

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة سعيدة الدكتور مولاي الطاهر
Université de Saida Dr Moulay Tahar
Faculté des sciences et de la technologie



MEMOIRE

Projet de recherche présenté pour l'obtention du Diplôme de MASTER

En : Génie Biomédicale

Spécialité : Instrumentation Biomédicale

Par: DELLAS Khaled et MOUSSOUNI Mohamed El Amine

Thème :

Système de suivi de santé pour animaux domestiques

Soutenue publiquement le : **21 septembre 2025** devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Mle BOUKHALFA Malika	MCB	Univ.Saida	Président
Mr BOUARFA Abdelkader	MCA	Univ.Saida	Examineur
Mr BERBER Redouane	MCA	Univ.Saida	Encadrant

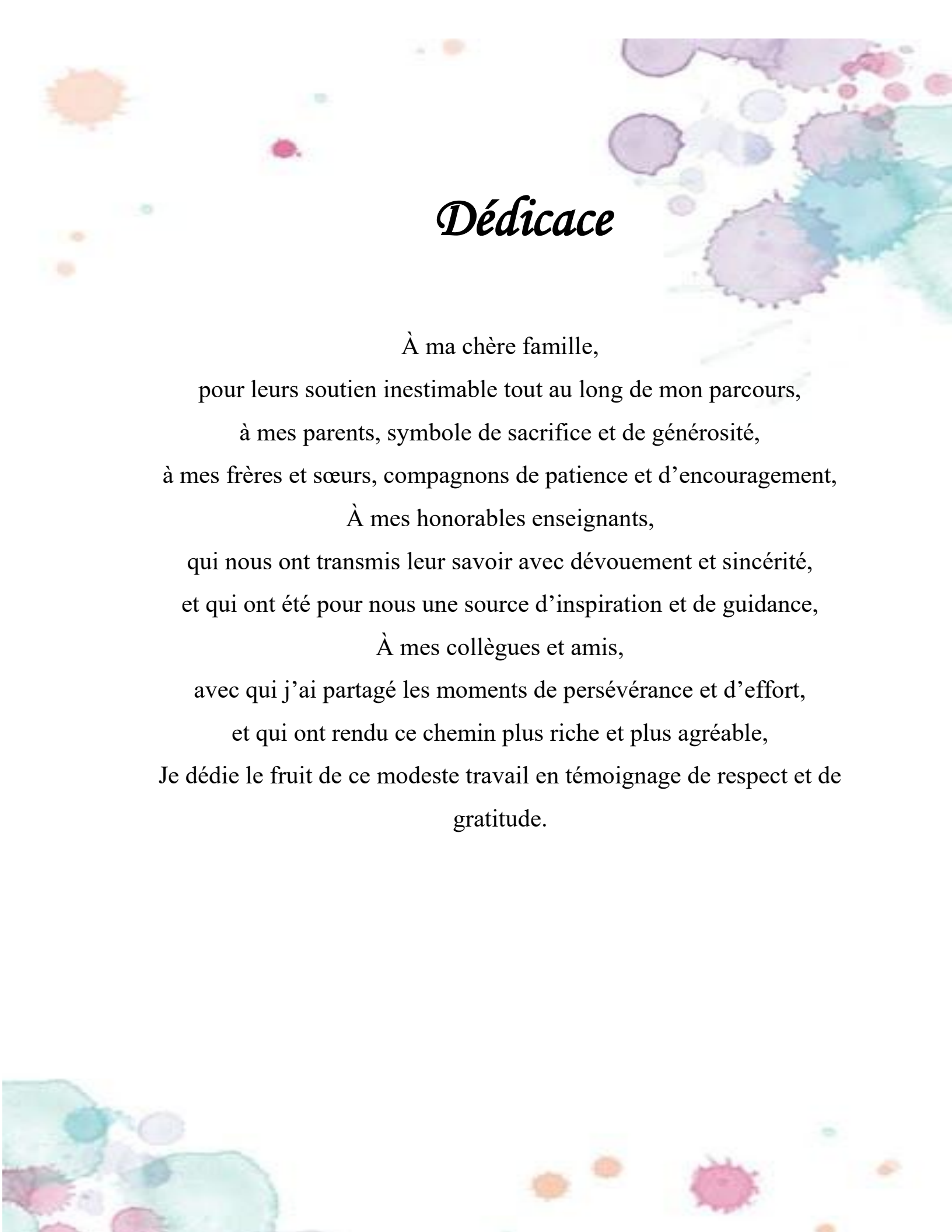
Année universitaire 2024/2025



Résumé

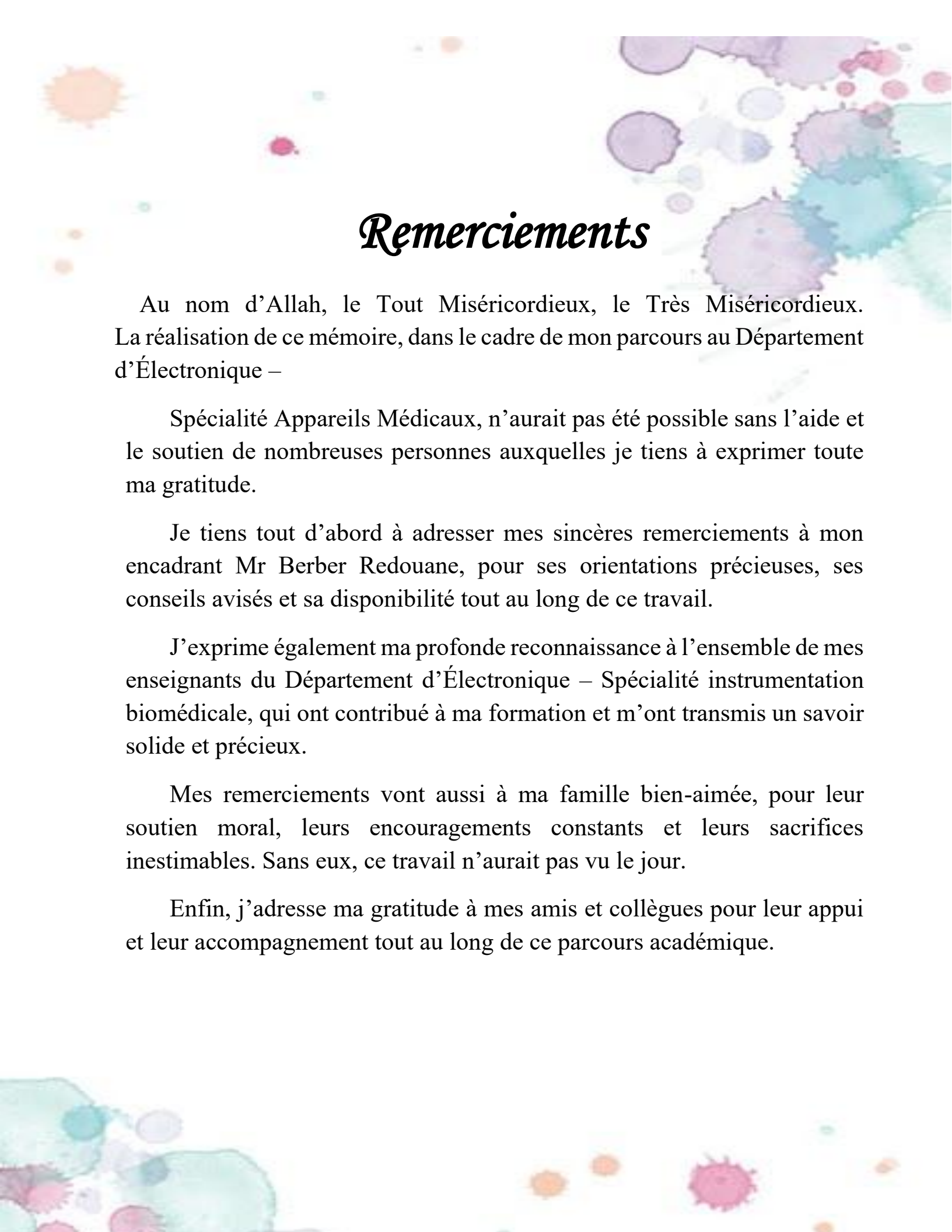
Ce mémoire présente la conception et la réalisation d'un système intelligent de suivi de santé pour les animaux domestiques. L'objectif principal est de surveiller en temps réel certains paramètres vitaux tels que la température corporelle, la fréquence cardiaque et l'activité physique, afin de détecter rapidement toute anomalie pouvant menacer la santé de l'animal. La solution proposée repose sur l'intégration de capteurs biométriques et de modules de communication sans fil connectés à une application mobile, permettant au propriétaire de recevoir des alertes et de consulter l'historique des données. Ce travail met en évidence l'importance des technologies embarquées et de l'Internet des objets (IoT) dans le domaine vétérinaire.

Mots-clés : Santé animale, Système intelligent, Capteurs biométriques, IoT, Application mobile.



