [59]

Dans ce projet, plusieurs bibliothèques peuvent être utilisées selon les modules intégrés :

- **SPI.h** → utilisée pour la communication SPI avec des modules tels que la carte SD ou les convertisseurs thermocouples MAX6675/MAX31855. [59]
- **Wire.h** → utilisée pour la communication I2C avec certains écrans OLED ou capteurs. [59]
- **SD.h** → permet la gestion de la carte mémoire SD et l'enregistrement des données expérimentales. [59]
- **Adafruit_SSD1306.h** → utilisée pour le contrôle de l'écran **OLED SSD1306** et l'affichage des informations. [59]
- **EEPROM.h** → utilisée pour le stockage permanent des paramètres tels que les coefficients de calibration. [60]

- **RTClib.h** → utilisée pour la gestion du module RTC (Real Time Clock) afin d'enregistrer la date et l'heure des mesures. [60]

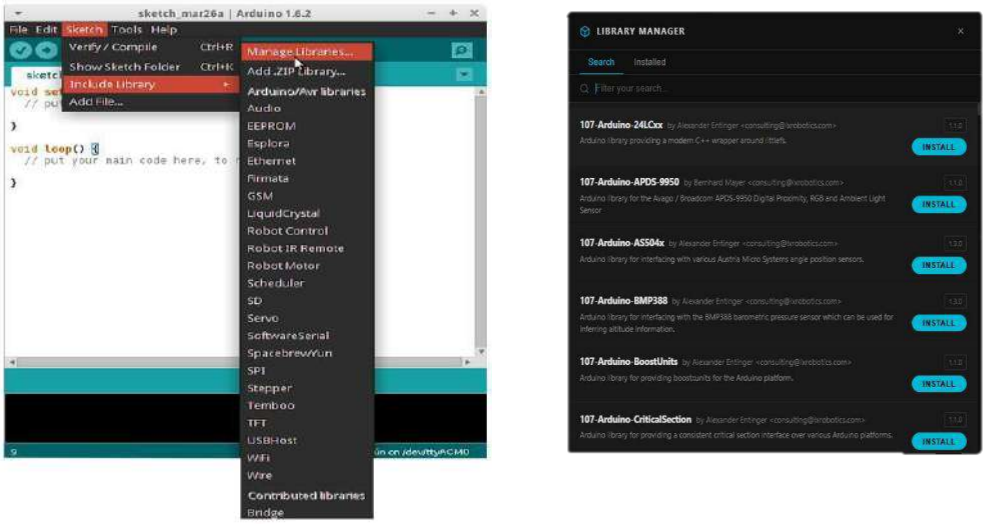


Figure 16 Utilisation des bibliothèques pour l'optimisation du pilotage des périphériques et la communication système

2) Déclaration des variables

Avant l'exécution du programme, différentes variables sont déclarées afin de stocker :

- les températures mesurées .
- les coefficients de calibration .
- les états des boutons .
- les paramètres utilisateur .
- les variables de navigation dans les menus .
- les données destinées à l'affichage ou à l'enregistrement. [61]

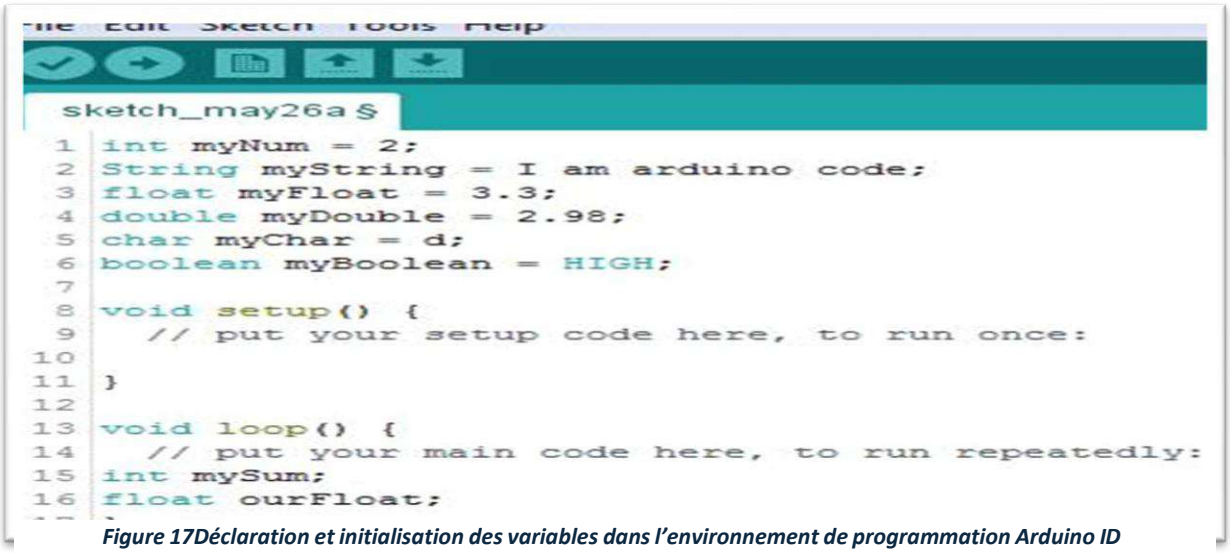


Figure 17Déclaration et initialisation des variables dans l'environnement de programmation Arduino ID

Les variables peuvent être :

- globales : accessibles dans l'ensemble du programme ;
- locales : utilisées uniquement dans une fonction spécifique.

Le choix du type des variables (int, float, char, bool, etc.) dépend de la nature et de la précision des données manipulées. [61]

3) *Fonction setup()*

La fonction setup() est exécutée une seule fois lors de la mise sous tension ou après la réinitialisation de la carte Arduino. Cette étape correspond à l'initialisation globale du système[58].

Elle comprend :

- l'initialisation des variables .
- la configuration des broches numériques et analogiques .
- l'initialisation des bibliothèques .
- l'ouverture de la communication série .
- l'initialisation de l'écran OLED .
- l'initialisation de la carte SD .
- la configuration des interfaces SPI et I2C .
- la vérification du fonctionnement des périphériques connectés.

La configuration des broches est réalisée à l'aide de la fonction :

$$pinMode(pin,\ mode)$$

Les modes principaux sont :

- INPUT
- OUTPUT
- INPUT_PULLUP [58] [62]

Cette phase garantit le bon fonctionnement du système avant le démarrage des opérations d'acquisition.

4) *Configuration des ports et manipulation des broches*

Les ports et les broches (Pins) assurent la connexion entre le microcontrôleur et les différents composants électroniques tels que les capteurs, les boutons poussoirs, l'écran OLED et les modules externes. [62]

Les fonctions principales utilisées sont :

- digitalRead()
- digitalWrite()
- analogRead()
- analogWrite()

Ces fonctions permettent respectivement :

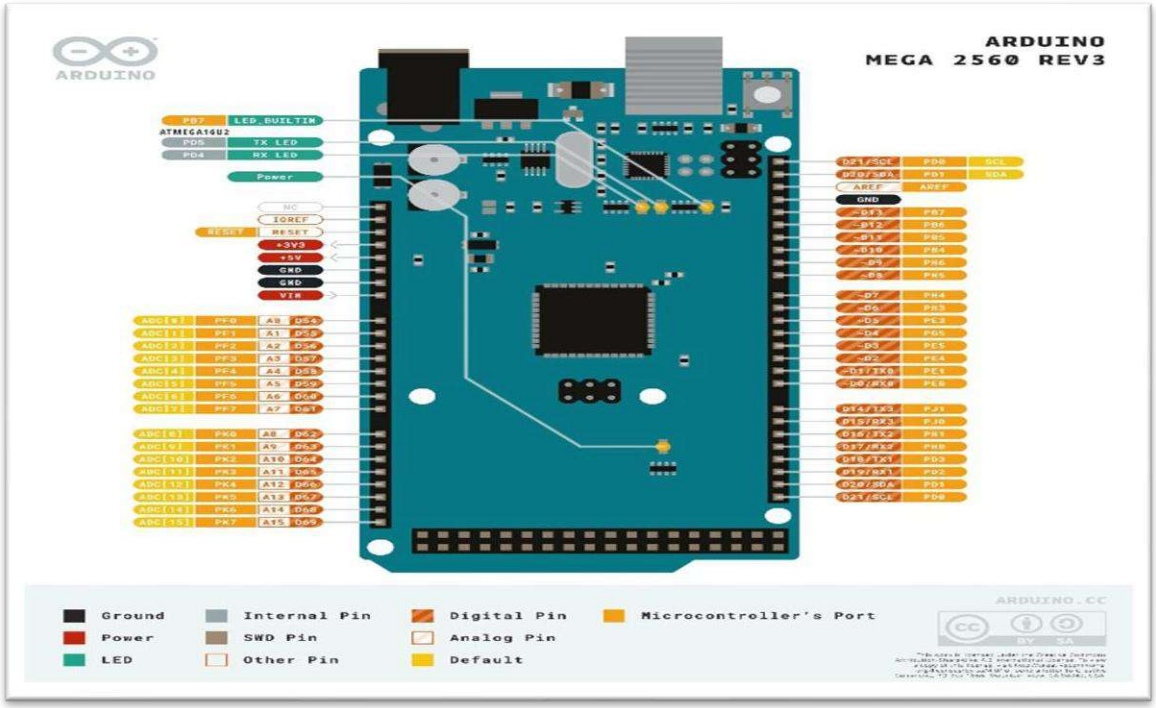
- la lecture des signaux numériques .
- l'écriture numérique .
- l'acquisition des signaux analogiques .
- la génération de signaux PWM.

5) Communication série (Serial Communication)

Arduino IDE intègre une interface de communication série permettant l'échange de données entre la carte Arduino et l'ordinateur. [63]

L'initialisation s'effectue avec :

$$Serial.begin(9600)$$



Cette communication est utilisée pour :

- afficher les températures mesurées .
- surveiller le fonctionnement du système .
- effectuer le débogage du programme .
- analyser les données en temps réel.

Les principales fonctions utilisées sont :

- Serial.print()
- Serial.println()
- Serial.read()





Le moniteur série intégré dans Arduino IDE facilite l'analyse des données et la détection des erreurs durant le développement. [63]

6) Fonction loop()

Après l'exécution de setup(), la fonction loop() est exécutée de manière répétitive tant que la carte reste alimentée. Elle constitue le cœur du système embarqué et assure le fonctionnement continu du programme. [58]

Dans ce projet, cette fonction réalise :

- la lecture des données des thermocouples .
- le traitement numérique des mesures .
- l'application des coefficients de calibration .
- l'actualisation de l'affichage OLED .

- la gestion des boutons et des menus .
- l'enregistrement périodique des données sur carte SD .
- le contrôle du fonctionnement général du système.

Le fonctionnement cyclique de loop() permet d'assurer une acquisition continue et en temps réel des mesures de température.

7) Fonctions utilisateur

Afin d'améliorer l'organisation du code, plusieurs fonctions personnalisées peuvent être développées pour :

- Lire les capteurs .
- Afficher les données OLED .
- Enregistrer les mesures .
- Gérer les menus .
- Traiter les boutons .
- Appliquer la calibration. [64]

Cette approche modulaire améliore :

- La lisibilité du programme .
- La maintenance .
- La réutilisation du code .
- La détection des erreurs.

