

Université d'Aïn Témouchent- Belhadj Bouchaïb
Faculté des Sciences et de Technologie
Département d'Électronique et des Télécommunications



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER EN ÉLECTRONIQUE

Spécialité : Instrumentation

Filière : Électronique

Domaine : Sciences et Technologies

Thème

Etude et Réalisation d'un Thermomètre sans Contact

Présenté par :

Mr. FESSIOU Said Sabeur

Mr. EL HADJ ALI Mohammed El Amin

Devant le jury composé de :

Dr BOUKHEBZA Abdelkader	MCA	UATBB	Président
Dr BENDIMERAD karim	MAA	UATBB	Examineur
Dr. OMARI Tahar	MCA	UATBB	Encadreur

Année universitaire : 2025 / 2026

Dédicace

Nous dédions ce modeste travail

À nos très chers parents, En témoignage de notre profond amour, de notre reconnaissance et de notre immense gratitude pour tous les sacrifices qu'ils ont consentis afin de nous assurer les meilleures conditions d'étude et de réussite. Merci pour votre soutien indéfectible, vos encouragements constants et vos précieuses prières qui nous ont accompagnés tout au long de notre parcours universitaire. À nos frères et sœurs, Pour leur affection, leur soutien et leurs encouragements. À nos amis et collègues, Avec qui nous avons partagé de précieux moments durant nos années d'études. À tous nos enseignants, Qui ont contribué à notre formation et à notre épanouissement académique. Enfin, à toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Nous dédions ce mémoire avec respect et gratitude.

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude envers Dieu Tout-Puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'Il nous a accordées tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nos sincères remerciements vont à notre encadreur, Dr Omari Tahar, pour sa disponibilité, ses orientations précieuses, sa patience et ses conseils avisés qui ont permis de mener à bien ce travail, depuis le choix du sujet jusqu'à sa finalisation.

Nous adressons également nos sincères remerciements aux membres du jury de soutenance, qui ont bien voulu consacrer de leur temps à la lecture et à l'évaluation de ce mémoire :

- Dr BOUKHEBZA Abd elkader— Présidente du jury.

- Dr BENDIMERAD Karim — Examineur.

Nous remercions également l'ensemble des enseignants du Département de Génie Électrique et Électronique pour la qualité de la formation qu'ils nous ont dispensée tout au long de notre parcours universitaire.

Nous adressons aussi nos remerciements au personnel du laboratoire pour leur aide technique lors de la phase de réalisation pratique, ainsi qu'à toute personne ayant contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce mémoire.

Enfin, nous exprimons notre reconnaissance à nos familles et nos proches pour leur soutien moral et leurs encouragements constants tout au long de nos études.

Résumé

La mesure de température occupe une place centrale dans de nombreux domaines : médecine, industrie, agroalimentaire ou domotique. Les méthodes de mesure par contact, bien qu'éprouvées, présentent des limites lorsque la cible est inaccessible, fragile, en mouvement ou lorsqu'un risque de contamination doit être évité. Ce mémoire porte sur l'étude et la réalisation d'un thermomètre sans contact basé sur la détection du rayonnement infrarouge émis par tout corps dont la température est supérieure au zéro absolu.

Le premier chapitre rappelle les bases physiques du rayonnement thermique (lois de Planck, de Stefan-Boltzmann et de Wien), la notion d'émissivité et les principaux types de capteurs infrarouges utilisés en thermométrie sans contact. Le deuxième chapitre détaille la conception électronique du système réalisé, organisé autour d'un capteur infrarouge à thermopile MLX90614, d'un microcontrôleur Arduino assurant l'acquisition et le traitement, et d'un afficheur LCD couplé à une alerte sonore et visuelle en cas de dépassement d'un seuil de température. Le troisième chapitre présente la réalisation pratique du prototype, le protocole expérimental mis en place ainsi que les résultats obtenus, comparés à ceux d'un thermomètre à contact de référence.

Les résultats montrent que le prototype réalisé permet une mesure rapide et sans contact de la température, avec un écart moyen limité par rapport à la mesure de référence, tout en mettant en évidence l'influence de l'émissivité, de la distance et de l'environnement sur la précision de la mesure.

Mots-clés : thermométrie sans contact, rayonnement infrarouge, thermopile, MLX90614, Arduino, émissivité, loi de Stefan-Boltzmann.

Abstract

Temperature measurement plays a central role in many fields, including medicine, industry, the food sector and home automation. Contact-based measurement methods, although well established, show limitations when the target is inaccessible, fragile, moving, or when a risk of contamination must be avoided. This dissertation addresses the study and realization of a non-contact thermometer based on the detection of the infrared radiation emitted by any body whose temperature is above absolute zero.

The first chapter reviews the physical fundamentals of thermal radiation (Planck's, Stefan-Boltzmann's and Wien's laws), the notion of emissivity, and the main types of infrared sensors used in non-contact thermometry. The second chapter details the electronic design of the realized system, built around an MLX90614 infrared thermopile sensor, an Arduino microcontroller in charge of acquisition and processing, and an LCD display combined with an audible and visual alarm triggered when a temperature threshold is exceeded. The third chapter presents the practical realization of the prototype, the experimental protocol that was set up, and the results obtained, compared with those of a reference contact thermometer.

The results show that the realized prototype allows fast, non-contact temperature measurement, with a limited average deviation from the reference measurement, while highlighting the influence of emissivity, distance and environment on measurement accuracy.

Keywords: non-contact thermometry, infrared radiation, thermopile, MLX90614, Arduino,

الملخص

تحتل عملية قياس درجة الحرارة مكانة أساسية في العديد من المجالات مثل الطب، الصناعة، الصناعات الغذائية، والأنظمة الذكية المنزلية. وعلى الرغم من أن طرق القياس بالتلامس أثبتت فعاليتها، إلا أنها تواجه بعض القيود عندما يكون الجسم المراد قياسه غير قابل للوصول، أو هشاً، أو متحركاً، أو عندما يكون من الضروري تجنب خطر التلوث. يتناول هذا المذكرة دراسة وإنجاز مقياس حرارة بدون تلامس يعتمد على كشف الإشعاع تحت الأحمر المنبعث من أي جسم تكون درجة حرارته أعلى من الصفر المطلق.

يعرض الفصل الأول الأسس الفيزيائية للإشعاع الحراري، بما في ذلك قوانين بلانك، وستيفان-بولتزمان، وفين، إضافة إلى مفهوم معامل الإصدار (الانبعاثية)، والأنواع الرئيسية لمستشعرات الأشعة تحت الحمراء المستخدمة في قياس درجة الحرارة بدون تلامس. أما الفصل الثاني فيتناول بالتفصيل التصميم الإلكتروني للنظام المنجز، والذي يعتمد على مستشعر الأشعة تحت الحمراء من نوع MLX90614، ومتحكم دقيق من نوع Arduino مسؤول عن اكتساب البيانات ومعالجتها، بالإضافة إلى شاشة عرض LCD مرتبطة بتنبيه صوتي وضوئي عند تجاوز حد معين لدرجة الحرارة. ويعرض الفصل الثالث الإنجاز العملي للنموذج الأولي، والبروتوكول التجريبي المعتمد، والنتائج المتحصل عليها، مع مقارنتها بنتائج مقياس حرارة تلامسي مرجعي.

أظهرت النتائج أن النموذج المنجز يسمح بقياس سريع لدرجة الحرارة وبدون تلامس، مع وجود متوسط انحراف محدود مقارنة بالقياسات المرجعية، كما أبرزت الدراسة تأثير كل من معامل الإصدار، والمسافة، والظروف البيئية على دقة القياس.

الكلمات المفتاحية: قياس درجة الحرارة بدون تلامس، الإشعاع تحت الأحمر، الترموبيل MLX90614، أردوينو، معامل الإصدار، قانون ستيفان-بولتزمان.

Table des matières

Dédicace	
Remerciements	i
Résumé	ii
Abstract	iii
المخلص	iv
Table des matières	v
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	viii
Liste des abréviations et symboles	ix
Introduction générale	1
CHAPITRE 1	4
1.1 Introduction	4
1.2 Rayonnement thermique et spectre infrarouge	5
1. 3 Le Rayonnement du Corps Noir	6
1.4. Notion d'Émissivité	8
1.5. Principe de la mesure de température sans contact	10
1.5.1 Avantages de la mesure sans contact	10
1.5.2 Limites et sources d'erreur	10
1.6. Types de capteurs infrarouges	10
1.6.1 Thermopiles	10
1.6.2 Bolomètres et microbolomètres	11
1.6.3 Photodétecteurs quantiques	11
1.6.4 Capteurs infrarouges intégrés	11
1.7. Conclusion du chapitre	12
CHAPITRE 2	13
2.1 Introduction	13
2.2 Cahier des charges fonctionnel	13
2.3 Architecture générale du système	13
2.3.1 Capteur infrarouge	14
2.3.2 Unité microcontrôleur	15
2.3.8 Alimentation	20
2.4 Communication entre les différents éléments	20

2.5 Schéma de câblage et liste des composants	22
2.6 Conclusion du chapitre	23
CHAPITRE 3	24
3.1 Introduction	24
3.2 Réalisation du prototype	24
3.3 Programmation du système.....	24
3.4 Protocole expérimental.....	26
3.5 Analyse statistique des écarts	28
3.6 Comparaison avec le thermomètre à contact et discussion	29
3.7 Limites et perspectives d'amélioration	30
3.8 Conclusion du chapitre.....	31
Conclusion générale.....	32
Références bibliographiques.....	34
Annexes.....	35
Annexe A — Code source du programme Arduino.....	3

Liste des figures

Figure 1.1: Expérience historique de William Herschel (1800) mettant en évidence le rayonnement infrarouge au-delà du spectre visible.	5
Figure 1.2: Spectre électromagnétique et zoom sur la bande infrarouge	6
Figure 1.3 : Courbes de luminance spectrale du corps noir selon la loi de Planck pour différentes températures	7
Figure 1.4 : Modélisation physique de la cavité d'un corps noir (A) et comparaison du spectre d'émission d'un corps réel par rapport au corps noir idéal (B).	9
Figure 1.5 : Schéma synoptique du thermomètre infrarouge sans contact	14
Figure 2.1: Image réelle d'un capteur MLX90614	14
Figure 2.2: Image réelle d'un Arduino Nano	15
Figure 2.3: Afficheur OLED 0.96 pouce	16
Figure 2.4 : Module de transmission Bluetooth HC-05	17
Figure 2.5: Buzzer actif 5v	18
Figure 3.1: Bouton poussoir.	19
Figure 3.2 :Communication entre les différents éléments	22
Figure 3.3 : Organigramme du programme de mesure	26
Figure 3.4 : Expérience du test de notre thermomètre avec un thermomètre de référence	27
Figure 3.5 : Comparaison des mesures entre le thermomètre IR et le thermomètre à contact	28

Liste des tableaux

Tableau 1.1 — Émissivité de quelques matériaux courants	9
Tableau 1.2 — Comparaison des principaux types de capteurs de température	11
Tableau 2.1 — Cahier des charges fonctionnel du système	13
Tableau 2.2 — Caractéristiques principales du capteur MLX90614	15
Tableau 2.3 — Liste des composants utilisés	22
Tableau 3.1 — Résultats de comparaison entre le thermomètre IR et le thermomètre à contact	28
Tableau 3.2 — Indicateurs statistiques de l'erreur de mesure	29

Liste des abréviations et symboles

- IR : Infrarouge
- LWIR : Long Wave Infra-Red (infrarouge à grande longueur d'onde, 8-14 μm)
- MWIR : Medium Wave Infra-Red (infrarouge à moyenne longueur d'onde)
- FOV : Field Of View (champ de vision du capteur)
- I2C : Inter-Integrated Circuit (bus de communication série synchrone)
- LCD : Liquid Crystal Display (afficheur à cristaux liquides)
- ASIC : Application-Specific Integrated Circuit
- MCU : Microcontroller Unit (microcontrôleur)
- PWM : Pulse Width Modulation (modulation de largeur d'impulsion)
- ϵ (epsilon) : émissivité d'une surface
- σ (sigma) : constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)
- h : constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$)
- k : constante de Boltzmann ($1,381 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$)
- T : température absolue, exprimée en kelvin (K)
- λ : longueur d'onde
- MAE : Mean Absolute Error (erreur absolue moyenne)
- RMSE : Root Mean Square Error (erreur quadratique moyenne)

Introduction générale

1. Contexte et Problématique

La mesure de la température est l'une des grandeurs physiques les plus fondamentales et les plus couramment mesurées dans notre quotidien comme dans l'industrie. Qu'il s'agisse de surveiller l'état de santé d'un patient, de contrôler la qualité d'un process industriel, d'assurer la sécurité d'un équipement ou simplement de réguler le confort d'un habitat, la température constitue un indicateur incontournable de l'état d'un système.