Dédicace

À ma chère famille,
pour leurs soutien inestimable tout au long de mon parcours,
à mes parents, symbole de sacrifice et de générosité,
à mes frères et sœurs, compagnons de patience et d'encouragement,
À mes honorables enseignants,
qui nous ont transmis leur savoir avec dévouement et sincérité,
et qui ont été pour nous une source d'inspiration et de guidance,
À mes collègues et amis,
avec qui j'ai partagé les moments de persévérance et d'effort,
et qui ont rendu ce chemin plus riche et plus agréable,
Je dédie le fruit de ce modeste travail en témoignage de respect et de
gratitude.



Remerciements

Au nom d'Allah, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux.
La réalisation de ce mémoire, dans le cadre de mon parcours au Département d'Électronique –

Spécialité Appareils Médicaux, n'aurait pas été possible sans l'aide et le soutien de nombreuses personnes auxquelles je tiens à exprimer toute ma gratitude.

Je tiens tout d'abord à adresser mes sincères remerciements à mon encadrant Mr Berber Redouane, pour ses orientations précieuses, ses conseils avisés et sa disponibilité tout au long de ce travail.

J'exprime également ma profonde reconnaissance à l'ensemble de mes enseignants du Département d'Électronique – Spécialité instrumentation biomédicale, qui ont contribué à ma formation et m'ont transmis un savoir solide et précieux.

Mes remerciements vont aussi à ma famille bien-aimée, pour leur soutien moral, leurs encouragements constants et leurs sacrifices inestimables. Sans eux, ce travail n'aurait pas vu le jour.

Enfin, j'adresse ma gratitude à mes amis et collègues pour leur appui et leur accompagnement tout au long de ce parcours académique.

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre 1 : La santé animale et enjeux actuels

1. Introduction	4
2. Bien-être animal	5
3. Les enjeux de la santé animale	6
4. Les besoins de suivi de santé pour les animaux domestiques	6
5. Technologies utilisées dans le suivi de santé des animaux	6
6. Exemples de solutions existantes et leurs limites	8
7. Contribution du projet	10
8. Conclusion du chapitre	12

Chapitre 2 : Système santé animale : Architecture et composants

1. Introduction	13
2. Architecture du système santé animale	13
3. Définition des composants du système	15
3.1 Capteur de température (LM35)	15
3.2 Capteur de rythme cardiaque	16
3.3 GPS pour la géolocalisation (NEO-6M).....	17
3.4 Modules de communication (GSM SIM800L, ESP32, Wi-Fi, Bluetooth)	18
3.5 Interface utilisateur (Application mobile / Web).....	19
4. Analyse comparative des technologies utilisées	20
5. Conclusion du chapitre	22

Chapitre 3 : Simulation et réalisation du système santé animale

1. Objectif de la simulation	24
------------------------------------	----

Sommaire

2. Outil de simulation (Proteus)	24
2.1 Modélisation des composants	24
2.2 Schéma de simulation	25
2.3 Résultats et interprétation	26
3. Prototype et montage physique	28
3.1 Présentation du prototype	28
3.2 Limitations	28
4. Programmation et communication	28
4.1 Lecture capteurs et transmission SMS (SIM800L)	28
4.2 Envoi des données vers un serveur cloud	29
5. Protocole expérimental	30
5.1 Observations comportementales	30
5.2 Résultats des capteurs	30
5.3 Évaluation et optimisation	31
5.4 Pistes d'amélioration	31
6. Discussion des résultats	32
7. Conclusion du chapitre	34
 Conclusion générale et Perspectives	 35
 Bibliographie	 37
 Annexes	 40

Liste des figures

Figure 1 : Schéma illustrant les contributions du projet (scientifique, technique, sociale et économique)	11
Figure 2 : Notre Architecture du Système de Santé animale	14
Figure 3 : Capteur de température LM35	15
Figure 4 : Capteur de fréquence cardiaque MAX30100	16
Figure 5 : Module de gps NEO-6M	17
Figure 6 : Carte de développement esp32.....	18
Figure 7 : Figure de SIM800L.....	19
Figure 8 : Comparaison des technologies de communication (Bluetooth, Wi-Fi, GSM) selon la portée, la consommation	22
Figure 9 : montre la conception du système santé animale sous Proteus.....	25
Figure 10 : Phase d'initialisation de communication et de mesure.....	25
Figure 11 : présente l'exécution du système santé animale sous Proteus.....	26
Figure 12 : montre le branchement pratique des composants	27
Figure 13 : Évolution de la température corporelle de l'animal au cours du test xpérimenta.....	32

Liste des Tableaux

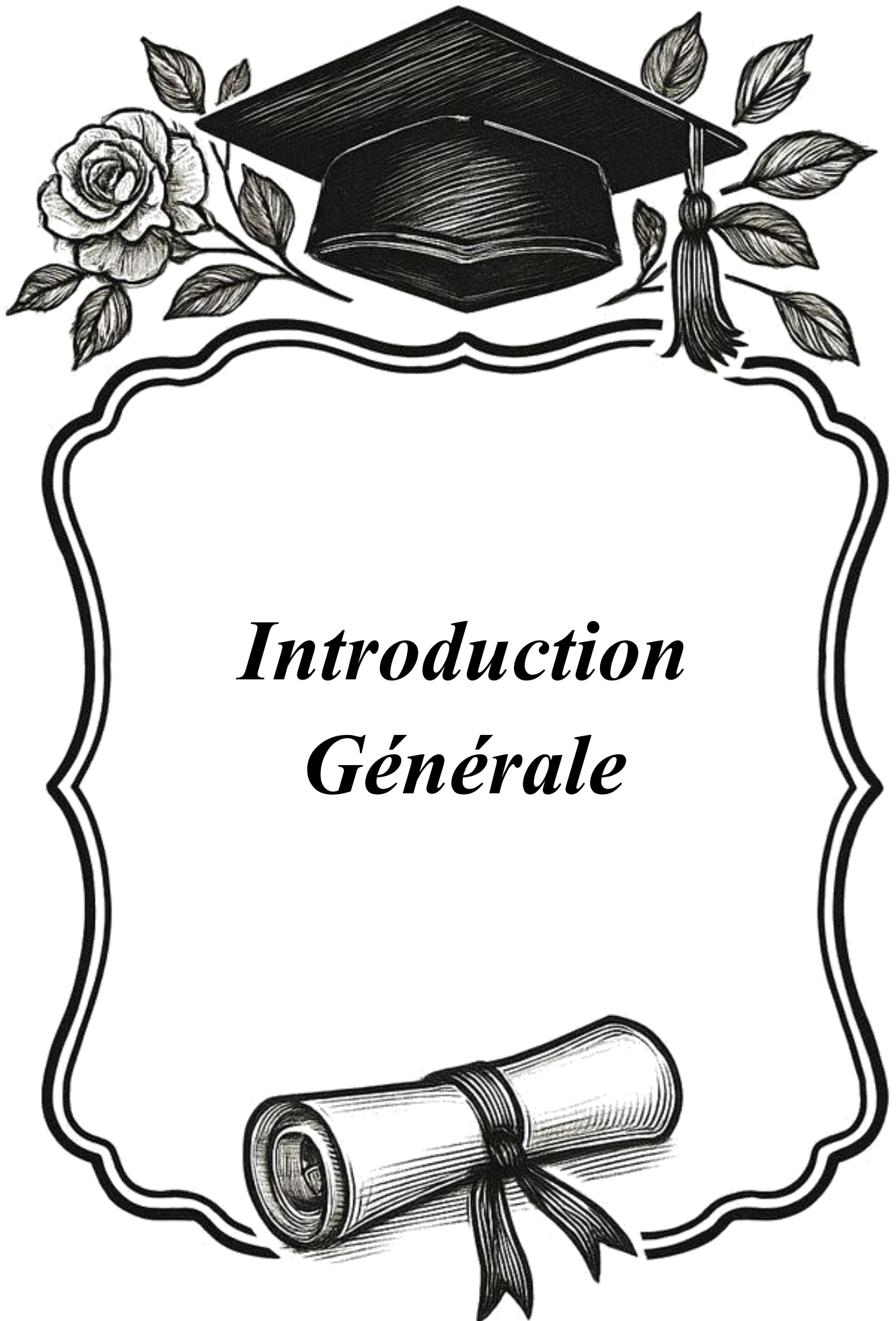
Tableau 1 : Exemples de dispositifs commerciaux de suivi de santé animale et leurs.....	8
Tableau 2 : Principaux composants du système de suivi de santé animale et leurs.....	25
Tableau 3 : Connexions entre les composants et les broches de l'Arduino UNO.....	25
Tableau 4 : Évolution du rythme cardiaque de l'animal mesuré avec le capteur XD-58C.....	34