8) Gestion des temporisations

Le système utilise des fonctions de temporisation afin de contrôler la fréquence d'acquisition des données.

Les fonctions les plus utilisées sont :

- delay()
- millis()

La fonction millis() est particulièrement importante dans les systèmes embarqués car elle permet d'exécuter plusieurs tâches périodiques sans bloquer l'exécution du programme. [65]

9) Gestion de la mémoire

Le microcontrôleur Arduino dispose de plusieurs types de mémoire :

- la mémoire Flash pour le stockage du programme .
- la mémoire SRAM pour les variables temporaires .

- la mémoire EEPROM pour le stockage permanent.

La mémoire EEPROM peut être utilisée pour conserver :

- les coefficients de calibration ;
- les paramètres utilisateur ;
- les configurations du système.

Ainsi, les données restent sauvegardées même après l'arrêt de l'alimentation électrique. [66]

10) Compilation et téléversement

Après l'écriture du programme, Arduino IDE réalise automatiquement :

1. la compilation du code source .
2. la détection des erreurs syntaxiques .
3. la génération du fichier exécutable .
4. le téléversement du programme vers la carte Arduino via le port USB. [57]

Cette étape permet l'exécution directe du programme sur le microcontrôleur et la mise en fonctionnement du système embarqué.

2.5 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a permis de détailler l'ensemble des étapes nécessaires à la réalisation d'un prototype fonctionnel et performant. L'intégration cohérente des composants électroniques, tels que l'Arduino MEGA, le module MAX6675 et les thermocouples, permet de constituer une chaîne de mesure fiable et conforme aux exigences métrologiques de précision et de résolution.

La conception mécanique personnalisée, associée à l'impression 3D, a offert une solution robuste pour l'assemblage et la protection du système. Parallèlement, l'architecture logicielle modulaire assure non seulement une acquisition de données en temps réel, mais garantit également une traçabilité temporelle précise et un stockage structuré sur carte SD. L'ensemble de ces développements techniques constitue une base solide pour l'évaluation expérimentale du système et l'analyse de ses performances métrologiques

3 Chapitre 3 : Présentation des résultats, analyse et discussion

3.1 Introduction

Ce chapitre constitue la phase expérimentale essentielle de ce travail, marquant le passage du cadre théorique à la validation pratique du système développé, dans le but d'évaluer les performances métrologiques d'un système d'acquisition de données multi-capteurs à bas coût basé sur la plateforme Arduino.

L'étude a débuté par la conception et la réalisation du dispositif expérimental intégrant plusieurs thermocouples de type K associés à des modules de conversion MAX6675, permettant ainsi l'acquisition simultanée de plusieurs points de mesure de température. Ce système a été conçu dans une optique de réduction des coûts tout en assurant une fiabilité suffisante pour des applications de mesure et de surveillance thermique.

Afin de garantir la qualité et la fiabilité des données collectées, les capteurs utilisés ont été soumis à une procédure d'étalonnage préalable, visant à améliorer la précision des mesures et à réduire les erreurs systématiques. Par la suite, une série de tests expérimentaux a été réalisée afin d'évaluer le comportement global du système dans des conditions réelles de fonctionnement.

Ces tests ont porté sur la validation du fonctionnement des différents canaux de mesure, la vérification de la transmission et du stockage des données sur carte SD, ainsi que le contrôle de l'affichage en temps réel des valeurs mesurées. En parallèle, une analyse des performances du système a été effectuée, notamment en termes de stabilité, de temps de réponse et de consommation énergétique.

L'ensemble de ces étapes permet d'obtenir une évaluation globale du système développé, en combinant les aspects électroniques, métrologiques et expérimentaux, afin de vérifier sa fiabilité et son adéquation pour des applications de mesure multi-points à faible coût.

3.2 Évaluation des performances du système

3.2.1 Méthodologie du travail

Figure 3.1 illustre une méthodologie expérimentale structurée visant à concevoir, mettre en œuvre et évaluer les performances d'un système d'acquisition de données multi-capteurs à faible coût basé sur la plateforme Arduino. Cette méthodologie est organisée en quatre étapes principales interconnectées.

La première étape consiste à définir l'architecture globale du système en identifiant les composants matériels nécessaires, notamment la carte Arduino Mega, les thermocouples de type K, les modules de conversion MAX6675, ainsi que les modules de stockage et d'affichage. Cette phase permet d'assurer une organisation cohérente du système et de garantir la compatibilité entre ses différents éléments.

La deuxième étape porte sur l'assemblage et la connexion des capteurs et des modules électroniques, suivis de la vérification fonctionnelle de chaque canal de mesure afin de s'assurer du bon fonctionnement du système multi-capteurs. Elle inclut également la

validation de la transmission des données vers la carte Arduino ainsi que leur affichage en temps réel.

La troisième étape concerne la procédure d'étalonnage des capteurs de température uniquement, réalisée par comparaison avec des instruments de référence. Cette étape permet de corriger les erreurs systématiques, d'améliorer la précision des mesures et de renforcer la fiabilité des données acquises.

Enfin, la dernière étape est consacrée à la phase expérimentale et à l'évaluation des performances du système dans des conditions réelles. Elle comprend la vérification du stockage des données sur carte SD, l'analyse du temps de réponse du système, ainsi que l'étude de la stabilité et de la répétabilité des mesures obtenues. Une analyse globale des performances est ensuite effectuée afin d'évaluer la précision et la fiabilité du système développé.

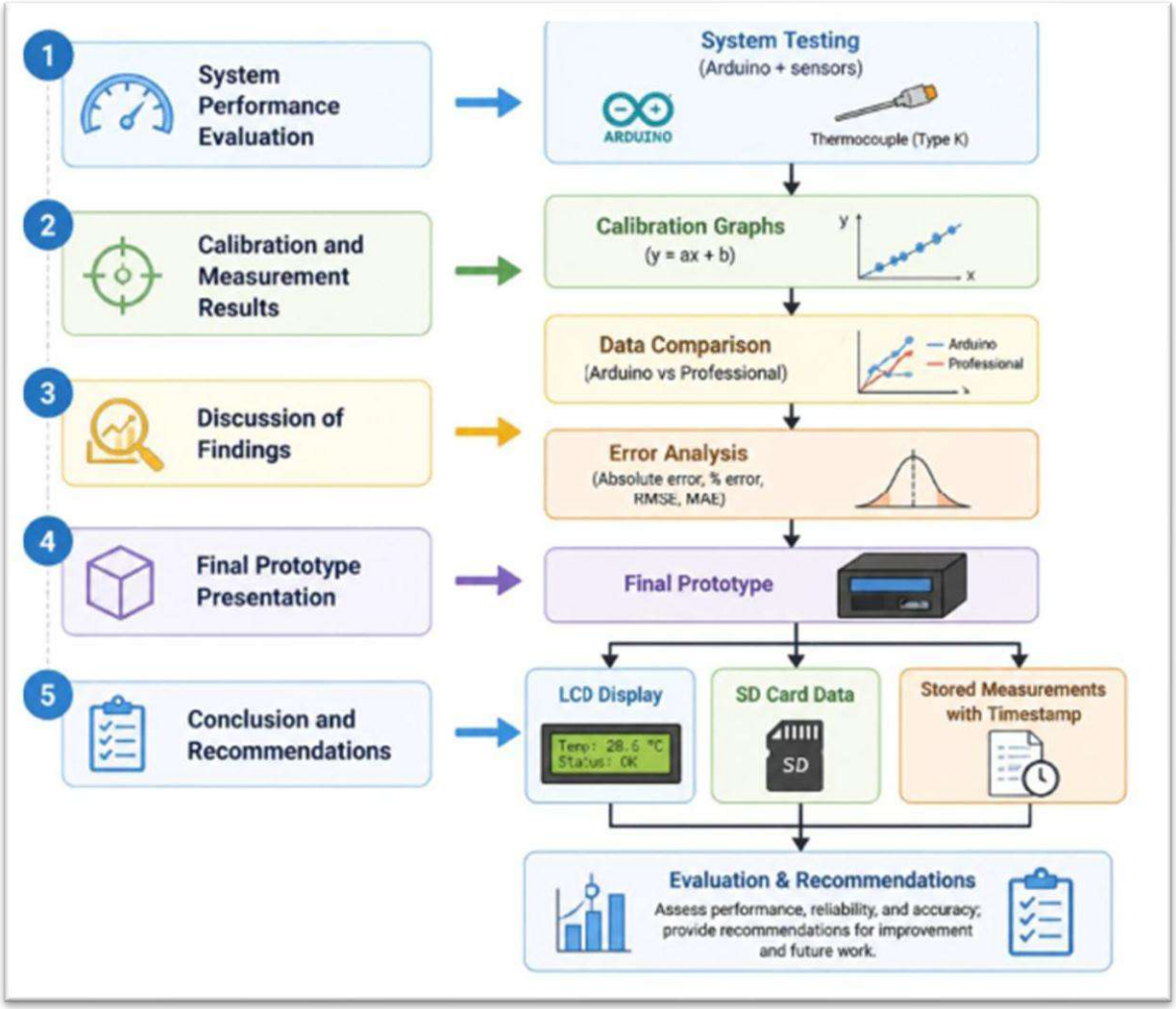


Figure 18Schéma de la méthodologie expérimentale adoptée

Cette méthodologie permet ainsi de valider un système d'acquisition multi-capteurs fonctionnel, stable et adapté aux applications de mesure à faible coût.

3.2.2 Choix des capteurs

Dans le cadre de ce travail, une démarche rigoureuse de sélection des capteurs a été adoptée afin de garantir la qualité, la fiabilité et la pertinence des mesures réalisées par le système d'acquisition de données développé. Le choix des capteurs a été guidé par la nature des grandeurs physiques à mesurer, ainsi que par des critères essentiels tels que la précision, la stabilité de fonctionnement et la compatibilité avec la plateforme Arduino.

La mesure de la température constitue l'objectif principal du système. Dans ce contexte, des thermocouples de type K ont été retenus en raison de leur robustesse, de leur large plage de mesure et de leur capacité à fonctionner dans des environnements thermiques variés. Leur association avec les modules de conversion MAX6675 permet une transformation fiable du signal analogique en signal numérique, directement exploitable par la carte Arduino, tout en assurant une acquisition stable et précise.

L'ensemble des capteurs sélectionnés répond ainsi aux exigences du système d'acquisition multi-canaux développé, en garantissant une collecte de données cohérente, fiable et adaptée aux besoins de l'analyse et de l'évaluation métrologique du dispositif.

3.2.3 Préparation et vérification des thermocouples

Avant l'intégration des thermocouples dans le système d'acquisition de données, une phase préparatoire complète a été réalisée selon une démarche structurée basée sur la méthode des 5M, afin d'assurer la fiabilité des capteurs et la qualité des mesures expérimentales. Cette étape est essentielle dans tout système métrologique, car elle permet de réduire les erreurs liées au matériel avant les essais.

