

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de Ahmed Zabana de Relizane
Faculté des Sciences et Technologies
Département d'Electrotechnique et d'Automatique



MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER
Dans le cadre de la décision 008 : Diplôme Institution Economique
Electrotechnique Industrielle
Intitulé

Développement et Mise en Œuvre d'un Système de
Surveillance Dédie aux Nourrissons

Présenté par :

Mlle : DAHMANE Aicha Radhia

Devant les membres de jury :

| | | | |
|---|------------------------|---------------------------|------------------|
| Président : | Mr BENAIRE D Nouredine | Professeur | (Univ. Relizane) |
| Encadrant : | Mr MILOUDI Mohamed | Maître de conférences (A) | (Univ. Relizane) |
| Examineur : | Mr LANTRI Tayeb | Maître de conférences (A) | (Univ. Relizane) |
| Représentant de l'incubateur : | Mme DRAADJIA Amina | Maître de conférences (B) | (Univ. Relizane) |
| Représentant du partenaire économique : | Mr KADER Hadjoudja | | (SPE / Relizane) |

Année universitaire : 2024/2025

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à **Dieu**, le Tout-Puissant, pour m'avoir accordé la force, la patience et les bénédictions nécessaires à la réalisation de ce travail, et pour avoir guidé mes pas sur le chemin du savoir, au sein de l'Université de Relizane.

Je souhaite adresser mes sincères remerciements à **mon encadrant, le Docteur Mohamed MILOUDI**, pour la confiance qu'il m'a accordée, la rigueur de son encadrement et la qualité de son accompagnement tout au long de ce travail. Sa disponibilité, ses conseils avisés, son soutien constant et son optimisme, même dans les moments les plus difficiles, ont été d'une grande importance tant sur le plan scientifique que personnel. Grâce à lui, j'ai pu surmonter les nombreux défis rencontrés au cours de ce parcours.

Je remercie également **Monsieur le Professeur BENAIED Noureddine**, de l'Université de Relizane, d'avoir accepté de présider le jury de soutenance. J'exprime aussi ma profonde reconnaissance à **Monsieur le Docteur LANTRI Tayeb**, de l'Université de Relizane, le **représentant de l'incubateur Madame le Docteur DRAADJIA Amina**, et le **représentant du partenaire économique Monsieur KADER Hadjoudja** de la **SPE-Relizane** pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de participer au jury. Qu'ils trouvent ici l'expression de mes remerciements les plus sincères.

Mes remerciements les plus chaleureux vont à **ma mère**, pour son amour inconditionnel, ses sacrifices silencieux, et ses prières constantes, ainsi qu'à **mon père**, pour son soutien moral, sa confiance, et son rôle fondamental dans l'aboutissement de mon parcours universitaire. À **mes sœurs**, merci pour leur affection, leur encouragement et leur présence bienveillante qui ont été pour moi une source de réconfort tout au long de ce chemin. À mon amie fidèle **Harigui Fatima**, je tiens à exprimer toute ma gratitude pour sa patience, sa compréhension et son soutien moral dans les moments les plus difficiles. À mon ami sincère **Mohamed**, merci pour ta précieuse amitié, tes encouragements constants et ton esprit positif qui m'ont aidé à garder le cap jusqu'au bout.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réussite de ce travail, notamment les enseignants du département d'électrotechnique pour la qualité de leur enseignement tout au long de ma formation.

TABLE DES MATIERES

| | |
|------------------------------|-----|
| Résumé | V |
| Liste des Abréviations | VI |
| Liste des Figures | VII |

| | |
|----------------------------|---|
| INTRODUCTION GÉNÉRALE..... | 1 |
|----------------------------|---|

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES SYSTEMES DE SURVEILLANCE DES NOURRISSONS

| | | |
|----------|--|----|
| I-1. | INTRODUCTION..... | 2 |
| I-2. | DEFINITION D'UN SYSTEME DE SURVEILLANCE INFANTILE..... | 2 |
| I-3. | HISTORIQUE ET EVOLUTION DES DISPOSITIFS DE SURVEILLANCE..... | 3 |
| I-4. | IMPORTANCE DE LA SURVEILLANCE DES NOURRISSONS..... | 4 |
| I-4-1. | Risques liés à l'absence de surveillance..... | 4 |
| I-4-2. | Principales causes de mortalité infantile évitables..... | 4 |
| I-4-2-1. | Troubles respiratoires..... | 5 |
| I-4-2-2. | Environnement de sommeil inadapté..... | 5 |
| I-4-2-3. | Facteurs génétiques..... | 5 |
| I-4-2-4. | Rôle de la surveillance efficace..... | 5 |
| I-4-2-5. | Rôle des nouvelles technologies dans la prévention et la surveillance..... | 5 |
| I-5. | TECHNOLOGIES EXISTANTES ET LEURS LIMITES..... | 6 |
| I-5-1. | Réseau de capteurs sans fil..... | 6 |
| I-5-2. | Composantes..... | 7 |
| I-5-3. | Architectures de réseaux de capteurs..... | 7 |
| I-5-3-1. | Topologie en étoile..... | 7 |
| I-5-3-2. | Topologie en «grille» (Mesh Network)..... | 7 |
| I-5-3-3. | Topologie hybride..... | 8 |
| I-5-4. | Avantages et inconvénients des solutions actuelles..... | 8 |
| I-6. | CAPTEURS ET DISPOSITIFS COURAMMENT UTILISES..... | 8 |
| I-6-1. | Capteurs de température et d'humidité..... | 9 |
| I-6-2. | Accéléromètres et gyroscopes pour la détection de mouvement..... | 9 |
| I-6-3. | Caméras intelligentes et reconnaissance faciale..... | 10 |
| I-6-4. | Systèmes de transmission des données (Bluetooth, Wi-Fi, RF)..... | 10 |
| I-7. | IMPACT DE L'IOT ET DE L'IA SUR LA SURVEILLANCE INFANTILE..... | 11 |
| I-7-1. | Automatisation et amélioration des systèmes de surveillance..... | 12 |

| | | |
|--------|---|----|
| I-7-2. | Intégration des objets connectés dans le quotidien des parents..... | 12 |
| I-7-3. | Surveillance en temps réel grâce aux applications mobiles..... | 12 |
| I-7-4. | Interaction avec les assistants vocaux..... | 13 |
| I-7-5. | Personnalisation et recommandations intelligentes..... | 13 |
| I-7-6. | Problématiques et défis techniques..... | 13 |
| I-7-7. | Accessibilité financière et adoption par les familles..... | 13 |
| I-8. | CONCLUSION..... | 14 |

Chapitre II : CONCEPTION ET REALISATION DU SYSTEME DE SURVEILLANCE

| | | |
|-----------|---|----|
| II-1. | INTRODUCTION..... | 15 |
| II-2. | VUE GLOBALE DU SYSTEME | 15 |
| II-2-1. | Présentation globale du système et objectifs fonctionnels..... | 15 |
| II-2-2. | Description des deux modules principaux : (ESP32) / (ESP32-CAM)..... | 16 |
| II-2-3. | Schéma de Fonctionnement..... | 17 |
| II-3 | CONCEPTION MATÉRIELLE..... | 19 |
| II-3-1. | Étude comparative et sélection des capteurs..... | 19 |
| II-3-1-1. | Capteur DHT22– Mesure précise de température et d'humidité..... | 19 |
| II-3-1-2. | Capteur HC-SR04 – Mesure de distance à ultrasons..... | 20 |
| II-3-1-3. | Capteur KY-038 – Détection sonore..... | 21 |
| II-3-1-4. | Capteur MLX90614 – Mesure de température infrarouge..... | 21 |
| II-4. | ROLE DE L'ESP32..... | 22 |
| II-4-1. | Caractéristiques techniques principales..... | 22 |
| II-4-2. | Rôle fonctionnel dans le système..... | 23 |
| II-4-2-1. | Acquisition des données..... | 23 |
| II-4-2-2. | Traitement local..... | 23 |
| II-4-2-3. | Transmission des données..... | 23 |
| II-4-2-4. | Réactions automatiques..... | 23 |
| II-4-2-5. | Avantages..... | 23 |
| II-5 | INTEGRATION MATERIELLE DE L'ESP32-CAM POUR LA VIDEO..... | 24 |
| II-5-1. | Caractéristiques techniques | 24 |
| II-5-2. | Rôle dans le système..... | 24 |
| II-5-3. | Avantages..... | 24 |
| II-5-4. | Limitations..... | 24 |
| II-6. | CONCEPTION LOGICIELLE, PROGRAMMATION ET COMMUNICATION..... | 25 |
| II-6-1. | Simulation par logicielle Eraser.io..... | 25 |
| II-6-2. | Présentation du logiciel Arduino IDE..... | 26 |
| II-6-3. | Application dans le système..... | 26 |
| II-6-4. | Lecture et traitement des données capteurs..... | 27 |
| II-6-5. | Connexion au réseau Wi-Fi..... | 28 |
| II-6-6. | Envoi des données vers le serveur sous format JSON via HTTP POST..... | 28 |
| II-7. | SÉCURITÉ ET GESTION DES ALERTES..... | 29 |
| II-7-1. | Transmission des données via Http..... | 29 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| II-7-2. | Sécurisation du réseau Wi-Fi..... | 30 |
| II-8 | TEST ET VALIDATION..... | 30 |
| II-8-1. | Test des capteurs..... | 30 |
| II-8-1-1. | Capteur DHT22 – Mesure précise de température et d'humidité..... | 30 |
| II-8-1-2. | Capteur MLX90614 – Mesure de température infrarouge sans contact..... | 31 |
| II-8-1-3. | Capteur KY-038 – Détection sonore..... | 32 |
| II-8-1-4. | Capteur HC-SR04 – Mesure de distance à ultrason..... | 33 |
| II-9 | TEST DE L'APPLICATION WEB..... | 33 |
| II-9-1. | Interaction avec l'Application Web..... | 33 |
| II-9-1-1. | Réception des données capteurs..... | 34 |
| II-9-1-2. | Intégration vidéo..... | 34 |
| II-9-1-3. | Tableau de bord interactif..... | 34 |
| II-9-1-4. | Système d'alertes intelligent..... | 34 |
| II-9-2. | Test global du projet..... | 36 |
| II-10 | CONCLUSION..... | 38 |
| | CONCLUSION GÉNÉRALE..... | 39 |
| | BIBLIOGRAPHIE..... | VII |

ملخص : يهدف هذا المشروع إلى تصميم وتنفيذ نظام مراقبة ذكي ومتكامل موجه لمتابعة الحالة الصحية والبيئية للرضيع في الوقت الحقيقي، مستعيناً بتقنيات إنترنت الأشياء. يركز النظام على وحدة تحكم ESP32 تتصل بمجموعة من المستشعرات الذكية لقياس درجة الحرارة المحيطة، درجة حرارة جسم الرضيع دون لمس، الضوضاء (مثل البكاء)، والحركة. كما تم دمج كاميرا ESP32-CAM لتوفير مراقبة مرئية لحظية. تُرسل جميع البيانات إلى واجهة تطبيق ويب أو هاتف ذكي، ما يسمح للأولياء أو مقدمي الرعاية بتلقي تنبيهات فورية في حال رصد أي خلل. يهدف النظام إلى تقديم حل مبتكر، موثوق، وسهل الاستخدام لتعزيز أمن وراحة الرضيع باستعمال أحدث تقنيات الذكاء الاصطناعي وIoT.

الكلمات المفتاحية: مراقبة ذكية، إنترنت الأشياء، ESP32، سلامة الرضع، مستشعرات متقدمة، كاميرا مدمجة، تطبيق جوال، تنبيهات فورية.

ABSTRACT: This project focuses on the design and deployment of a smart, real-time monitoring system tailored for infant care. Leveraging the power of the Internet of Things (IoT), the system utilizes an ESP32 microcontroller connected to a suite of advanced sensors for measuring ambient temperature, noise levels (cry detection), movement, and non-contact body temperature. Additionally, an ESP32-CAM module enables real-time video surveillance. All collected data are transmitted to a dedicated web or mobile application, which provides caregivers with intuitive dashboards and immediate alerts in case of abnormalities. The system is designed to be reliable, user-friendly, and adaptable, integrating cutting-edge IoT and artificial intelligence technologies to enhance infant safety and comfort.

Keywords: Smart monitoring, IoT, ESP32, infant safety, advanced sensors, integrated camera, mobile application, real-time alerts.

RESUME : Ce projet de fin d'études s'inscrit dans le cadre du développement de solutions technologiques innovantes pour la sécurité infantile. Il vise à concevoir et implémenter un système de surveillance intelligent et connecté, dédié à la surveillance en temps réel de l'état environnemental et physiologique des nourrissons. Le système repose sur une plateforme ESP32 intégrant des capteurs avancés (température ambiante, bruit, mouvement, température corporelle sans contact) ainsi qu'une caméra ESP32-CAM pour la surveillance visuelle. L'ensemble des données est transmis à une interface web ou mobile permettant la consultation des informations en direct et l'envoi d'alertes instantanées en cas d'anomalie. Ce système se veut fiable, intuitif et évolutif, en intégrant des technologies émergentes telles que l'IoT et l'intelligence artificielle.

Mots clés : Surveillance intelligente, Internet des Objets, ESP32, sécurité des nourrissons, capteurs intelligents, caméra embarquée, application mobile, alertes en temps réel.

LISTE DES ABREVIATIONS

| | |
|-------------------|--|
| IoT | Internet des Objets |
| IA / AI | Intelligence Artificielle |
| MSN / SMSN | Mort Subite du Nourrisson |
| ESP32 | Microcontrôleur Wi-Fi/Bluetooth |
| Wi-Fi | Wireless Fidelity |
| HTTP | Hyper Text Transfer Protocol |
| DECT | Digital Enhanced Cordless Telecommunications |
| GPIO | General Purpose Input/Output |
| LED | Light Emitting Diode |
| APP | Application (mobile ou web) |
| RAM | Random Access Memory |
| CPU | Central Processing Unit |
| MQTT | Message Queuing Telemetry Transport |
| API | Application Programming Interface |
| JSON | JavaScript Object Notation |
| CAM | Camera Module |
| UI | User Interface |
| UX | User Experience |

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|----|
| Figure I-1. Maison intelligente | 2 |
| Figure I-2. Schéma d'un réseau de capteurs | 7 |
| Figure I-3. Capteur de température et d'humidité | 9 |
| Figure I-4. Capteur d'accéléromètre et gyroscope | 10 |
| Figure I-6. Caméra intelligente | 11 |
| Figure I-7. Systèmes de transmission des données | 11 |
| Figure I-8. Surveillance infantile par l'IA | 12 |
| Figure II-1. Module ESP32 | 16 |
| Figure II-2. Module ESP32-CAM | 17 |
| Figure II-3. Schéma de fonctionnement | 18 |
| Figure II-4. Capteur DHT22 | 19 |
| Figure II-5. Capteur HC-SR04 | 20 |
| Figure II-6. Module Capteur KY-038 | 21 |
| Figure II-7. Module Capteur MLX90614 | 22 |
| Figure II-8. Simulation par Eraser.io | 25 |
| Figure II-9. Interface du logiciel Arduino IDE | 26 |
| Figure II-10. Programmation par Arduino IDE | 27 |
| Figure II-11. Test du capteur DHT22 – Température et humidité ambiantes | 31 |
| Figure II-12. Test du capteur MLX90614 – Température corporelle sans contact | 32 |
| Figure II-13. Test du capteur sonore KY-038 – Détection du bruit ambiant | 32 |
| Figure II-14. Test du capteur à ultrasons HC-SR04 – Mesure de distance | 33 |
| Figure II-15. Affichage des données des capteurs sur l'application web | 35 |
| Figure II-16. Visualisation vidéo via ESP32-CAM dans l'application web | 35 |
| Figure II-17. Photo réelle du prototype | 36 |
| Figure II-18. Interface Web – Tableau de bord interactif | 37 |
| Figure II-19. Alerte déclenchée lors d'une anomalie détectée | 37 |

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La protection et le bien-être des nourrissons représentent une préoccupation majeure, particulièrement au cours des premiers mois de leur vie, période durant laquelle ils sont particulièrement vulnérables aux variations environnementales et aux risques sanitaires. Dans ce contexte, les avancées technologiques, notamment dans le domaine de l'Internet des Objets (IoT) et des systèmes embarqués, offrent de nouvelles perspectives pour le développement de dispositifs intelligents de surveillance. Ces systèmes permettent aux parents de suivre à distance l'état de santé et les conditions environnementales de leur bébé en temps réel, tout en recevant des alertes en cas de situation anormale.