Liste des abréviations

- **AI : Artificial Intelligence (Intelligence artificielle)** → Système capable d'analyser et de traiter des données pour simuler l'intelligence humaine.
- **API : Application Programming Interface (Interface de programmation d'applications)** → Ensemble de fonctions permettant à une application d'interagir avec d'autres logiciels.
- **BLE : Bluetooth Low Energy (Bluetooth basse consommation)** → Version optimisée du Bluetooth pour faible consommation énergétique.
- **ECG : Electrocardiogram (Électrocardiogramme)** → Capteur mesurant l'activité électrique du cœur.
- **ESP32 : ESP32 Microcontroller (Microcontrôleur Wi-Fi/Bluetooth)** → Carte de développement intégrant Wi-Fi et Bluetooth pour l'IoT.
- **GPS : Global Positioning System (Système de positionnement global)** → Technologie permettant de déterminer la position géographique en temps réel.
- **GSM : Global System for Mobile communication (Système mondial de communication mobile)** → Standard de communication mobile pour transmission de données et appels.
- **IoT : Internet of Things (Internet des objets)** → Réseau d'objets physiques (capteurs, appareils) connectés via Internet.
- **Li-ion : Lithium-ion Battery (Batterie lithium-ion)** → Batterie rechargeable avec une haute densité énergétique.
- **PPG : Photoplethysmogram (Photopléthysmogramme)** → Technique optique pour mesurer la variation du volume sanguin.
- **RFID : Radio Frequency Identification (Identification par radiofréquence)** → Système d'identification utilisant les ondes radio et des puces électroniques.
- **SIM : Subscriber Identity Module (Module d'identité de l'abonné)** → Carte utilisée pour identifier l'abonné dans un réseau mobile.
- **TP4056 : TP4056 Charging Module (Module de gestion de charge)** → Circuit utilisé pour recharger et protéger les batteries Li-ion.
- **Wi-Fi : Wireless Fidelity (Fidélité sans fil)** → Technologie de communication sans fil à courte portée.

Liste des symboles

- **°C** : Degré Celsius → Unité de mesure de la température.
- **dB** : Décibel → Unité de mesure de l'intensité du signal.
- **f** : Fréquence (Hertz, Hz) → Nombre de cycles par seconde.
- **HR** : Fréquence cardiaque (Heart Rate, bpm) → Battements du cœur par minute.
- **I** : Courant électrique (Ampères) → Intensité du courant électrique.
- **mAh** : Milliampère-heure → Capacité d'une batterie.
- **m/s²** : Mètre par seconde carrée → Accélération, utilisé pour l'accéléromètre.
- **Ω** : Ohm → Unité de résistance électrique.
- **P** : Puissance (Watt) → Énergie par unité de temps.
- **T** : Température corporelle (°C) → Mesure de la chaleur du corps.
- **t** : Temps (secondes, s) → Durée mesurée en secondes.
- **V** : Tension électrique (Volts) → Différence de potentiel électrique



Introduction
Générale

Introduction Générale :

À l'ère du numérique, où les animaux domestiques sont considérés comme des membres à part entière de la famille, leur santé s'impose comme une priorité absolue. Pourtant, malgré cette relation croissante entre l'humain et l'animal, les méthodes traditionnelles de suivi vétérinaire - consultations sporadiques, observations subjectives, ou détection tardive des symptômes - peinent à répondre aux exigences modernes de prévention et de réactivité. Une étude récente menée par la "World Small Animal Veterinary Association" en (2023) révèle que "près de 60% des décès prématurés chez les chiens pourraient être évités par un diagnostic précoce [27], soulignant ainsi l'urgence de repenser les paradigmes de surveillance sanitaire. C'est dans ce contexte critique que les technologies de l'IoT ("Internet of Things") et les capteurs intelligents émergent comme une révolution silencieuse, offrant une surveillance continue, précise et non invasive des paramètres vitaux, loin des limites des approches conventionnelles. [6],[13]. Porté par cette ambition innovante, ce projet se donne pour mission de concevoir un « système intelligent de suivi de santé pour animaux domestiques », fusionnant ingénierie électronique et intelligence logicielle.

L'objectif premier réside dans le développement d'un dispositif embarqué miniaturisé, équipé de capteurs physiologiques de pointe (thermomètre infrarouge, accéléromètre triaxial, et capteur PPG "Photo plethysmography"), capables de mesurer en temps réel la température corporelle, la fréquence cardiaque et les niveaux d'activité. [6],[22].

Parallèlement, le système intègre un module d'intelligent léger, analysant en flux continu les données recueillies pour détecter toute anomalie critique déclenchant ainsi des alertes automatisées (SMS, notifications push) à destination des propriétaires et des cliniques vétérinaires partenaires [7],[15]. Enfin, une plateforme interactive, accessible via une application mobile ou une interface web, centralise l'historique des données, génère des rapports analytiques prédictifs et facilite la collaboration entre acteurs de la santé animal [2].

Sur le plan méthodologique, ce travail s'articule en trois phases synergiques. La première phase, exploratoire, combine une revue critique des capteurs biocompatibles et des tests en conditions réelles sur différentes races animales, garantissant ainsi une adaptation optimale aux spécificités anatomiques. La deuxième phase, technique, englobe la conception du prototype matériel (s'appuyant sur un microcontrôleur ESP32 à faible consommation énergétique) et la mise en place d'une architecture IoT sécurisée. Enfin, la troisième phase, logicielle, vise à transformer les données brutes en connaissances actionnables : déploiement un algorithme de classification des états de santé, couplé à une visualisation dynamique (des graphiques interactifs et des cartes de chaleur) [8],[9].

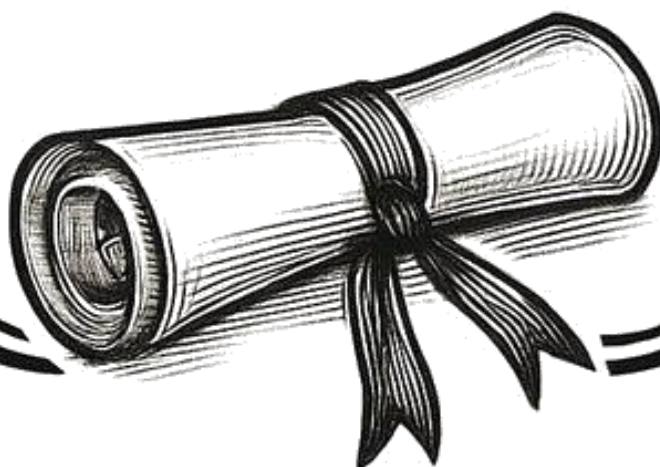
Introduction Générale :

Au-delà de son innovation technologique, ce projet incarne une vision holistique de la médecine animale. En rendant accessible une surveillance 24/24 et 7/7, en anticipant les crises sanitaires et en démocratisant l'accès aux données vétérinaires, ce système se positionne comme un maillon essentiel dans l'écosystème de la santé connectée. Il ouvre également la voie à des applications futures, telles que l'intégration de la blockchain pour la traçabilité des données ou l'extension aux espèces sauvages en captivité. Une étape pionnière, donc, vers un avenir où technologie et bien-être animal convergent harmonieusement [10],[11].



Chapitre I :

La santé animale et enjeux actuels



1-Introduction :

La santé animale joue un rôle essentiel dans la sécurité alimentaire, le bien-être des animaux de compagnie et la prévention des zoonoses (maladies transmissibles à l'homme). Cependant, plusieurs défis persistent : détection tardive des maladies, suivi difficile dans les fermes de grande taille, et manque de vétérinaires dans certaines régions rurales.

De plus, la santé animale entre dans une nouvelle ère grâce aux capteurs biomédicaux, à l'IoT et à l'IA. Ces innovations offrent un suivi précis, une détection précoce des maladies, et contribuent au bien-être animal ainsi qu'à la sécurité sanitaire mondiale.

Dans ce chapitre nous allons présenter l'importance du respect et de la compassion envers les animaux. Ainsi les éléments clé pour assurer la bonne santé des animaux [10],[27].

2- Bien-être animal :

L'importance de la **santé animale** ne peut être sous-estimée dans notre quête d'un **bien-être durable**. Les enjeux liés à cette problématique s'étendent au-delà des simples aspects médicaux ; ils englobent également des dimensions éthiques et environnementales. La prévention des maladies, tant à un niveau individuel que collectif, constitue un axe fondamental pour assurer la **protection** et le **bien-être** des animaux. Parallèlement, un bon traitement



des animaux favorise l'empathie et la compassion au sein des communautés humaines, contribuant ainsi à une meilleure **santé mentale**. Adopter des **bonnes pratiques** d'élevage et de soins est essentiel pour garantir que chaque animal vive dans un environnement adapté à ses besoins, tout en préservant les équilibres écologiques nécessaires à notre planète.

La santé animale est un sujet essentiel qui engendre des réflexions profondes sur les enjeux liés au **bien-être** des animaux et sur les pratiques indispensables pour garantir leur qualité de vie. Que ce soit dans un contexte domestique ou agricole, la **protection** et le **bien-être** des animaux doivent être envisagés de manière holistique, prenant en compte les aspects sanitaires, environnementaux et éthiques. Dans ce chapitre, on propose d'explorer les enjeux fondamentaux relatifs à la santé animale et les bonnes pratiques à adopter pour un **bien-être durable** [5],[17].