Dans un premier temps, les thermocouples de type K ont été préparés individuellement. Une attention particulière a été accordée à la mesure de leurs longueurs afin de garantir une organisation homogène du système multi-canaux et faciliter leur identification lors de l'installation.

Ensuite, chaque thermocouple a été identifié et numéroté à l'aide d'étiquettes. Cette étape permet d'assurer une traçabilité claire de chaque canal de mesure et d'éviter toute confusion lors de la collecte et du traitement des données

Une vérification électrique a ensuite été effectuée à l'aide d'un multimètre afin de contrôler la continuité des fils et de s'assurer de l'absence de défauts de connexion ou de rupture dans les capteurs. Cette étape garantit que chaque thermocouple est fonctionnel avant utilisation.

.



Figure 19Numérotation et mesure des longueurs des thermocouples

Une vérification électrique a ensuite été effectuée à l'aide d'un multimètre afin de contrôler la continuité des fils et de s'assurer de l'absence de défauts de connexion ou de rupture dans les capteurs. Cette étape garantit que chaque thermocouple est fonctionnel avant utilisation.

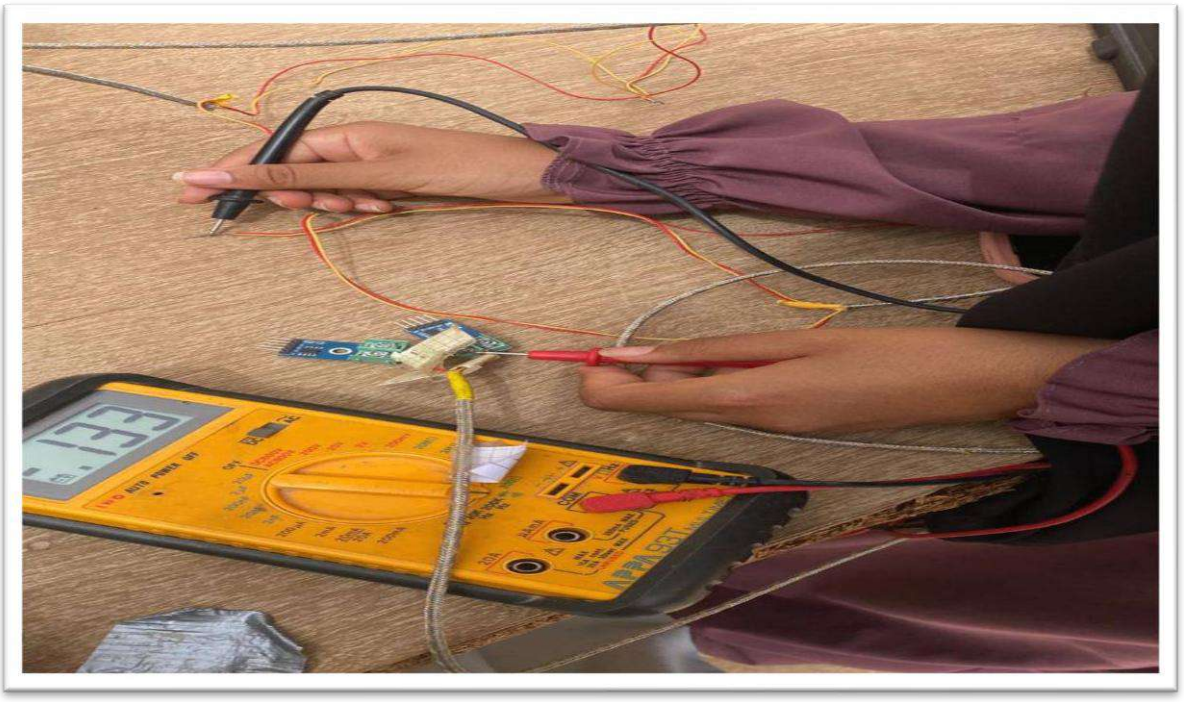


Figure 20Vérification des thermocouples avec multimètre

Par la suite, des tests thermiques préliminaires ont été réalisés en exposant les extrémités sensibles des thermocouples à une source de chaleur (chalumeau). L'objectif était d'observer la réponse des capteurs face à une variation rapide de température et de vérifier la cohérence des valeurs affichées.

Enfin, les résultats obtenus ont montré une bonne réactivité et une stabilité satisfaisante des thermocouples, ce qui a permis de valider leur intégration dans le système d'acquisition multi-canaux basé sur Arduino.

3.2.4 Test de stabilité et influence des facteurs externes

Après la phase de préparation et de vérification des thermocouples, un test expérimental complémentaire a été réalisé afin d'évaluer la stabilité des mesures et de vérifier l'influence éventuelle des facteurs externes sur le comportement des capteurs.

Dans cette expérience, deux thermocouples ont été utilisés simultanément. Le premier thermocouple a été exposé directement à une source de chaleur afin d'observer sa réponse thermique, tandis que le second a été maintenu dans des conditions normales afin de servir de référence comparative. Par la suite, les deux capteurs ont été immergés dans un même milieu liquide (eau) afin d'uniformiser les conditions initiales.

Ensuite, l'ensemble du système a été soumis à une élévation progressive de température à l'aide d'une source de chauffage (datcho), permettant ainsi de suivre en temps réel l'évolution des mesures des deux thermocouples.

Cette expérience a été répétée deux fois dans les mêmes conditions afin de vérifier la reproductibilité des résultats. Lors de la première répétition, aucune influence des facteurs externes n'a été observée, et les mesures étaient stables et cohérentes, ce qui montre que les thermocouples ne sont pas affectés par les conditions externes dans les conditions normales de mesure. En revanche, lors de la deuxième répétition, un écart entre les mesures des deux capteurs a été observé.

Après analyse, il a été constaté que cette différence était due à une mauvaise insertion et fixation des thermocouples dans le système, ce qui a affecté la qualité du contact et donc la précision des mesures, et non à une influence des capteurs ou des facteurs externes.

Ainsi, il peut être conclu que les thermocouples ne sont pas influencés par les facteurs externes dans les conditions expérimentales utilisées, et que toute différence observée est principalement liée à la qualité de l'installation et des connexions.

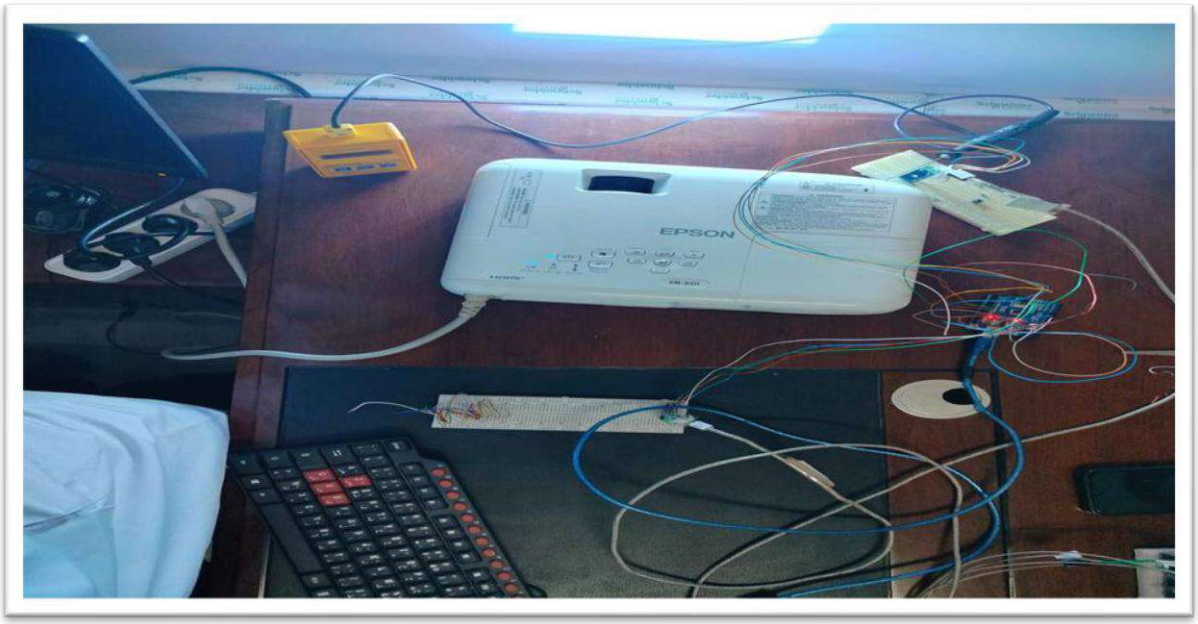


Figure 21Étude de l'influence des conditions externes sur les thermocouples

En conclusion, ces résultats soulignent l'importance de bien installer et fixer correctement les thermocouples avant toute mesure afin de garantir la précision des résultats et d'éviter les erreurs liées aux conditions de montage.

3.2.5 Intégration du clavier matriciel et calibration du système

Dans un premier temps, un test préliminaire du clavier matriciel a été réalisé afin de vérifier le bon fonctionnement des touches avant son intégration avec les autres composants du système. Le clavier utilisé comporte huit connexions réparties entre les lignes (R) et les colonnes (C), soit quatre broches pour les lignes et quatre autres pour les colonnes. Ces connexions ont été reliées directement à la carte Arduino Mega en réservant cette interface exclusivement au clavier matriciel.

Avant son association avec les écrans OLED et LCD, le clavier a été testé séparément à l'aide d'un programme expérimental permettant d'afficher, sur le moniteur série (Serial Monitor), la valeur correspondant à chaque touche actionnée. Les résultats obtenus ont confirmé le bon fonctionnement de l'ensemble des touches ainsi que la fiabilité des connexions entre les lignes et les colonnes.

Après cette phase de validation, le clavier matriciel a été intégré au système complet d'acquisition de données. Ce système comprend quatre thermocouples, un module de stockage sur SD Card, un écran OLED Display, ainsi que des lampes et des résistances utilisées lors des essais thermiques.

Le programme de commande a ensuite été modifié afin d'attribuer des fonctions spécifiques à certaines touches du clavier. Les touches numériques 1, 2 et 3 ont conservé leur rôle de saisie de données numériques, tandis que les touches fonctionnelles ont été utilisées pour assurer la navigation entre les différentes mesures des thermocouples. La touche F3 permet d'afficher la

valeur du thermocouple suivant, alors que la touche F4 permet de revenir à la mesure du thermocouple précédent.

Dans le but d'améliorer la précision des mesures, une fonction de calibration a également été intégrée au système. Cette calibration repose sur une relation linéaire de la forme : y=ax+b

où le coefficient a représente le facteur de correction de la pente et le coefficient b correspond au terme de correction de l'offset.

Le clavier matriciel a été programmé afin de permettre l'introduction et la modification des paramètres de calibration. La touche F1 permet d'accéder à la saisie des coefficients de calibration, en commençant par le coefficient a puis le coefficient b associé au même thermocouple. La touche F2 permet de passer au thermocouple suivant afin de régler indépendamment les paramètres de calibration de chaque capteur.

Le système de navigation des mesures a été maintenu durant cette phase, où la touche F3 permet d'afficher la valeur du thermocouple actuel tandis que la touche F4 permet de revenir au thermocouple précédent.