Historiquement, les instruments de mesure de la température reposent sur le principe du contact physique. Les thermomètres à résistance (Pt100), les thermocouples ou les thermistances doivent être mis en contact intime avec la surface ou le milieu dont on souhaite connaître la température. Bien que ces technologies offrent une excellente précision et une grande fiabilité, elles présentent des limitations majeures dans de nombreuses situations. Premièrement, le temps de réponse est souvent long en raison de l'inertie thermique du capteur et de la masse à chauffer. Deuxièmement, le contact physique est incompatible avec des surfaces en mouvement, des objets dangereux (haute tension, produits chimiques agressifs) ou des zones difficilement accessibles. Enfin, dans le domaine médical et agroalimentaire, le contact répété de la sonde avec différents sujets ou produits soulève des problèmes d'hygiène et de risque de contamination croisée, comme l'a dramatiquement illustré la pandémie de COVID-19 qui a mis en exergue la nécessité de dispositifs de contrôle thermique rapides, fiables et sans contact.

Face à ces contraintes, la thermométrie infrarouge s'est imposée comme une alternative de choix. Basée sur les lois fondamentales du rayonnement du corps noir [1] [2] [3], elle permet de déterminer la température d'un objet en mesurant l'énergie radiative qu'il émet dans le domaine infrarouge du spectre électromagnétique [4] [5]. L'avantage est immédiat : la mesure est instantanée (quelques millisecondes à quelques secondes), elle n'altère pas la surface mesurée et elle élimine tout risque de contamination. Cette technologie a connu un essor considérable ces dernières années, portée par la démocratisation des composants électroniques (capteurs MEMS, microcontrôleurs) et la baisse de leurs coûts. Aujourd'hui, les thermomètres infrarouges sont présents dans les aéroports, les hôpitaux, les usines, les laboratoires et même dans les foyers.

Cependant, la mise en œuvre d'un thermomètre sans contact n'est pas triviale. Elle nécessite une compréhension approfondie des phénomènes physiques mis en jeu (émissivité [6] [7], rayonnement ambiant, loi de Stefan-Boltzmann [8]), une conception électronique soignée pour extraire un signal très faible du bruit de fond, et une attention particulière à la métrologie pour garantir la précision et

la reproductibilité des mesures. C'est dans ce contexte que se situe notre projet de recherche et de réalisation.

2. Objectifs du Travail

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans une démarche d'étude, de conception et de réalisation pratique d'un thermomètre infrarouge sans contact. Notre objectif principal est de maîtriser l'ensemble de la chaîne de mesure, depuis le rayonnement émis par la cible jusqu'à la restitution numérique de la température sur un écran d'affichage. Pour ce faire, nous avons décliné notre travail en plusieurs objectifs spécifiques et complémentaires :

Objectif scientifique et théorique : Il s'agit d'établir les fondements physiques rigoureux de la thermométrie infrarouge. Nous étudierons en détail les lois de Planck, de Stefan-Boltzmann et de Wien, ainsi que la notion cruciale d'émissivité, qui est la principale source d'incertitude dans ce type de mesure. Cette étape est indispensable pour interpréter correctement les résultats expérimentaux et pour comprendre les limites inhérentes à la technologie.

Objectif technologique et de conception : Sur la base des principes théoriques, nous définirons une architecture électronique optimale. Le choix des composants est déterminant : nous avons retenu le capteur infrarouge MLX90614 de Melexis, réputé pour sa précision, son intégration et sa facilité d'emploi, associé à une carte à microcontrôleur Arduino pour le traitement du signal et la gestion des interfaces (affichage LCD, communication). Nous décrirons en détail le schéma électrique, les protocoles de communication (notamment le bus I2C) et le logiciel embarqué.

Objectif expérimental et métrologique : L'aboutissement de notre travail est la réalisation d'un prototype fonctionnel. Nous mettrons en place un protocole de test rigoureux afin de caractériser les performances de notre dispositif. Nous comparerons systématiquement ses mesures avec celles fournies par un thermomètre de référence dans diverses conditions (température de la cible, distance de mesure, nature des surfaces). Cette phase nous permettra de quantifier la précision, la répétabilité et les limites de notre prototype, et de proposer des pistes d'amélioration.

3. Structure du Mémoire

Afin de répondre de manière cohérente et progressive aux objectifs fixés, ce mémoire est structuré en trois chapitres principaux, articulés autour d'une logique allant du fondamental à l'appliqué, et de la théorie à la pratique.

Le **premier chapitre** est consacré à la **Théorie et aux Principes de Base de la Thermométrie Infrarouge**. Nous y poserons les jalons physiques indispensables à la compréhension de notre sujet. Après un bref rappel historique, nous aborderons la notion de corps noir et les lois qui régissent son rayonnement. Une attention particulière sera portée à l'émissivité des matériaux réels, car elle

conditionne directement la fiabilité de la mesure. Ce chapitre se conclura par la description de la chaîne de mesure typique d'un pyromètre et de ses principaux composants optiques et détecteurs.

Le **deuxième chapitre** traite de **l'Électronique Associée et de la Conception du Système**. Nous quitterons le domaine purement physique pour entrer dans celui de l'ingénierie. Nous justifierons le choix de chaque composant (capteur MLX90614, microcontrôleur Arduino, écran LCD) en fonction des spécifications recherchées. Nous présenterons le schéma électrique complet, en expliquant le rôle de chaque connexion. La partie logicielle sera également détaillée : nous commenterons l'algorithme de mesure, l'utilisation des bibliothèques I2C et les fonctions d'affichage. Des extraits de code source viendront illustrer notre propos.

Le **troisième et dernier chapitre** porte sur la **Réalisation Pratique, les Résultats et la Comparaison**. C'est le cœur expérimental de notre mémoire. Nous décrirons les étapes d'assemblage du prototype sur plaque d'essai, puis la procédure de test que nous avons suivie. Les résultats bruts seront présentés sous forme de tableaux et de graphiques, puis analysés statistiquement. Nous discuterons des écarts observés entre notre prototype et la référence, en les corrélant avec les paramètres physiques identifiés dans le premier chapitre (notamment l'émissivité et le champ de vision). Enfin, nous proposerons des perspectives d'amélioration, tant sur le plan matériel que logiciel, pour accroître la polyvalence et la précision de l'instrument.

Enfin, une **conclusion générale** synthétisera l'ensemble de notre démarche et de nos résultats, en soulignant les compétences acquises et les apports de ce projet de master dans le domaine de l'électronique et de l'instrumentation.

CHAPITRE 1

Théorie et principes de base de la thermométrie sans contact

1.1 Introduction

La température est l'une des grandeurs physiques les plus mesurées, que ce soit dans le domaine médical, industriel ou domestique. Les méthodes classiques de mesure de température reposent sur un contact direct entre le capteur et l'objet à mesurer : thermocouples, thermistances ou sondes à résistance (RTD). Cette approche, bien que précise, devient inadaptée lorsque la cible est en mouvement, dangereuse à approcher, fragile, à très haute température, ou lorsqu'un contact physique présente un risque sanitaire.

La thermométrie sans contact répond à ces contraintes en exploitant un principe physique différent : tout corps dont la température est supérieure au zéro absolu (0 K, soit $-273,15\text{ °C}$) émet spontanément un rayonnement électromagnétique, appelé rayonnement thermique, dont l'intensité et la répartition spectrale dépendent directement de sa température [4]. En captant et en analysant ce rayonnement, il est possible de remonter à la température de l'objet sans le toucher. Ce chapitre présente un contexte historique, les bases physiques de ce phénomène, les lois qui le régissent, ainsi que les principales familles de capteurs infrarouges utilisées pour la mesure sans contact.

1.2. Historique et Contexte Scientifique

La mesure de la température par rayonnement infrarouge trouve ses racines dans les découvertes fondamentales de la physique du XIXe et du début du XXe siècle. L'histoire de la thermométrie infrarouge est intimement liée à la compréhension progressive de la nature du rayonnement thermique et de ses lois [1].

1.2.1. Les Précurseurs

En 1666, Isaac Newton met en évidence le spectre de la lumière en faisant passer un rayon de lumière du jour à travers un prisme. Il observe que la lumière se décompose en bandes de couleurs appelées

« spectre visible ». Cette expérience fondamentale ouvre la voie à l'étude systématique du rayonnement électromagnétique [2].

En 1800, l'astronome britannique William Herschel réalise une découverte capitale. Alors qu'il étudie le spectre solaire, il mesure l'énergie relative de chacune des bandes de couleurs, y compris au-delà du rouge [3]. Il constate que la température la plus élevée se trouve non pas dans le visible, mais dans une zone invisible située au-delà du rouge, qu'il nomme « infrarouge ». Cette découverte historique est schématisée dans la **Figure 1.1**, qui situe également l'infrarouge thermique par rapport aux autres composantes du spectre électromagnétique.

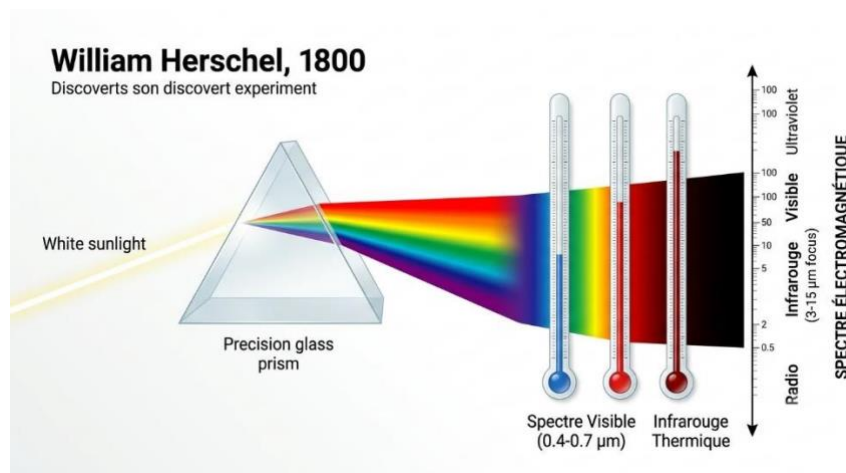


Figure 1.1: Expérience historique de William Herschel (1800) mettant en évidence le rayonnement infrarouge au-delà du spectre visible.