Ce projet s'inscrit dans cette dynamique, visant à concevoir et réaliser un système connecté de surveillance des nourrissons basé sur un microcontrôleur ESP32. Ce dernier est associé à une série de capteurs mesurant des paramètres essentiels tels que la température, l'humidité, le bruit et le mouvement, ainsi qu'à une caméra ESP32-CAM assurant une surveillance visuelle. L'objectif est de proposer une solution complète et accessible via une application web conviviale, permettant une consultation en temps réel des données collectées.

Le système combine plusieurs disciplines techniques, incluant l'électronique embarquée pour la gestion des capteurs, la communication sans fil via Wi-Fi pour la transmission des données, ainsi que le développement web pour l'interface utilisateur. Cette architecture simple mais efficace garantit une surveillance continue, fiable et évolutive. En effet, ce projet ouvre également la voie à des développements futurs, tels que l'intégration d'algorithmes d'intelligence artificielle capables d'analyser automatiquement les pleurs ou les mouvements du bébé, ainsi que le déploiement sur des plateformes mobiles pour une accessibilité renforcée.

Enfin, ce mémoire est structuré afin de présenter dans un premier temps le contexte théorique et l'état de l'art des systèmes de surveillance, suivi des choix techniques et de la conception matérielle et logicielle, pour terminer par la réalisation, les tests et les perspectives d'amélioration du système proposé.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES SYSTEMES DE SURVEILLANCE DES NOURRISSONS

I-1. INTRODUCTION

La surveillance des nourrissons est une préoccupation majeure pour tous les parents. Chaque pleur, chaque mouvement, chaque instant de silence peut être source d'inquiétude. C'est pourquoi, au fil du temps, différentes solutions ont été développées pour aider les parents à veiller sur leurs bébés, même à distance. Des simples écoutes-bébés aux dispositifs intelligents capables de surveiller la température, les mouvements ou encore la respiration, ces technologies ont évolué pour répondre à un besoin grandissant de sécurité et de tranquillité d'esprit.

Aujourd'hui, avec l'essor des nouvelles technologies, les systèmes de surveillance infantile se sont perfectionnés. L'Internet des Objets (IoT) et l'Intelligence Artificielle (IA) permettent désormais d'analyser en temps réel l'état du nourrisson et d'envoyer des alertes en cas d'anomalie. Cependant, malgré ces avancées, ces technologies posent aussi des défis, notamment en matière de fiabilité et de protection des données personnelles.

Ce chapitre explore l'univers des systèmes de surveillance pour nourrissons en abordant leur importance, les technologies actuelles, leurs limites et les défis à relever pour améliorer leur efficacité.

I-2. DEFINITION D'UN SYSTEME DE SURVEILLANCE INFANTILE

Un système de surveillance infantile est un ensemble de dispositifs électroniques permettant de suivre l'état de santé et l'environnement d'un nourrisson. Il peut inclure des caméras, des capteurs de mouvement, des moniteurs de fréquence cardiaque et des applications mobiles pour informer les parents en temps réel (Fig. I-1) [1] :

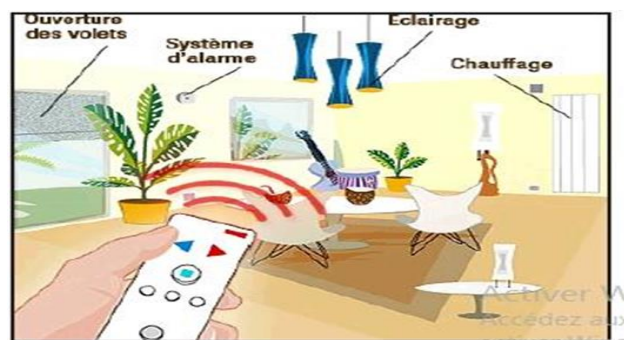


Figure I-1. Maison intelligente [1]

I-3. HISTORIQUE ET EVOLUTION DES DISPOSITIFS DE SURVEILLANCE

Les dispositifs de surveillance des nourrissons ont connu une évolution significative au fil des décennies, passant de simples systèmes audio analogiques à des technologies avancées intégrant l'Intelligence Artificielle (IA) et l'Internet des Objets (IoT).

Entre 1930 et 1990, les baby-phones analogiques ont marqué les débuts de la surveillance audio des nourrissons [2]. Le tout premier modèle emblématique fut le "Zenith Radio Nurse", lancé en 1937 aux États-Unis [3]. Ces appareils utilisaient une transmission audio unidirectionnelle, permettant aux parents d'écouter leur bébé à distance, généralement depuis une autre pièce.

Cependant, malgré leur utilité, ces dispositifs présentaient plusieurs limites techniques :

- Les interférences : comme ils fonctionnaient sur des fréquences radio analogiques, ils étaient souvent sujets à des perturbations provenant d'autres appareils électroniques comme les radios ou les téléphones.
- Une portée réduite : leur capacité de transmission était limitée à une courte distance, ce qui restreignait leur efficacité aux petits espaces ou à un seul étage de la maison.

Malgré ces contraintes, les baby-phones analogiques ont représenté une avancée majeure pour leur époque, offrant aux parents un sentiment de sécurité accru en leur permettant de rester attentifs aux besoins de leur bébé tout en vaquant à d'autres tâches [4].

Avec l'essor des technologies numériques dans les années 1990, les baby-phones ont bénéficié d'avancées notables, notamment en matière de clarté sonore et de réduction des interférences. Les anciennes fréquences analogiques, telles que le 49 MHz, ont progressivement laissé place à des systèmes plus performants comme le DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunications), offrant une transmission audio plus fiable et sécurisée. Vers la fin de cette décennie, les premiers modèles de baby-phones équipés de caméras ont émergé, inaugurant la surveillance vidéo domestique et permettant aux parents de garder un œil sur leur nourrisson à distance [5].

Entre 2000 et 2010, les baby-phones ont connu une évolution significative avec l'apparition des modèles dits intelligents. Ces dispositifs intégraient désormais des capteurs de mouvement et de son, rendant la surveillance plus réactive et précise. Ils pouvaient détecter les pleurs ou les agitations du bébé et envoyer des alertes automatiques aux parents. Cette nouvelle génération de baby-phones a permis aux parents d'intervenir plus rapidement en cas de besoin. Ainsi, la technologie est devenue un véritable allié pour assurer le bien-être et la sécurité du nourrisson [6].

Les dispositifs de surveillance modernes ont intégré des technologies avancées telles que l'IA et l'IoT. Grâce à l'IA, ces appareils sont capables de réaliser une analyse approfondie des données recueillies, comme par exemple la reconnaissance des pleurs du bébé, la détection des mouvements, et même la surveillance des paramètres environnementaux (température, qualité de l'air, etc.).

L'intégration de l'IoT permet quant à elle de connecter ces dispositifs à d'autres appareils intelligents, offrant ainsi une expérience plus fluide et complète. Ces technologies fournissent aux parents une tranquillité d'esprit accrue, en leur permettant d'obtenir des informations précises en temps réel et d'intervenir rapidement si nécessaire [7].

La surveillance des nourrissons est essentielle pour réduire les risques liés à leur vulnérabilité. Elle permet de détecter rapidement des anomalies respiratoires, de température ou de mouvement, notamment pendant le sommeil. Elle répond également aux inquiétudes des parents et leur offre une tranquillité d'esprit, en particulier pour les prématurés ou les bébés souffrant de pathologies spécifiques.

I-4. IMPORTANCE DE LA SURVEILLANCE DES NOURRISSONS

La surveillance des nourrissons est essentielle pour garantir leur sécurité, leur santé et leur bien-être. L'absence de surveillance adéquate peut entraîner des conséquences dramatiques, telles que des accidents domestiques, des problèmes de santé non détectés et un stress parental excessif. Une surveillance efficace permet de prévenir les risques d'étouffement, de chutes, de fièvre ou de troubles respiratoires. Grâce aux avancées technologiques, les parents disposent aujourd'hui de dispositifs intelligents intégrant des capteurs de mouvement, des moniteurs de fréquence cardiaque et des caméras connectées, facilitant ainsi le suivi des nourrissons en temps réel. Cependant, ces technologies présentent certains défis, notamment en matière de protection des données, de coût et de dépendance excessive aux dispositifs numériques. Un équilibre entre l'utilisation des nouvelles technologies et la vigilance parentale est crucial pour assurer un environnement sûr et rassurant aux nourrissons. Enfin, la surveillance infantile joue également un rôle clé dans le maintien de l'équilibre psychologique des parents, en réduisant leur anxiété et en leur offrant une plus grande tranquillité d'esprit [8].

I-4-1. Risques liés à l'absence de surveillance

L'absence de surveillance expose les nourrissons à des risques graves tels que l'étouffement, la fièvre élevée ou l'arrêt respiratoire, qui peuvent survenir sans signe préalable évident. Ces incidents, s'ils ne sont pas détectés à temps, peuvent entraîner des complications sévères, voire mettre en danger la vie du bébé. Une surveillance régulière est donc essentielle pour prévenir ces situations et garantir une intervention rapide en cas de besoin [9].

I-4-2. Principales causes de mortalité infantile évitables

La mort subite du nourrisson (MSN), ou syndrome de mort subite du nourrisson (SMSN) est l'une des principales causes de décès chez les bébés de moins d'un an. Ce phénomène, qui survient le plus souvent durant le sommeil, reste difficile à prévoir, mais plusieurs facteurs de risque ont été identifiés [9].

I-4-2-1. Troubles respiratoires

Nourrissons présentent des anomalies dans la régulation de leur respiration, les empêchant de réagir correctement à une baisse du taux d'oxygène ou à une obstruction des voies respiratoires. Cette incapacité à se réveiller en cas de détresse respiratoire constitue un facteur majeur de MSN.

I-4-2-2. Environnement de sommeil inadapté

Un cadre de sommeil non sécurisé peut augmenter considérablement les risques de MSN. Parmi les éléments les plus dangereux figurent :

- Position de sommeil : les bébés dormant sur le ventre ou sur le côté risquent davantage de souffrir d'une obstruction des voies respiratoires.
- Literie inappropriée : l'usage de couvertures épaisses, d'oreillers ou de coussins moelleux peut entraîner un étouffement accidentel.
- Partage du lit avec les parents : le Co-sleeping peut exposer le nourrisson à un risque d'écrasement involontaire ou d'étouffement.

I-4-2-3. Facteurs génétiques

Nourrissons possèdent une prédisposition génétique à des troubles affectant la respiration ou la régulation cardiaque, augmentant ainsi leur vulnérabilité au SMSN, même dans un environnement de sommeil sécurisé. Une surveillance adaptée peut aider à détecter les signes avant-coureurs de ces troubles et à intervenir rapidement [9].

I-4-2-4. Rôle de la surveillance efficace

Une surveillance adéquate peut permettre de détecter les signes précurseurs de la MSN. L'utilisation de moniteurs de respiration et de capteurs de mouvement peut alerter les parents en cas de pauses respiratoires ou de mouvements anormaux, permettant une intervention rapide. Cependant, il est important de noter que la surveillance ne doit pas remplacer les recommandations sécuritaires de sommeil, comme mettre les bébés sur le dos pour dormir et éviter les objets mous dans leur lit [9].

I-4-2-5. Rôle des nouvelles technologies dans la prévention et la surveillance

Les nouvelles technologies, notamment l'IA, jouent un rôle crucial dans la prévention et la surveillance des nourrissons. Grâce à des dispositifs connectés et des capteurs avancés, il est désormais possible de suivre en temps réel les signes vitaux du bébé, comme la fréquence cardiaque, la respiration et la température. L'IA peut analyser ces données pour détecter des anomalies, comme des schémas de sommeil irréguliers ou des risques potentiels, et générer des alertes précoces. De plus, elle peut offrir des recommandations personnalisées pour améliorer la sécurité et le confort du nourrisson, réduisant ainsi les risques d'incidents graves.

I-5. TECHNOLOGIES EXISTANTES ET LEURS LIMITES

Différentes solutions technologiques sont actuellement disponibles pour surveiller les nourrissons, mais elles présentent des avantages et des inconvénients.

- **Baby phones audio et vidéo** : ces dispositifs permettent aux parents d'écouter ou de voir leur bébé à distance. Cependant, ils sont limités en termes d'analyse des signes vitaux et peuvent être sujets aux interférences ou au piratage s'ils sont connectés à Internet.
- **Moniteurs de fréquence cardiaque et de respiration** : les moniteurs de fréquence cardiaque et de respiration sont des appareils précieux pour surveiller la santé des nourrissons en détectant les pauses respiratoires et les anomalies cardiaques. Cependant, leur utilisation peut parfois donner lieu à de fausses alertes, en particulier si les capteurs sont sensibles aux mouvements ou aux variations normales du rythme cardiaque. Ces alertes erronées peuvent induire un stress inutile pour les parents, qui peuvent se retrouver à réagir à des événements bénins, perturbant ainsi leur tranquillité d'esprit. Il est donc essentiel que ces moniteurs soient conçus avec une grande précision pour minimiser le risque de fausses alertes, tout en garantissant un suivi fiable [10].
- **Capteurs de température et de mouvement** : les capteurs de température et de mouvement sont des éléments clés des systèmes modernes de surveillance des nourrissons et jouent un rôle essentiel dans la sécurité et le bien-être de l'enfant. Les capteurs de température surveillent en permanence la chaleur corporelle du bébé et la température ambiante, ce qui permet de détecter rapidement les situations dangereuses telles qu'hypothermie (température trop basse) ou hyperthermie (température trop élevée), qui peuvent toutes deux avoir de graves conséquences sur la santé. Les capteurs de mouvement, tels que les accéléromètres et les gyroscopes, analysent les mouvements de l'enfant pour identifier un comportement anormal, comme une absence prolongée de mouvement ou des gestes saccadés, qui pourraient indiquer un malaise ou une détresse. Toutefois, l'efficacité de ces capteurs dépend fortement de leur qualité et de leur précision. Des capteurs de mauvaise qualité peuvent générer des faux positifs ou manquer des signaux importants, ce qui peut compromettre la fiabilité du système. Il est donc essentiel de choisir des appareils équipés de capteurs de haute qualité et de les utiliser correctement pour garantir une surveillance optimale et fiable [11].