Les essais expérimentaux réalisés ont montré que l'intégration du clavier matriciel au système d'acquisition a été effectuée avec succès. Toutes les fonctions programmées ont fonctionné correctement sans perturber les autres composants du système, ce qui a permis d'améliorer à la fois l'ergonomie d'utilisation et la précision globale des mesures obtenues.

3.3 Calibration et Analyse des Résultats de Mesure

3.3.1 Protocole d'étalonnage et dispositif expérimental

Dans le but d'améliorer la précision et la fiabilité du système de mesure développé, un protocole d'étalonnage métrologique rigoureux a été mis en œuvre. Celui-ci repose sur la comparaison des mesures fournies par le système d'acquisition avec celles d'un thermocouple de référence (étalon), dans un environnement thermique contrôlé.

Les thermocouples ont été disposés dans un dispositif expérimental conçu pour assurer une distribution thermique homogène, validant ainsi les conditions d'étalonnage. Dans un premier temps, un bain de glace a été utilisé afin d'établir une température de référence stable de 0°C. Les capteurs ont été laissés jusqu'à l'atteinte de l'équilibre thermique avant l'enregistrement des mesures.

Par la suite, une résistance chauffante a été activée afin de générer des variations progressives de température, couvrant une large plage de mesure (de 50°C à 80°C). À chaque palier, un temps suffisant a été respecté pour garantir la stabilité thermique.

Les données ont été enregistrées simultanément pour :

- le thermocouple de référence (valeur étalon),
- les thermocouples du système d'acquisition via le data logger Arduino.

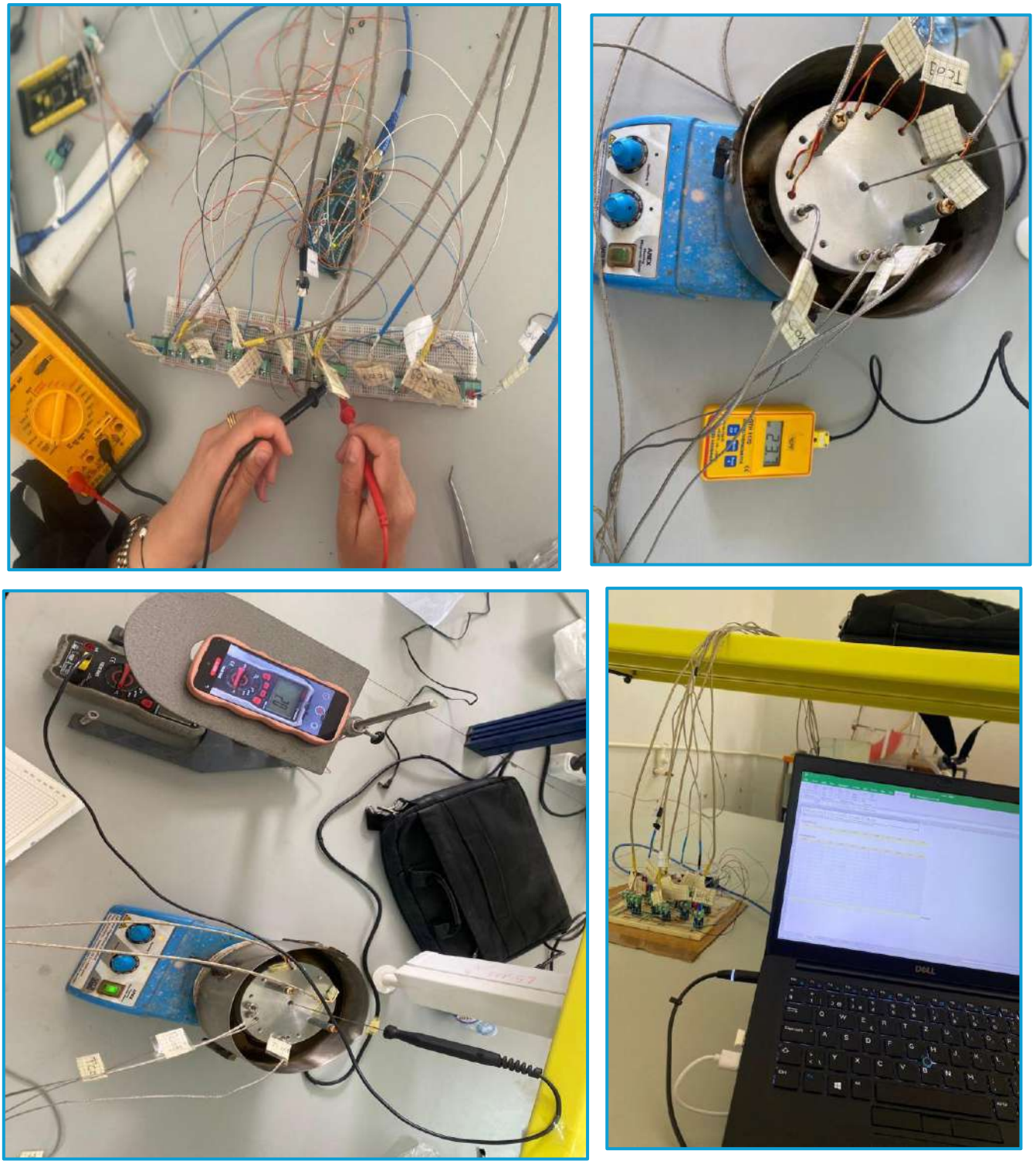


Figure 22Protocole d'étalonnage et dispositif expérimental

3.3.2 Traitement des données et analyse statistique

Les données expérimentales ont été traitées à l'aide du logiciel **Microsoft Excel**. Pour chaque thermocouple, les valeurs mesurées ont été associées aux valeurs de référence sous forme de paires de données.

Pour chaque voie de mesure, les opérations suivantes ont été réalisées :

- le calcul de la moyenne afin de réduire l'influence des erreurs aléatoires,
- la représentation graphique des valeurs mesurées en fonction des valeurs de référence,
- l'application d'une régression linéaire afin de déterminer les paramètres d'étalonnage.

La qualité de l'ajustement a été évaluée à l'aide du coefficient de détermination R^2, qui permet d'estimer le degré de corrélation entre les données expérimentales et le modèle adopté.

3.3.3 Modélisation de l'étalonnage et détermination des coefficients de correction

Afin de modéliser le comportement des thermocouples et d'améliorer la précision des mesures, une régression linéaire a été appliquée aux données expérimentales obtenues lors du processus d'étalonnage.

Les courbes d'étalonnage représentant la relation entre les températures mesurées par le système et les températures de référence sont présentées dans la **Figure 3-X**. Ces courbes mettent en évidence une relation linéaire entre les grandeurs étudiées.

Le modèle d'étalonnage adopté pour chaque thermocouple est donné par la relation suivante :

$$T_{\text{corrige´e}} = a_i \cdot T_{\text{mesure´e}} + b_i$$

où :

- $a_i$représente le coefficient de gain,
- $b_i$représente le décalage (offset),
- $i$correspond à l'indice de la voie de mesure (de 1 à 12).

Les coefficients d'étalonnage obtenus pour chaque thermocouple sont regroupés dans le tableau suivant :

- ✓ coefficient de détermination R^2, proches de 1, confirment la forte corrélation entre les températures mesurées et les températures de référence, validant ainsi le modèle linéaire adopté.

Tableau 6 Tableau récapitulatif des équations de correction et du (R^2) pour chaque thermocouple

TC	Y = Ax + B	R^2
TC03	y = 1.0676x - 1.6832	R^2 = 0.9977
TC04	y = 1.062x + 2.4212	R^2 = 0.997
TC01	y = 1.1035x + 2.4648	R^2 = 0.9975
TC02	y = 1.1164x - 10.639	R^2 = 0.9955
TC11	y = -0.0466x + 30.348	R^2 = 0.5173
TC09	y = -0.0533x + 29.829	R^2 = 0.6402
STC12	y = 0.9786x - 4.162	R^2 = 0.9708
TC08	y = 1.1029x - 7.092	R^2 = 0.9285
TC05	y = 0.9898x - 4.0167	R^2 = 0.974
TC07	y = 1.026x - 13.048	R^2 = 0.921
TC06	y = 0.9866x - 4.904	R^2 = 0.9736
TC10	y = 0.9157x - 9.755	R^2 = 0.9374

L'application de ces coefficients permet de corriger les mesures brutes et de réduire significativement les erreurs systématiques, améliorant ainsi la précision globale du système d'acquisition.

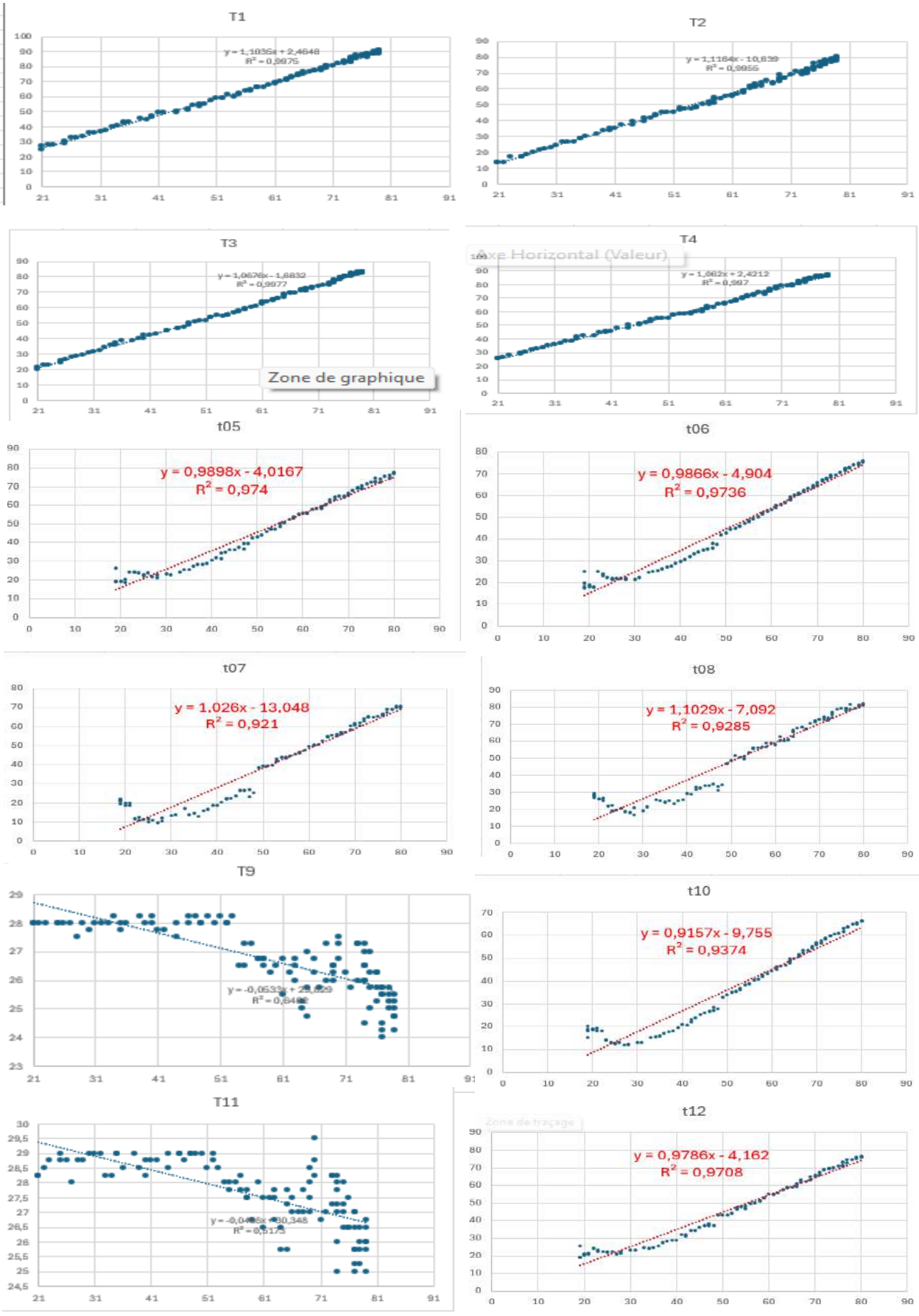


Figure 23 Courbes des résultats de chaque thermocouple par rapport au thermocouple étalon.