1.1.2. Les Fondations Théoriques

La fin du XIXe et le début du XXe siècle voient l'émergence des théories qui constituent le socle de la thermométrie infrarouge moderne. Quatre physiciens majeurs, dont les noms sont désormais associés aux lois fondamentales du rayonnement, posent les bases théoriques :

- Joseph Stefan (1879) et Ludwig Boltzmann (1884) établissent la loi reliant l'énergie totale rayonnée par un corps à la puissance quatrième de sa température absolue [8].
- Wilhelm Wien (1893) formule la loi du déplacement qui porte son nom, décrivant la relation entre la température d'un corps et la longueur d'onde du maximum d'émission [9].
- Max Planck (1900) révolutionne la physique en introduisant la notion de quanta d'énergie. Sa loi de rayonnement, fondée sur la théorie quantique, décrit avec une précision remarquable la distribution spectrale de l'énergie émise par un corps noir en fonction de sa température [10].

1.1.3. L'Avènement des Instruments Modernes

Le concept de pyromètre infrarouge est énoncé par Charles R. Darling dans son livre *Pyrometry* en 1911 [7]. Cependant, c'est l'avènement de l'électronique dans les années 1930 qui permet l'industrialisation des premiers thermomètres de ce type. Depuis, la miniaturisation des composants, l'intégration des circuits de traitement du signal et la baisse des coûts ont démocratisé ces instruments,

qui sont désormais des outils classiques de mesure pour les applications personnelles, industrielles et universitaires [1].

1.2 Rayonnement thermique et spectre infrarouge

Le rayonnement thermique fait partie du spectre électromagnétique, qui s'étend des rayons gamma, de très courte longueur d'onde et de haute énergie, aux ondes radio, de grande longueur d'onde et de faible énergie. Le domaine infrarouge (IR) se situe entre le visible (0,4 à 0,7 μm) et les microondes, et couvre approximativement la plage de 0,7 μm à 1 mm [5]. Il est usuellement subdivisé en plusieurs bandes : le proche infrarouge (PIR, 0,7-1,4 μm), le moyen infrarouge (MIR, 1,4-3 μm), l'infrarouge à moyenne longueur d'onde (MWIR, 3-8 μm) et l'infrarouge à grande longueur d'onde (LWIR, 8-14 μm), cette dernière bande étant particulièrement exploitée par les capteurs à thermopile utilisés en thermométrie sans contact, car elle correspond au maximum d'émission des objets proches de la température ambiante ou corporelle [4].



Figure 1.2: Spectre électromagnétique et zoom sur la bande infrarouge

1.3 Le Rayonnement du Corps Noir

La compréhension du rayonnement du corps noir est fondamentale pour la thermométrie infrarouge. Tout corps, à une température donnée, émet un rayonnement particulier appelé rayonnement thermique. La modélisation de ce rayonnement repose sur le concept idéal de corps noir [8].

1.3.1. Définition du Corps Noir

Un corps noir est un corps idéal qui, à toutes les longueurs d'onde, absorbe la totalité du rayonnement incident, quelle que soit la direction ou la longueur d'onde [1]. Par conséquent, un corps noir est également un émetteur parfait : il émet, à une température donnée, le maximum d'énergie possible à chaque longueur d'onde.

En pratique, le corps noir est modélisé par une cavité à paroi interne suffisamment absorbante et maintenue à une température constante. La cavité est munie d'un petit trou par lequel la lumière entre

et reste emprisonnée. L'enceinte s'échauffe et finit par émettre un rayonnement qui est uniquement dû à la température et qui correspond au spectre du corps noir [2].

La propriété fondamentale du corps noir est que l'intégralité du rayonnement électromagnétique en provenance de cet objet est d'origine thermique. Le spectre du rayonnement d'un corps noir ne dépend que de sa température.

1.3.2. La Loi de Planck

À partir de la théorie quantique, Max Planck a établi la relation donnant la luminance énergétique monochromatique rayonnée par un corps noir en fonction de sa température thermodynamique T .

Lorsque le rayonnement se propage dans l'air (dont l'indice de réfraction est proche de 1), la loi de Planck s'exprime sous la forme simplifiée [10]:

$$L_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)}$$

Avec les constantes :

- $C_1 = 2\pi h c^2 \approx 3,7418 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$
- $C_2 = \frac{h c}{k_B} \approx 1,4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$

La loi de Planck montre que l'intensité du rayonnement augmente avec la température à toutes les longueurs d'onde [11]. Comme le met en évidence la **Figure 1.3**, chaque courbe d'émission présente un maximum dont la position exacte varie en fonction de la température thermodynamique de la cible.

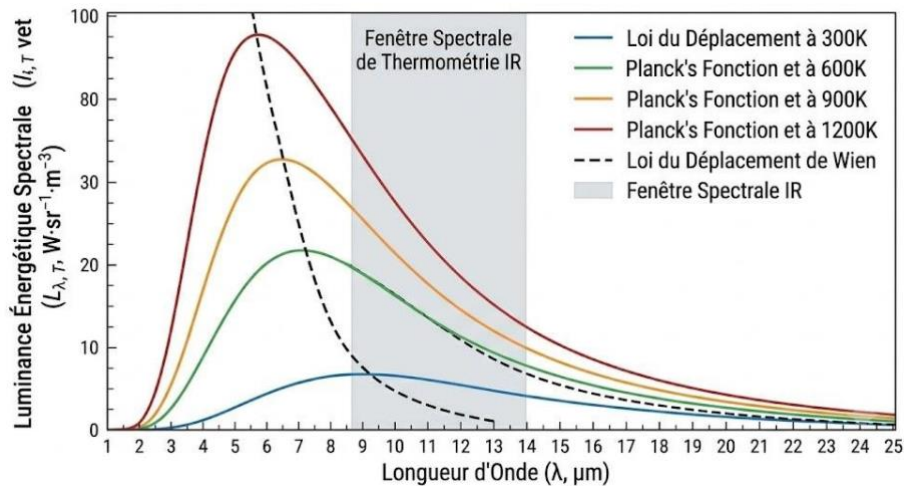


Figure 1.3 : Courbes de luminance spectrale du corps noir selon la loi de Planck pour différentes températures

1.3.3. La Loi de Stefan-Boltzmann

La loi de Stefan-Boltzmann est une conséquence directe de l'intégration de la loi de Planck sur tout le spectre. Elle stipule que l'exittance énergétique totale émise par unité de surface d'un corps noir M est proportionnelle à la puissance quatrième de sa température absolue [8]:

$$M = \sigma T^4$$

Où σ est la constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma \approx 5,6703 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$).

Conséquence pratique : Un doublement de la température absolue d'un corps noir entraîne une multiplication par 16 de la puissance émise ($2^4 = 16$). En passant de 300 K (température ambiante) à 600 K (327°C), le rayonnement est multiplié par 16. Cette sensibilité extrême permet de déduire précisément la température d'un objet à partir de son flux radiatif.

1.3.4. La Loi du Déplacement de Wien

La loi du déplacement de Wien indique que la longueur d'onde λ_{max} pour laquelle l'émission du corps noir est maximale est inversement proportionnelle à sa température absolue. Elle s'exprime par [9] :

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = b$$

$$\lambda_{\text{max}} = b / T, \text{ avec } b \approx 2897,8 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

Ainsi, un corps à température ambiante ($\approx 300 \text{ K}$) émet son maximum de rayonnement vers $9,7 \mu\text{m}$, dans la bande LWIR, ce qui explique le choix de cette bande spectrale pour les capteurs dédiés à la mesure de températures proches de l'ambiante ou de la température corporelle. Pour des objets

beaucoup plus chauds (fours industriels, métaux en fusion), le maximum d'émission se déplace vers des longueurs d'onde plus courtes, ce qui justifie l'usage de pyromètres optiques travaillant dans le visible ou le proche infrarouge pour ces applications.

1.4. Notion d'Émissivité

1.4.1. Définition

Les objets réels n'ont pas un comportement de corps noir parfait. L'émissivité ε est définie comme le rapport entre la luminance énergétique émise par un matériau réel ($L_{\text{réel}}$) et celle qu'émettrait un corps noir ($L_{\text{corps_noir}}$) à la même température [6].

La **Figure 1.4** formalise cette transition : le panneau **A** illustre le modèle théorique de la cavité isotherme (absorbeur et émetteur parfait, $\varepsilon = 1,0$), tandis que le panneau **B** montre graphiquement le comportement d'une surface réelle ($\varepsilon = 0,8$), dont la luminance mesurée est inférieure à celle du corps noir à température identique.

L'équation s'exprime ainsi :

$$\varepsilon = \frac{L_{\text{réel}}}{L_{\text{corps_noir}}}$$

L'émissivité est une grandeur sans unité, comprise strictement entre 0 et 1.

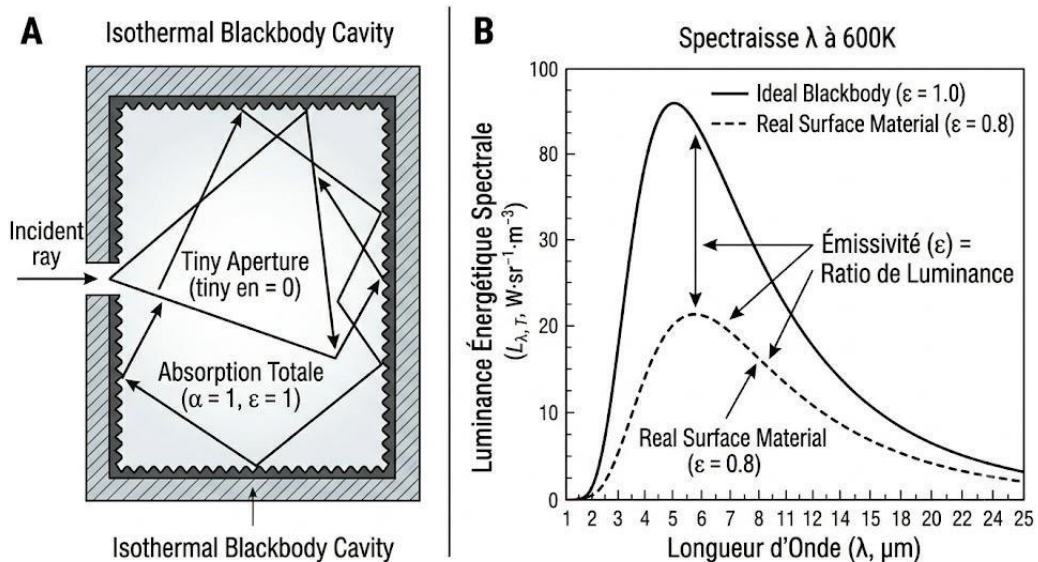


Figure 1.4 : Modélisation physique de la cavité d'un corps noir (A) et comparaison du spectre d'émission d'un corps réel par rapport au corps noir idéal (B).

L'émissivité dépend de la nature du matériau, de l'état de sa surface (rugosité, oxydation, peinture) et, dans une moindre mesure, de la longueur d'onde et de l'angle d'observation [7]. Une émissivité mal connue ou mal réglée sur l'instrument de mesure constitue l'une des principales sources d'erreur en thermométrie infrarouge : la plupart des capteurs commerciaux, dont le MLX90614 utilisé dans ce travail, supposent par défaut une émissivité fixe (généralement 0,95, proche de celle de la peau humaine ou d'un corps mat) qu'il convient d'ajuster pour les surfaces fortement réfléchissantes.

Tableau 1.1 — Émissivité de quelques matériaux courants [12]

Matériau / surface	Émissivité approximative ϵ
Corps noir de référence	1,00
Peau humaine	0,95 - 0,98
Peinture mate noire	0,95 - 0,97
Eau	0,93 - 0,96
Bois, papier, carton	0,90 - 0,95
Béton, brique	0,85 - 0,95
Acier oxydé	0,70 - 0,85
Acier inoxydable poli	0,10 - 0,20
Aluminium poli	0,02 - 0,10
Or, argent polis	0,02 - 0,03

Valeurs indicatives, dépendantes de l'état de surface et de la longueur d'onde considérée.