3- Les enjeux de la santé animale :

La **santé animale** est directement liée à la santé publique et à l'environnement. En effet, des animaux en bonne santé contribuent à la sécurité alimentaire en offrant des produits de qualité. D'autre part, les maladies animales peuvent avoir un impact significatif sur la santé humaine à travers la transmission de zoonoses. L'Organisation mondiale de la santé animale indique que le bien-être animal est un élément central pour maintenir l'équilibre sanitaire global dans nos sociétés [10],[27].

a) Le rôle de l'élevage dans la santé animale :

Les animaux d'élevage représentent une part majeure de la **santé animale**. Des pratiques comme la **médecine préventive**, l'hygiène, et l'amélioration des conditions d'élevage sont essentielles pour prévenir les épidémies et garantir une vie saine aux animaux. Des éleveurs formés aux enjeux de la santé animale peuvent mettre en œuvre des stratégies efficaces, en réduisant l'utilisation d'antibiotiques et en favorisant des approches durables et respectueuses du vivant [11],[19].

b) Les bonnes pratiques pour un bien-être durable :

Adopter des **bonnes pratiques** pour assurer la santé et le bien-être des animaux est crucial. Il est impératif de leur fournir un environnement adapté à leurs besoins spécifiques. Cela inclut un aménagement propice au repos, des espaces pour se mouvoir librement, ainsi qu'un accès à une alimentation équilibrée et à de l'eau propre [5],[17].

c) Critères de bien-être : Les cinq libertés fondamentales de l'animal à respecter :

Pour garantir un véritable **bien-être**, il est essentiel de respecter les **cinq libertés fondamentales** de l'animal, qui sont : la liberté de ne pas souffrir de faim ou de soif, la liberté de ne pas être soumis à la douleur ou à des maladies, la liberté d'exprimer des comportements naturels, la liberté de ne pas être peur ou d'angoisse, et la liberté de bénéficier d'un confortable espace de repos [5],[27].

d) La prévention des maladies « comme levier de bien-être »

La prévention des maladies est une clé de voûte de la **santé animale**. Cela implique des suivis réguliers par des vétérinaires, des vaccinations appropriées et une détection précoce des maladies potentielles. En mettant l'accent sur la **prévention**, on réduit les risques d'épidémies et on promeut un environnement plus sain pour les animaux et pour les humains qui interagissent avec eux [10],[27].

e) Éthique et responsabilité collective :

Le **bien-être animal** est également une question éthique qui engage notre responsabilité collective. En tant qu'individus, producteurs et consommateurs, il est de notre devoir de promouvoir et d'appliquer des pratiques respectueuses des animaux. La sensibilisation à ces enjeux et l'application de stratégies durables sont indispensables pour garantir un avenir respectueux du vivant. Pour approfondir ce sujet, des ressources utiles sont disponibles auprès de l'Organisation mondiale de la santé animale ou encore sur Vie Publique [5],[17].

4- Les besoins de suivi de santé pour les animaux domestiques :**a) Surveillance de la température corporelle, du rythme cardiaque et de l'activité :**

La surveillance de la température corporelle permet de détecter les variations anormales qui pourraient indiquer des infections ou des maladies. Les capteurs modernes permettent de mesurer en continu la température et d'alerter les propriétaires en cas de fluctuations inquiétantes [22],[24].

b) Détection des anomalies comportementales :

L'analyse des mouvements et du comportement d'un animal permet d'identifier des signes de stress, d'anxiété ou de maladie. L'intelligence artificielle et les capteurs biométriques aident à interpréter ces données et à fournir des alertes en temps réel [6],[15].

5- Technologies utilisées dans le suivi de santé des animaux

Les développements des capteurs biomédicaux permettent un suivi continu et précis des animaux. Ils permettent de collecter des données physiologiques des animaux en temps réel, incluent des capteurs de température et fréquence cardiaque, des électrocardiogrammes (ECG), des accéléromètres et des dispositifs GPS. Pour transmettre les données collectées des capteurs biomédicaux, plusieurs modules de communication sont utilisés afin d'assurer la récupération vers un serveur ou une plateforme comme interface ou directement vers un autre appareil connecté [6],[7].

Exemple : un collier connecté pour vaches laitières détecte la chaleur, le stress, l'activité et la localisation permettant le suivi en temps réel de la santé de l'animal, et d'envoyer des alertes automatiquement [11],[22].

5-1. Les capteurs biomédicaux :

- a) **Capteurs de température** : Ces capteurs mesurent la température corporelle de l'animal et détectent les variations pouvant indiquer une maladie ou une infection. Ils sont souvent intégrés dans des colliers intelligents ou des implants sous-cutanés [22],[24].
- b) **Électrocardiogrammes (ECG)** : Les capteurs ECG surveillent le rythme cardiaque et permettent de détecter des anomalies telles que l'arythmie cardiaque. Ils sont utilisés pour diagnostiquer des maladies cardiaques précoces et de voir l'état du stress de l'animal [6],[22].
- c) **Accéléromètres** : Les accéléromètres analysent l'activité physique et le comportement de l'animal. Ils aident à détecter les changements d'activité inhabituels, indiquant un problème de santé potentiel.
- d) **Le GPS** : Les dispositifs GPS permettent de suivre la position de l'animal en temps réel. Ils sont très utiles pour surveiller les déplacements et prévenir la perte des animaux domestiques [6],[23].

5-2. Modules de Communication :

- a) **Le Bluetooth** : est une technologie de communication sans fil à courte portée. Elle est utilisée dans les dispositifs de suivi de santé des animaux pour transmettre les données des capteurs vers un smartphone ou un autre appareil connecté [8],[9].
- b)
- c) **Le Wi-Fi** : il permet une transmission rapide des données sur de longues distances. Les colliers intelligents dotés de Wi-Fi peuvent envoyer en temps réel les données de santé de l'animal vers une plateforme en ligne ou une application mobile [8],[9].
- d) **LoRa** : (Long Range) est une technologie de communication sans fil à basse consommation. Elle est idéale pour suivre la santé et la localisation des animaux sur de longues distances sans nécessiter une connexion Internet permanente [7],[20].
- e) **GSM** : Les dispositifs utilisant le réseau GSM (2G, 3G, 4G) permettent d'envoyer des alertes et des mises à jour de localisation via SMS ou applications mobiles. Ils sont très utiles pour le suivi des animaux en extérieur [20],[21].

5-3. Intelligence artificielle et analyse de données :

- a) **Rôle de l'intelligence artificielle :** L'intelligence artificielle (IA) joue un rôle crucial dans l'analyse des données de santé des animaux. Elle permet d'identifier des tendances et de détecter des anomalies en comparant les données recueillies avec des modèles prédéfinis [7],[15].
- b) **Méthodes d'analyse des données :** Les données collectées par les capteurs sont traitées via des algorithmes d'apprentissage automatique. Ces algorithmes permettent de prédire les risques de maladies, d'alerter en cas de comportements anormaux et de fournir des recommandations aux propriétaires d'animaux [7],[15].
- c) **Applications pratiques :** Grâce à l'IA, les dispositifs de suivi de santé animale peuvent apprendre les habitudes normales de l'animal et signaler toute déviation importante. Par exemple, une baisse soudaine d'activité ou une température corporelle anormalement élevée peut déclencher une alerte envoyée au propriétaire via une application mobile [7],[15].

6. Exemples de solutions existantes et leurs limites :

6-1. Dispositifs commerciaux et leur efficacité : Plusieurs dispositifs de suivi de santé animale sont disponibles sur le marché. Ces dispositifs incluent des colliers GPS, des capteurs de température, et des systèmes connectés permettant une surveillance en temps réel. Parmi les solutions populaires, on trouve :

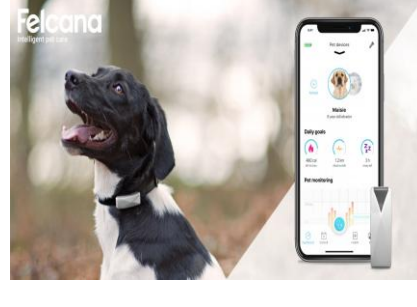
		
1. FitBark : Un collier connecté qui suit l'activité et la santé des chiens et chats.	2. Whistle GO: Un appareil de suivi GPS avec surveillance de la santé et des habitudes.	3. Felcana: Un système avancé utilisant l'intelligence artificielle pour analyser le comportement animal.

Tableau 1 : Exemples de dispositifs commerciaux de suivi de santé animale et leurs

Malgré leurs avantages, ces dispositifs présentent certaines limites, notamment :

- Autonomie de la batterie : Les appareils nécessitent une recharge fréquente, limitant leur efficacité sur le long terme.
- Précision des capteurs : Certains dispositifs peuvent donner des résultats imprécis, influencés par les mouvements de l'animal.
- Coût élevé : Les solutions avancées peuvent être onéreuses, limitant leur accessibilité pour certains propriétaires.
- Dépendance à la connectivité : Le bon fonctionnement des dispositifs dépend souvent d'une connexion Internet stable.