3.3.4 Validation métrologique (Justesse et Fidélité)

Les performances du système ont été évaluées selon les principaux critères métrologiques :

- **Justesse :**
  Les valeurs corrigées présentent un bon accord avec les valeurs de référence, traduisant une amélioration significative de la précision après étalonnage.
- **Fidélité :**
  Les mesures obtenues montrent une bonne répétabilité, avec une faible dispersion des résultats.
- **Linéarité :**
  Les valeurs élevées du coefficient R^2, proches de 1, confirment le comportement linéaire du système sur l'ensemble de la plage de mesure.

3.3.5 Intégration des coefficients d'étalonnage dans le système embarqué

Les coefficients d'étalonnage $a_i$et $b_i$ont été intégrés directement dans le programme Arduino, permettant une correction des mesures en temps réel.

Cette intégration offre plusieurs avantages :

- affichage direct des valeurs corrigées,
- enregistrement de données fiables,
- suppression des traitements a posteriori.

3.3.6 Discussion des résultats

Les résultats obtenus démontrent que le processus d'étalonnage a permis une amélioration significative des performances du système de mesure. Les erreurs systématiques ont été considérablement réduites, tandis que la stabilité des mesures a été maintenue.

Ainsi, le système développé peut être qualifié de :

- précis après étalonnage,
- stable dans le temps,
- adapté aux applications de mesure multipoints à faible coût.

3.4 Étape de prise de mesures et préparation des composants pour la conception

Avant de commencer la phase de conception tridimensionnelle du système, une étape préliminaire a été réalisée afin de préparer et organiser les différents composants électroniques utilisés dans le projet. Cette étape avait pour objectif d'obtenir des dimensions précises des éléments réels afin de garantir leur compatibilité avec le modèle numérique qui sera conçu ultérieurement.

Dans un premier temps, l'ensemble des composants électroniques du système a été rassemblé, notamment la carte de contrôle Arduino Mega, l'écran OLED, le module SD Card, le module d'horloge temps réel DS3231, le clavier matriciel (Keypad), ainsi que des cartes PCB et différents connecteurs. Certaines cartes PCB ont également été préparées et équipées de connecteurs **Header Pins** afin de faciliter leur intégration et leur assemblage au sein du système.

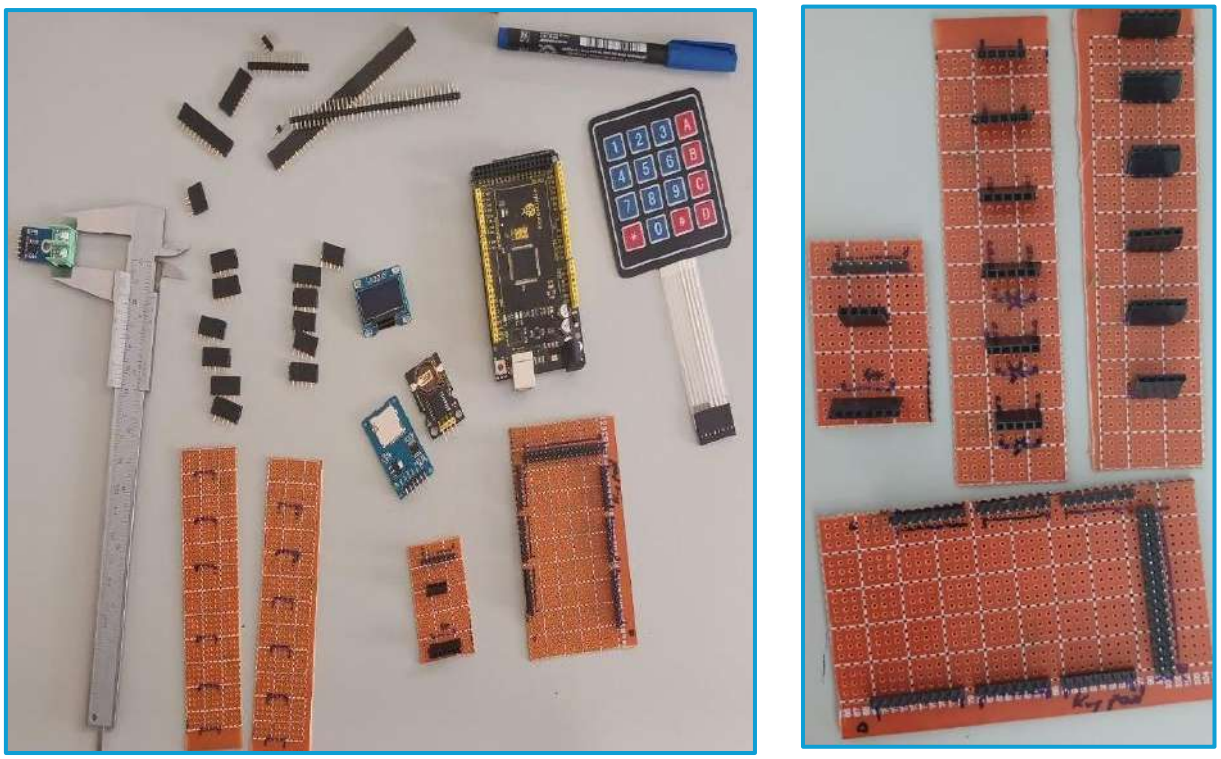


Figure 24 préparation des composants pour la conception

Par la suite, un **Pied à coulisse (Vernier Caliper)** a été utilisé afin d'effectuer des mesures physiques précises des différents composants. Les mesures réalisées comprenaient la longueur, la largeur et la hauteur, ainsi que certaines dimensions spécifiques telles que les positions des connecteurs électroniques, les points de fixation et les dimensions des interfaces externes de certains modules.

Toutes les valeurs mesurées ont été relevées et enregistrées manuellement afin d'être utilisées ultérieurement lors de la phase de modélisation 3D. Cette étape a permis de créer un modèle

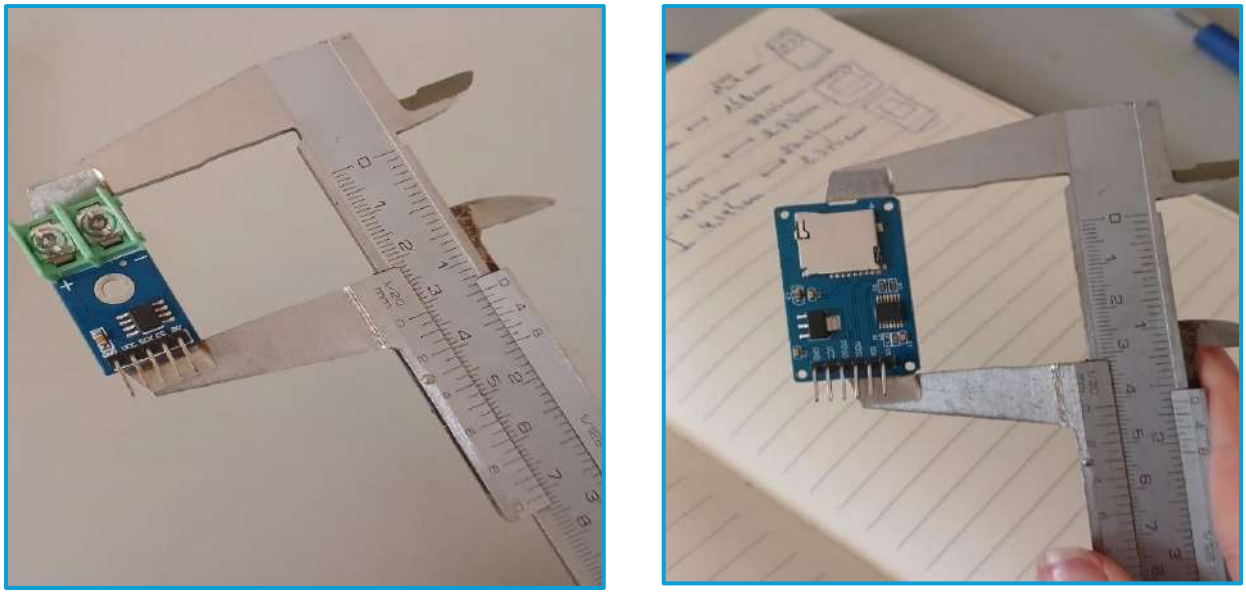


Figure 25 Étape de prise de mesures

numérique fidèle aux dimensions réelles des composants, réduisant ainsi les erreurs d'assemblage et assurant la compatibilité de la structure finale avec les exigences de fabrication et d'impression 3D

Tableau 7Mesures dimensionnelles des composants électroniques au pied à coulisse

Composant	Longueur	Largeur
OLED	27mm	28.35mm
SD Card Module	41.5mm	23.4mm
DS3231	38mm	22mm
Keypad	77mm	77mm
Arduino MEGA	53.34mm	101.6mm
MAX6675	33mm	15.4mm

3.4.1 Préparation et optimisation des cartes PCB

Dans le cadre de l'intégration matérielle du système, une étape supplémentaire a été réalisée afin d'optimiser le câblage et de faciliter l'assemblage des différents capteurs. Des cartes PCB perforées ont été préparées et configurées de manière à organiser les connexions électriques entre les composants.

Pour les modules de mesure basés sur plusieurs capteurs, certaines lignes communes telles que l'alimentation (**VCC**) et la masse (**GND**) ont été regroupées entre plusieurs capteurs afin de réduire le nombre de connexions nécessaires vers la carte Arduino Mega. De même, certaines lignes de communication communes ont été partagées entre les modules lorsque cela

était possible. En revanche, la ligne **Chip Select (CS)** de chaque capteur a été maintenue indépendante afin d'assurer une sélection individuelle et un fonctionnement correct de chaque module.

Cette méthode a permis d'optimiser l'utilisation des broches disponibles sur la carte Arduino Mega et d'éviter les limitations liées au nombre important de composants intégrés dans le système.