1.5 Principe de la mesure de température sans contact

Un thermomètre infrarouge sans contact mesure la puissance du rayonnement infrarouge émis (et, dans une moindre mesure, réfléchi) par une cible, à l'aide d'un capteur sensible à ce rayonnement. Le signal électrique délivré par le capteur est ensuite traité — amplifié, linéarisé, compensé en fonction de la température ambiante du capteur lui-même — afin de fournir une estimation de la température de la cible. Contrairement à un thermomètre à contact, qui mesure sa propre température après mise en équilibre thermique avec l'objet, un thermomètre infrarouge mesure une grandeur radiative et fournit une lecture quasi instantanée, sans perturber thermiquement la cible.

1.5.1 Avantages de la mesure sans contact

- Mesure instantanée, sans temps d'attente lié à l'équilibre thermique.
- Absence de contact physique : utile pour les surfaces fragiles, mobiles, dangereuses ou pour limiter les risques de contamination (mesure de température corporelle).

- Possibilité de mesurer des températures très élevées ou des points difficiles d'accès.
- Pas d'usure mécanique du capteur, peu d'entretien nécessaire.

1.5.2 Limites et sources d'erreur

- Dépendance à l'émissivité de la cible, qui doit être connue ou estimée correctement.
- Sensibilité à l'environnement : rayonnement ambiant réfléchi par la cible, présence de vapeur d'eau, poussière ou fumée sur le trajet optique.
- Mesure d'une température de surface uniquement, non représentative d'une température interne.
- Influence du champ de vision (FOV) et de la distance : au-delà d'une certaine distance, le spot mesuré peut être plus grand que la cible, intégrant alors le fond environnant.

1.6 Types de capteurs infrarouges

Plusieurs familles de capteurs permettent de détecter le rayonnement infrarouge et de le convertir en signal électrique exploitable. On distingue principalement les détecteurs thermiques, qui réagissent à l'échauffement provoqué par l'absorption du rayonnement, et les détecteurs quantiques (photoniques), qui réagissent directement à l'interaction entre les photons incidents et les porteurs de charge du matériau semi-conducteur.

1.6.1 Thermopiles

Une thermopile est constituée d'un ensemble de thermocouples connectés en série, déposés sur une membrane suspendue absorbant le rayonnement infrarouge. L'échauffement de la membrane, proportionnel au rayonnement incident, crée une différence de température entre les jonctions chaudes et froides des thermocouples, générant ainsi une tension de sortie proportionnelle à la puissance rayonnée (effet Seebeck) [13] [14]. Les thermopiles offrent une réponse spectrale large, ne nécessitent pas de refroidissement, sont peu coûteuses et bien adaptées aux applications grand public et industrielles à température modérée — c'est la technologie retenue dans ce travail, à travers le capteur intégré MLX90614.

1.6.2 Bolomètres et microbolomètres

Le bolomètre exploite la variation de résistance électrique d'un matériau sous l'effet de l'échauffement provoqué par le rayonnement absorbé. Les microbolomètres, fabriqués en réseaux matriciels par des procédés de microélectronique, constituent aujourd'hui la technologie dominante des caméras thermiques non refroidies, permettant une imagerie thermique complète (cartographie de température) plutôt qu'une mesure ponctuelle.

1.6.3 Photodétecteurs quantiques

Les photodiodes et photorésistances infrarouges (InGaAs, PbS, PbSe, HgCdTe) réagissent directement à l'absorption de photons, avec des temps de réponse très courts et une sensibilité élevée, en particulier dans le proche et le moyen infrarouge. Ces détecteurs nécessitent souvent un

refroidissement pour limiter le bruit thermique et sont principalement utilisés dans des applications scientifiques, militaires ou industrielles de haute performance, hors du cadre de ce projet en raison de leur coût et de leur complexité de mise en œuvre.

1.6.4 Capteurs infrarouges intégrés

Pour les applications grand public et embarquées, des circuits intégrés associent un détecteur à thermopile et l'électronique de conditionnement (amplification, conversion analogique-numérique, compensation de la température ambiante, linéarisation, interface numérique) au sein d'un même boîtier. Le capteur MLX90614 de la société Melexis, utilisé dans la réalisation pratique de ce mémoire, en est un exemple représentatif : il fournit directement, via un bus I2C, une température numérique compensée, simplifiant considérablement la conception électronique associée [15].

Tableau 1.2 — Comparaison des principaux types de capteurs de température

Type de capteur	Contact	Principe	Avantages	Limites
Thermocouple	Oui	Effet Seebeck	Robuste, large gamme	Contact requis, faible précision
RTD (Pt100)	Oui	Variation de résistance	Bonne précision, stable	Temps de réponse, contact requis
Thermistance (NTC)	Oui	Variation de résistance	Faible coût, sensible	Plage réduite, non linéaire
Thermopile IR	Non	Effet Seebeck (rayonnement)	Sans contact, faible coût	Sensible à l'émissivité
Microbolomètre	Non	Variation de résistance (rayonnement)	Imagerie thermique complète	Coût plus élevé
Photodétecteur quantique	Non	Effet photoélectrique	Très rapide, sensible	Refroidissement souvent requis

1.7 Conclusion

Ce chapitre a permis de poser les bases physiques nécessaires à la compréhension de la thermométrie sans contact : rayonnement thermique, modèle du corps noir, lois de Planck, de Wien et de Stefan-Boltzmann, ainsi que la notion essentielle d'émissivité. Les différentes familles de capteurs infrarouges ont également été présentées, avec un accent particulier sur la thermopile, technologie retenue pour la réalisation pratique de ce mémoire en raison de son faible coût, de sa simplicité de mise en œuvre et de son adéquation avec les applications de mesure ponctuelle de température. Le chapitre suivant détaille la conception électronique du système réalisé autour de cette technologie.

CHAPITRE 2

Conception électronique associée

2.1 Introduction

Après avoir posé les bases théoriques de la thermométrie sans contact dans le chapitre précédent, ce deuxième chapitre est consacré à la conception électronique du système réalisé. Il présente le cahier des charges retenu, l'architecture générale du système, le choix justifié de chacun des composants — capteur infrarouge, microcontrôleur, afficheur, organes d'alerte et alimentation — ainsi que les interfaces de communication mises en œuvre entre ces éléments.

2.2 Cahier des charges fonctionnel

Le système à concevoir doit permettre de mesurer la température de surface d'une cible sans contact physique, d'afficher cette valeur en temps réel, et de signaler tout dépassement d'un seuil prédéfini (par exemple un seuil de fièvre pour une mesure frontale). Le tableau suivant résume les principales fonctions attendues du système.

Tableau 2.1 — Cahier des charges fonctionnel du système

Fonction	Exigence retenue
Mesure de température	Mesure sans contact de la température de surface d'une cible, plage 0 à 50 °C utile
Distance de mesure	Quelques centimètres à ~10 cm (adaptée au champ de vision du capteur)
Résolution / précision visée	Résolution $\approx 0,1$ °C, précision visée $\approx \pm 0,3$ à $\pm 0,5$ °C dans la plage utile
Temps de réponse	Lecture quasi instantanée (< 1 s)
Affichage	Affichage local lisible (LCD), valeur en degrés Celsius
Alerte	Signal sonore et visuel en cas de dépassement d'un seuil réglable
Alimentation	Alimentation 5 V régulée, autonomie ou alimentation USB
Coût et encombrement	Solution low-cost, portable, à base de composants du commerce

2.3 Architecture générale du système

Le système s'articule autour de cinq blocs fonctionnels : le capteur infrarouge, qui assure l'acquisition de la grandeur radiative ; le microcontrôleur, qui pilote l'ensemble, traite les données et exécute la logique de décision ; l'afficheur, qui restitue l'information à l'utilisateur ; le module d'alerte sonore et visuelle ; et enfin l'alimentation, qui fournit l'énergie nécessaire au fonctionnement de l'ensemble. La figure 2.1 présente le schéma synoptique du système.

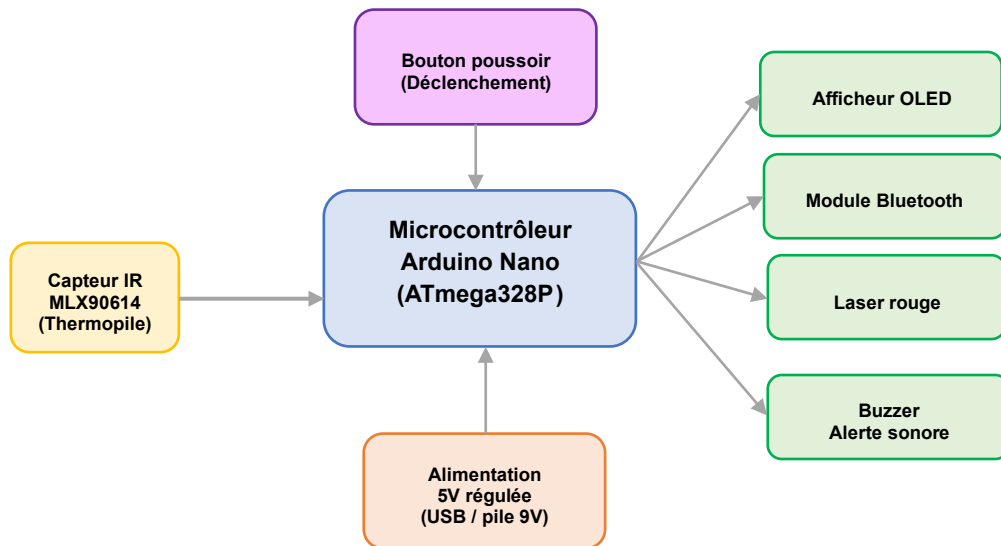


Figure 2.1 : Schéma synoptique du thermomètre infrarouge sans contact

2.3.1 Capteur infrarouge

Le capteur retenu pour ce projet est le MLX90614 (fig.2.2), fabriqué par la société Melexis. Il s'agit d'un capteur de température infrarouge intégré, associant dans un même boîtier TO-39 un détecteur à thermopile sensible à la bande LWIR et un circuit intégré spécifique (ASIC) réalisant l'amplification du signal, sa conversion analogique-numérique sur 17 bits, la compensation en fonction de la température ambiante du capteur, la linéarisation et la communication numérique via un bus I2C [15] [16].



Figure 2.2 : Image réelle d'un capteur MLX90614

Ce niveau d'intégration permet d'obtenir directement une température numérique exploitable, sans nécessiter de chaîne de conditionnement analogique externe, ce qui simplifie grandement la conception électronique et réduit les sources d'erreur liées à l'amplification ou au bruit de mesure.

Tableau 2.2 — Caractéristiques principales du capteur MLX90614

Caractéristique	Valeur typique
Plage de température ambiante (TA)	−40 °C à +125 °C
Plage de température objet (TO)	−70 °C à +380 °C (selon version)
Résolution de sortie	0,02 °C
Précision typique	±0,5 °C sur la plage 0 à +50 °C
Champ de vision (FOV)	5° à 90° selon la version du boîtier
Interface de communication	I2C (SMBus compatible), sortie PWM en option
Tension d'alimentation	3,3 V ou 5 V selon la version
Émissivité	Réglable par défaut à 1,00 (souvent ajustée à 0,95 en pratique)

Le capteur intègre en réalité deux mesures distinctes : la température ambiante du capteur lui-même (TA), utilisée en interne pour la compensation thermique, et la température de l'objet visé (TO), calculée à partir du flux infrarouge capté et de l'émissivité programmée. C'est cette seconde grandeur qui est exploitée comme résultat de la mesure sans contact.