L'amélioration de ces aspects est essentielle pour rendre ces technologies plus fiables et accessibles aux propriétaires d'animaux domestiques [11],[20],[22].

6-2. Perspectives d'Amélioration : Bien que les technologies de surveillance de la santé des animaux domestiques aient fait des progrès significatifs, plusieurs pistes d'amélioration restent à explorer. L'intégration de nouvelles technologies et l'optimisation des dispositifs actuels permettront d'améliorer l'efficacité et l'accessibilité de ces solutions. Parmi les évolutions futures, on peut citer :

1. Miniaturisation des capteurs : Réduire la taille des capteurs pour améliorer le confort des animaux et permettre une intégration plus discrète.
2. Amélioration de la précision des mesures : Développer des capteurs plus précis et plus sensibles pour détecter les variations physiologiques avec une meilleure fiabilité.
3. Augmentation de l'autonomie des dispositifs : Optimiser la consommation énergétique des capteurs et utiliser des sources d'énergie renouvelables, comme la recharge solaire.
4. Utilisation avancée de l'IA : Intégrer des algorithmes d'intelligence artificielle capables de détecter automatiquement des anomalies et de proposer des diagnostics préliminaires.
5. Connectivité améliorée : Permettre une communication plus stable et efficace entre les capteurs et les plateformes de surveillance, notamment grâce à l'implémentation de la 5G et de réseaux à basse consommation comme LoRa.

Ces perspectives d'amélioration ouvrent la voie à une surveillance plus intelligente, efficace et adaptée aux besoins des propriétaires d'animaux domestiques, garantissant ainsi un meilleur suivi de leur santé et de leur bien-être [6],[7],[15],[20].

7. Contribution du projet

1.1. Contribution scientifique

La première contribution de ce projet se situe dans le domaine scientifique. En effet, la majorité des travaux antérieurs sur la santé animale se sont concentrés sur la médecine vétérinaire traditionnelle, où le diagnostic repose principalement sur les consultations périodiques et les observations cliniques. Le système proposé innove en intégrant des technologies issues de l'Internet des objets (IoT), des capteurs biométriques et des modules de communication modernes afin d'assurer un suivi en temps réel. Cette approche permet d'enrichir la littérature scientifique existante sur la télésurveillance vétérinaire. Elle ouvre également la voie à de nouvelles perspectives de recherche, notamment l'exploitation de l'intelligence artificielle pour l'analyse prédictive des données et la personnalisation des seuils de détection en fonction de chaque animal. Ainsi, le projet contribue à l'évolution des pratiques en santé animale, en passant d'un suivi ponctuel à une approche continue, proactive et centrée sur le bien-être [6],[7].

1.2. Contribution technique

Sur le plan technique, le projet propose une solution intégrée combinant plusieurs capteurs et modules complémentaires : capteur de température (LM35), capteur de rythme cardiaque (XD-58C), module GPS (NEO-6M) et module GSM (SIM800L). L'originalité réside dans la combinaison de ces composants dans un même système embarqué, permettant de surveiller simultanément différents paramètres physiologiques et environnementaux. Un autre aspect technique important est l'intégration d'un mécanisme d'alerte via SMS, qui constitue une alternative efficace à l'application mobile dans les contextes où l'accès à Internet est limité. Cette redondance renforce la fiabilité du système, puisqu'elle garantit que le propriétaire reçoit toujours l'information en temps réel. De plus, la modularité de l'architecture proposée offre la possibilité d'ajouter d'autres capteurs à l'avenir (par exemple, capteurs de respiration, oxymètre de pouls ou capteur de stress). Cette flexibilité permet d'adapter le système à différents types d'animaux et d'évoluer en fonction des besoins [20],[21].

1.3. Contribution sociale et économique

D'un point de vue social, le projet répond à un besoin réel chez les propriétaires d'animaux domestiques, qui cherchent des solutions pratiques pour assurer le bien-être de leurs compagnons. En offrant un suivi continu et des alertes instantanées, le système réduit le stress et l'incertitude

liés à la santé animale, tout en renforçant la relation entre l'homme et l'animal. Sur le plan économique, ce projet peut contribuer à diminuer les coûts de soins vétérinaires grâce à la détection précoce des maladies, qui permet d'intervenir avant que les pathologies ne deviennent graves. En outre, il ouvre la voie à la création d'un produit commercialisable, pouvant intéresser des start-ups spécialisées dans la santé animale et l'IoT. Le développement local d'une telle solution représenterait une opportunité d'innovation technologique et de dynamisation du secteur vétérinaire [10],[11].

1.1. Synthèse et impact global

En résumé, ce projet apporte une contribution multidimensionnelle : Scientifique, en enrichissant la recherche sur le suivi connecté des animaux. Technique, en proposant une architecture modulaire et redondante. Sociale, en améliorant la qualité de vie des animaux et la sérénité des propriétaires. Économique, en réduisant les coûts de soins et en ouvrant la voie à des opportunités de valorisation industrielle. Ainsi, le système conçu dépasse le simple cadre académique pour s'inscrire dans une dynamique d'innovation concrète, susceptible d'avoir un impact durable sur la santé animale et sur le secteur des technologies embarquées [6],[7],[10],[11],[15],[22].

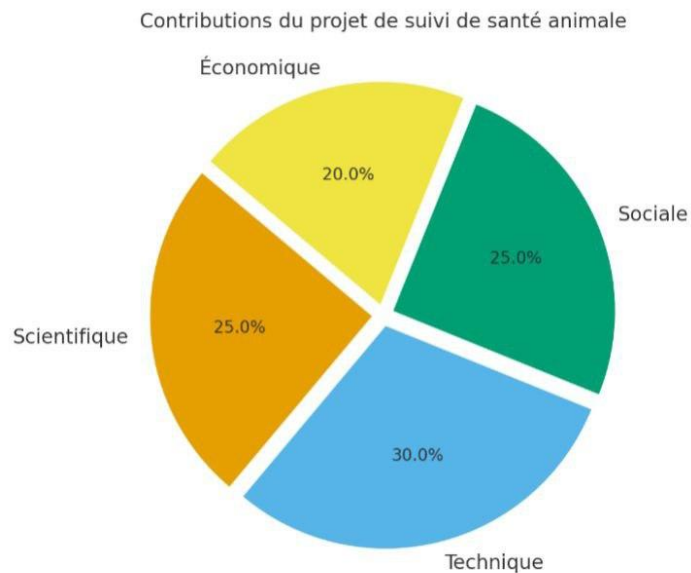


Figure 1 : Schéma illustrant les contributions du projet (scientifique, technique, sociale et économique).

8. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons parlé sur les besoins croissants en suivi de santé des animaux domestiques, mettant en évidence l'importance de surveiller la température corporelle, le rythme cardiaque et l'activité de ces compagnons fidèles. L'identification précoce des anomalies comportementales constitue un levier essentiel pour prévenir des maladies et améliorer la qualité de vie des animaux domestiques.

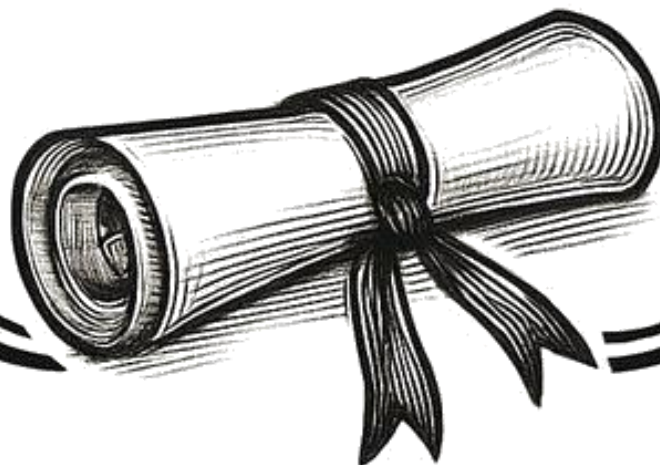
Nous avons également présenté les différentes technologies utilisées dans ce domaine, telles que les capteurs biométriques (capteurs de température, ECG, accéléromètres, GPS), les systèmes de communication sans fil (Bluetooth, Wi-Fi, LoRa, GSM), ainsi que le rôle de l'intelligence artificielle et de l'analyse de données pour améliorer la détection et l'interprétation des données recueillies.

Le suivi de la santé des animaux domestiques reste un domaine en pleine évolution, offrant des opportunités considérables pour la recherche et le développement de nouvelles solutions plus performantes et accessibles. Dans le prochain chapitre, nous aborderons la conception du système proposé, en détaillant son architecture, ses composants et son mode de fonctionnement.



Chapitre II

**Systeme santé animale :
Architecture et composants**



1.Introduction :

L'objectif principal de ce projet est de développer une solution technologique performante, créer un dispositif embarqué intelligent et innovant pour surveiller en temps réel la santé des animaux de compagnie, Le système repose sur plusieurs composants électroniques essentiels permettant de surveiller la santé et la position de l'animal en temps réel : le système est capable de suivre plusieurs paramètres physiologiques (température corporelle, fréquence cardiaque), tout en localisant l'animal grâce au module GPS. Ce système sera intégré dans un collier que l'animal pourra porter sans gêne.