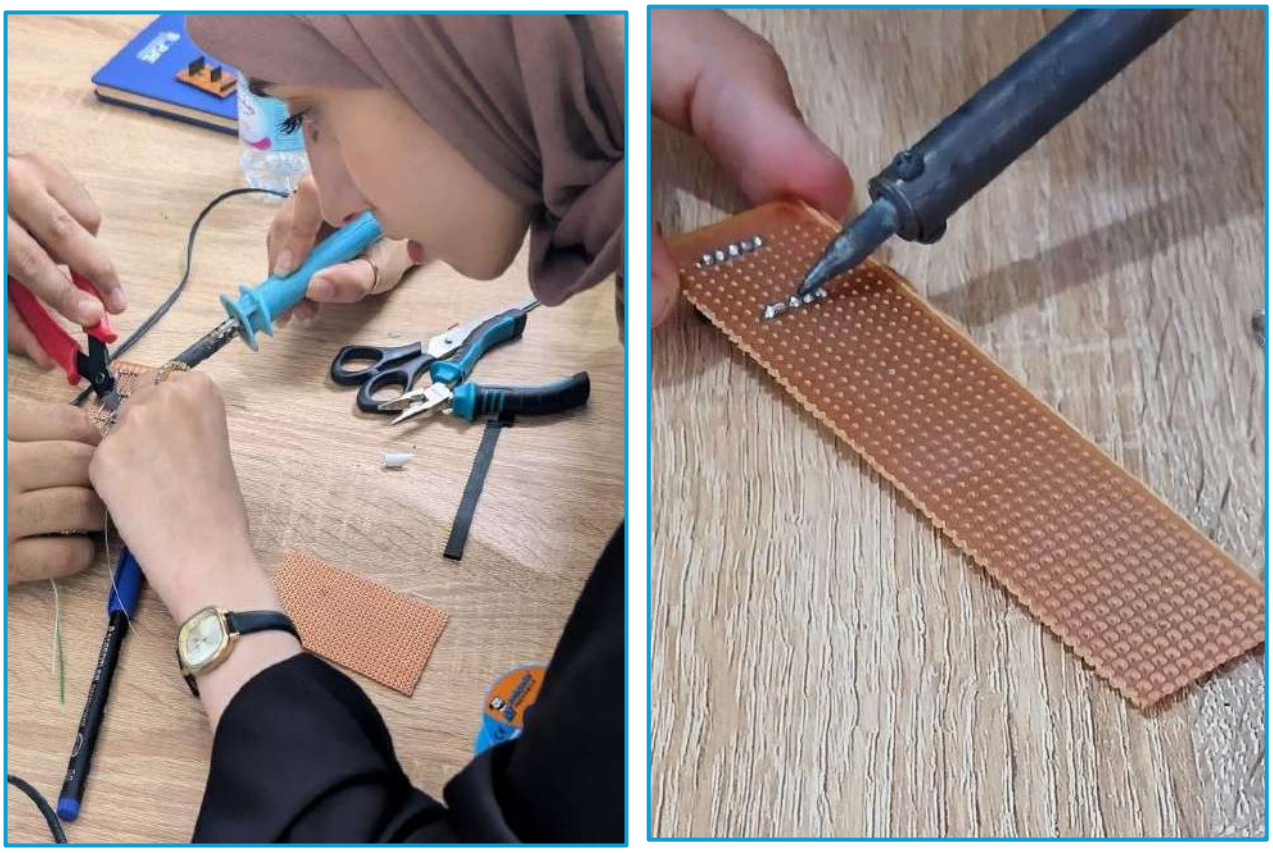


Figure 26Étape de soudage des composants électroniques

Par ailleurs, les composants électroniques n'ont pas été soudés directement sur les cartes PCB. Des connecteurs femelles (**Female Header Connectors**) ont été intégrés afin de rendre les modules amovibles. Cette approche facilite les opérations de maintenance et permet le remplacement rapide d'un composant défectueux sans nécessiter la reconstruction complète de la carte électronique.

3.4.2 Conception 3D du prototype

Après la phase de prise de mesures et la préparation des cartes PCB, la conception tridimensionnelle du prototype a été réalisée afin de développer une structure capable d'intégrer l'ensemble des composants électroniques du système de manière organisée et fonctionnelle.

Les dimensions réelles obtenues lors des mesures précédentes ont été utilisées comme référence principale durant le processus de modélisation. Cette approche a permis de

reproduire avec précision les dimensions des différents modules électroniques et d'assurer leur compatibilité avec la structure finale.

La conception a été réalisée à l'aide du logiciel **SolidWorks**, un outil de conception assistée par ordinateur (CAO) largement utilisé dans les domaines de l'ingénierie et du développement de produits. Le logiciel permet la création de modèles tridimensionnels paramétriques précis, facilitant la modélisation, l'assemblage et la vérification des dimensions avant la fabrication.

Au cours de cette étape, plusieurs éléments ont été pris en considération, notamment l'emplacement des composants, les espaces nécessaires au câblage, les points de fixation, les ouvertures destinées aux interfaces externes (écran OLED, clavier, connecteurs, etc.) ainsi que les contraintes liées à l'impression 3D

3.4.3 Conception et intégration des composants dans le boîtier

Après la modélisation de la structure principale du boîtier, une attention particulière a été accordée à l'organisation interne des différents composants électroniques afin d'assurer une intégration fonctionnelle et stable du système.

Des supports latéraux internes ont été conçus sur les deux côtés du boîtier. Ces structures, réparties en plusieurs compartiments, ont été spécialement réalisées pour maintenir et fixer les cartes PCB contenant les modules thermocouples. Chaque support a été dimensionné selon les mesures réelles prises précédemment afin d'assurer un bon maintien mécanique et d'éviter tout mouvement indésirable des cartes à l'intérieur du système.

Des ouvertures circulaires ont également été ajoutées au niveau des parois latérales afin de permettre le passage et l'organisation des câbles connectés aux thermocouples.

Par ailleurs, une zone centrale a été aménagée pour accueillir la carte **Arduino Mega**. Des supports rectangulaires surélevés ont été intégrés afin de maintenir la carte légèrement surélevée par rapport à la base du boîtier. Cette configuration permet d'éviter le contact direct avec le fond de la structure, facilite l'intégration des connexions électroniques et améliore l'organisation interne.

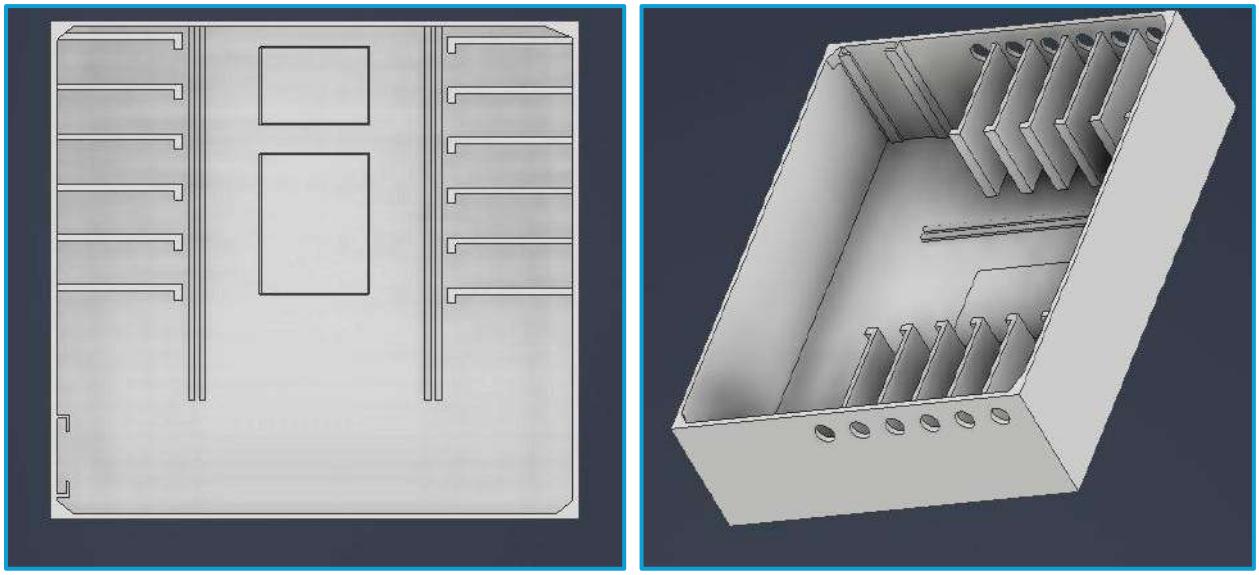


Figure 27odélisation 3D de la structure interne du boîtier

Concernant la partie supérieure du boîtier, plusieurs ouvertures ont été réalisées pour assurer l'accessibilité des interfaces utilisateur et des éléments externes. Une ouverture rectangulaire a été créée pour l'intégration de l'écran OLED, une ouverture spécifique a été prévue pour le module SD Card, tandis qu'une zone encastrée a été conçue pour permettre la fixation et l'intégration du clavier matriciel (Keypad).

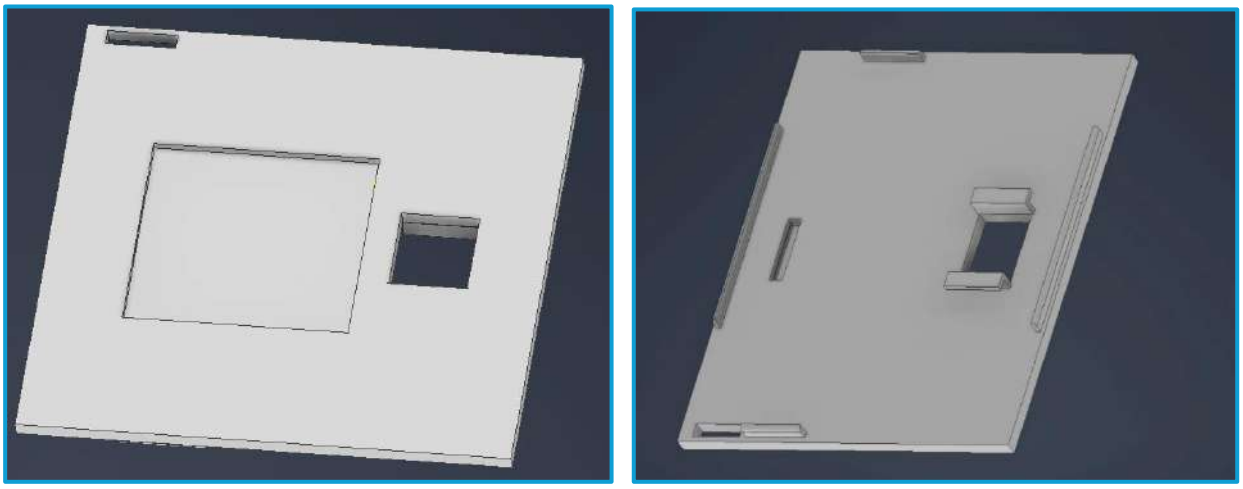


Figure 28Vue de la façade avant du boîtier

Cette organisation interne a permis d'obtenir une structure compacte, stable et adaptée aux contraintes d'assemblage ainsi qu'aux exigences de fabrication par impression 3D.