I-5-1. Réseau de capteurs sans fil

Un réseau de capteurs sans fil est un réseau ad hoc (réseau sans fil décentralisé dans lequel les appareils (nœuds) communiquent directement entre eux sans avoir besoin d'une infrastructure fixe, comme un routeur ou un point d'accès central) composé d'un grand nombre de micro-capteurs capables de collecter et de transmettre des données de manière

autonome. Ces capteurs peuvent être de différents types et sont conçus pour surveiller divers paramètres tels que la température, l'humidité, la pression, le mouvement des véhicules, le niveau sonore, ainsi que la présence ou l'absence d'objets, etc) (Fig. I-2) [12,13].

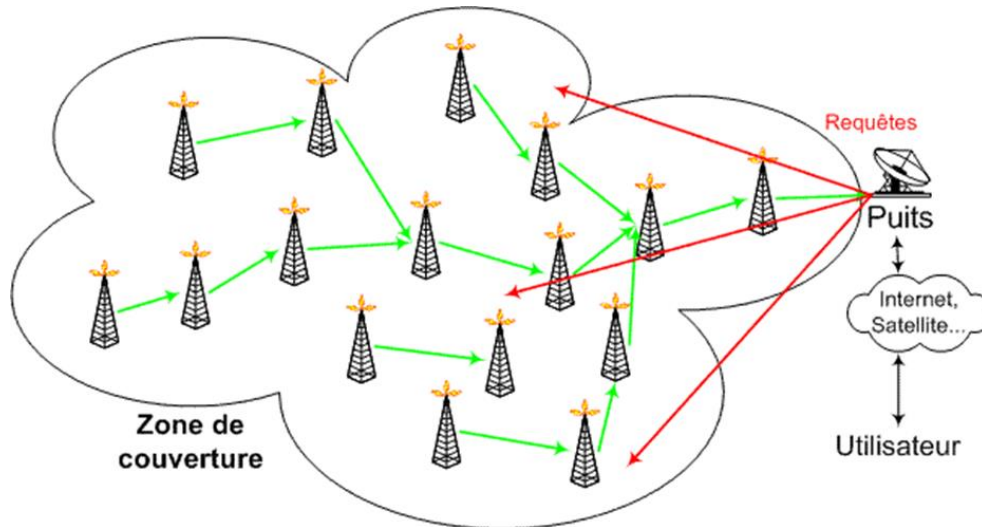


Figure I-2. Schéma d'un réseau de capteurs [11]

I-5-2. Composantes

Un réseau de capteurs est composé de deux types de nœuds : les capteurs et les puits. Les capteurs sont chargés de relever et de router les informations relevées sur la zone couverte vers le point de collecte, également appelé puits. Le puits récupère les informations remontées par les différents capteurs et les transmet au centre de traitement. Les capteurs disposés de manière aléatoire forment la zone de couverture [12].

I-5-3. Architectures de réseaux de capteurs

Il existe plusieurs topologies pour les réseaux à communication radio. Nous discutons ci-dessous des topologies applicables aux réseaux de capteurs.

I-5-3-1. Topologie en étoile

Dans cette topologie une station de base envoie ou reçoit un message via un certain nombre de nœuds. Ces nœuds peuvent uniquement envoyer ou recevoir un message de l'unique station de base, il ne leur est pas permis de s'échanger des messages.

- **Avantage** : simplicité et faible consommation d'énergie des nœuds, moindre. Latence de communication entre les nœuds et la station de base,
- **Inconvénient** : la station de base est vulnérable, car tout le réseau est géré par un seul nœud.

I-5-3-2. Topologie en «grille» (Mesh Network)

Dans ce cas (dit «communication multi-sauts»), tout nœud peut échanger avec n'importe quel autre nœud du réseau, s'il est à sa portée de transmission. Un nœud voulant

transmettre un message à un autre nœud hors de sa portée de transmission, peut utiliser un nœud intermédiaire pour envoyer son message au nœud destinataire.

- **Avantage** : possibilité de passer à l'échelle du réseau, avec redondance et tolérance aux fautes.

- **Inconvénient** : une consommation d'énergie plus importante est induite par la communication multi-sauts. Une latence est créée par le passage des messages des nœuds par plusieurs autres avant d'arriver à la station de base.

I-5-3-3. Topologie hybride

Une topologie hybride se situe entre celle en étoile et en grille apporte des communications réseau robustes et diverses, en assurant la minimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs. Dans ce type de topologie, les nœuds capteur autonome en énergie ne routent pas les messages, mais il y a d'autres nœuds qui ont la possibilité de faire le routage des messages. Généralement, ces nœuds disposent d'une source d'énergie externe.

I-5-4. Avantages et inconvénients des solutions actuelles

Les solutions modernes de surveillance des nourrissons offrent des avantages considérables, mais elles ne sont pas sans inconvénients. Le principal avantage de ces systèmes est la tranquillité d'esprit qu'ils offrent aux parents, grâce au suivi en temps réel des signes vitaux, des mouvements et des conditions environnementales du bébé. Des technologies telles que les capteurs de mouvement, les moniteurs de température et les applications connectées permettent une surveillance précise et proactive [14], réduisant ainsi les risques pour la santé et la sécurité de l'enfant. Toutefois, ces solutions soulèvent également des défis importants [15]. Par exemple, la forte consommation d'énergie de certains appareils nécessite des recharges fréquentes ou l'utilisation de batteries, ce qui peut être contraignant. En outre, la dépendance à l'égard d'une connexion Internet fiable pour les systèmes Wi-Fi ou basés sur l'informatique en nuage peut s'avérer problématique dans les zones mal desservies ou en cas de panne de réseau. Enfin, le coût élevé de certains dispositifs avancés limite leur accessibilité pour de nombreuses familles, ce qui aggrave les inégalités en matière de santé et de sécurité des enfants. En résumé, si ces technologies offrent des avantages indéniables, il est essentiel de relever ces défis pour maximiser leur efficacité et leur accessibilité [16].

I-6. CAPTEURS ET DISPOSITIFS COURAMMENT UTILISES

Les systèmes de surveillance actuels reposent sur une variété de capteurs pour assurer un suivi précis de l'état du nourrisson lesquelles :

I-6-1. Capteurs de température et d'humidité

Les capteurs de température et d'humidité jouent un rôle crucial dans les dispositifs de surveillance des nourrissons, car ils contribuent à maintenir un environnement confortable et sûr pour le bébé. Ces capteurs mesurent la température et l'humidité de la pièce en temps réel, ce qui permet de détecter des conditions potentiellement dangereuses, telles qu'une chaleur excessive, un froid intense ou une sécheresse excessive de l'air. Par exemple, une température trop élevée peut augmenter le risque de mort subite du nourrisson (MSN), tandis qu'un air trop sec peut irriter les voies respiratoires du bébé.

Grâce à ces données, les parents peuvent régler le chauffage, utiliser un humidificateur ou ouvrir une fenêtre pour créer un environnement optimal. Intégrés à des applications mobiles, ces capteurs envoient des alertes en cas de variations anormales, offrant ainsi une surveillance proactive rassurante pour les familles. Ces technologies contribuent à améliorer le confort et la sécurité des nourrissons, tout en simplifiant la gestion de leur environnement quotidien (Fig. I-3) [17].



Figure I-3. Capteur de température et d'humidité pour la surveillance des nourrissons [17]

I-6-2. Accéléromètres et gyroscopes pour la détection de mouvement

Les accéléromètres et les gyroscopes sont des capteurs essentiels dans les dispositifs de surveillance des nourrissons, qui permettent de détecter et d'analyser avec précision les mouvements de l'enfant. Les accéléromètres mesurent les changements de vitesse et d'orientation, tandis que les gyroscopes détectent les rotations et les angles d'inclinaison. Ensemble, ces technologies offrent une vue détaillée des mouvements de l'enfant, ce qui permet d'identifier des comportements inhabituels, tels que des troubles du sommeil ou des signaux de détresse. Par exemple, une absence prolongée de mouvements ou des mouvements saccadés peuvent alerter les parents ou les soignants en temps réel via une application mobile. Ces capteurs, associés à des algorithmes intelligents, contribuent ainsi à améliorer la sécurité et le bien-être des nourrissons, tout en offrant aux familles un suivi fiable et non invasif. Leur

efficacité dépend toutefois de la qualité des capteurs et de la précision des algorithmes d'analyse utilisée (Fig. I-5) [18].

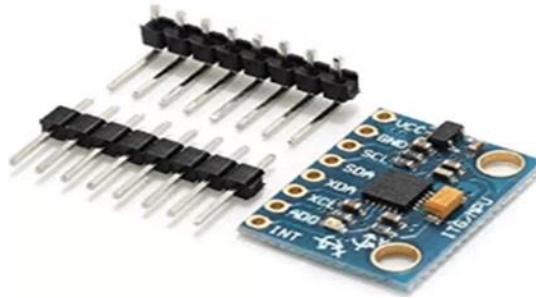


Figure I-4. Capteur d'accéléromètre et gyroscope [18]

I-6-3. Caméras intelligentes et reconnaissance faciale

Les caméras intelligentes équipées de technologies de reconnaissance faciale et d'IA représentent une avancée majeure dans les systèmes de surveillance des nourrissons. Elles permettent de surveiller en temps réel l'état du bébé, d'analyser ses mouvements et de détecter des signes de détresse (Fig. I-6).



Figure I-6. Caméra intelligente

I-6-4. Systèmes de transmission des données (Bluetooth, Wi-Fi, RF)

Les systèmes de transmission de données, tels que Bluetooth, Wi-Fi et les ondes radiofréquences (RF), jouent un rôle essentiel dans les dispositifs de surveillance des nourrissons. Ces technologies sans fil permettent la transmission en temps réel d'informations, telles que les signes vitaux ou les mouvements du bébé, directement vers une application mobile utilisée par les parents. Cette connectivité offre une surveillance pratique et immédiate, renforçant la tranquillité d'esprit des familles. Toutefois, ces systèmes ne sont pas sans risques, notamment en ce qui concerne la sécurité des données. Les transmissions par Wi-Fi ou Bluetooth peuvent être vulnérables au piratage ou aux interférences, exposant ainsi des informations sensibles. Il est donc essentiel de mettre en œuvre des protocoles de sécurité solides, tels que le cryptage des données et des mises à jour logicielles régulières, afin de minimiser ces risques et de garantir une utilisation sûre et fiable de ces technologies (Fig. I-7) [19].

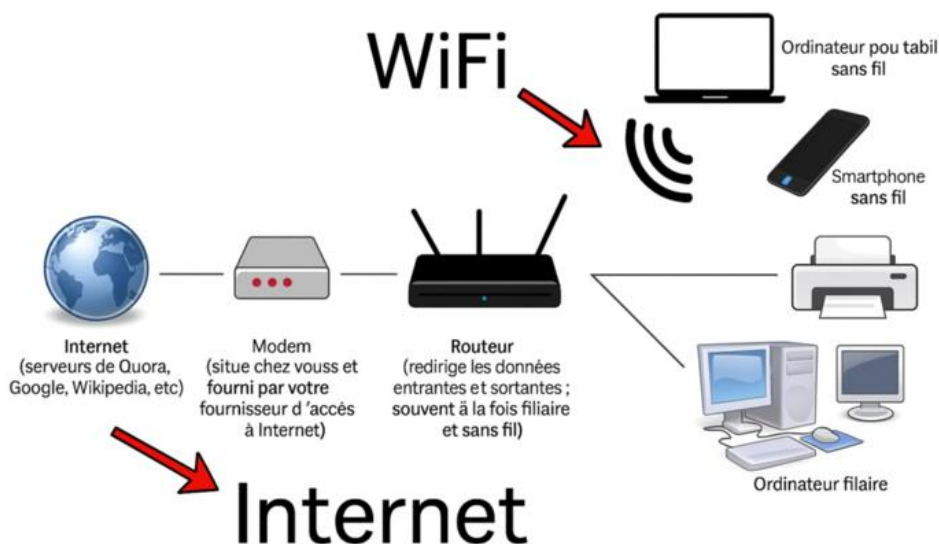


Figure I-7. Systèmes de transmission des données [18]

I-7. IMPACT DE L'IOT ET DE L'IA SUR LA SURVEILLANCE INFANTILE

L'IoT et l'IA transforment la surveillance infantile en automatisant la détection des risques et en améliorant la précision des alertes. L'IoT et l'IA ont profondément transformé la surveillance des nourrissons, en introduisant des appareils intelligents et connectés qui offrent des fonctionnalités innovantes pour la surveillance et la sécurité des nourrissons. Grâce à l'IoT, les parents peuvent surveiller leur bébé en temps réel via des caméras connectées, des capteurs de paramètres vitaux et des alertes instantanées en cas d'anomalie (Fig. I-8).



Figure I-8. Surveillance infantile par L'IA [20]

L'IA, quant à elle, ajoute une dimension prédictive et personnalisée en analysant les habitudes du bébé, en détectant les signes de détresse et en proposant des recommandations appropriées. Ces technologies permettent également l'intégration entre différents dispositifs, créant ainsi un écosystème connecté qui améliore le confort et la sécurité. Cependant, des défis subsistent, notamment en termes de protection des données, de coût élevé et de fiabilité des algorithmes. Malgré ces limites, l'IoT et l'IA ouvrent la voie à une

surveillance des nourrissons plus précise, proactive et accessible, tout en réduisant l'anxiété des parents et en renforçant la sécurité des nourrissons [20,21].

I-7-1. Automatisation et amélioration des systèmes de surveillance

L'automatisation et l'amélioration des systèmes de surveillance des nourrissons, grâce à l'IoT et à l'IA, ont permis de collecter et d'analyser des données en continu, rendant la surveillance plus réactive et plus efficace. Les appareils connectés, tels que les caméras intelligentes et les capteurs portables, recueillent des informations en temps réel sur les mouvements, la respiration, la température et d'autres paramètres vitaux d'un nourrisson. Grâce à des algorithmes d'intelligence artificielle, ces données sont analysées pour détecter les anomalies, telles que des respirations irrégulières ou des signes de détresse, et pour prédire les risques potentiels, tels que les épisodes de fièvre ou les troubles du sommeil. En cas de problème, le système peut alerter les parents et même suggérer des actions correctives, comme l'ajustement de la température de la pièce ou la consultation d'un médecin. Cette combinaison d'IoT et d'IA transforme la surveillance des nourrissons en un processus plus précis, proactif et personnalisé, tout en réduisant le stress et l'anxiété des parents [22,23].