Grâce à une plateforme d'affichage intuitive, une application mobile ou un interface web est créer dont l'utilisateur pourra consulter l'historique des mesures, visualiser les données en direct, et suivre l'état de santé général de son animal.

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'architecture de notre système de sante animale, voir les différents composants biométriques essentiel et les l'ensemble des modules de position et de communication réseau et mobile[3], [6], [9],[19]

2.Architecture du système Santé animale :

L'architecture du système est pensée pour être modulaire, compacte et adaptée aux animaux de compagnie. Elle repose sur une série de composants électroniques interconnectés, permettant une collecte, une transmission et une visualisation efficaces des données vitales.

Tout d'abord, les capteurs physiologiques comme le LM35 (température) et le XD-58C (fréquence cardiaque) sont placés sur le collier de l'animal. Ces capteurs sont connectés à une carte de développement (ESP32 ou Arduino Uno) qui sert de cœur du système.

Ensuite, les données collectées sont traitées par le microcontrôleur puis transmises via le module GSM SIM800L. Ce module permet d'envoyer des SMS ou de communiquer avec une base de données distante en réseau, ou même sans connexion Wi-Fi.

Un module GPS NEO-6M est également intégré afin de permettre la localisation en temps réel de l'animal, ce qui est particulièrement utile en cas de fugue ou de perte.

Les données sont ensuite consultables par le propriétaire via une application mobile ou web, qui affiche les paramètres vitaux, l'historique, et les notifications automatiques en cas d'anomalies.

Chapitre II : Système santé animale : architecture et composants

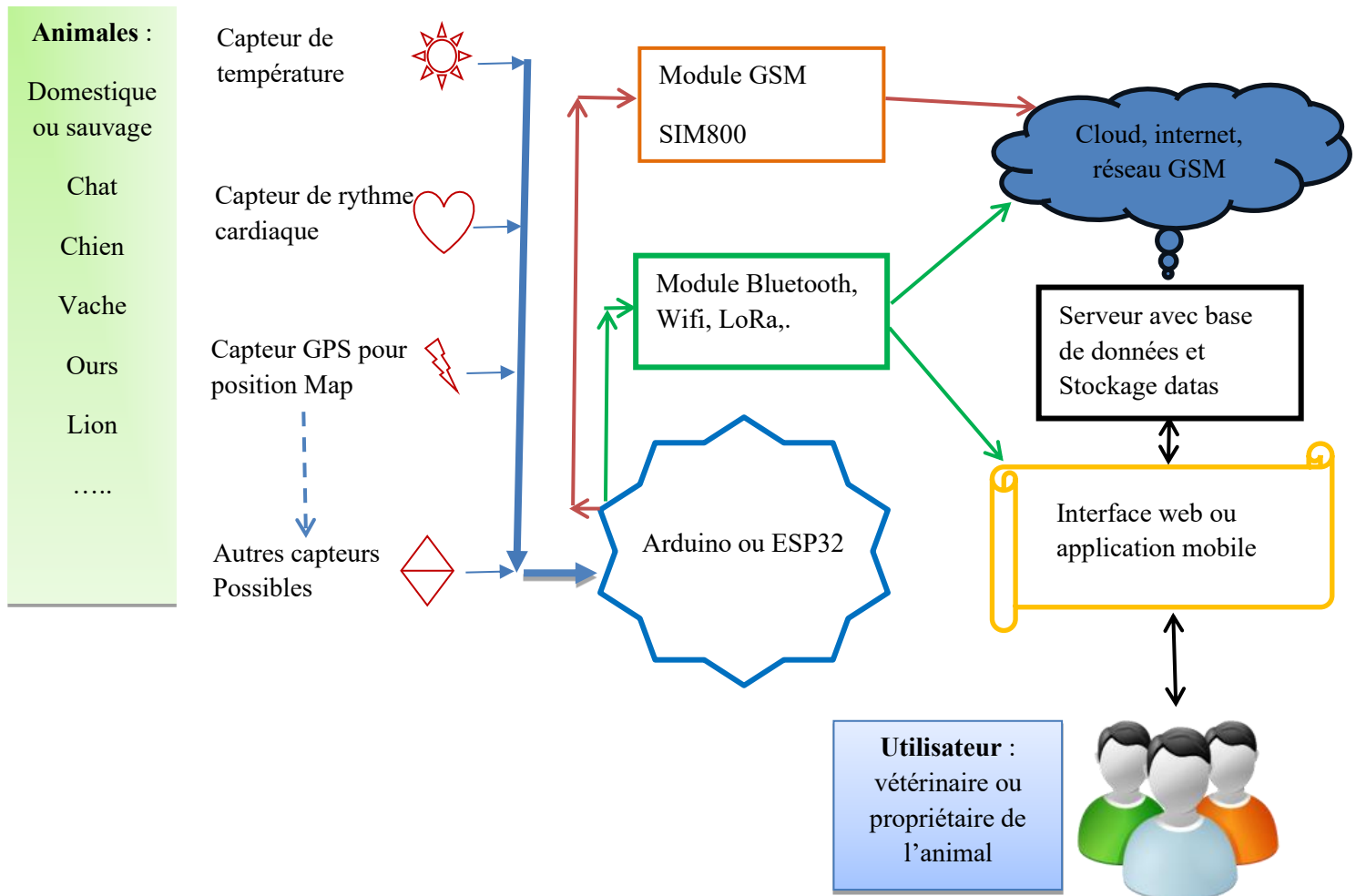


Figure 2 : Notre Architecture du Système de Santé animale

Cette architecture permet une surveillance continue, autonome et intelligente de l'état de santé de l'animal, tout en garantissant une interface simple pour l'utilisateur.

Grâce au module NEO-6M, l'application affiche la position actuelle de l'animal sur une carte intégrée (Google Maps ou OpenStreetMap), ce qui est particulièrement utile en cas de fuite ou d'animal errant.

L'interface de l'application joue un rôle central dans le système de suivi de santé des animaux domestiques. Elle représente le point de contact principal entre le système embarqué et l'utilisateur final, qu'il soit propriétaire ou vétérinaire.

L'application affiche en direct les valeurs de température corporelle et la fréquence cardiaque transmises par les capteurs. Ces données sont visualisées avec des codes couleur pour faciliter l'interprétation rapide (ex. : vert = normal, rouge = alerte). Lorsque des valeurs anormales sont

ii) **Fréquence cardiaque** : Un moniteur de fréquence cardiaque, également appelé cardiofréquencemètre, est un dispositif utilisé pour mesurer et afficher en temps réel la fréquence des battements du cœur. Ces appareils se présentent généralement sous deux formes principales :

- **Dispositifs électriques (ECG)** : Ces appareils utilisent des électrodes pour mesurer l'activité électrique du cœur. Ils se présentent souvent sous la forme d'une ceinture portée autour de la poitrine, où les électrodes captent les signaux électriques générés par les battements cardiaques et les transmettent à un récepteur, tel qu'une montre, pour afficher la fréquence cardiaque.
- **Dispositifs optiques (PPG)** : Ces appareils reposent sur une technique appelée photo pléthysmographie. Ils utilisent des LED pour émettre de la lumière sur la peau et mesurent la quantité de lumière réfléchiée pour détecter les variations du flux sanguin, permettant ainsi de calculer la fréquence cardiaque. Cette technologie est souvent intégrée dans des dispositifs portables tels que les montres connectées et les trackers d'activité physique.
 - Il existe des Capteurs d'activité qui sont conçu pour mesurer et analyser les mouvements et les activités physiques d'un individu, animal ou d'un objet. Il repose généralement sur des technologies telles que l'accéléromètre, le gyroscope et parfois des capteurs de fréquence cardiaque pour suivre des paramètres comme le nombre de pas, la distance parcourue, les calories brûlées et la qualité du sommeil. Ces capteurs sont couramment intégrés dans les montres connectées, bracelets intelligents et autres dispositifs portables destinés à la santé, au sport et au bien-être.[5]

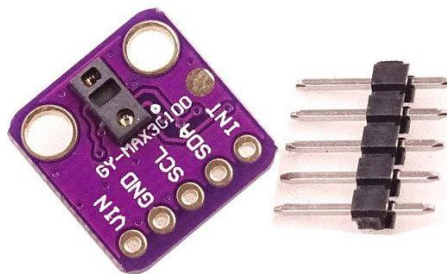


Figure 4 : Capteur de fréquence cardiaque MAX30100.[29]

Chapitre II : Système santé animale : architecture et composants

➤ **iii) GPS pour la géolocalisation :** Le Système de positionnement mondial (GPS, Global positioning System) est un système américain de radionavigation basé dans l'espace qui propose aux usagers civils des services de géolocalisation, de navigation et de référence temporelle fiables, 24 heures sur 24 et dans le monde entier -- gratuitement. Il suffit d'être équipé d'un récepteur GPS pour connaître la position et la référence temporelle d'un objet. Le GPS fournit des informations précises en matière de positionnement et de référence temporelle à un nombre illimité de personnes, sous toutes les conditions météorologiques, de jour comme de nuit, partout au monde.