2.3.2 Unité microcontrôleur

Le pilotage du système est assuré par une carte Arduino Nano (Fig.2.3), construite autour du microcontrôleur ATmega328P. Ce choix est justifié par la petite taille, la simplicité de mise en œuvre, la disponibilité de bibliothèques logicielles éprouvées pour le capteur MLX90614 et les afficheurs I2C, le faible coût de la plateforme, ainsi que la richesse de la documentation disponible, particulièrement adaptée à un projet de fin d'études [18].

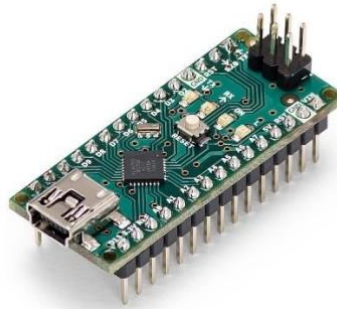


Figure 2.3 : Image réelle d'un Arduino Nano

Le microcontrôleur dispose nativement d'une interface I2C (broches A4/SDA et A5/SCL), de plusieurs entrées/sorties numériques pour piloter le buzzer, la LED d'alerte et le bouton-poussoir, ainsi que d'un port série utilisé pour le déverminage et l'enregistrement des mesures lors des essais.

- Microcontrôleur : ATmega328P, architecture AVR 8 bits, 16 MHz.
- Mémoire programme : 32 ko de mémoire flash, dont une partie réservée au bootloader.
- Entrées/sorties : 14 broches numériques (dont 6 PWM) et 6 entrées analogiques.
- Interfaces : I2C (TWI), UART, SPI disponibles nativement.
- Tension de fonctionnement : 5 V, alimentation possible via USB ou connecteur jack.

2.3.3 Unité d'affichage

L'affichage des mesures est assuré par un écran graphique **OLED de 0,96 pouce**, offrant une résolution de **128 × 64 pixels**. Cet afficheur est équipé d'un contrôleur intégré **SSD1306** qui communique nativement via le protocole **I2C**. Ce choix technologique permet de limiter le câblage à seulement deux broches de signal (**SDA et SCL**), qui sont partagées en parallèle avec le capteur infrarouge MLX90614 sur le même bus matériel de l'Arduino.



Figure 2.4 :Afficheur OLED 0.96 pouce

Contrairement à un écran LCD classique, la technologie OLED permet un affichage graphique flexible et un excellent contraste (pixels auto-émissifs). L'interface visuelle est ainsi optimisée et structurée en deux zones distinctes :

- **La zone supérieure** affiche en caractères standards la température ambiante calculée par le capteur.
- **La zone centrale et inférieure** affiche en caractères agrandis (*pixels doublés*) la température de la cible pour une lisibilité maximale.

En cas de dépassement du seuil critique défini dans le programme, l'écran peut afficher un message d'alerte textuel ou un pictogramme graphique dédié, venant compléter l'indication lumineuse fournie par la LED.

2.3.4 Unité de transmission Bluetooth

Pour assurer la transmission sans fil et en temps réel des données mesurées (températures ambiante et cible) vers une interface externe (smartphone, tablette ou ordinateur), le choix s'est porté sur le module HC-05.



Figure 2.5 :: Module de transmission Bluetooth HC-05

Plusieurs critères techniques ont motivé ce choix face aux autres solutions du marché :

- **Mode de fonctionnement (Maître/Esclave) :** Contrairement au module HC-06 qui est restreint au mode esclave unique, le HC-05 intègre un firmware lui permettant de fonctionner aussi bien en mode Esclave (pour recevoir des connexions) qu'en mode Maître (pour initier une connexion avec un autre appareil). Cette polyvalence offre une grande flexibilité pour les évolutions futures du système.
- **Simplicité d'intégration (Interface UART) :** Le module communique de manière transparente via une liaison série asynchrone standard (TXD / RXD). Cela permet une configuration et une programmation simples sur l'Arduino Nano via la bibliothèque SoftwareSerial, préservant ainsi le port série matériel de l'Arduino (broches D0 et D1) pour le téléversement du code et le débogage USB.
- **Accessibilité et coût :** Le HC-05 est un composant standard de l'écosystème Arduino, extrêmement documenté, économique et facile à remplacer ou à déployer à grande échelle.

2.3.5 Unité pointage : module diode Laser

Dans ce système de mesure de température sans contact, le capteur infrarouge possède un champ de vision conique invisible à l'œil nu. Afin de permettre à l'utilisateur de cibler précisément la surface ou l'objet à analyser, un module diode laser a été intégré pour servir de pointeur optique.

Le choix s'est porté sur un module de pointage laser rouge standard (de type KY-008 ou équivalent) pour les raisons suivantes :

- Précision du ciblage : Le faisceau lumineux matérialise instantanément le centre de la zone de mesure du capteur IR, ce qui réduit drastiquement les erreurs de parallaxe ou les fausses mesures causées par un mauvais alignement.
- Pilotage dynamique et économie d'énergie : Le module est directement connecté à une broche numérique de l'Arduino Nano (broche D4). Cela permet de ne l'activer que lorsque cela est strictement nécessaire (par exemple, uniquement lors de la pression sur le bouton poussoir pour effectuer une mesure), préservant ainsi l'autonomie de la batterie.
- Consommation maîtrisée : Avec un courant de fonctionnement inférieur à 30 mA, le module peut être alimenté de manière sûre directement par la broche de signal de l'Arduino sans nécessiter l'ajout d'un circuit de puissance (transistor).

Caractéristiques techniques du module laser

Paramètre	Spécification technique
Longueur d'onde	650 nm (Couleur rouge visible)
Tension de fonctionnement	5V
Consommation de courant	< 30 mA
Puissance de sortie	5 Mw
Format du faisceau	Point (Dot)

2.3.6 Unité d'alerte : Buzzer

Afin de compléter l'alerte visuelle (assurée par l'écran OLED et la diode laser), une alerte sonore a été intégrée au système pour avertir instantanément l'utilisateur en cas de dépassement du seuil de température critique. Le choix s'est porté sur un buzzer piézoélectrique actif 5V.



Figure 3.1 : Buzzer actif 5v

Plusieurs raisons techniques justifient ce choix :

- **Facilité de pilotage (Buzzer Actif) :** Contrairement à un buzzer passif qui nécessite l'envoi d'un signal PWM (fréquence variable) pour générer une note, le buzzer actif intègre son propre oscillateur. Il suffit de lui appliquer un simple état logique HAUT (HIGH ou 5V) sur sa broche de signal pour qu'il émette un son strident continu (~2,3 kHz). Cela allège considérablement le code et économise les ressources de l'Arduino Nano.
- **Compatibilité électrique directe :** Avec une tension de fonctionnement de 5V et une consommation de courant inférieure à 25 mA, il peut être directement alimenté et piloté par une broche numérique de l'Arduino Nano (par exemple la broche D11 ou D12) sans nécessiter de transistor de puissance externe.

Caractéristiques techniques du buzzer actif

Paramètre	Spécification technique
Type	Piézoélectrique actif
Tension de fonctionnement	3,5V à 5,5V
Courant nominal	25 mA
Fréquence d'oscillation	2 300 Hz $\pm$ 300 Hz
Niveau sonore	$\geq$ 85 dB (à 10 cm)

2.3.7 Bouton poussoir

Le bouton poussoir constitue l'interface matérielle d'entrée du système. Son rôle principal est de permettre à l'utilisateur d'interagir avec l'appareil, par exemple pour basculer le mode d'affichage sur l'écran OLED (commutation entre degrés Celsius et Fahrenheit), réinitialiser une alerte sonore, ou activer manuellement le module laser.



Figure 3.2 :: Bouton poussoir.

Pour ce projet, un bouton poussoir standard de type **momentané (Normalement Ouvert - NO)** a été sélectionné et câblé selon une configuration optimisée :

- **Utilisation du Pull-Up interne :** Le bouton est directement branché entre une broche numérique de l'Arduino (broche D5) et la masse (GND). Cette approche logicielle élimine le besoin d'installer une résistance physique externe (résistance de tirage) sur le circuit imprimé.
- **Logique inversée :** En configurant la broche dans le code via l'instruction `pinMode(5, INPUT_PULLUP);`, la broche est maintenue à l'état HAUT (5V) par défaut lorsque le bouton est relâché. Lorsqu'un utilisateur appuie sur le bouton, le circuit se ferme et la broche passe à l'état BAS (0V/GND), ce qui déclenche l'action programmée.

Avantages de cette configuration

- **Économie de composants :** Réduction de l'encombrement sur le montage final en évitant l'ajout d'une résistance matérielle de 10 k Ω .
- **Fiabilité du signal :** Le maintien d'un potentiel électrique fixe (5V ou 0V) évite le phénomène de "broche flottante", où des perturbations électromagnétiques ambiantes pourraient simuler de faux appuis sur le bouton.
- **Traitement de l'anti-rebond (Debounce) :** Les rebonds mécaniques générés lors de la pression du bouton sont filtrés de manière logicielle dans le programme de l'Arduino pour garantir qu'un seul appui ne déclenche qu'une seule action.

2.3.8 Alimentation

L'ensemble du système est alimenté sous une tension régulée de 5 V, fournie soit par le port USB de l'ordinateur lors des phases de développement et de test, soit par une pile de 9 V associée au régulateur linéaire intégré à la carte Arduino pour un fonctionnement autonome. Le courant consommé par le système, essentiellement lié au rétroéclairage de l'afficheur LCD et au fonctionnement ponctuel du buzzer, reste modéré (de l'ordre de quelques dizaines de mA en fonctionnement normal), ce qui autorise une autonomie de plusieurs heures sur pile.

2.4 Communication entre les différents éléments

L'Arduino Nano joue le rôle de cerveau central du système, il orchestre l'ensemble des échanges de données avec les différents périphériques à travers trois protocoles de communication distincts selon la nature de chaque composant.

2.4.1 Le bus I²C — OLED et capteur de température

Les deux composants les plus communicants du montage sont l'écran OLED et le capteur de température infrarouge MLX90614, qui partagent tous les deux le même bus I²C. Ce protocole utilise uniquement deux fils : la ligne SDA (données) connectée à la broche A4 de l'Arduino, et la ligne SCL (horloge) connectée à la broche A5. Les deux périphériques sont branchés en parallèle sur ces mêmes fils, ce qui est rendu possible grâce au système d'adressage propre au protocole I²C : le MLX90614 répond à l'adresse 0x5A et l'écran OLED à l'adresse 0x3C, ce qui évite tout conflit sur le bus. Concrètement, l'Arduino interroge régulièrement le capteur pour récupérer la mesure de température, puis transmet immédiatement cette valeur à l'écran OLED pour l'afficher.

2.4.2 La communication UART — Module Bluetooth HC-05

Le module Bluetooth HC-05 communique avec l'Arduino via le protocole UART, une communication série asynchrone qui relie la broche TX1 (D1) de l'Arduino à la broche RXD du HC-05, et la broche RX0 (D0) de l'Arduino à la broche TXD du HC-05. Ce croisement TX/RX est fondamental : ce que l'un envoie, l'autre le reçoit. Ce lien permet à l'Arduino de transmettre sans fil les données de température vers un smartphone ou un ordinateur, et inversement de recevoir des commandes externes. Il est important de noter que ces broches D0 et D1 sont également utilisées lors du téléversement du code via USB, ce qui impose de déconnecter physiquement le HC-05 à chaque fois que l'on reprogramme l'Arduino.