I-7-2. Intégration des objets connectés dans le quotidien des parents

Intégration des objets connectés dans le quotidien des parents L'essor des objets connectés a considérablement transformé la parentalité moderne, offrant aux parents des outils avancés pour surveiller et veiller sur leur bébé en toute sérénité [24].

I-7-3. Surveillance en temps réel grâce aux applications mobiles

Les applications mobiles dédiées jouent un rôle central dans la surveillance intelligente des nourrissons. Elles offrent aux parents une interface simple et intuitive qui leur permet d'accéder, en un seul geste, à toutes les données essentielles concernant la santé et le bien-être de leur bébé. Connectées aux moniteurs intelligents via Wi-Fi ou Bluetooth, ces applications centralisent en temps réel les informations recueillies par différents capteurs intégrés.

Par exemple, un capteur de température corporelle informe les parents si la température du bébé dépasse la normale, ce qui pourrait signaler une fièvre ou un début d'infection. Un autre capteur peut mesurer la qualité de l'air dans la chambre, en détectant la présence de gaz nocifs ou un taux d'humidité trop élevé, conditions pouvant affecter la respiration ou le confort de l'enfant. De plus, des capteurs de mouvement suivent l'activité du bébé : ils peuvent repérer un manque de mouvement prolongé (ce qui peut être inquiétant) ou détecter une agitation anormale.

En cas de détection d'un paramètre inhabituel, le système envoie immédiatement une alerte sur le téléphone des parents, sous forme de notification sonore, vibration ou

message visuel. Ce dispositif permet une réaction rapide face à un danger potentiel, renforçant ainsi la sécurité du nourrisson, même à distance.

I-7-4. Interaction avec les assistants vocaux

Les assistants vocaux comme Amazon Alexa ou Google Assistant rendent encore plus simple la surveillance des nourrissons. Grâce à ces technologies, les parents peuvent recevoir des mises à jour vocales sur l'état de leur bébé sans avoir à regarder un écran ou manipuler leur téléphone. Cela s'avère particulièrement pratique lorsqu'ils sont occupés avec d'autres tâches ménagères, comme faire la cuisine ou le ménage.

Par exemple, un parent peut simplement demander : « Alexa, quelle est la température du bébé ? » et recevoir une réponse immédiate à voix haute. Ces assistants peuvent également envoyer des alertes vocales si un problème est détecté, comme une température trop élevée ou une agitation inhabituelle du bébé. Ce type d'intégration améliore le confort et la tranquillité d'esprit des parents, en leur permettant de rester informés en temps réel tout en gardant les mains libres.

I-7-5. Personnalisation et recommandations intelligentes

Au-delà du simple suivi, les technologies embarquées exploitent l'intelligence artificielle pour analyser les tendances du sommeil et du comportement du bébé. Elles peuvent ainsi proposer des ajustements automatisés, comme le réglage de la température de la chambre ou l'activation d'un bruit blanc apaisant pour favoriser un sommeil optimal [25].

I-7-6. Problématiques et défis techniques

Malgré des avancées significatives dans les systèmes de surveillance des nourrissons grâce à l'IoT et à l'IA, plusieurs défis techniques persistent. Tout d'abord, la fiabilité et la précision des capteurs sont cruciales pour éviter les fausses alertes tout en assurant la détection des événements critiques. Ensuite, la sécurité des données et la protection de la vie privée constituent un enjeu majeur, car la transmission de données sensibles via Internet les expose au risque de piratage et d'exploitation malveillante. Enfin, la consommation d'énergie et l'autonomie des appareils constituent un enjeu majeur, nécessitant des solutions innovantes telles que des batteries à longue durée de vie ou l'utilisation d'énergies renouvelables pour assurer un fonctionnement continu et fiable. Ces défis techniques doivent être relevés pour rendre ces systèmes plus accessibles, plus sûrs et plus efficaces [23].

I-7-7. Accessibilité financière et adoption par les familles

Le coût élevé des dispositifs de surveillance des nourrissons avancés constitue un véritable obstacle à leur adoption par un large public. Bien que ces appareils offrent des

fonctionnalités sophistiquées telles que la détection des mouvements, la surveillance de la température corporelle, l'analyse des pleurs et des positions de sommeil, leur prix reste souvent inaccessible pour de nombreuses familles, en particulier dans les pays en développement ou pour les ménages à revenus modestes. Cette barrière économique limite considérablement leur diffusion, réduisant ainsi leur impact potentiel sur la sécurité et le bien-être des nourrissons.

Cette problématique souligne l'urgence de concevoir des alternatives plus accessibles, tant en termes de coût que de simplicité d'utilisation, tout en maintenant la fiabilité et la qualité des dispositifs. Il est donc nécessaire d'explorer des pistes d'innovation, telles que l'utilisation de composants électroniques moins coûteux, l'intégration de solutions open source ou encore la mutualisation des services via des applications mobiles. Ces pistes seront approfondies dans les chapitres suivants, où des approches novatrices et des perspectives prometteuses seront présentées pour un développement technologique plus inclusif et durable [25].

I-8. CONCLUSION

Les systèmes de surveillance des nourrissons ont beaucoup progressé depuis les premiers baby phones, passant de simples outils audio à des dispositifs sophistiqués intégrant des technologies de pointe telles que l'IoT et l'intelligence artificielle. Ces progrès ont permis d'améliorer la sécurité et le bien-être des nourrissons, en offrant aux parents des moyens efficaces de surveiller la santé et l'environnement de leur bébé. Cependant, ces technologies restent confrontées à un certain nombre de défis, notamment en termes de fiabilité, de sécurité des données et d'accessibilité financière.

L'impact de ces systèmes sur la réduction des risques pour la santé des nourrissons, tels que la mort subite du nourrisson et les problèmes respiratoires, est indéniable. Toutefois, pour maximiser leur efficacité, il est essentiel de surmonter les obstacles techniques et d'assurer l'adoption généralisée de ces solutions, notamment en améliorant l'accessibilité et en sécurisant les données.

À l'avenir, les technologies de surveillance des nourrissons évolueront pour offrir des dispositifs plus intelligents, plus précis et plus accessibles, contribuant ainsi à un environnement plus sûr et plus serein pour les bébés et leurs familles. Ce premier chapitre, en exposant l'évolution historique et technologique des systèmes de surveillance des nourrissons, prépare le terrain pour le deuxième chapitre qui détaille le projet innovant visant à surmonter les limitations actuelles grâce à une solution intelligente intégrant l'IoT et l'IA.

Chapitre II : CONCEPTION ET REALISATION DU SYSTEME DE SURVEILLANCE

II-1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous exposons en détail la conception matérielle et logicielle du système de surveillance intelligent destiné aux nourrissons. L'objectif est de présenter l'architecture générale du dispositif, les choix technologiques retenus, ainsi que les étapes de développement et d'intégration des différents composants. S'inscrivant dans une démarche fondée sur les principes de l'Internet des objets (IoT), cette solution permet une surveillance à distance, en temps réel, de l'environnement et de l'état de santé du nourrisson.

Le système s'appuie sur des microcontrôleurs ESP32, des capteurs intelligents et une caméra intégrée (ESP32-CAM), le tout relié à une application web. Cette interface assure la visualisation des données collectées et l'envoi d'alertes en cas d'anomalies détectées. La conception met l'accent sur la fiabilité, la sobriété énergétique et la simplicité d'utilisation pour les parents et les professionnels de la petite enfance.

La phase de conception s'est articulée autour de deux volets complémentaires : d'une part, l'implémentation de l'architecture matérielle, incluant la sélection et l'interconnexion des capteurs et microcontrôleurs ; d'autre part, le développement du code embarqué et des protocoles de communication entre les modules et l'interface utilisateur. L'approche adoptée est volontairement modulaire et évolutive, afin de faciliter l'intégration de fonctionnalités futures, notamment celles liées à l'intelligence artificielle ou à l'optimisation énergétique.

II-2. VUE GLOBALE DU SYSTEME

II-2-1. Présentation globale du système et objectifs fonctionnels

Le système de surveillance proposé a pour objectif d'assurer un suivi intelligent, constant et en temps réel de l'état du nourrisson. Il repose sur une architecture modulaire, intégrant différents capteurs environnementaux ainsi qu'une caméra embarquée. Grâce à

cette configuration, le système est capable de collecter en continu des données relatives aux conditions ambiantes telles que la température, la qualité de l'air ou encore le niveau sonore.

L'ensemble des composants est interconnecté via une infrastructure IoT, permettant une surveillance à distance efficace et réactive. Ce dispositif vise principalement à prévenir les risques environnementaux susceptibles d'affecter le bien-être du bébé, tout en garantissant une observation visuelle continue, l'intégration de capteurs intelligents et de modules de vision dans les systèmes embarqués contribue significativement à renforcer la sécurité dans les environnements domestiques sensibles [26].

II-2-2. Description des deux modules principaux : (ESP32) / (ESP32-CAM)

Le cœur du module capteurs repose sur une carte ESP32, un microcontrôleur performant largement utilisé dans les applications IoT grâce à sa capacité à se connecter facilement aux réseaux Wi-Fi. Cette connectivité permet une transmission fluide et rapide des données vers une plateforme de traitement distante.

Dans ce système, l'ESP32 est couplé à plusieurs capteurs environnementaux qui assurent la surveillance de paramètres essentiels tels que la température, le taux d'humidité, la qualité de l'air, ainsi que le niveau sonore ambiant. Ces mesures sont cruciales pour évaluer en temps réel les conditions dans lesquelles évolue le nourrisson (Fig.II-1).

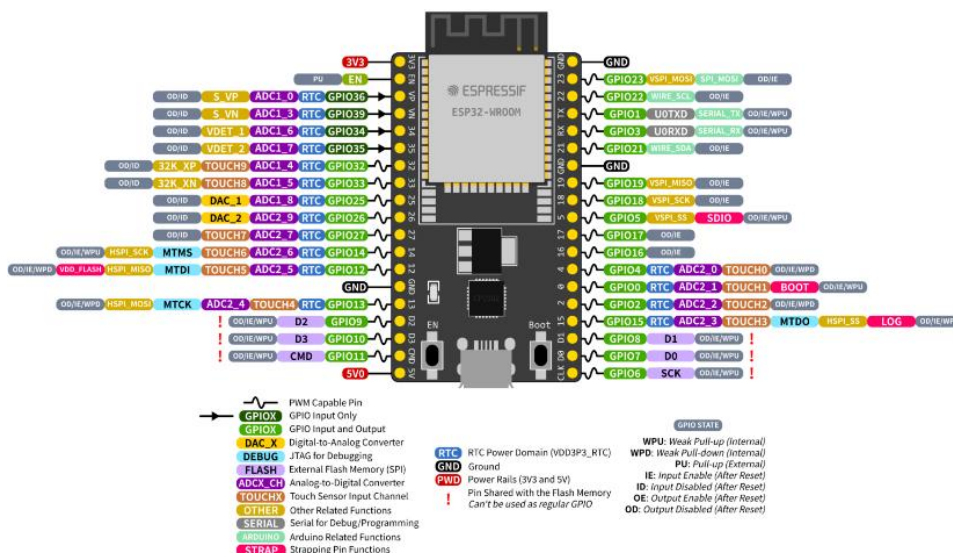


Figure II-1. Module ESP32

Dans cette architecture, les modules d'acquisition comprenant à la fois les capteurs environnementaux et la caméra ESP32-CAM jouent le rôle de collecteurs d'informations en temps réel. Ils mesurent et capturent les données pertinentes concernant l'environnement et l'activité du nourrisson.

Ces données sont ensuite transmises vers un serveur central, qui constitue le cœur de l'infrastructure du système. Le serveur assure plusieurs fonctions essentielles :

- **Réception** des données brutes envoyées par les modules ;
- **Traitement** de ces données pour en extraire les informations utiles ;
- **Analyse** des conditions détectées (température anormale, absence du bébé, mouvement suspect, etc.) ;
- Et enfin, **restitution** de l'information vers l'utilisateur sous forme d'alertes ou de visualisation sur une interface claire et accessible.

L'interface utilisateur, qu'elle soit mobile ou web, permet ainsi aux parents ou aux soignants d'avoir un accès instantané à toutes les informations pertinentes, de visualiser le flux vidéo, et de recevoir des notifications en temps réel.

Ce modèle repose sur une architecture distribuée, largement adoptée dans les systèmes embarqués IoT modernes. Il permet une communication bidirectionnelle entre les unités d'acquisition et l'utilisateur, favorisant ainsi une réactivité optimale et une supervision continue (Fig.II-3) [27].

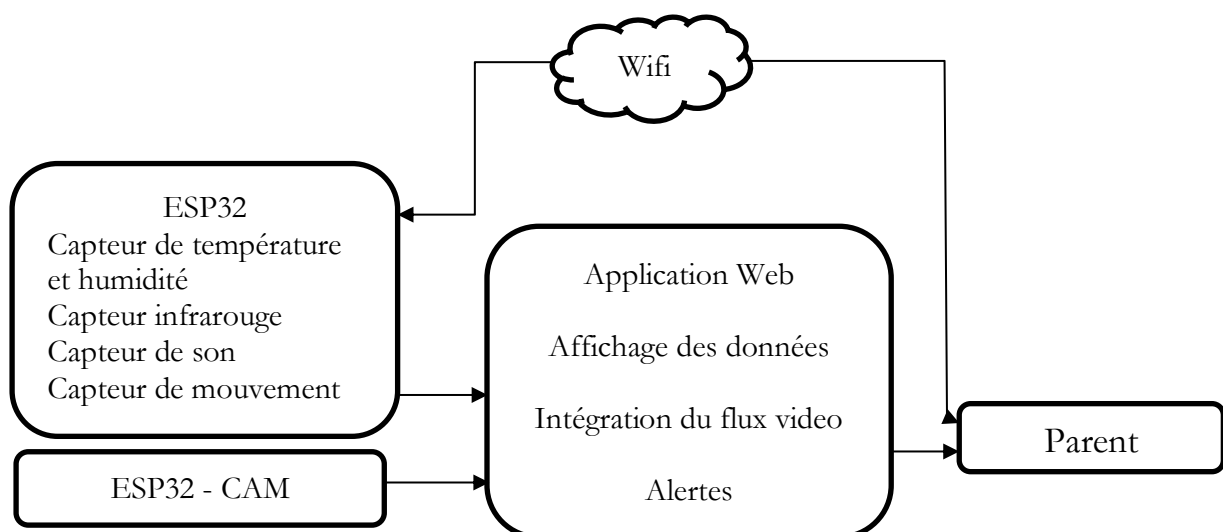


Figure II-3. Schéma de Fonctionnement

II-3. CONCEPTION MATÉRIELLE

II-3-1. Étude comparative et sélection des capteurs

Dans le cadre de la conception matérielle du système intelligent de surveillance des nourrissons, une sélection rigoureuse de capteurs a été effectuée afin de garantir des performances optimales en matière de sécurité, de fiabilité et de précision. Cette section présente une analyse technique approfondie de quatre capteurs essentiels intégrés au dispositif : le DHT22, le HC-SR04, le KY-038 et le MLX90614. Pour chacun de ces capteurs, une description détaillée est fournie, accompagnée de leurs avantages, de leurs limitations, ainsi que d'une référence technique fiable permettant de mieux comprendre leurs caractéristiques et conditions d'utilisation.