Le GPS se compose de trois groupes d'éléments : des satellites en orbite autour de la Terre ; des stations de contrôle au sol ; et les récepteurs GPS des utilisateurs. Les satellites GPS émettent des signaux qui sont captés et identifiés par les récepteurs. Ces derniers peuvent alors situer précisément en trois dimensions (latitude, longitude et altitude) le point et la référence temporelle voulus.

Les particuliers peuvent acheter des combinés GPS dans le commerce sans difficultés. Equipés de ces récepteurs, ils sont alors en mesure de localiser précisément leur position et d'obtenir des directions précises pour se rendre à leur destination, que ce soit à pied, en voiture, en avion ou par bateau. Le GPS est devenu une pièce maîtresse des systèmes de transport à travers le monde, apprécié pour sa capacité d'aider les gens à s'orienter en vol, sur Terre ou sur l'eau. Les services d'acheminement des secours et les services d'urgence se fient au GPS pour localiser les sites de leurs missions de sauvetage et obtenir des références temporelles. Les activités quotidiennes, par exemple les opérations bancaires, la téléphonie mobile et même la surveillance des réseaux d'électricité, sont facilitées par les références temporelles précises que fournit le GPS. Agriculteurs, géomètres, géologues et quantités d'autres personnes font leur travail de manière plus efficace, plus sûre, plus économique et plus précise en utilisant les signaux gratuits et librement accessibles du GPS.[11]



Figure 5 : Module de gps NEO-6M.[30]

➤ iv) Modules de communication :

a) **ESP32** : est une série de microcontrôleurs de type système sur une puce (SoC) d'Espressif Systems, basé sur l'architecture Xtensa LX6 de Tensilica, intégrant la gestion du Wi-Fi et du Bluetooth (jusqu'à LE 5.0 et 5.1) en mode double, et un DSP. C'est une évolution d'ESP8266. Le principal outil de développement est ESP-IDF, logiciel libre développé par Expressif, écrit en C et utilisant le système temps réel Free RTOS.[15],[16]



Figure 6 : Carte de développement esp32.[31]

b) **Module GSM** : Un module GSM, ou modem GSM, ou Contrôleur GSM, est un boîtier électronique muni d'une carte SIM, qui se connecte au réseau téléphonique comme un téléphone portable. Ainsi, il dispose de son propre numéro de téléphone, et fonctionne par tout dans le monde où il existe un réseau cellulaire GSM. Mais il n'est pas verrouillé à un réseau, il peut donc être utilisé avec n'importe quel fournisseur de réseau GSM.

Lorsque vous appelez, il rejette l'appel sans y répondre, donc il n'y a pas de frais de communication engagés. Il a une mémoire non-volatile et sauvegarde les paramètres dans le cas d'une interruption de son alimentation.

Le module GSM, ou modem GSM, ou Contrôleur GSM, est autonome grâce à sa batterie interne. Ainsi, en cas de coupure secteur, il vous envoie un SMS pour vous le signaler. Et un module GSM envoie des SMS à multiples utilisateurs autorisés à les recevoir.

Le GSM ou Global System for Mobile Communication, est une norme numérique pour la téléphonie mobile. Celle-ci a vu le jour en 1982, lors de la Conférence européenne des administrations des postes et télécommunications

LED Status Indicators

The SIM800L module has an LED that shows you the status of your cellular network connection. The LED will blink at different rates depending on what the module is doing:



Blink every 1s

The chip is running but hasn't connected to the cellular network yet.



Blink every 2s

The GPRS data connection you requested is active and working.



Blink every 3s

The module has successfully connected to a cellular network and is ready to send/receive text messages and phone calls.

Figure 7 a : SIM800L- indication des états des LED

Chapitre II : Système santé animale : architecture et composants

(CEPT). Elle a commencé à être utilisée au début des années 1991. Le but ? Pallier à la demande croissante des communications mobiles sans fil, et définir une norme internationale. Sa création a marqué l'ouverture de la transmission des données numériques de faibles volumes comme le SMS ou le MMS que l'on connaît tous aujourd'hui.[12]



Figure 7 b : Figure de SIM800L.[32]

c) Interface Utilisateur (Web) ou application Mobile : Comme son nom l'indique, une interface Web est une interface utilisateur qui permet à l'utilisateur de naviguer sur un site Web. Si elle est correctement conçue, cette navigation se fait sans trop de difficultés. L'interface Web correspond à une façon d'organiser les éléments graphiques et textuels d'un site pour le rendre attrayant, ergonomique et facile à utiliser.[14],[17]



Figure : Interface de quelque application web

3. Analyse comparative des technologies utilisées

Le choix des technologies pour la conception d'un système de suivi de santé des animaux domestiques n'est pas anodin. Chaque composant doit être sélectionné en fonction de critères précis tels que la fiabilité, la consommation énergétique, le coût, la facilité d'intégration et l'adéquation aux besoins du projet. Dans ce qui suit, nous présentons une analyse comparative des principales technologies utilisées dans ce travail, en mettant en évidence leurs avantages et limites respectives.[8],[9],[18]**Les capteurs de température**

Le capteur LM35 est largement utilisé pour la mesure de la température corporelle des animaux. Il se distingue par sa simplicité d'utilisation, son faible coût et sa consommation énergétique réduite. Toutefois, sa précision est légèrement inférieure à celle de certains capteurs numériques modernes tels que le DS18B20, qui offrent une résolution plus fine et une communication numérique facilitée.

Ainsi, le choix du LM35 s'explique par un compromis entre accessibilité financière et simplicité d'intégration, ce qui en fait une solution idéale pour un prototype fonctionnel, malgré une précision légèrement limitée.

3.2 Les capteurs de rythme cardiaque

Pour la surveillance du rythme cardiaque, plusieurs technologies existent :

- Les capteurs ECG (électrocardiogramme), qui fournissent une grande précision mais nécessitent un contact direct et parfois intrusif avec la peau.
- Les capteurs PPG (photopléthysmographie), qui utilisent des signaux optiques pour estimer le rythme cardiaque mais qui sont sensibles aux mouvements.
- Le capteur XD-58C, utilisé dans notre projet, qui offre un bon compromis entre précision et facilité d'intégration dans un dispositif portable.
- Le choix du XD-58C repose donc sur un équilibre entre précision acceptable et simplicité de mise en œuvre, contrairement aux solutions médicales plus complexes et coûteuses.

3.3 Le module GPS pour la géolocalisation

Le module NEO-6M a été retenu pour la localisation en temps réel. Il offre une précision de l'ordre de quelques mètres, suffisante pour le suivi des déplacements d'un animal domestique. Comparé à des modules GPS plus récents comme le NEO-M8N, il est moins précis mais reste beaucoup plus économique et largement supporté par les microcontrôleurs comme l'Arduino Uno ou l'ESP32.

Ainsi, le NEO-6M constitue un choix optimal dans une optique de prototypage à faible coût, tout en assurant des performances convenables pour la géolocalisation basique.

3.4 Les modules de communication

Le choix du module de communication est essentiel, car il conditionne la manière dont les données sont transmises au propriétaire :

Bluetooth : faible consommation d'énergie et intégration facile avec un smartphone à proximité, mais sa portée est limitée à quelques mètres.

Wi-Fi : permet un débit de données élevé et une communication en temps réel avec un serveur ou une application web. Cependant, il dépend de la disponibilité d'un réseau Wi-Fi, ce qui peut limiter son usage en extérieur.

GSM (SIM800L) : contrairement aux deux précédents, il offre une couverture quasi universelle grâce au réseau cellulaire. Il permet notamment l'envoi de SMS ou la transmission de données via GPRS. Son principal inconvénient réside dans sa consommation énergétique plus élevée et la nécessité d'une carte SIM active.

Dans ce projet, l'intégration du module SIM800L a été privilégiée afin d'assurer une communication fiable et indépendante d'Internet, permettant au système d'envoyer directement des notifications par SMS au propriétaire, même dans des environnements dépourvus de Wi-Fi.[12]

3.5 Interface utilisateur : application mobile et application web

Le choix entre une application mobile et une application web repose sur des critères de praticité et d'accessibilité :

Une application mobile (Android ou iOS) offre une expérience utilisateur fluide, avec des notifications instantanées et une interface intuitive.

Une application web présente l'avantage d'être accessible depuis n'importe quel appareil connecté à Internet, mais elle nécessite une connexion stable et permanente.

Dans ce projet, l'approche mobile a été privilégiée car elle répond mieux aux besoins d'un suivi rapide et pratique, directement sur le smartphone du propriétaire.

Synthèse de l'analyse comparative

L'ensemble des choix technologiques réalisés dans ce projet résulte d'un compromis entre performance, coût et accessibilité. Les composants retenus, tels que le LM35, le XD-58C, le NEO-6M et le SIM800L, ne représentent peut-être pas les solutions les plus performantes sur le marché.