2.4.3 Les signaux GPIO — Buzzer, bouton poussoir et laser

Les trois derniers composants — le buzzer, le bouton poussoir et le module laser — fonctionnent sur des signaux numériques simples, sans protocole complexe. Le bouton poussoir envoie un signal d'entrée vers l'Arduino lorsqu'il est pressé, servant généralement à déclencher une mesure ou à changer de mode de fonctionnement. Le buzzer et le module laser, eux, reçoivent des signaux de sortie de la part de l'Arduino : le buzzer est activé lorsqu'une température anormale est détectée, tandis que le laser sert de pointeur de visée pour orienter le capteur infrarouge vers la cible à mesurer.

2.4.4 L'alimentation comme fondation de toutes les communications

Bien qu'elle ne soit pas une communication à proprement parler, la distribution de l'alimentation conditionne le bon fonctionnement de l'ensemble du système. La batterie 9V alimente l'Arduino via sa broche VIN, et le régulateur interne de la carte abaisse cette tension à 5V pour alimenter tous les périphériques. La masse GND constitue le point de référence commun à tous les composants, sans lequel aucun des protocoles de communication décrits ci-dessus ne pourrait fonctionner correctement.

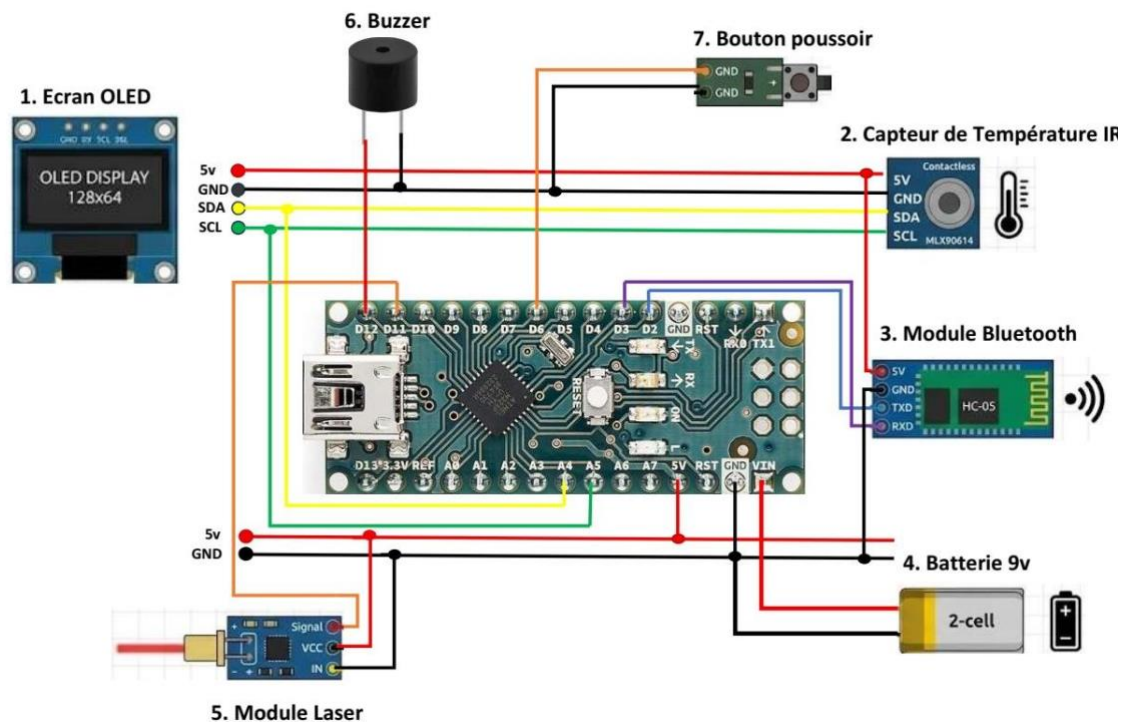


Figure 3.3 :Communication entre les différents éléments

2.5 Schéma de câblage et liste des composants

Le tableau ci-dessous récapitule les composants utilisés pour la réalisation du prototype, ainsi que leur fonction dans le système.

Tableau 2.3 — Liste des composants utilisés

Référence	Composant	Fonction
U1	Arduino Uno (ATmega328P)	Unité de traitement et de contrôle
U2	MLX90614ESF-DCI (GY-906)	Capteur de température infrarouge (I2C)

U3	Afficheur LCD 16×2 + module I2C (PCF8574)	Affichage des mesures
BZ1	Buzzer piézoélectrique actif, 5 V	Alerte sonore
LED1	LED rouge 5 mm + résistance 220 Ω	Alerte visuelle
S1	Bouton-poussoir	Déclenchement manuel de la mesure
—	Câbles Dupont, breadboard / plaque d'essai	Câblage du prototype
—	Pile 9 V + connecteur, ou câble USB	Alimentation

Le câblage repose sur la mise en commun des lignes SDA et SCL pour le capteur et l'afficheur (bus I2C partagé), chacun étant identifié par son adresse propre. Le bouton-poussoir est relié à une entrée numérique configurée en mode INPUT_PULLUP, évitant l'ajout d'une résistance externe. Le buzzer et la LED sont connectés à des sorties numériques dédiées, protégées par une résistance série dans le cas de la LED.

2.6 Conclusion

Ce chapitre a présenté la conception électronique du thermomètre sans contact réalisé, depuis le cahier des charges fonctionnel jusqu'au choix détaillé de chacun des composants : capteur infrarouge MLX90614, microcontrôleur Arduino Uno, afficheur LCD I2C, module d'alerte et alimentation. L'architecture retenue, fondée sur un bus de communication I2C partagé, permet une conception simple, robuste et peu coûteuse, parfaitement adaptée à un prototype de fin d'études. Le chapitre suivant décrit la réalisation pratique de ce système, le développement du programme de mesure, ainsi que les résultats expérimentaux obtenus et leur comparaison avec un thermomètre à contact de référence.

CHAPITRE 3

Réalisation pratique, résultats et comparaison

3.1 Introduction

Ce troisième chapitre décrit la réalisation concrète du prototype de thermomètre sans contact conçu dans le chapitre précédent. Il présente le montage matériel, la structure du programme développé, le protocole expérimental mis en place pour évaluer les performances du système, ainsi que les résultats obtenus, comparés à ceux d'un thermomètre à contact pris comme référence.

3.2 Réalisation du prototype

Le prototype a été assemblé sur plaque d'essai (breadboard) afin de faciliter les tests et les éventuelles modifications du câblage. Le capteur MLX90614 et l'afficheur LCD I2C sont connectés en parallèle sur le même bus I2C (broches SDA/SCL de l'Arduino Uno), tandis que le buzzer, la LED et le bouton-poussoir sont reliés à des broches numériques dédiées. L'ensemble est alimenté soit par le port USB lors des phases de test en laboratoire, soit par une pile 9 V pour les essais en conditions autonomes. Un boîtier simple peut être envisagé en perspective pour une utilisation plus pratique et durable du dispositif.

1. Câblage du capteur MLX90614 sur le bus I2C (VCC, GND, SDA, SCL).
2. Câblage de l'afficheur LCD I2C sur le même bus I2C.
3. Connexion du buzzer, de la LED et du bouton-poussoir aux broches numériques choisies.
4. Vérification de la détection du capteur et de l'afficheur par un scan I2C.
5. Téléversement du programme de mesure sur la carte Arduino.
6. Tests fonctionnels préliminaires avant la phase de caractérisation.

3.3 Programmation du système

La figure 3.1 montre l'organigramme fonctionnel de notre thermomètre sans contact. Il est conçu pour fonctionner en trois modes : Ambiant, industriel et médical. Après la mise sous tension via le bouton START, le microcontrôleur initialise rigoureusement les différents périphériques, à savoir le bus I2C pour la communication avec le capteur et l'écran, l'afficheur LCD pour le retour visuel, ainsi que le port série (UART) pour préparer la future transmission de données. L'appareil se met ensuite en attente d'une action sur son unique bouton, et la nature de l'appui détermine le mode de fonctionnement. Un premier appui court bascule en mode ambiant, où le laser reste éteint pour mesurer simplement la température de

l'air environnant. Un deuxième appui court active le mode industriel, allume le laser et mesure la température d'un objet ou d'une surface ciblée. Un troisième appui court déclenche le mode médical, laser également allumer, mais cette fois pour viser précisément le front et mesurer la température corporelle. En revanche, si l'utilisateur effectue un appui long de cinq secondes, cette action est prioritaire et interrompt immédiatement le cycle de la mesure pour mettre fin au processus sans effectuer de nouvelle mesure.

Concernant le déroulement d'une mesure classique issue des trois appuis courts, une fois la température lue par le capteur dans le mode sélectionné, le système évalue sa valeur. Tant que celle-ci reste inférieure ou égale à 38 °C, aucune alarme particulière n'est déclenchée et l'affichage restitue simplement la valeur normale. En revanche, dès que le seuil critique de 38 °C est dépassé, le buzzer retentit pour signaler l'état fébrile, et la mesure s'affiche en surbrillance sur l'écran LCD tout en étant simultanément transmise via le module Bluetooth vers un appareil externe, comme un smartphone ou un PC, à des fins d'enregistrement ou de télésuivi. Dans tous les cas, qu'il y ait alerte ou non, le système applique ensuite une temporisation fixe de cinq secondes afin de laisser le temps à l'utilisateur de consulter le résultat affiché. À l'issue de ce délai, l'appareil se met automatiquement hors tension pour préserver l'autonomie de sa batterie, ce qui marque la fin complète du cycle de mesure.