II-3-1-1. Capteur DHT22– Mesure précise de température et d'humidité

Le DHT22 (AM2302) (Fig.II-4) est un capteur numérique économique et performant, spécialement conçu pour mesurer la température ambiante et l'humidité relative avec une grande précision. Idéal pour des applications domestiques, industrielles ou médicales, ce capteur offre une solution fiable pour la surveillance des conditions environnementales.

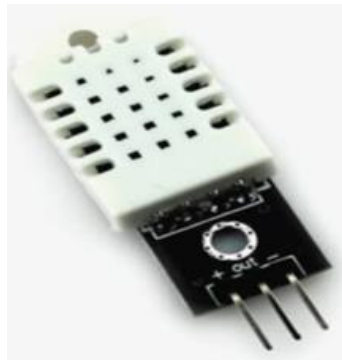


Figure II4. Module Capteur DH22

A. Caractéristiques techniques [28] :

- Température : -40 °C à +80 °C (précision : $\pm 0,5$ °C) ;
- Humidité relative : 0 % à 100 % HR (précision : ± 2 % HR) ;
- Temps de réponse : ~ 2 secondes ;
- Alimentation : 3,3 V à 6 V (faible consommation d'énergie) ;
- Communication : Interface numérique via une seule broche.

B. Avantages :

- Haute précision pour des mesures environnementales fiables Faible coût et grande disponibilité sur le marché ;

- Compatibilité avec de nombreux microcontrôleurs (ESP32, Raspberry Pi, etc.).

C. Limitations à considérer :

- Temps de rafraîchissement lent (jusqu'à 2 secondes entre deux mesures) ;
- Sensibilité à l'humidité excessive (risque de condensation pouvant affecter les performances).

II-3-1-2. Capteur HC-SR04 – Mesure de distance à ultrasons

Le HC-SR04 (Fig.II-5) est un capteur de distance par ultrasons qui fonctionne en émettant un signal sonore à 40 kHz et en mesurant le temps de retour de l'écho. Il permet de détecter la proximité d'un objet sans contact direct.



Figure II-5. Module Capteur HC-SR04

A. Caractéristiques techniques [29] :

- Plage de mesure : de 2 cm à 4 m ;
- Précision : ± 3 mm ;
- Angle de détection : 15° ;
- Tension d'alimentation : 5 V ;
- Temps de réponse : < 50 ms ;
- Interface : broches Trigger et Echo.

B. Avantages :

- Technologie sans contact ;
- Mesure rapide et précise à courte distance ;
- Idéal pour détecter la présence ou absence de l'enfant.

C. Inconvénients :

- Perturbations possibles dues à la température ambiante
- Moins efficace sur surfaces absorbantes ou très inclinées.

II-3-1-3 Capteur KY-038 – Détection sonore

Le KY-038 (Fig.II-6) est un capteur sonore simple basé sur un microphone électret, capable de détecter les variations de niveaux sonores. Il est principalement utilisé pour déclencher une alerte en cas de cris ou de bruits anormaux.



Figure II-6. Module Capteur KY-038

A. Caractéristiques techniques [30] :

- Tension d'alimentation : 3,3 à 5 V ;
- Sorties : signal analogique (niveau sonore) et signal numérique (seuil configurable) ;
- Sensibilité réglable via potentiomètre.
- Gamme de fréquence : 100 Hz à 10 kHz.

B. Avantages :

- Détection simple et rapide des sons ;
- Sensibilité ajustable via potentiomètre ;
- Faible encombrement.

C. Inconvénients :

- Pas d'indication précise en décibels (dB) ;
- Sensible aux interférences électromagnétiques et au bruit de fond.

II-3-1-4. Capteur MLX90614 – Mesure de température infrarouge

Le capteur MLX90614 (Fig.II-7) est un capteur infrarouge hautement sensible permettant de mesurer la température d'un objet ou d'une surface à distance, sans contact physique. Grâce à sa précision et son temps de réponse rapide, il est particulièrement adapté à la surveillance de la température corporelle des nourrissons, notamment pendant leur sommeil, sans provoquer de gêne.

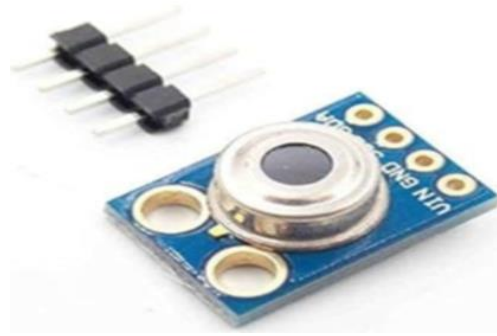


Figure II-7. Module Capteur MLX90614

A. Caractéristiques techniques [31] :

- Plage de mesure (objet) : de -70 °C à +380 °C ;
- Précision : $\pm 0,5$ °C ;
- Résolution : 0,02 °C ;
- Tension d'alimentation : 2,6 V à 3,6 V ;
- Interface de communication : I²C ou PWM ;
- Temps de réponse : inférieur à 1 seconde.

B. Avantages :

- Permet des mesures rapides et fiables à distance ;
- Parfaitement adapté à la détection de température corporelle sans contact ;
- Faible consommation énergétique, idéal pour les systèmes embarqués.

C. Limites :

- Sensible aux conditions environnementales extrêmes (lumière solaire directe, infrarouges ambiants) ;
- Une calibration peut s'avérer nécessaire selon l'environnement d'utilisation.

II-4. ROLE DE L'ESP32

L'ESP32 est un microcontrôleur de nouvelle génération développé par Espressif Systems, spécifiquement conçu pour les applications de l'Internet des objets (IoT). Grâce à son intégration native du Wi-Fi, du Bluetooth, ainsi que de nombreuses interfaces de communication numériques et analogiques, il offre une solution complète et performante pour la gestion de systèmes embarqués intelligents [32,33].

II-4-1. Caractéristiques techniques principales

- Processeur : Dual-core Xtensa® LX6 cadencé jusqu'à 240 MHz ;
- Mémoire : 520 Ko de SRAM, extensible via PSRAM externe + Flash SPI ;
- Connectivité : Wi-Fi 802.11 b/g/n et Bluetooth v4.2 (incluant BLE) ;
- Interfaces : SPI, I2C, UART, PWM, CAN, ADC (12 bits), DAC ;

- Broches E/S : Jusqu'à 34 broches GPIO configurables ;
- Consommation énergétique : Modes de veille (light, deep sleep) avec gestion d'alimentation ultra-efficace [32].

II-4-2. Rôle fonctionnel dans le système

II-4-2-1. Acquisition des données

L'ESP32 permet la lecture en temps réel de capteurs analogiques (KY-038) via l'ADC, ainsi que de capteurs numériques via les bus I2C ou GPIO comme le DHT22 (température/humidité), HC-SR04 (ultrasons) et MLX90614 (température infrarouge) [33].

II-4-2-2. Traitement local

Il assure un prétraitement local des données, comme le filtrage des valeurs anormales ou le calcul de moyennes, ce qui réduit la charge du réseau et optimise la consommation d'énergie.

II-4-2-3. Transmission des données

L'ESP32 transmet les données traitées via Wi-Fi vers une interface utilisateur mobile ou un serveur cloud, en utilisant des protocoles standards comme MQTT ou HTTP [34]. Cela permet une surveillance distante en temps réel du nourrisson.

II-4-2-4. Réactions automatiques

En fonction des données reçues, l'ESP32 peut déclencher des actions, telles qu'activer une alarme sonore, envoyer une notification ou commander un autre module.

II-4-2-5. Avantages

- Haute intégration : Pas besoin de modules Wi-Fi ou Bluetooth externes
- Faible coût et format compact
- Écosystème logiciel large : support Arduino, Esp-IDF, MicroPython, etc.
- Adapté à des solutions temps réel et basse consommation.

II-5. INTEGRATION MATERIELLE DE L'ESP32-CAM POUR LA VIDEO

L'ESP32-CAM est une extension du microcontrôleur ESP32, intégrant un module caméra OV2640 ainsi qu'un lecteur de carte microSD. Elle permet la capture et la

transmission de flux vidéo en temps réel, ce qui en fait une solution idéale pour les applications de surveillance, notamment dans le cadre de la sécurité des nourrissons.

II-5-1. Caractéristiques techniques [35]

- Processeur : ESP32-D0WD dual-core jusqu'à 240 MHz ;
- Caméra : OV2640, résolution maximale de 1600×1200 pixels ;
- Connectivité : Wi-Fi IEEE 802.11 b/g/n ;
- Interfaces : UART, SPI, I2C, PWM, ADC, microSD ;
- Mémoire : 520 Ko SRAM + support externe (PSRAM / microSD) ;
- Alimentation : 5 V via broche ou micro-USB, régulée à 3.3 V.

II-5-2. Rôle dans le système

- Capture vidéo : L'ESP32-CAM transmet des images ou flux en direct via Wi-Fi vers une interface de visualisation ;
- Stockage local : Les fichiers peuvent être enregistrés sur carte microSD pour une consultation différée ;
- Surveillance discrète : Son faible encombrement permet une intégration dans des espaces restreints comme un berceau [26] ;
- Possibilités d'extension : Elle est compatible avec des bibliothèques de reconnaissance faciale ou de détection de mouvement [36].

II-5-3. Avantages

- Solution vidéo tout-en-un à faible coût [26] ;
- Facilement programmable via l'IDE Arduino [36] ;
- Transmission sans fil sécurisée via Wi-Fi [26].

II-5-4. Limitations

- **Chauffe** notable en usage continu
- Débit vidéo limité selon la qualité du signal Wi-Fi [26]
- Sensibilité aux perturbations électromagnétiques [36]

II-6. CONCEPTION LOGICIELLE, PROGRAMMATION ET COMMUNICATION

II-6-1. Simulation par logicielle Eraser.io

Dans le cadre du développement du projet, le logiciel Eraser.io [37] a été utilisé pour la documentation et la création de schémas techniques liés au système. Cet outil s'est révélé particulièrement efficace pour produire des documents techniques intégrant à la fois du texte explicatif et des diagrammes illustratifs de manière cohérente. Parmi ses fonctionnalités clés, Eraser.io permet la génération automatique de diagrammes, tels que les diagrammes de flux de données (DFD) ou d'architecture système, à partir de commandes textuelles ou d'extraits de code, grâce à l'intelligence artificielle. Il offre également un environnement collaboratif en temps réel, facilitant le travail en équipe et les modifications collectives. Grâce à sa flexibilité et à ses capacités d'édition intelligentes, cet outil s'est imposé comme une solution idéale pour assurer une documentation claire, précise et professionnelle du projet (Fig. II-8).

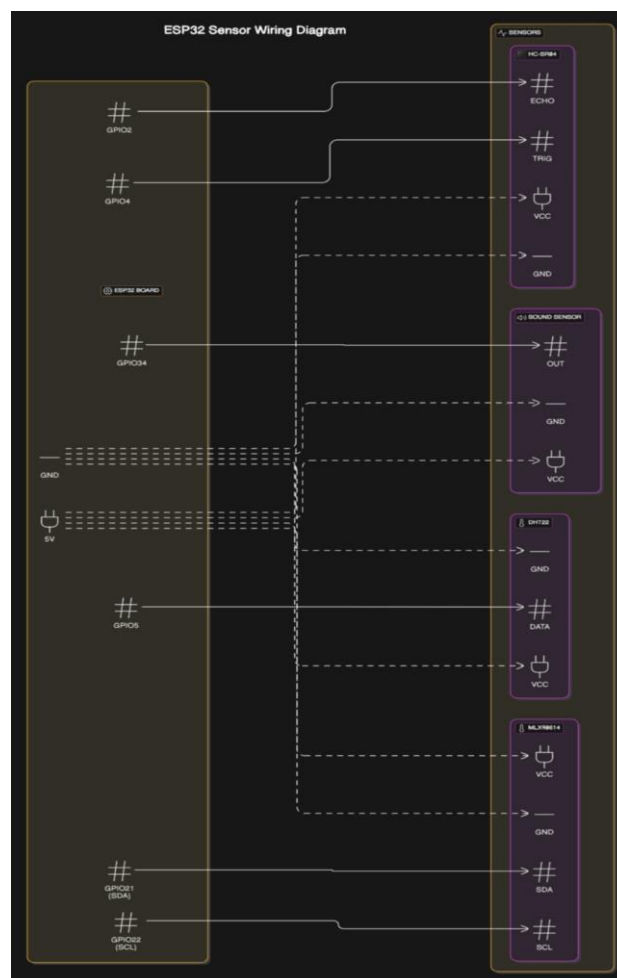


Figure II-8. Simulation par Eraser.io

II-6-2. Présentation du logiciel Arduino IDE

L'Arduino IDE (Integrated Development Environment) est un environnement de développement open-source spécifiquement conçu pour la programmation des cartes Arduino. Ce logiciel (Fig.II-9) joue un rôle fondamental dans le domaine des systèmes embarqués, car il permet de développer des applications électroniques interactives de manière simple et efficace. L'interface de l'IDE est conviviale et accessible, ce qui en fait un outil très prisé par les étudiants, enseignants et chercheurs. Elle prend en charge plusieurs systèmes d'exploitation (Windows, macOS, Linux) et utilise un langage de programmation dérivé du C/C++, simplifié pour convenir aux débutants tout en restant puissant pour les utilisateurs avancés. Grâce à Arduino IDE, il est possible de coder, compiler et téléverser rapidement des programmes sur une carte Arduino, facilitant ainsi la création de prototypes fonctionnels pour divers projets : automatisation, robotique, domotique, surveillance, etc. Cela fait de lui un outil essentiel dans les formations en électronique, informatique industrielle, et IoT [38,39].