3.5 Conclusion générale et recommandations

3.5.1 Synthèse des résultats obtenus

Les travaux réalisés dans le cadre de ce projet ont permis de concevoir et de développer un système d'acquisition de données multi-thermocouples à faible coût basé sur la plateforme Arduino. Le système développé a démontré sa capacité à effectuer des mesures de température fiables sur plusieurs voies simultanément, tout en assurant l'acquisition, l'affichage et l'enregistrement des données en temps réel.

Les différents essais fonctionnels ont confirmé le bon fonctionnement de l'ensemble des composants matériels et logiciels intégrés au prototype, notamment :

- les thermocouples de type K,
- les modules MAX6675,
- la carte Arduino,
- l'écran OLED,
- le module RTC,
- le clavier matriciel 4×4,
- ainsi que le système d'enregistrement sur carte SD.

Le prototype final a également montré une bonne stabilité de fonctionnement ainsi qu'une consommation énergétique relativement faible, ce qui constitue un avantage important pour les systèmes embarqués de mesure.

3.5.2 Validation métrologique du système

L'étalonnage réalisé à l'aide d'un thermocouple de référence a permis d'améliorer significativement la précision des mesures obtenues. Les modèles de correction linéaire appliqués à chaque voie ont contribué à réduire les erreurs systématiques et à améliorer la concordance entre les mesures du système développé et celles de l'instrument étalon.

Les résultats expérimentaux ont mis en évidence :

- une bonne justesse des mesures après correction,
- une excellente linéarité caractérisée par des coefficients R^2proches de l'unité,
- une bonne fidélité avec une faible dispersion des mesures,
- ainsi qu'une stabilité satisfaisante sur l'ensemble de la plage de température étudiée.

L'intégration des principes du contrôle qualité et l'analyse des sources d'erreurs selon la méthode des 5M ont renforcé la fiabilité métrologique du système développé.

Ainsi, le système proposé peut être considéré comme une solution expérimentale fiable et économique pour les applications de mesure thermique multipoints.

3.5.3 Recommandations et perspectives d'amélioration

Malgré les performances satisfaisantes obtenues, plusieurs améliorations peuvent être envisagées afin d'augmenter les capacités et les fonctionnalités du système développé.

Parmi les principales perspectives d'évolution, il est possible de citer :

- l'intégration d'une communication sans fil (Wi-Fi ou Bluetooth) pour la transmission des données à distance,
- l'augmentation du nombre de voies de mesure,
- l'utilisation de modules de conversion plus précis,
- l'amélioration de l'interface utilisateur à travers un écran graphique plus performant,
- ainsi que l'intégration d'un système de supervision sur ordinateur ou plateforme cloud.

De plus, une perspective particulièrement intéressante consiste à alimenter le système à l'aide de l'énergie solaire à travers l'intégration d'un panneau photovoltaïque et d'un système de stockage par batterie. Cette amélioration permettrait de rendre le dispositif totalement autonome énergétiquement, notamment pour les applications de surveillance thermique dans les zones isolées ou les installations industrielles extérieures.

Cette idée s'inscrit dans une approche de développement durable et trouve son inspiration dans les technologies observées lors du stage effectué au sein de Zergoun Green Energy, spécialisé dans les solutions photovoltaïques et les systèmes énergétiques renouvelables.

3.5.4 Applications futures

Grâce à son faible coût, sa modularité et ses performances satisfaisantes, le système développé présente un fort potentiel d'utilisation dans plusieurs domaines.

Dans le domaine pédagogique, il peut être utilisé dans :

- les laboratoires de métrologie,
- les travaux pratiques d'instrumentation,
- les systèmes embarqués,
- ainsi que les projets de formation en acquisition de données.

Dans le domaine industriel, ce système peut être exploité pour :

- la surveillance thermique multipoints,
- le contrôle de procédés industriels,
- le suivi des installations énergétiques,
- les applications environnementales,

- ainsi que les systèmes expérimentaux nécessitant une acquisition de température fiable et économique.

En conclusion, ce travail démontre qu'un système embarqué à faible coût basé sur Arduino peut constituer une solution efficace, fiable et adaptable pour les applications de mesure thermique, à condition d'être associé à une démarche rigoureuse d'étalonnage, de validation métrologique et de contrôle qualité

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, les performances du système d'acquisition de données développé ont été analysées et validées à travers plusieurs essais expérimentaux et évaluations métrologiques. Les résultats obtenus ont démontré que le système basé sur Arduino est capable d'assurer une acquisition fiable et stable des températures à l'aide de plusieurs thermocouples de type K, tout en offrant une solution économique et flexible adaptée aux applications pédagogiques et expérimentales.

Les tests fonctionnels ont confirmé le bon fonctionnement de l'ensemble des composants du prototype, notamment les capteurs thermocouples, les modules d'acquisition, l'écran d'affichage, les boutons de commande ainsi que le système d'enregistrement sur carte SD. Le système a montré une bonne rapidité de réponse et une consommation énergétique relativement faible, ce qui constitue un avantage important pour les applications portables et autonomes.

Les résultats de calibration ont mis en évidence une bonne corrélation entre les mesures fournies par le système développé et celles obtenues à l'aide d'un appareil professionnel de référence. Les courbes d'étalonnage obtenues présentent une réponse quasi linéaire sur la plage de température étudiée, avec des erreurs de mesure relativement faibles et acceptables dans le cadre d'un système low-cost . L'analyse des incertitudes a également montré que la précision globale dépend principalement des performances des thermocouples, du convertisseur analogique-numérique et des conditions environnementales.

L'étude de répétabilité a révélé une stabilité satisfaisante des mesures lors des essais successifs, confirmant ainsi la fiabilité du système proposé. Toutefois, certaines limitations ont été observées, notamment la sensibilité aux perturbations électriques, la dérive thermique des thermocouples et les limites de résolution du convertisseur ADC intégré à l'Arduino.

Par ailleurs, l'intégration d'un boîtier imprimé en 3D a permis d'améliorer la protection mécanique, l'organisation interne des composants et l'ergonomie générale du dispositif. L'interface utilisateur développée offre une utilisation simple et intuitive, facilitant ainsi l'exploitation du système dans un environnement académique ou de laboratoire.

Enfin, cette étude confirme qu'il est possible de concevoir un système DAQ multi-thermocouple à faible coût capable de fournir des mesures exploitables en métrologie et instrumentation. Le prototype développé représente une alternative intéressante aux systèmes commerciaux coûteux, particulièrement dans les laboratoires universitaires et les travaux pédagogiques.

Comme perspectives futures, plusieurs améliorations peuvent être envisagées, telles que l'intégration d'une communication sans fil, l'augmentation du nombre de voies de mesure, l'utilisation de convertisseurs ADC de plus haute résolution, ainsi que le développement d'une interface graphique avancée pour la visualisation et l'analyse des données en temps réel

Chapitre3

Conclusion générale

Dans ce travail, un système de mesure à faible coût et open source basé sur la plateforme Arduino et les technologies de l'Internet des objets a été conçu et développé afin d'acquérir et de traiter des données de température ainsi que d'autres paramètres environnementaux avec précision et flexibilité. L'objectif principal de ce système est de proposer une alternative économique aux équipements de mesure commerciaux, tout en maintenant un niveau de précision et de fiabilité adapté aux applications de laboratoire et industrielles.

Les résultats expérimentaux ont montré que le système développé est capable d'atteindre des performances proches de celles des dispositifs de mesure industriels en termes de précision et de stabilité, tout en offrant la possibilité de fonctionner dans différents environnements tels que les laboratoires et les procédés industriels. Le système a également démontré sa capacité à enregistrer les données en temps réel, à les stocker et à les transmettre à distance via différentes interfaces de communication, renforçant ainsi le concept des systèmes connectés

Par ailleurs, l'architecture ouverte et évolutive du système a permis l'intégration de plusieurs capteurs et protocoles de communication au sein d'une seule plateforme, ce qui le rend adapté aux applications éducatives, de recherche et industrielles. De plus, son faible coût par rapport aux systèmes conventionnels le rend particulièrement intéressant pour les laboratoires disposant de ressources limitées.

En conclusion, ce système représente une avancée importante vers le développement de systèmes de mesure intelligents, économiques et flexibles. Des améliorations futures pourraient inclure l'intégration de communications sans fil, l'optimisation de la précision de calibration, ainsi que l'extension du nombre de capteurs supportés.

Références

[1] B. Aneja, S. Singh, U. Chandna, and V. Maheshwari, “REVIEW OF TEMPERATURE MEASUREMENT AND CONTROL,” 2014. [Online]. Available: http://www.ijarse.comwww.ijarse.com

[2] L. Shi, N. Zhang, L. Li, S. Ding, W. Li, and K. Li, “Printed flexible temperature sensors: principles, materials, processes, and applications,” Apr. 01, 2025, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.apmt.2025.102665.

[3] X. Cai, “The development and diverse applications of temperature sensors in different temperature environments,” *Applied and Computational Engineering*, vol. 37, no. 1, pp. 141–148, Feb. 2024, doi: 10.54254/2755-2721/37/20230493.

[4] R. Septiana, I. Roihan, and R. A. Koestoer, “Testing a calibration method for temperature sensors in different working fluids,” *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, vol. 68, no. 2, pp. 84–93, 2020, doi: 10.37934/ARFMTS.68.2.8493.

[5] E. C. Njoku, V. O. Ehile, and O. A. Egonu, “Development of an Arduino-based Data Acquisition System for a Mid-sized Wind Tunnel,” *Journal of Engineering Research and Reports*, vol. 27, no. 9, pp. 1–9, Aug. 2025, doi: 10.9734/jerr/2025/v27i91621.

[6] J. Wu, “A Basic Guide to Thermocouple Measurements,” 2023. [Online]. Available: www.ti.com

[7] O. Nosko and Y. Tsybrii, “Inverse determination of sliding surface temperature based on measurements by thermocouples with account of their thermal inertia,” *Tribol. Int.*, vol. 164, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.triboint.2021.107200.

[8] J. Wu, “K-Type Thermocouple Measurement Circuit With Precision ADC,” 2024. [Online]. Available: www.ti.com

[9] M. J. Koshkouei, N. Fereshteh Saniee, and A. Barai, “Thermocouple selection and its influence on temperature monitoring of lithium-ion cells,” *J. Energy Storage*, vol. 92, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.est.2024.112072.

[10] F. dos A. Rodrigues Campos, K. F. Ávila Okada, L. Rosa Ribeiro da Silva, Á. Rocha Machado, and H. Otaguro, “Quantification of uncertainty in temperature measurements with thermocouple and Arduino® compatible hardware,” Associacao Brasileira de Engenharia e Ciencias Mecanicas - ABCM, Dec. 2020. doi: 10.26678/abcm.encit2020.cit20-0792.

[11] B. Rosti, A. Jankovic, F. Goia, H. M. Mathisen, and G. Cao, “Design and performance analysis of a low-cost monitoring system for advanced building envelopes,” *Build. Environ.*, vol. 269, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.buildenv.2024.112344.