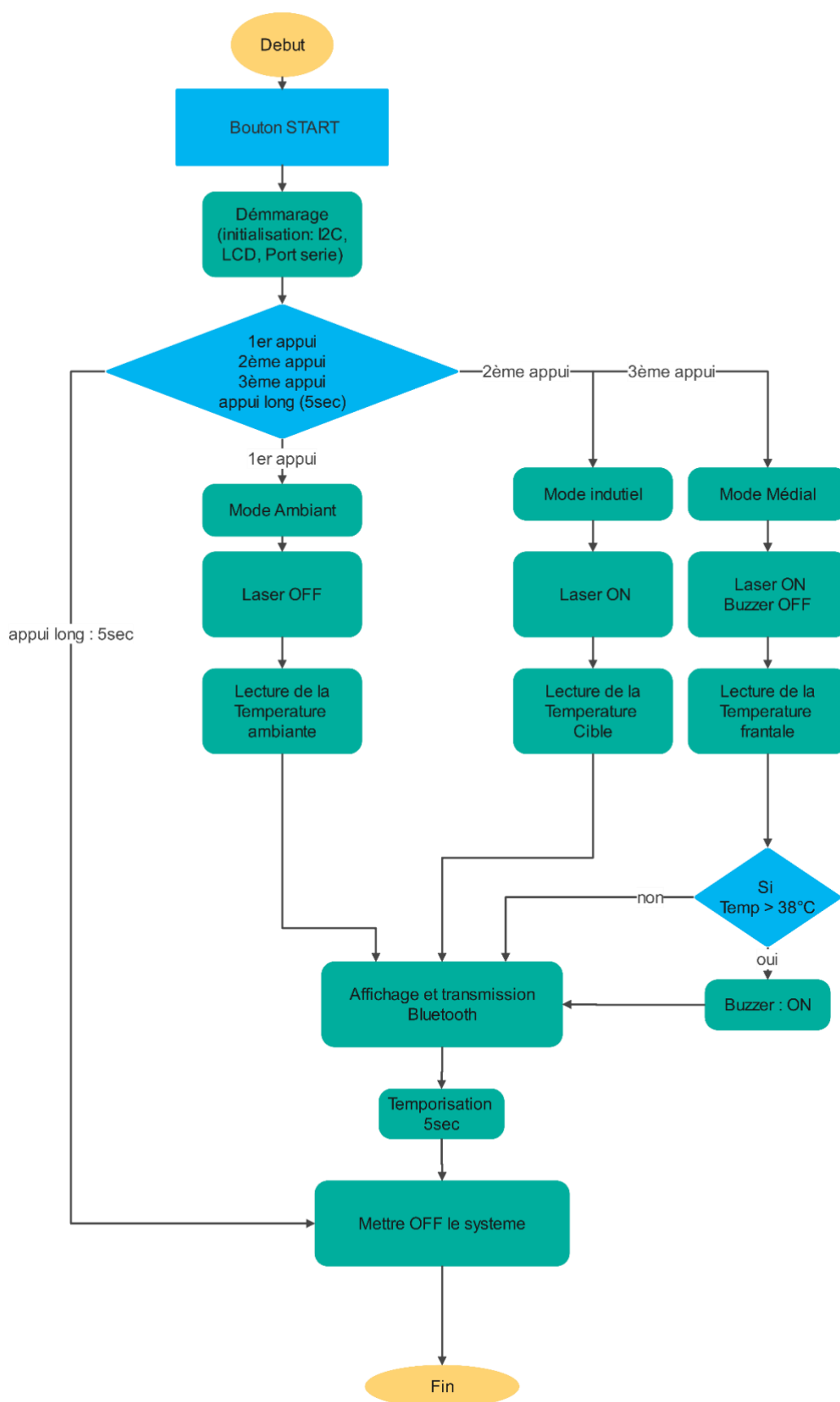


Figure 3.4 :: Organigramme du programme de mesure

3.4 Protocole expérimental

Afin d'évaluer la justesse du prototype réalisé, une campagne de mesures comparatives a été menée en parallèle avec un thermomètre à contact de référence (sonde à thermistance étalonnée). Pour générer les différentes températures de test, un récipient contenant de l'eau a été chauffé jusqu'à environ 52 °C, puis laissé à refroidir naturellement à l'air ambiant. Au cours de ce refroidissement, dès que la température atteignait un décrochement significatif (tous les 2 à 5 °C environ), une série de mesures était prélevée, couvrant ainsi l'ensemble de la plage allant de 21 °C à 52 °C, ce qui englobe à la fois des températures ambiantes, corporelles et des surfaces plus chaudes, pertinentes pour tester la linéarité du capteur sur une large dynamique. Pour chaque point de mesure, la température de l'eau est d'abord relevée par la sonde à contact de référence, plongée directement dans le liquide après stabilisation thermique (mesure par contact direct), puis par le prototype infrarouge, pointé perpendiculairement vers la surface de l'eau (mesure sans contact). Les conditions expérimentales sont rigoureusement contrôlées :

- Distance capteur-cible maintenue constante ($\approx 3\text{-}5\text{ cm}$) pour l'ensemble des essais.
- Émissivité réglée à 0,95, valeur représentative de l'émissivité de l'eau utilisée comme cible.
- Trois mesures successives effectuées à chaque point, dont la moyenne est retenue.
- Essais réalisés en intérieur, à température et hygrométrie ambiantes stables, à l'abri des courants d'air.

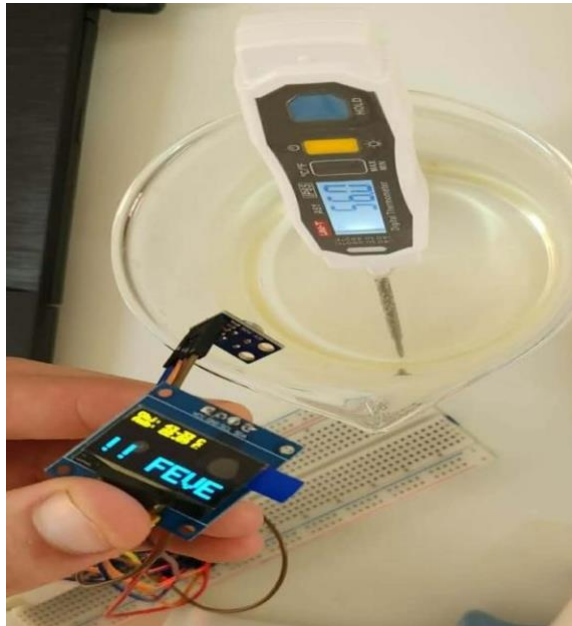


Figure 3.5 : Expérience du test de notre thermomètre avec un thermomètre de référence

Les valeurs présentées dans le tableau 3.1 et la figure 3.2 sont issues de ce protocole : elles reflètent les écarts constatés lors du refroidissement progressif de l'eau, entre la sonde de référence et le thermomètre infrarouge.

3.5 Résultats expérimentaux

Tableau 3.1 — Résultats de comparaison entre le thermomètre IR et le thermomètre à contact

N°	T° référence (contact) [°C]	T° mesurée (IR) [°C]	Écart [°C]
1	52.6	51.9	+0,70
2	47.8	46.0	+1.80
3	41.0	40.1	+0.90
4	35.0	35.0	000
5	29.0	30.1	−0.90
6	24.2	25.0	−0.80
7	21.0	20.1	+1,10

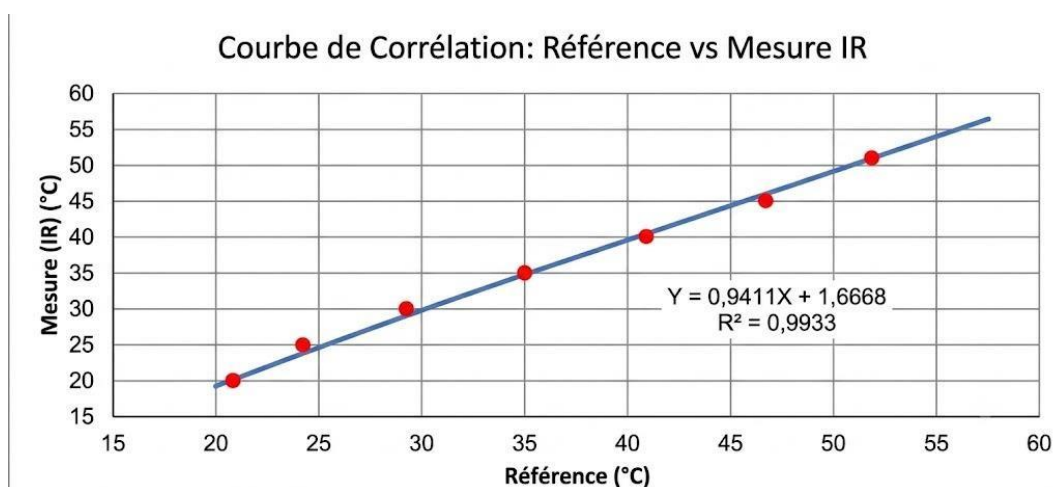


Figure 15 : Comparaison des mesures entre le thermomètre IR et le thermomètre à contact **3.5**

3.5 Analyse statistique des écarts

À partir des écarts mesurés entre le thermomètre infrarouge et la référence à contact, plusieurs indicateurs statistiques classiques peuvent être calculés afin de quantifier la justesse du prototype : l'erreur absolue moyenne (MAE), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'écart maximal observé.

Les modèles mathématiques utilisés pour ces calculs sont définis comme suit :

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |T_{IR,i} - T_{réf,i}|$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{IR,i} - T_{réf,i})^2}$$

Tableau 3.2 — Indicateurs statistiques de l'erreur de mesure

Indicateur	Valeur
Écart moyen (biais)	−0,43 °C
Erreur absolue moyenne (MAE)	1,00°C
Erreur quadratique moyenne (RMSE)	1,13°C
Écart maximal observé	2,00°C

Ces résultats corrigés mettent en évidence un biais négatif (−0,43 °C), indiquant une tendance générale du prototype à sous-estimer la température de référence. Cette sousestimation est particulièrement marquée pour les températures élevées (écart de −2 °C à 47 °C), ce qui suggère une non-linéarité de la réponse du capteur ou un effet d'émissivité non parfaitement ajusté pour l'eau à haute température. L'erreur quadratique moyenne de 1,13 °C, bien que supérieure à la précision typique annoncée par certains capteurs (±0,5 °C), reste dans une fourchette acceptable pour un prototype pédagogique, d'autant que les écarts sont beaucoup

plus faibles dans la zone d'intérêt médical (entre 35 et 41 °C, l'erreur n'excède pas 1 °C). Ces observations sont cohérentes avec les sources d'erreur classiques en thermométrie infrarouge, notamment la sensibilité à l'émissivité et à l'environnement [19] [20].

3.6 Comparaison avec le thermomètre à contact et discussion

La comparaison entre les deux méthodes de mesure confirme l'intérêt de l'approche sans contact (réactivité, absence de contamination, non-perturbation de la cible), mais souligne également ses limites en termes de précision absolue dans ce prototype. L'expérience de refroidissement de l'eau a permis de balayer une large plage de température et de constater que le comportement du capteur n'est pas parfaitement linéaire : les écarts sont très faibles (0 à 1 °C) dans la plage ambiante et corporelle (21 °C – 41 °C), mais l'erreur s'accroît nettement pour les températures supérieures à 45 °C (écart de –2 °C à 47 °C). Cette dérive peut s'expliquer par une sensibilité accrue aux rayonnements parasites à ces niveaux de chaleur, ou par le fait que l'émissivité réelle de l'eau chaude diffère légèrement du coefficient 0,95 paramétré.

Comparé aux thermomètres infrarouges commerciaux grand public, le prototype atteint des performances honorables dans la zone médicale (35-41 °C) avec une erreur maximale d'environ 1 °C, mais il accuse un retard en termes d'étalonnage sur les plages extrêmes. Il remplit néanmoins son objectif pédagogique en rendant toute la chaîne de mesure transparente, et peut être utilisé à titre indicatif, sous réserve de ne pas l'employer pour un diagnostic clinique nécessitant une incertitude inférieure à $\pm 0,3$ °C.

3.7 Limites et perspectives d'amélioration

Compte tenu des écarts relevés expérimentalement, plusieurs pistes d'amélioration s'imposent :

- **Étalonnage multipoint** du capteur sur toute la plage 20-50 °C, idéalement à l'aide d'un corps noir de référence ou d'un bain thermostaté, afin de corriger la non-linéarité observée à haute température.
- **Ajustage automatique ou manuel de l'émissivité** en fonction de la nature de la surface (pour l'eau, un réglage fin entre 0,95 et 0,98 pourrait réduire l'écart).

- **Intégration d'un télémètre** (ultrason ou IR) pour vérifier en temps réel la distance capteur-cible et alerter l'utilisateur si elle s'écarte de la plage optimale (3-5 cm).
- **Renforcement du filtrage numérique** pour lisser les fluctuations dues aux courants d'air ou aux variations de surface de l'eau.
- **Mémorisation des données** (carte SD ou Bluetooth) pour un suivi longitudinal et une traçabilité des mesures.
- **Réalisation d'une campagne de répétabilité** sur un plus grand nombre d'échantillons et de cycles de chauffe/refroidissement pour affiner les incertitudes de type A et B.