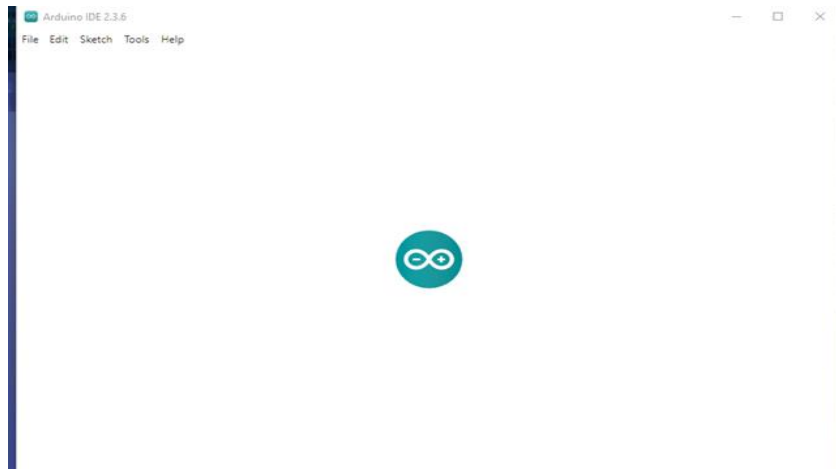


Figure II-9. Interface du logiciel Arduino IDE

II-6-3. Application dans le système

Le logiciel Arduino IDE joue un rôle central dans le développement du système en permettant la programmation des capteurs et actionneurs intégrés à la carte Arduino. Grâce à sa simplicité et à sa flexibilité, il facilite la gestion des données collectées (température, mouvement, son, etc.) et leur transmission vers le dispositif de réception. Dans le cadre de systèmes embarqués pour la surveillance, comme celui de la surveillance des nourrissons,

Arduino IDE permet d'écrire des programmes qui analysent en temps réel les signaux des capteurs et déclenchent des alertes ou des actions adaptées.

L'intégration de l'Arduino IDE dans ce type de projet permet non seulement un prototypage rapide, mais aussi une mise à jour facile du logiciel, ce qui est crucial pour améliorer continuellement la performance et la fiabilité du système (Fig.II-10) [39].

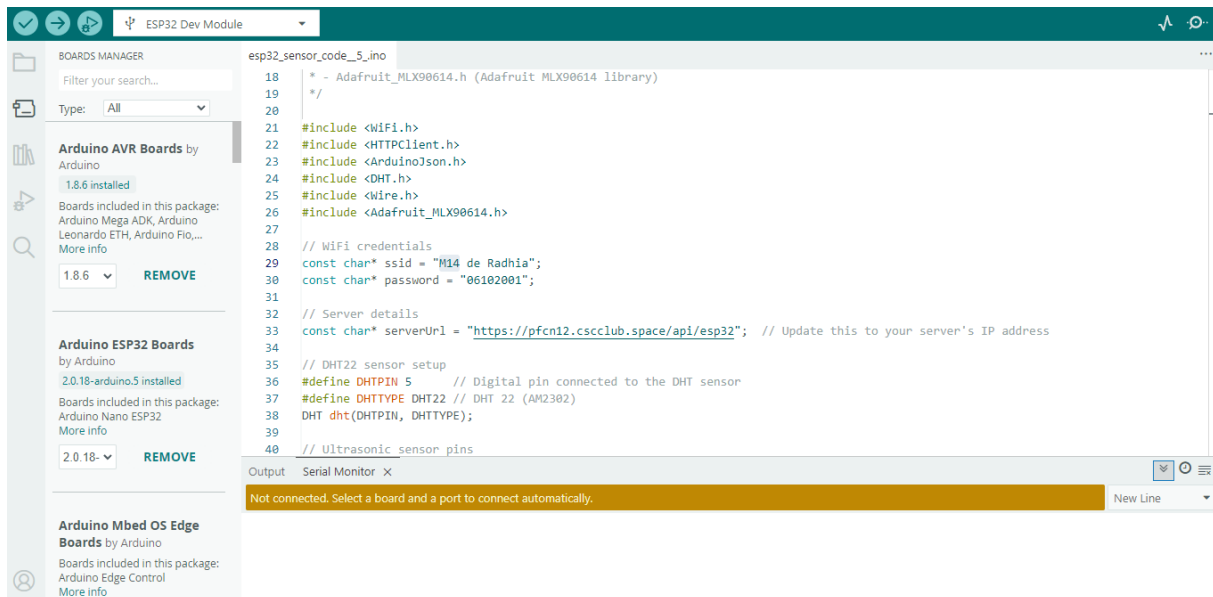


Figure II-10. Programmation par Arduino IDE

II-6-4. Lecture et traitement des données capteurs

Dans les systèmes embarqués modernes, la capacité de lire et de traiter les données issues des capteurs en temps réel est essentielle pour garantir la fiabilité et l'efficacité du dispositif. L'ESP32, grâce à sa puissance de calcul et sa compatibilité avec l'environnement Arduino IDE, offre une plateforme robuste pour l'acquisition de données environnementales telles que la température, l'humidité, ou encore la luminosité.

La lecture des capteurs se fait généralement par l'intermédiaire de bibliothèques logicielles adaptées, comme DHT.h pour les capteurs de température et d'humidité de type DHT11 ou DHT22. Ces bibliothèques permettent non seulement d'interagir facilement avec le matériel, mais également d'extraire les données de manière stable et cohérente.

Une fois les données brutes récupérées, une phase de traitement est souvent nécessaire. Elle peut inclure :

- La moyennisation des mesures pour réduire les fluctuations dues au bruit ;
- L'application de filtres numériques simples (comme le filtre passe-bas) pour lisser les courbes de données ;
- L'exclusion des valeurs aberrantes ou incohérentes à l'aide de seuils définis.

Ce traitement local des données présente plusieurs avantages, notamment la réduction de la charge du serveur de réception et l'amélioration de la qualité des informations transmises. Il permet également de détecter plus rapidement des comportements anormaux au niveau du capteur (par exemple, défaillance ou déconnexion) [40].

II-6-5. Connexion au réseau Wi-Fi

La connectivité réseau constitue un élément fondamental dans les systèmes embarqués connectés. L'ESP32, équipé nativement d'un module Wi-Fi, permet une intégration directe dans des réseaux sans fil domestiques ou professionnels. Cette fonctionnalité est accessible via l'IDE Arduino, grâce à la bibliothèque WiFi.h, qui offre une interface simplifiée pour la configuration des connexions.

La mise en œuvre de la connexion se fait généralement en spécifiant le SSID (nom du réseau) et le mot de passe, ce qui permet à l'ESP32 d'obtenir une adresse IP locale via DHCP. Une fois connecté, le microcontrôleur devient capable de dialoguer avec des serveurs distants, de transmettre des données ou encore de recevoir des commandes. Ce type de connexion est particulièrement adapté aux projets IoT (Internet des Objets), où l'autonomie et la légèreté du système sont primordiales. La fiabilité de la liaison Wi-Fi peut être renforcée par la mise en place de routines de reconnexion automatique en cas de perte de signal, assurant ainsi une disponibilité continue du système. L'IDE Arduino permet en outre de superviser en temps réel l'état de la connexion via le port série, ce qui facilite le débogage et l'optimisation du code pendant la phase de développement [41].

II-6-6. Envoi des données vers le serveur sous format JSON via HTTP POST

Une fois les données acquises et traitées localement, l'étape suivante consiste à les transmettre à un serveur pour exploitation ou archivage. L'ESP32 permet l'envoi des

données via le protocole HTTP, en utilisant la méthode POST, très répandue dans les architectures web modernes.

Les données sont généralement structurées au format JSON (JavaScript Object Notation), qui offre un équilibre idéal entre lisibilité et compacité. L'utilisation des bibliothèques HTTPClient et ArduinoJson dans l'IDE Arduino facilite grandement cette tâche. L'ESP32 crée un objet JSON contenant les données à transmettre, puis établit une connexion HTTP avec le serveur cible pour envoyer ces informations.

Cette méthode est largement utilisée dans les systèmes IoT pour transmettre les mesures vers une base de données ou un service cloud. Le choix du protocole HTTP POST permet aussi de gérer des envois sécurisés, notamment lorsque combiné avec HTTPS. De plus, cette structure permet une grande évolutivité : on peut facilement ajouter de nouveaux champs de données, gérer les erreurs de transmission, ou encore intégrer des mécanismes d'authentification [41].

II-7. SÉCURITÉ ET GESTION DES ALERTES

II-7-1. Transmission des données via HTTP

Dans le système développé, la transmission des données issues des capteurs vers le serveur s'effectue à l'aide du protocole HTTP. Ce choix s'explique principalement par la simplicité et la rapidité de son implémentation, ce qui en fait une solution adaptée pour les phases de prototypage ou de tests initiaux. En effet, HTTP permet d'établir des communications entre les dispositifs connectés et le serveur sans configuration complexe, facilitant ainsi le développement et le déploiement préliminaire du système.

Cependant, ce protocole présente des limites importantes en matière de sécurité. HTTP transmet les données en clair, sans aucun chiffrement, ce qui signifie que les informations échangées parfois sensibles, comme les mesures de température ou les alertes liées à la sécurité du nourrisson peuvent être interceptées, modifiées ou utilisées à des fins malveillantes par des tiers non autorisés.

Dans cette optique, il est fortement recommandé, pour les versions futures ou une mise en production réelle du système, d'abandonner HTTP au profit de HTTPS. Ce dernier ajoute une couche de sécurité en utilisant le chiffrement SSL/TLS, garantissant ainsi la confidentialité, l'intégrité et l'authenticité des données transmises. Cela permet de renforcer

la confiance des utilisateurs tout en protégeant efficacement les communications entre les capteurs et le serveur [42].

II-7-2. Sécurisation du réseau Wi-Fi

Le système est actuellement connecté à un réseau Wi-Fi local protégé par un mot de passe. Cette mesure constitue une première ligne de défense contre les accès non autorisés. Toutefois, face à des attaques ciblées ou à des intrusions sophistiquées, la simple protection par mot de passe peut s'avérer insuffisante.

Pour renforcer la sécurité du réseau et limiter les risques d'intrusion, il est recommandé d'adopter des bonnes pratiques complémentaires. Parmi celles-ci, le filtrage des adresses MAC permet de restreindre l'accès uniquement aux appareils identifiés et autorisés. De plus, la création d'un réseau Wi-Fi dédié exclusivement aux dispositifs IoT permet de segmenter le trafic et d'isoler ces appareils des autres équipements du réseau principal. Enfin, l'utilisation de protocoles de sécurité avancés comme WPA3 offre une protection renforcée grâce à un chiffrement plus robuste et des mécanismes améliorés pour la gestion des clés.

Ces mesures, combinées, permettent d'augmenter significativement la sécurité globale du système, notamment dans un contexte où les objets connectés sont souvent des cibles privilégiées pour les cyberattaques.

II-8. TEST ET VALIDATION

II-8-1. Test des capteurs

II-8-1-1. Capteur DHT22 – Mesure précise de température et d'humidité

L'objectif de vérifier que le capteur DHT22 mesure correctement la température et l'humidité ambiantes (Fig.II-11). Le capteur a été connecté à l'ESP32 sur le port GPIO 5 (à adapter selon le câblage utilisé). Un programme de test basé sur la bibliothèque DHT.h a été chargé pour lire les données. Les valeurs ont été observées à la fois sur le moniteur série et sur l'interface mobile. Pour évaluer la réactivité du capteur, la température ambiante a été modifiée en approchant une source de chaleur.

Lors du premier test, le capteur a mesuré une température de 32.1°C et un taux d'humidité de 26.4%. Dans un second scénario, après augmentation de l'humidité dans l'environnement, la lecture a montré une valeur de 60.0% d'humidité avec une température de 25.0°C. Les valeurs mesurées étaient cohérentes avec les conditions environnementales simulées. La variation des lectures a montré une bonne réactivité du capteur, ainsi qu'une stabilité acceptable lors de conditions constantes. Ces résultats confirment que le DHT22 est fiable pour la surveillance ambiante dans le cadre de notre système de suivi des nourrissons.

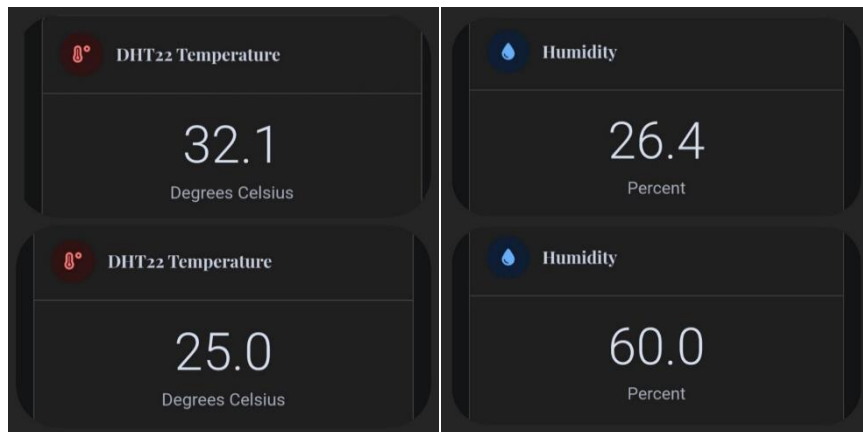


Figure II-11. Test du capteur DHT22 – Température et humidité ambiantes

II-8-1-2. Capteur MLX90614 – Mesure de température infrarouge sans contact

Nous procédons à la vérification que le capteur infrarouge (IR) mesure correctement la température d'un corps sans contact. Le capteur de température infrarouge a été connecté à l'ESP32. Un programme de test a été utilisé pour lire les valeurs de température depuis une surface corporelle (main, front). Deux mesures ont été relevées à différentes distances ou positions. Les données ont été observées à la fois à travers le moniteur série et l'interface mobile. Pour évaluer la précision du capteur, des tests ont également été effectués en le dirigeant vers des objets inanimés, permettant ainsi de comparer les différences de lecture entre des surfaces vivantes et non vivantes. Deux valeurs ont été mesurées, 31.0 °C : relevée sur une partie du corps éloignée ou moins exposée à la chaleur (ex. : main) 36.5 °C : relevée sur une zone corporelle centrale (ex. : front).

Ces deux mesures (Fig.II-12) sont cohérentes avec la température corporelle humaine, sachant qu'elle varie selon la partie du corps et la distance de mesure. Le capteur a démontré une bonne sensibilité et une réponse adaptée selon la surface mesurée.

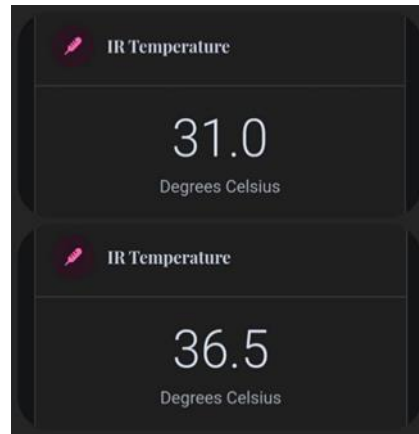


Figure II-12. Test du capteur infrarouge MLX90614 – Température corporelle sans contact

II-8-1-3. Capteur KY-038 – Détection sonore

Nous vérifierons que le capteur de son mesure correctement le niveau sonore ambiant et réagit aux variations de bruit. Le capteur de son a été connecté à l'ESP32 via une entrée analogique (port GPIO XX, à adapter selon le câblage utilisé).

Un programme de test a été chargé pour lire en continu le niveau sonore en décibels. Les valeurs ont été affichées à la fois sur le moniteur série et sur l'application mobile. Des sons ont été émis à proximité du capteur (comme des claquements de main ou des bruits ambiants) pour évaluer sa sensibilité.