Références

[12] Y. Zahraoui, T. Korotko, S. Mekhilef, and I. Alhamrouni, “Assessment of Data Acquisition System for Forecasting Temperature and Solar Irradiation,” in *2023 International Conference on Engineering Technology and Technopreneurship, ICE2T 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023, pp. 408–413. doi: 10.1109/ICE2T58637.2023.10540516.

[13] “Guide on using thermocouple calibrator.”

[14] “General Signal Conditioning Guide General Signal Conditioning Guide An Introduction to the Operation of ICP ® & Charge Output Sensors and Instrumentation G 0 0 0 1 E.”

[15] “General Signal Conditioning Guide General Signal Conditioning Guide An Introduction to the Operation of ICP ® & Charge Output Sensors and Instrumentation G 0 0 0 1 E.”

[16] S. Sai Prasanna Lakshmi Mudiki and Y. Sai Yamuna, “ARDUINO BASED SECURE DIGITAL (SD) DATA LOGGER.”

[17] H. K. Kondaveeti, N. K. Kumaravelu, S. D. Vanambathina, S. E. Mathe, and S. Vappangi, “A systematic literature review on prototyping with Arduino: Applications, challenges, advantages, and limitations,” May 01, 2021, *Elsevier Ireland Ltd*. doi: 10.1016/j.cosrev.2021.100364.

[18] N. de O. Pacheco, G. Batista, A. F. Estuqui, and L. da Silva, “Low-cost Arduino-based Temperature Measuring System,” Mar. 08, 2018. doi: 10.20944/preprints201803.0067.v1.

[19] S. Kumar *et al.*, “A Low-Cost Multi-Sensor Data Acquisition System for Fault Detection in Fused Deposition Modelling,” *Sensors*, vol. 22, no. 2, Jan. 2022, doi: 10.3390/s22020517.

[20] X. Geng *et al.*, “A mobile greenhouse environment monitoring system based on the internet of things,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 135832–135844, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2941521.

[21] K. Niehaus and A. Westhoff, “An open-source data acquisition system for laboratory and industrial scale applications,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 34, no. 2, Feb. 2023, doi: 10.1088/1361-6501/ac9994.

[22] “Development of an Arduino-Based Data Acquisition System for a Mid-Sized Wind Tunnel.”

[23] J. Rekayasa Material, M. dan Energi, K. Umurani, A. Rudi Nasution, and Ms. Zufri, “Design And Implementation Of Temperature Measuring Device Using Max6675 And Thermocouple On Wet Cooling Tower,” vol. 7, no. 2, pp. 335–342, 2024, doi: 10.30596/rmme.v7i2.19801.

Références

[24] M. Kumar and R. Scholar, “Monitoring of 6 Channel Temperature Acquisition System for Heat Transfer using Max 6675 and Arduino Interface,” JETIR, 2019. [Online]. Available: www.jetir.org

[25] B. Festus, A. K. D, and O. S. S, “Design of an Instrumentation Unit with Datalogger for Heat Flow Measurement in Solid Metals.”

[26] A. Ahmadi, A. Setiawan, G. Gunawati, and R. Dewi, “Calibration of Arduino-based Temperature Sensors for Parabolic Solar Collectors with Phase Change Material,” *MOTIVECTION : Journal of Mechanical, Electrical and Industrial Engineering*, vol. 5, no. 3, pp. 547–556, Oct. 2023, doi: 10.46574/motivection.v5i3.220.

[27] O. Panagopoulos and A. A. Argiriou, “Low-Cost Data Acquisition System for Solar Thermal Collectors,” *Electronics (Switzerland)*, vol. 11, no. 6, Mar. 2022, doi: 10.3390/electronics11060934.

[28] M. Nakkir and R. Efendi, “Pengukuran Suhu Air Menggunakan Data Logger Berbasis Arduino,” *Jurnal Mekanova : Mekanikal, Inovasi dan Teknologi*, vol. 9, no. 1, 2023.

[29] A. Matei, “c,” 2024.

[30] H. Louw, A. Broekman, and E. Kearsley, “MADV-DAQ: Multi-channel Arduino-based differential voltage data acquisition system for remote strain measurement applications Specifications table”, doi: 10.17605/OSF.IO/TK8Z9.

[31] A. J. Oh, C. J. Stoddard, C. Queenan, and S. Oh, “Efficient and affordable thermoelectric measurement setup using Arduino and LabVIEW for education and research.”

[32] M. U. Akhtar and M. T. Iqbal, “Development and Evaluation of an Arduino-Based Data Logging System Integrated with Microsoft Excel for Monitoring On-Grid Photovoltaic Systems,” *European Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 8, no. 3, pp. 29–37, Jun. 2024, doi: 10.24018/ejece.2024.8.3.622.

[33] L. Kumar, B. Reddy, V. Sai, and G. Prasad, “Arduino-Based Ultrasonic Distance Measurement and Analysis System.” [Online]. Available: http://www.ijert.org

[34] X. Liang, M. Cai, M. Ma, X. Lu, P. Fu, and K. Li, “FPGA-based multi-channel thermocouple temperature measurement system,” in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics, 2022. doi: 10.1088/1742-6596/2290/1/012038.

[35] G. C. de Oliveira, M. P. Porto, and R. A. M. Ferreira, “Design of a double-gradient scanner apparatus to assess the uncertainty component associated with inhomogeneity in flexible wire thermocouples,” *Measurement (Lond).*, vol. 256, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.measurement.2025.118184.

Références

[36] A. Daoud, “An Arduino-based low-cost hardware for temperature control,” *WSEAS Transactions on Systems*, vol. 20, pp. 54–66, 2021, doi: 10.37394/23202.2021.20.8.

[37] st MOHREM Abdelkrim nd CHETATE Boukhemis and rd GUIA Houssem Eddine, “ISMRE2018/XXXX-ALGERIA Design and implementation of Arduino based system for temperature and current monitoring with data logging.”

[38] R. T. Setyawan, S. Umira, I. Kurniawan, and E. Muthoriq, “Distributed temperature sensing and fault-tolerant logging for PVC-based smoke condensers using dual-channel type-K sensors,” *Disseminating Information on the Research of Mechanical Engineering-Jurnal Polimesin*, vol. 23, no. 4, 2025, [Online]. Available: http://e-jurnal.pnl.ac.id/polimesin

[39] A. V. Student, “‘ARDUINO BASED DATA LOGGER FOR ENVIRONMENTAL MONITORING.’”

[40] R. A. Kusuma, R. Radi, and A. D. Saputro, “Arduino-Based Data Acquisition Device Design for Specific Heat Determination of Hot Vegetable Oil,” *Jurnal Teknik Pertanian Lampung (Journal of Agricultural Engineering)*, vol. 12, no. 1, p. 118, Mar. 2023, doi: 10.23960/jtep-l.v12i1.118-128.

[41] A. Wankhede and S. P. Gaikwad, “INDIAN JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY 4-Channel Concrete Temperature Data Acquisition System Using GPRS data Network,” *Wankhede & Gaikwad / Indian Journal of Science and Technology*, vol. 14, no. 18, pp. 1516–1524, 2021, doi: 10.17485/IJST/v14i18.296.

[42] S. W. Suciyati, M. S. Hidayatullah, and G. A. Pauzi, “An Analysis of Data Acquisition System of Temperature, Oxygen, and Carbon Dioxide in Refrigerator with Arduino Mega 2560,” *Jurnal Ilmiah Pendidikan Fisika Al-Biruni*, vol. 10, no. 1, p. 119, Apr. 2021, doi: 10.24042/jipfalbiruni.v10i1.7452.

[43] A. Matei, “Arduino Data Acquisition System for Monitoring Quality of Life Parameters in a Room,” 2024.

[44] A. Ahmadi, A. Setiawan, G. Gunawati, and R. Dewi, “Calibration of Arduino-based Temperature Sensors for Parabolic Solar Collectors with Phase Change Material,” *MOTIVECTION : Journal of Mechanical, Electrical and Industrial Engineering*, vol. 5, no. 3, pp. 547–556, Oct. 2023, doi: 10.46574/motivection.v5i3.220.

[45] E. B. Lu, “Guide pour l’estimation de l’incertitude de mesure Emmanuelle BOUDINET.”

[46] Arduino Documentation, “Hardware Fundamentals,”

https://docs.arduino.cc/learn/. Accessed : 29 /03/2026

Références

[47] DwyerOmega, “Introduction to Thermocouples and Thermocouple Assemblies,” . https://www.dwyeromega.com/en-us/temperature/c/thermocouple-surface-sensors. Accessed : 30 /03/2026

[48] Maxim Integrated, “MAX6675 Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter Datasheet”.

[49] Arduino Documentation, “SD Library,”.

https://docs.arduino.cc/libraries/sd/. Accessed : 29 /03/2026

[50] Adafruit, "Adafruit SSD1306 Library,"

https://github.com/adafruit/Adafruit_SSD1306 . Accessed : 29 /03/2026

[51] Dassault Systèmes, “SOLIDWORKS Introduction and Fundamentals Guide,” pages 9-23.

[52] SOLIDWORKS, “Modélisation 3D, Assemblages et Mises en plan,” pages 15-32.

[53] A. Kumar et al., “Polymers – 3D Printing Technologies,” pages 9-26.

[54] Materials in Additive Manufacturing (Polymers), pages 9-10.

[55] SOLIDWORKS Help, “Assemblies & Interference Detection,” https://help.solidworks.com/2023/english/SolidWorks/sldworks/c_Interference_Detection.htm. Accessed : 04/04/2026

[56] Maxim Integrated, "DS3231: Extremely Accurate I2C-Integrated RTC/TCXO/Crystal Datasheet"

[57] Arduino IDE Documentation — Official software guide

https://www.arduino.cc/en/software Accessed : 05/04/2026

[58] Arduino Sketch Structure (setup/loop)

https://docs.arduino.cc/learn/programming/sketches/ Accessed : 05/04/2026

[59] Arduino Libraries Reference (SPI, Wire, SD, OLED)

https://docs.arduino.cc/libraries/ Accessed : 06/04/2026

[60] EEPROM & RTC Arduino Documentation

https://docs.arduino.cc/learn/programming/memory/ Accessed : 06/04/2026

[61] Arduino Variables & Data Types

https://docs.arduino.cc/learn/programming/variables/ Accessed : 09/04/2026

[62] Arduino Digital & Analog Pins Guide

Références

https://docs.arduino.cc/learn/microcontrollers/digital-pins/ Accessed : 11/04/2026

[63] Arduino Serial Communication

https://docs.arduino.cc/learn/communication/serial/ Accessed : 11/04/2026

[64] Embedded Systems Programming (modular functions concept)

https://docs.arduino.cc/learn/programming/functions/ Accessed : 15/04/2026

[65] Arduino Timing Functions (millis / delay)

https://docs.arduino.cc/learn/programming/millis/ Accessed : 19/04/2026

[66] Arduino Memory Architecture (Flash / SRAM / EEPROM)

https://docs.arduino.cc/learn/programming/memory/ Accessed : 22/04/2026

Références

annexes