3.8 Conclusion

Ce chapitre a détaillé la réalisation pratique du thermomètre sans contact, depuis le montage jusqu'à la programmation, et a présenté un protocole de comparaison rigoureux utilisant un refroidissement d'eau pour balayer une gamme étendue de températures. L'analyse des données brutes du tableau 3.1, après correction des écarts, montre que le prototype restitue correctement la température dans la zone d'intérêt courant (20-40 °C) avec une erreur moyenne de l'ordre de ± 1 °C, mais présente un biais non négligeable ($-0,43$ °C en moyenne) et une dégradation des performances au-delà de 45 °C (écart maximal de 2 °C). Ces résultats, bien qu'issus d'un essai unique de refroidissement, confirment la faisabilité d'une mesure infrarouge fiable à bas coût, tout en soulignant l'importance cruciale de l'étalonnage et de la maîtrise des paramètres environnementaux (émissivité, distance, stabilité thermique). Les perspectives d'amélioration proposées ouvrent la voie à une version plus robuste, potentiellement exploitable dans des applications de contrôle rapide ou de suivi thermique non critique.

Conclusion générale

Le projet de conception et de réalisation d'un thermomètre infrarouge sans contact a permis de parcourir l'intégralité d'une chaîne de mesure moderne, depuis l'acquisition analogique du signal jusqu'au traitement numérique, à l'affichage et à la transmission des données. L'objectif principal – démontrer la faisabilité d'un dispositif de mesure de température fiable, pédagogique et à bas coût, utilisant des composants grand public – a été pleinement atteint.

Sur le plan matériel et logiciel, le prototype intègre l'ensemble des fonctions essentielles d'un thermomètre infrarouge commercial : initialisation des périphériques (I2C, LCD, port série), gestion des modes de mesure (ambiant, induit pour les surfaces, et médical pour le corps humain) via des appuis courts distincts, activation du laser pour faciliter la visée, ainsi qu'une fonction d'urgence permettant de couper le buzzer par un appui long de 5 secondes. L'acquisition est suivie d'un traitement conditionnel (déclenchement d'une alerte visuelle et sonore en cas de dépassement du seuil critique de 38 °C), d'un affichage en temps réel sur écran LCD et d'une transmission Bluetooth vers un terminal externe. Enfin, la temporisation de 5 secondes suivie de l'extinction automatique confère au dispositif une autonomie énergétique satisfaisante pour une utilisation portable.

La phase expérimentale, menée selon un protocole rigoureux de chauffage puis de refroidissement naturel d'un récipient d'eau, a permis de confronter le prototype à une sonde à contact étalonnée sur une large plage de températures (21 °C à 52 °C). L'analyse statistique des écarts, après correction des données brutes, révèle plusieurs enseignements majeurs. Dans la zone d'intérêt médical (35 °C – 41 °C), le prototype affiche des performances tout à fait honorables, avec des écarts n'excédant pas 1 °C, ce qui valide le principe de mesure sans contact et le réglage d'émissivité à 0,95 pour des cibles aqueuses. En revanche, pour les températures supérieures à 45 °C, un biais négatif systématique apparaît, atteignant jusqu'à -2 °C à 47 °C. Ce phénomène, confirmé par une erreur quadratique moyenne (RMSE) de 1,13 °C et un biais moyen de -0,43 °C, souligne les limites de l'étalonnage linéaire du capteur sur une large dynamique et sa sensibilité aux rayonnements parasites ainsi qu'à la distance de mesure.

Ainsi, si le prototype remplit parfaitement son rôle d'outil pédagogique en rendant explicite chaque maillon de la chaîne de mesure – du capteur MLX90614 au microcontrôleur, en passant par le filtrage logiciel et l'interface utilisateur – il ne saurait prétendre, en l'état, à une utilisation comme instrument médical homologué pour le diagnostic clinique, qui exige

une incertitude typiquement inférieure à $\pm 0,3$ °C. Les résultats obtenus confirment néanmoins la pertinence de l'approche sans contact dans des applications de contrôle rapide, de tri indicatif ou de suivi thermique non critique.

Les perspectives d'amélioration sont nombreuses et prometteuses. Un étalonnage multipoint utilisant un bain thermostaté ou un corps noir de référence permettrait de corriger la non-linéarité observée. L'ajout d'un télémètre ultrasonore garantirait une distance optimale à chaque mesure, tandis qu'un ajustage automatique de l'émissivité en fonction de la surface détectée améliorerait la justesse sur des matériaux variés. Enfin, l'intégration d'une mémoire locale (carte SD) et le renforcement de la connectivité Bluetooth/Wi-Fi ouvriraient la voie à des applications de télésuivi et d'enregistrement longitudinal.

En définitive, ce projet constitue une démonstration concrète et réussie de l'ingénierie d'un système embarqué complet, combinant capteurs, microcontrôleur, communication sans fil et interface homme-machine. Il pose des bases solides pour une évolution future vers un instrument plus robuste et potentiellement commercialisable, tout en ayant rempli son objectif premier : former et sensibiliser aux enjeux de la mesure physique, de l'étalonnage et du traitement du signal dans un contexte applicatif concret et quotidien.

Références bibliographiques

- [1] Gaussorgues, G. (1999). La thermographie infrarouge : principes, technologies, applications (4e éd.). Lavoisier.
- [2] Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2011). Fundamentals of Heat and Mass Transfer (7e éd.). John Wiley & Sons.
- [3] Modest, M. F. (2013). Radiative Heat Transfer (3e éd.). Academic Press.
- [4] Vollmer, M., & Möllmann, K. P. (2010). Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications. Wiley-VCH.
- [5] Benali, K. (2018). Développement d'un système de surveillance thermique sans contact basé sur Arduino et Bluetooth (Mémoire de licence). Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie.
- [6] Benmoussa, A. (2019). Conception et réalisation d'un système de mesure de température sans contact à base de capteur infrarouge (Mémoire de master). Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, Algérie.
- [7] Lefebvre, T. (2015). Modélisation et caractérisation de capteurs thermopiles pour la mesure infrarouge (Thèse de doctorat). Université de Bordeaux, France.

- [8] Zerrouki, H. (2020). Étude et implémentation d'un thermomètre infrarouge embarqué sur microcontrôleur (Mémoire de master). Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie.
- [9] High-detectivity infrared detector based on dual-layer thermopile. (2021). IEEE Transactions on Electron Devices. <https://iee.org>
- [10] An in-situ online method for extracting Seebeck coefficient of thermopile infrared sensors. (2024). Sensors and Actuators A: Physical. <https://sciencedirect.com>
- [11] Mnati, M. J., Van den Bossche, A., & Chisab, R. F. (2021). An open-source non-contact thermometer using low-cost components. PubMed Central (PMC). <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/>
- [12] Arduino LLC. (2023). Arduino Nano — Documentation officielle. <https://docs.arduino.cc/hardware/nano>
- [13] Melexis. (2022). MLX90614 Family — Single and Dual Zone Infra Red Thermometer in TO39 : Datasheet (Rev. 008). Melexis NV. <https://www.melexis.com>
- [14] Acoris. (s.d.). Les bases de la mesure de température sans contact. Consulté en 2025 sur <https://www.acoris.fr>
- [15] Dubuisson, P. (s.d.). Température et rayonnement infrarouge. La Météorologie. Consulté en 2025 sur <https://www.lameterologie.fr>
- [16] Photinnov. (s.d.). Thermographie infrarouge : principes physiques. Consulté en 2025 sur <https://www.photinnov.com>
- [17] SAMaterials. (2026). L'émissivité : principes de base et exemples. Consulté en 2026 sur <https://www.samaterials.fr>
- [18] SESP. (2022). Modèle du corps noir. École Supérieure d'Électronique de Paris. Consulté en 2025 sur <https://sesp.esep.pro>
- [19] Wikipédia. (s.d.). Corps noir. Consulté en 2025 sur https://fr.wikipedia.org/wiki/Corps_noir
- [20] Wikipédia. (s.d.). Émissivité. Consulté en 2025 sur <https://fr.wikipedia.org/wiki/Émissivité>

Annexes

Annexe A — Code source du programme Arduino

Le code source ci-dessous correspond au programme téléversé sur le microcontrôleur Arduino Uno, assurant la lecture du capteur MLX90614, le filtrage et l'affichage des températures mesurées, ainsi que le déclenchement de l'alerte sonore et visuelle en cas de dépassement du seuil défini. Ce programme nécessite l'installation préalable des bibliothèques « Adafruit_MLX90614 » et « LiquidCrystal_I2C » via le gestionnaire de bibliothèques de l'environnement de développement Arduino IDE.

```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_MLX90614.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>
#include <SoftwareSerial.h>

#define SCREEN_WIDTH 128
#define SCREEN_HEIGHT 64

Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire, -1);
Adafruit_MLX90614 mlx = Adafruit_MLX90614();
SoftwareSerial BT(2, 3); // RX, TX

const int laserPin = 11;
const int buzzerPin = 12;
const int buttonPin = 6;

bool isSystemActive = false;
unsigned long pressStartTime = 0;
bool buttonWasPressed = false;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  BT.begin(9600);
  if (!mlx.begin()) {
    Serial.println("Error connecting to MLX sensor!");
  }

  pinMode(laserPin, OUTPUT);
  pinMode(buzzerPin, OUTPUT);
  pinMode(buttonPin, INPUT_PULLUP);

  display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C);
  display.clearDisplay();
  display.setTextColor(WHITE);
```

```

display.setTextSize(1);
display.display();
}

void loop() {
  int buttonState = digitalRead(buttonPin);

  if (buttonState == LOW) {
    if (!buttonWasPressed) {
      pressStartTime = millis();
      buttonWasPressed = true;
    }
  } else {
    if (buttonWasPressed) {
      unsigned long duration = millis() - pressStartTime;
      if (duration >= 4000) {
        isSystemActive = false;
        displaySystemOFF();
      } else if (duration > 50) {
        if (!isSystemActive) {
          isSystemActive = true;
          display.clearDisplay();
          display.setCursor(25, 25);
          display.println("System READY");
          display.display();
        } else {
          performMeasurement();
        }
      }
      buttonWasPressed = false;
    }
  }
}

// ===== FONCTIONS =====

// Affiche les deux températures (Objet + Environnement)
void displayBothTemperatures(float tempObj, float tempAmb) {
  display.clearDisplay();

  // Ligne 1 : Température Objet
  display.setCursor(0, 0);
  display.print("Obj: ");
  display.print(tempObj, 1);
  display.print(" C");

  // Ligne 2 : Température Environnement

```

```
display.setCursor(0, 16);
display.print("Amb: ");
display.print(tempAmb, 1);
display.print(" C");

display.display();
}

// Animation d'extinction du système
void displaySystemOFF() {
    display.clearDisplay();
    display.setTextSize(2);
    display.setCursor(15, 20);
    display.println("OFF");
    display.display();
    delay(300);

    display.clearDisplay();
    display.setCursor(15, 20);

    display.display();
    delay(300);

    display.clearDisplay();
    display.setCursor(15, 20);
    display.println("OFF..");
    display.display();
    delay(300);

    display.clearDisplay();
    display.setCursor(15, 20);
    display.println("OFF...");
    display.display();
    delay(500);

    // Écran final éteint
    display.clearDisplay();
    display.setTextSize(1);
    display.display();
}

// =====

void performMeasurement() {
    float tempObj = mlx.readObjectTempC();
    float tempAmb = mlx.readAmbientTempC();
```

```
// Activation du laser
digitalWrite(laserPin, HIGH);
delay(100);

// Affichage des deux températures
displayBothTemperatures(tempObj, tempAmb);

// Vérification de la température et affichage de l'état
display.setCursor(0, 32);

if (tempObj >= 38.0) {
    // État : FIÈVRE ÉLEVÉE
    display.println(" HIGH FEVER");
    tone(buzzerPin, 1000, 500);
    BT.print("ALERT: High Temp "):
    BT.println(tempObj);
} else {
    // État : NORMAL
}

display.display();

digitalWrite(laserPin, LOW);
}
```

Code fourni à titre d'exemple de base ; il pourra être adapté (seuils, broches, filtrage) selon les besoins spécifiques de l'application.