Le capteur a mesuré un niveau sonore de 30.0 dB dans un environnement calme, et de 40.0 dB lorsqu'un bruit a été généré (Fig.II-13). Ces variations montrent une bonne réactivité du capteur aux changements sonores. Les données étaient stables et cohérentes, confirmant le bon fonctionnement du capteur.

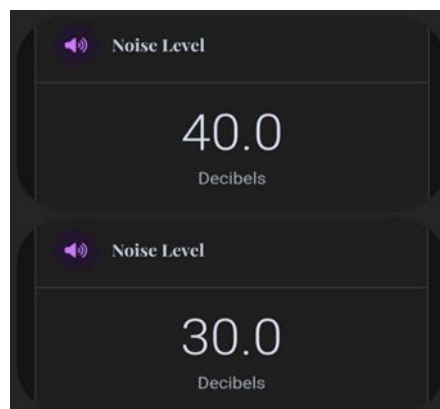


Figure II-13. Test du capteur sonore KY-038 – Détection du bruit ambiant

II-8-1-4 Capteur HC-SR04 – Mesure de distance à ultrasons

Vérifier que le capteur à ultrasons (HC-SR04 ou similaire) mesure correctement la distance entre le capteur et un obstacle. Le capteur de distance a été connecté à la carte ESP32 en utilisant les broches GPIO 4et GPIO2 (à adapter selon le câblage réel).

Un programme de test a été chargé en utilisant une bibliothèque de gestion des capteurs à ultrasons. Les distances mesurées ont été affichées à la fois sur le moniteur série et sur l'interface mobile. Pour tester la précision et la réactivité, un objet a été déplacé progressivement plus près du capteur.

Lorsque l'objet était éloigné, la distance mesurée était de 11.5 cm, puis en rapprochant l'objet, la valeur est descendue à 7.9 cm (Fig.II-14).

Les variations ont été détectées en temps réel, ce qui confirme la bonne réactivité et le bon fonctionnement du capteur.

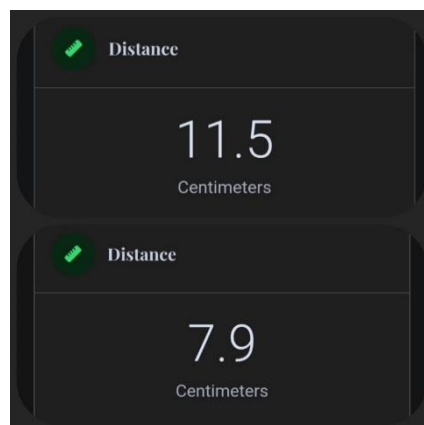


Figure II-14. Test du capteur à ultrasons HC-SR04 – Mesure de distance

II-9. TEST DE L'APPLICATION WEB

II-9-1. Interaction avec l'Application Web

L'application web constitue l'interface centrale d'interaction entre le système embarqué ESP32 et les utilisateurs finaux, notamment les parents. Elle a été conçue pour offrir une visualisation claire, en temps réel, des données collectées, ainsi qu'une expérience utilisateur intuitive et réactive.

II-9-1-1. Réception des données capteurs

L'application reçoit, via une API dédiée (/api/esp32), des données au format JSON transmises directement par la carte ESP32. Ces données comprennent les mesures de température (DHT22 et capteur infrarouge), d'humidité, de niveau sonore et de distance.

II-9-1-2. Intégration vidéo

Lorsque le module ESP32-CAM est utilisé, l'application peut recevoir des captures d'image périodiques ou afficher un flux vidéo en direct en se connectant à l'adresse IP locale de la caméra. Cette fonctionnalité permet une surveillance visuelle continue du bébé.

II-9-1-3. Tableau de bord interactif

Toutes les informations sont affichées dans un tableau de bord ergonomique, mettant en valeur les dernières valeurs mesurées par les capteurs, accompagnées d'indicateurs visuels explicites. Des graphiques peuvent également être intégrés pour permettre une analyse historique de l'évolution des paramètres.

II-9-1-4. Système d'alertes intelligent

L'application surveille en permanence les données reçues et déclenche des alertes en cas de détection d'anomalies, telles que :

- Température ou humidité dépassant les seuils sécurisés ;
- Température infrarouge du bébé anormalement élevée ;
- Niveau sonore élevé indiquant des pleurs ;
- Mouvement inhabituel détecté par le capteur de distance.

Les alertes peuvent prendre la forme de notifications visuelles dans l'interface (Fig.II-15), de notifications push sur mobile ou encore d'envois par email. Cette application web joue un rôle essentiel dans l'exploitation du système de surveillance en assurant un suivi en temps réel, une interprétation facile des données, et une réponse rapide face aux situations potentiellement dangereuses (Fig.II-16).

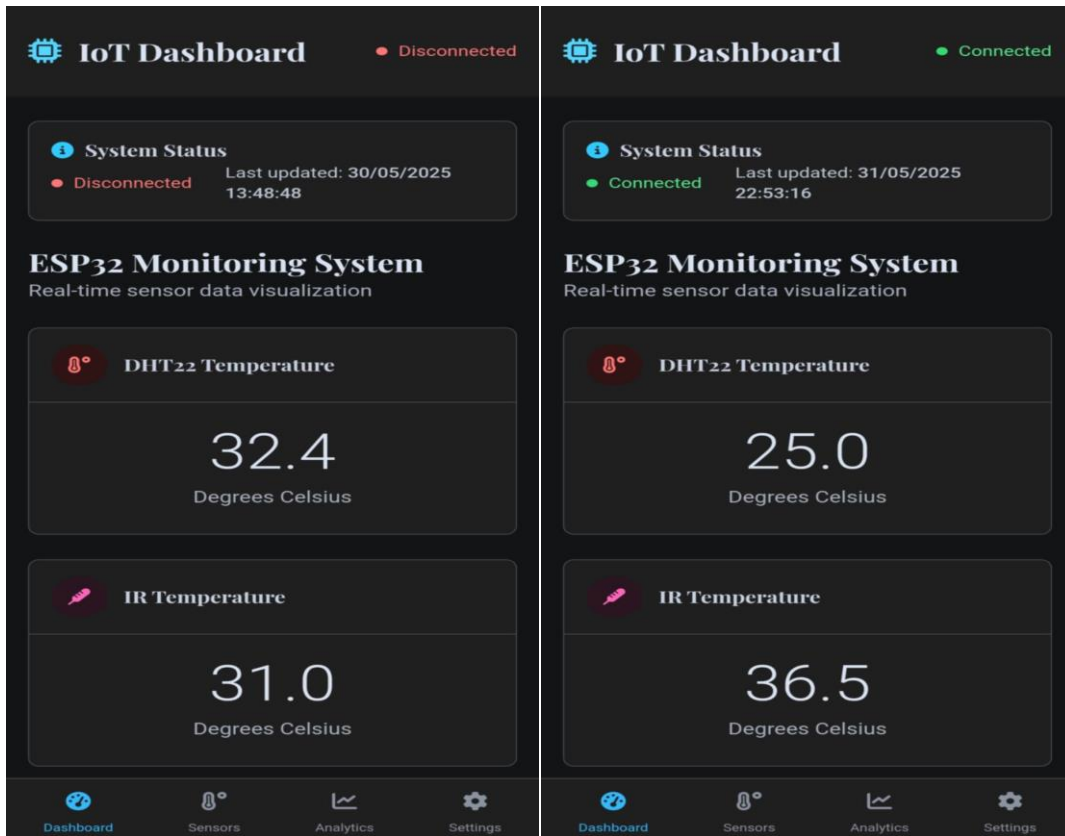


Figure III-15. Affichage des données des capteurs sur l'application web

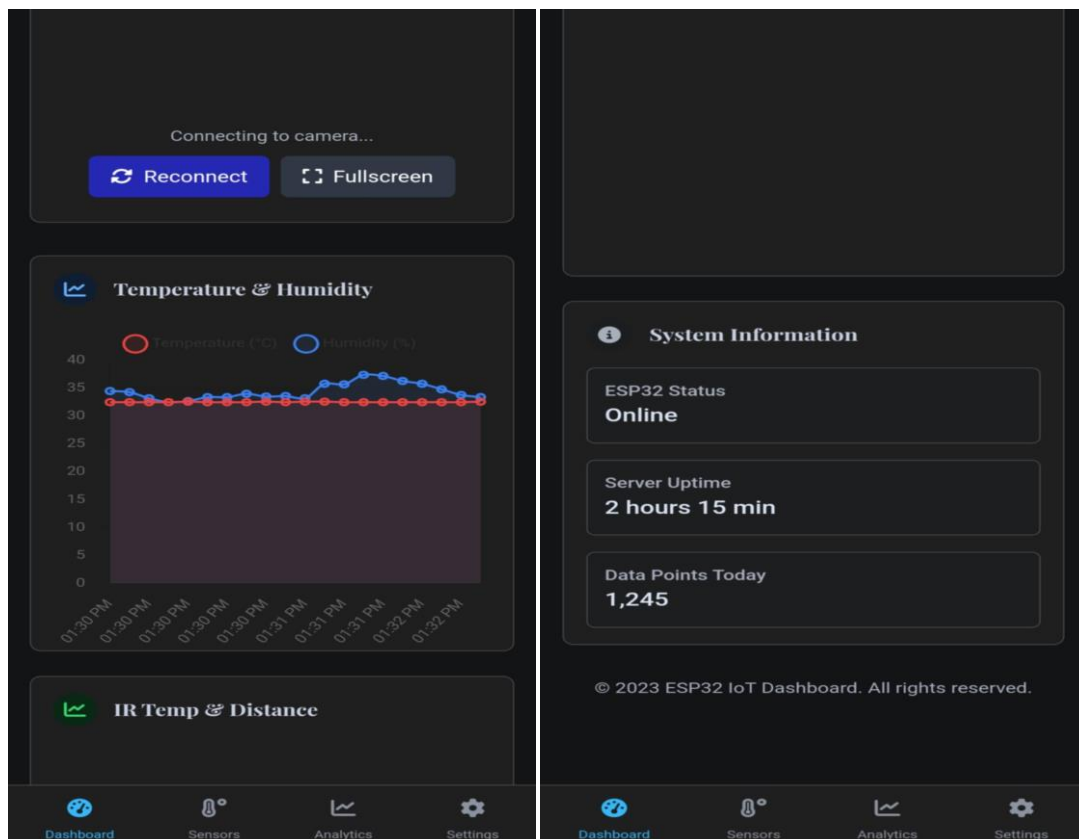


Figure II-16. Visualisation vidéo via ESP32-CAM dans l'application web

II-9-2. Test global du projet

Afin d'évaluer la robustesse et l'intégration complète de la solution de surveillance du nourrisson, un test global a été réalisé après la validation individuelle de chaque composant, incluant les capteurs, l'application web et le module caméra ESP32-CAM.

L'objectif principal de ce test était de s'assurer de la communication fluide entre les éléments matériels et logiciels, de mesurer la stabilité du système lors d'un fonctionnement prolongé, et de vérifier sa capacité à réagir efficacement à des situations critiques. Le système (Fig.II-17) a été mis en service dans sa configuration complète, avec tous les capteurs connectés à la carte ESP32. Les données ont été transmises en temps réel via Wi-Fi à l'API, puis affichées sur le tableau de bord de l'interface web (Fig.II-18). Des scénarios simulés ont permis de tester la réactivité du système, notamment en cas de température élevée, de bruit soudain ou de mouvement détecté, déclenchant des alertes instantanées sur l'interface (Fig.II-19). Le flux vidéo en direct de l'ESP32-CAM a également été intégré avec succès à l'application.

Les essais ont été menés sur plusieurs navigateurs et appareils, confirmant une compatibilité optimale et une expérience utilisateur fluide. Les résultats obtenus témoignent d'un système fiable, réactif et parfaitement opérationnel dans un contexte proche de son utilisation réelle.

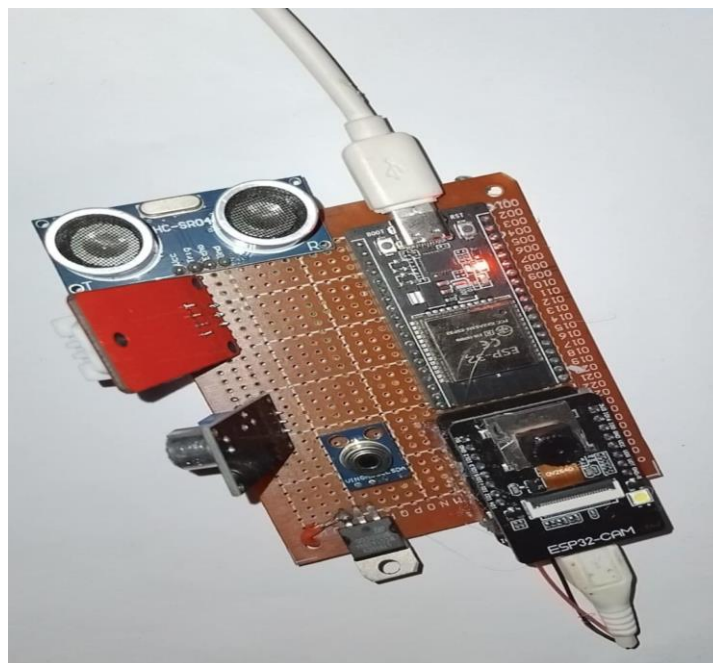


Figure II-17. Photo réelle du prototype

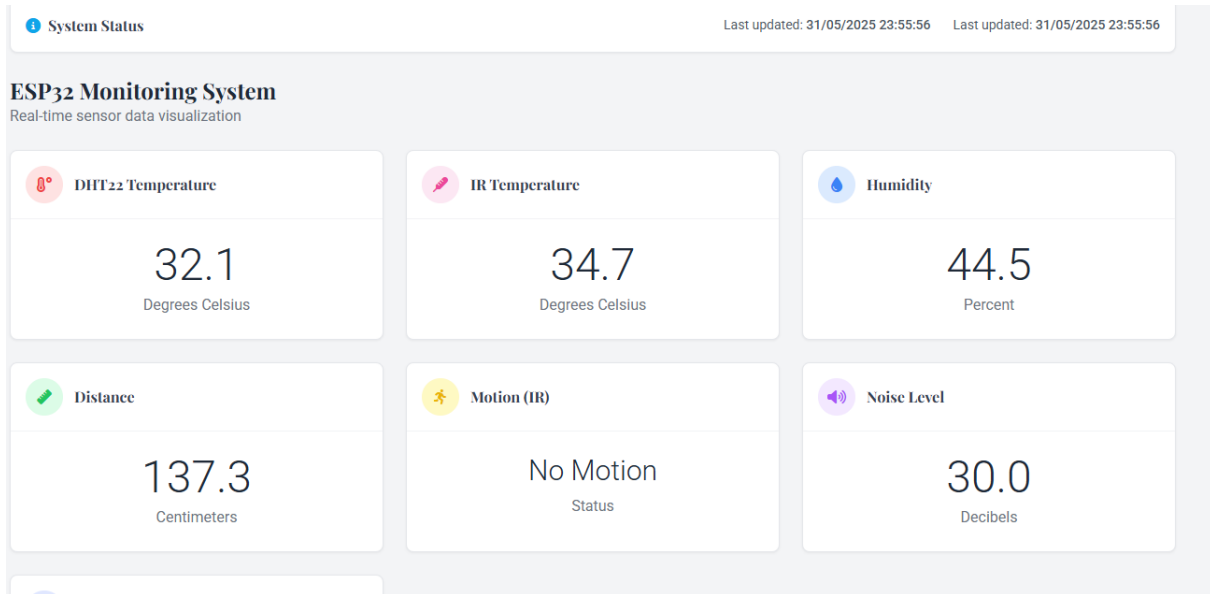


Figure II-18. Alertes automatiques en cas d'anomalie (température, son, mouvement)

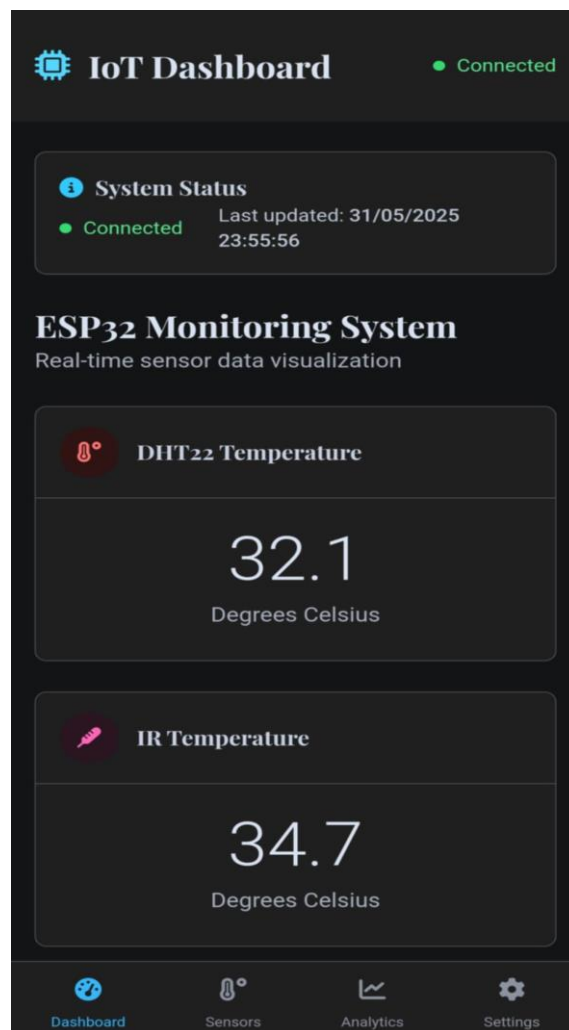


Figure II-19. Intégration complète du système – Vue d'ensemble du test global

II-10. Conclusion

Ce chapitre a exposé de manière approfondie les différentes étapes de la conception et de la mise en œuvre du système de surveillance du nourrisson. Il a débuté par le choix judicieux des composants matériels, incluant le microcontrôleur ESP32, les capteurs environnementaux (température, humidité, son, distance), ainsi que le module ESP32-CAM destiné à la capture ou à la diffusion vidéo. L'intégration de ces éléments dans une architecture cohérente et compacte a permis de répondre efficacement aux contraintes techniques et fonctionnelles du projet.

Sur le plan logiciel, l'accent a été mis sur le développement d'une communication fluide et sécurisée entre l'ESP32 et l'interface web, via une API REST, assurant une transmission fiable des données en temps réel. L'interface web, pensée pour une utilisation multi-supports, combine lisibilité, réactivité et accessibilité. Elle permet non seulement l'affichage dynamique des mesures captées, mais aussi la consultation du flux vidéo et la réception d'alertes intelligentes en cas d'anomalie.

Les phases de test ont couvert l'ensemble du système, des unités matérielles et logicielles aux interactions globales, validant ainsi la stabilité, la robustesse et la cohérence de l'ensemble.

En définitive, le système conçu atteint pleinement les objectifs fixés, en assurant une surveillance efficace, continue et proactive du nourrisson. Il constitue une base prometteuse pour des évolutions futures, telles que l'intégration de mécanismes d'intelligence artificielle pour une analyse comportementale avancée, ou encore le développement d'une application mobile dédiée afin d'optimiser l'accessibilité et l'usage nomade de la solution.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le projet développé constitue une solution IoT complète et moderne pour la surveillance intelligente des nourrissons. Il combine des capteurs environnementaux, un module visuel ESP32-CAM et une interface web intuitive, afin d'assurer un suivi en temps réel, fiable et accessible. Grâce à l'intégration de technologies ouvertes telles que le microcontrôleur ESP32, une variété de capteurs, la connectivité Wi-Fi et une architecture modulaire, le système répond efficacement aux besoins croissants en matière de sécurité et de confort parental.

Cependant, plusieurs axes d'amélioration peuvent être envisagés pour optimiser les performances globales du système. Il serait pertinent d'exploiter pleinement les capacités de l'ESP32-CAM, notamment en implémentant le streaming vidéo en continu ou l'envoi périodique de captures. L'ajout d'une vision nocturne à l'aide de LEDs infrarouges améliorerait considérablement la surveillance dans des conditions de faible luminosité. Par ailleurs, l'intégration d'une analyse sonore avancée, basée sur des techniques de traitement du signal ou d'intelligence artificielle, permettrait de différencier les pleurs du bébé des autres bruits ambiants.

La mise en place d'une communication bidirectionnelle, via un haut-parleur connecté, offrirait une interaction directe avec le nourrisson. En matière de sécurité, le passage du protocole HTTP à HTTPS, l'authentification du flux vidéo, l'adoption de la norme WPA3 et la segmentation réseau renforceraient la confidentialité des données échangées. D'autres améliorations pourraient inclure l'ajout d'alertes locales (buzzer, LED), l'utilisation du protocole MQTT plus adapté aux environnements IoT, l'optimisation énergétique grâce aux modes de veille de l'ESP32, ainsi que l'intégration d'un capteur PIR pour une détection de mouvement plus précise.

Enfin, dans une perspective d'évolution, le système pourrait être enrichi par des modules d'intelligence artificielle dédiés à l'analyse comportementale (interprétation des pleurs, suivi du sommeil, détection de gestes anormaux). Une plateforme de conseils personnalisés et d'assistance médicale en ligne pourrait également être intégrée, notamment

pour accompagner les parents d'enfants atteints de troubles du spectre autistique (TSA), avec un accès à des consultations à distance auprès de pédiatres et de spécialistes en psychologie infantile.

Ces pistes d'amélioration ouvrent la voie à la transformation de la solution actuelle en un véritable assistant intelligent de puériculture, alliant surveillance, prévention et accompagnement parental.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Chen, W., & Xu, W., “*Smart Baby Monitoring Systems: A Review of Technologies and Applications*”, IEEE Sensors Journal, 20(8), pp.4125-4140. 2020.
- [2] Fisher G., “*A Brief History of Baby Monitors*”, IEEE Consumer Electronics Magazine, 3(1), pp.95–97, 2014.
- [3] Bakker, J.I., “*Zenith Radio Nurse: The first baby monitor*”, In Technology and Culture, Vol. 47, No. 3, pp. 596–601, 2006.
- [4] Jobidon, Mireille, “*Introduction de la vidéosurveillance intelligente à domicile : Perception des acteurs du système de santé à l’égard de leur pratique, de l’accessibilité et de l’image transmise*”, Mémoire de Maîtrise, Université de Montréal, 2008.
- [5] Ben Hadj Mohamed Asma, “*Réseau de capteurs sans fil comportementaux pour l’aide au maintien à domicile par la surveillance en habitat intelligent*”, Thèse de Doctorat, Université Toulouse 2 et Université de Sfax, 2015.
- [6] Bersi Ouiza et Lebbal Nasima, “*Conception et réalisation d’un système de surveillance (température et mouvement) d’une chambre de malade/nourrisson*”, Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri, 2017.
- [7] Ait Mechedal Mohamed, “*Élaboration d’un système de surveillance pour un nourrisson*”, Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri, 2020.
- [8] Andrea, W., “*Technology and Infant Monitoring: A Review*”, Journal of Pediatric Health Care. 2014.
- [9] American Academy of Pediatrics, “*Sudden Infant Death Syndrome and Other Sleep-Related Infant Deaths: Recommendations for a Safe Infant Sleeping Environment*”, Journal of Pediatrics, 2011.
- [10] Moon R. Y., “*SIDS and Other Sleep-Related Infant Deaths: Updated 2016 Recommendations for Safe Sleep*”, Journal of Pediatrics, 138(5), 2016
- [11] Lai, H. C., & Tsai, Y. H., “*Design and Evaluation of a Wireless Infant Monitoring System for Heart Rate and Respiratory Pattern Detection*” Journal of Medical Systems, 41(3), 2017.
- [12] BENADDA Belkacem, “*Détection Coopérative multi-agents pour réseaux de Capteurs*”, Thèse de Doctorat, Université d’Abou Bakr Belkaid, 2011.
- [13] Salheddine kabou, “*Etat de l’art sur les réseaux de capteur sans fil*”, Mémoire de licence, Université de Bechar, 2010.
- [14] Brown, K., & Davis, M., “*Economic Barriers to Adoption of Advanced Infant Monitoring Technologies*”, Health Technology and Society Journal, 12(3), pp.112-125, 2021.
- [15] Lee, H., & Patel, R. (2022). “*Energy Efficiency in Wireless Infant Monitoring Devices: Challenges and Solutions*”, International Journal of Pediatric Engineering, 8(4), pp. 56-70, 2022.
- [16] Johnson, A., & Smith, T., “*Modern Infant Monitoring Systems: Balancing Benefits and Challenges*”, Journal of Child Safety Technology, 14(2), pp. 89-102, 2023.
- [17] Martinez, L., & Green, P., “*The Role of Temperature and Humidity Sensors in Infant Health Monitoring: Ensuring a Safe Sleep Environment*”, Journal of Pediatric Environmental Health, 10(3), pp. 45-58, 2022.
- [18] Taylor, S., & Brown, K., “*Advanced Motion Detection in Infant Monitoring: The Role of Accelerometers and Gyroscopes*”, Journal of Child Safety and Health Technology, 18(2), pp. 112-125, 2023.
- [19] Anderson, R., & Lee, M. “*Wireless Data Transmission in Infant Monitoring Systems: Balancing Convenience and Security*”, Journal of Pediatric Technology and Safety, 12(4), pp. 78-92, 2021.

- [20] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, et al., "Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications", IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 17, No. 4, 2015.
- [21] S. Patel, H. Park, P. Bonato, L. Chan, et M. Rodgers, "A review of wearable sensors and systems with application in rehabilitation", Journal of Neuro-Engineering and Rehabilitation, Vol. 9, No. 1, 2012.
- [22] World Health Organization (WHO), "Digital Health for Infants and Children: Opportunities and Challenges", 2021.
- [23] Almeida, A., & Silva, S., "IoT-Based Smart Monitoring for Infant Health: A Review", Journal of Medical Systems, 44(6), pp. 1-12, 2020.
- [24] M. A. Hanson, H. C. Powell Jr, A. T. Barth, et al., "Body Area Sensor Networks: Challenges and Opportunities", Computer, Vol. 42, No. 1, 2009.
- [25] Smith, J., & Johnson, L., "Barriers to Adoption of Advanced Infant Monitoring Systems: A Study on Financial Accessibility", Journal of Child Health Technology, 15(3), pp. 45-60, 2022.
- [26] P. R. C. Abordo, P. R. C., et al. (2024). Smart surveillance system using ESP32 and camera-based motion detection with IM technology. International Journal of Research Studies in Educational Technology
- [27] Sepanosian, T., et al. (2024). An IoT-Based Architecture for Real-Time Emission Monitoring at Construction Sites. ResearchGate.
- [28] Aosong Electronics Co., Ltd., "Digital-output relative humidity & temperature sensor AM2302 (DHT22) Datasheet," Rev. 1.0, 2014. [Online]. Available: <https://cdn.sparkfun.com/assets/f/7/d/9/c/DHT22.pdf>
- [29] SparkFun Electronics, "HC-SR04 Ultrasonic Range Sensor Datasheet," 2019. [Online]. Available: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Proximity/HCSR04.pdf>
- [30] Joy-IT, SensorKit Documentation: KY-038 Sound Sensor Module. [Online]. Available: <https://www.joy-it.net/en/products/ky-038-sound-sensor-module>
- [31] [6] Melexis Technologies NV, "MLX90614 Family Single and Dual Zone Infra Red Thermometer in TO-39," Datasheet, Rev. 6, 2016. [Online]. Available: <https://www.melexis.com/en/documents/documentation/datasheets/datasheet-mlx90614>
- [32] Espressif Systems, ESP32 Technical Reference Manual, v4.1, 2023. [En ligne]. Disponible : https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf
- [33] Espressif Systems, ESP32 Datasheet, Rev. 3.5, 2022. [En ligne]. Disponible : https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
- [34] M. Alioto et al., "Internet of Things: Smart objects and sensor networks," IEEE Solid-State Circuits Magazine, vol. 9, no. 1, pp. 43–54, Winter 2017
- [35] A. Patil, S. Pati, L. Momin, Y. Patil, and S. Nalawade, "ESP32-CAM Motion Sensor Security Camera," International Research Journal of Modern Engineering and Technology Science, vol. 5, no.12, pp. 1–5, Dec. 2023. [En ligne]. Disponible sur : https://www.irjmets.com/uploadedfiles/paper//issue_12_december_2023/47001/final/fin_irjmets1701871777.pdf
- [36] R. Santos, "ESP32-CAM Video Streaming Web Server (works with Home Assistant)," Random Nerd Tutorials, 2020. [En ligne]. Disponible sur : <https://randomnerdtutorials.com/esp32-cam-video-streaming-web-server-camera-home-assistant/>
- [37] Eraser.io.(2024).AIDiagrams&TechnicalDocs. <https://www.eraser.io>
- [38] A. Mansouri, Étude et réalisation d'une carte Arduino, Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira – Béjaïa, 2022.
- [39] Y. Boukhelifa, Étude et conception d'un système de surveillance médicale basé sur Arduino, Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, 2021. [En ligne]. Disponible :

- [40] <https://theses-algerie.com/1060799245816164/memoire-de-master/universite-abou-bekr-belkaid---tlemcen/etude-et-conception-d-un-syst%C3%A8me-de-surveillance-m%C3%A9dicale-bas%C3%A9-sur-arduino>
- [41] Abir, A. (2022). *Réalisation d'une maquette de ville intelligente utilisant Arduino et ESP32*. Mémoire de fin d'études, Université Badji moukhtar annaba
- [42] Larras, M. (2019). *La sécurité dans l'Internet des Objets*. Mémoire de fin d'études, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.