Cette analyse comparative met en évidence que chaque composant a été sélectionné non pas isolément, mais dans une vision globale visant à garantir un système efficace, fiable et adapté aux besoins réels des utilisateurs.



Dans ce chapitre, nous avons présenté l'architecture générale du système de suivi de santé animale ainsi que les différents composants qui le constituent. Chaque élément, qu'il s'agisse des capteurs biométriques (LM35 pour la température, XD-58C pour la fréquence cardiaque), du module GPS NEO-6M ou encore des modules de communication (Bluetooth, Wi-Fi et GSM SIM800L), a été décrit en mettant en évidence son rôle et ses caractéristiques principales.

Une analyse comparative des technologies utilisées a permis de justifier les choix effectués. En effet, le système proposé repose sur un compromis entre fiabilité, simplicité d'intégration, coût réduit et efficacité fonctionnelle. Cette démarche méthodologique assure la pertinence du prototype envisagé, tout en offrant une flexibilité pour de futures améliorations (ajout de nouveaux capteurs, optimisation de la communication, etc.).

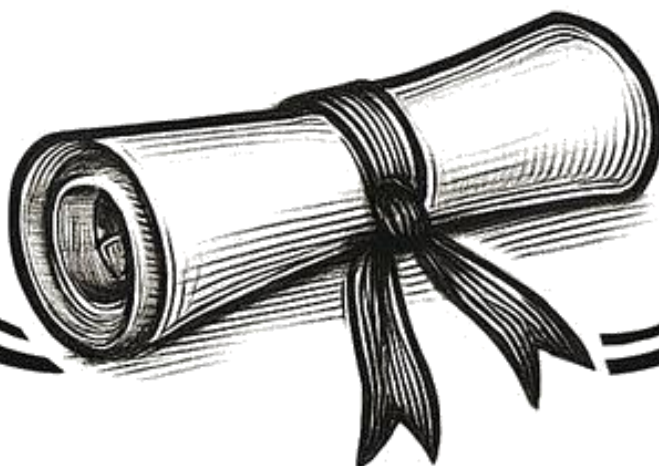
Chapitre II : **Système santé animale, architecture et composants**

Ainsi, le chapitre 2 a permis d'établir les bases techniques du projet. Le chapitre suivant sera consacré à la simulation et à la réalisation pratique du système, en passant de la phase conceptuelle à une implémentation concrète à l'aide d'outils de simulation, de montage physique et de programmation.[9],[11],[12],[15]



Chapitre III

Simulation et réalisation
du système santé animale



3. Simulation du Système santé animale :

3.1. Objectif de la Simulation : L'objectif principal de la simulation est de vérifier le bon fonctionnement du système proposé avant sa mise en œuvre réelle. Elle permet d'évaluer :

- ❖ L'intégration des capteurs avec la carte Arduino Uno.
- ❖ La transmission correcte des signaux des capteurs (LM35 pour la température, XD-58C pour le rythme cardiaque).
- ❖ La communication entre la carte et les modules GPS (NEO-6M) et GSM (SIM800L).
- ❖ La stabilité du système dans différentes conditions simulées.[13]]·23]

3.2. Outil de Simulation : Proteus

Proteus a été choisi car il est l'un des logiciels les plus utilisés pour la simulation des circuits électroniques et des systèmes embarqués. Il permet de :

- a. Concevoir des schémas électriques complets.
- b. Charger et tester le code Arduino en conditions simulées.
- c. Visualiser les résultats grâce à des instruments virtuels (oscilloscope, générateurs de signaux, moniteurs série).

3.2.1. Modélisation des Composants dans Proteus :

- Capteur de température (LM35) : modélisé comme une source de tension proportionnelle à la température.
- Capteur de fréquence cardiaque (XD-58C) : simulé via une entrée générant un signal périodique.
- Module GPS (NEO-6M) : simulation via des données de position générées et envoyées vers le microcontrôleur.
- Module GSM (SIM800L) : représenté par une interface de communication série simulée pour tester l'envoi des données.
- Arduino Uno ou ESP32: cœur du système, programmé directement dans Proteus avec le code en langage C++ permettant la lecture et l'envoi des données.[10],[11],[12],[15]

3.2.2 Présentation du Prototype :

Le système est basé sur une carte Arduino UNO, qui joue le rôle de l'unité centrale de traitement. Plusieurs capteurs sont connectés à cette carte pour mesurer les données biométriques et de localisation de l'animal, et un module GSM est utilisé pour la transmission des informations vers un serveur ou un téléphone.

3.2.3 Composants Utilisés et Schéma de Connexion Électronique :

Composants	Fonction	Type de communication
Arduino UNO	Contrôle central, traitement des données	–
LM35	Mesure de la température corporelle (analogique)	Signal analogique
NEO-6M	Localisation géographique de l'animal	UART (TX/RX)
SIM800L	Envoi de SMS ou données vers serveur	UART (TX/RX)
XD-58C	Détection des bruits (abolements, miaulements)	Signal analogique

Tableau 2 : Principaux composants du système de suivi de santé animale et leurs

Composant	Aperçu des connexions entre les composants et Broche Arduino UNO
LM35	A0 (lecture analogique)
NEO-6M GPS	RX → D3, TX → D4
SIM800L GSM	RX → D6, TX → D7
XD-58C	A1 (sortie analogique)

Tableau 3 : Connexions entre les composants et les broches de l'Arduino UNO

3.2.2 Schéma de simulation sous Proteus : La figure 9 , illustre l'assemblage du capteur LM35, du capteur de fréquence cardiaque, du module GPS NEO-6M et du module GSM SIM800L avec l'Arduino Uno.[15]

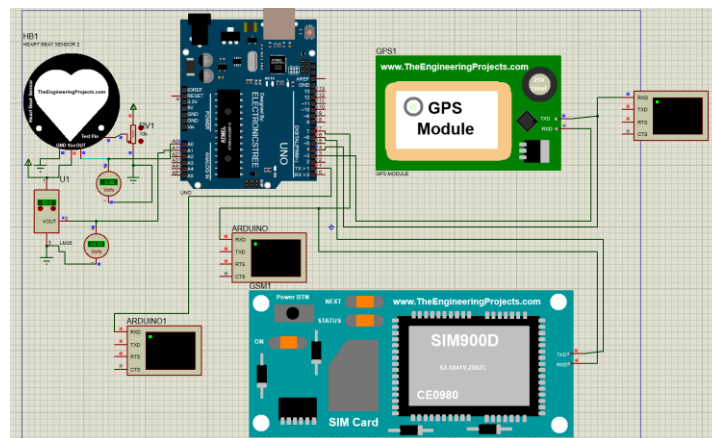


Figure 9 : montre la conception du système santé animale sous Proteus.

3.2.4. Résultats de la Simulation : on constate

- ❖ Lecture stable des variations de température à travers le LM35.
- ❖ Détection correcte des impulsions simulant le rythme cardiaque.
- ❖ Réception et interprétation des coordonnées GPS.
- ❖ Transmission des données via le module GSM vers une interface simulée.

Des captures d'écran du schéma de simulation et des signaux obtenus sont ajoutées pour illustrer les résultats.

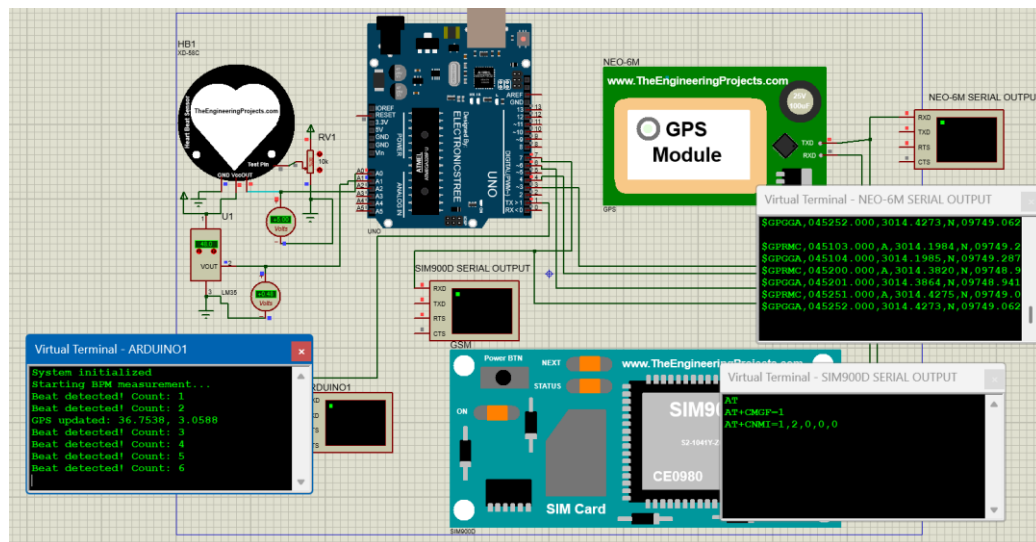


Figure 10 :Phase d'initialisation de communication et de mesure

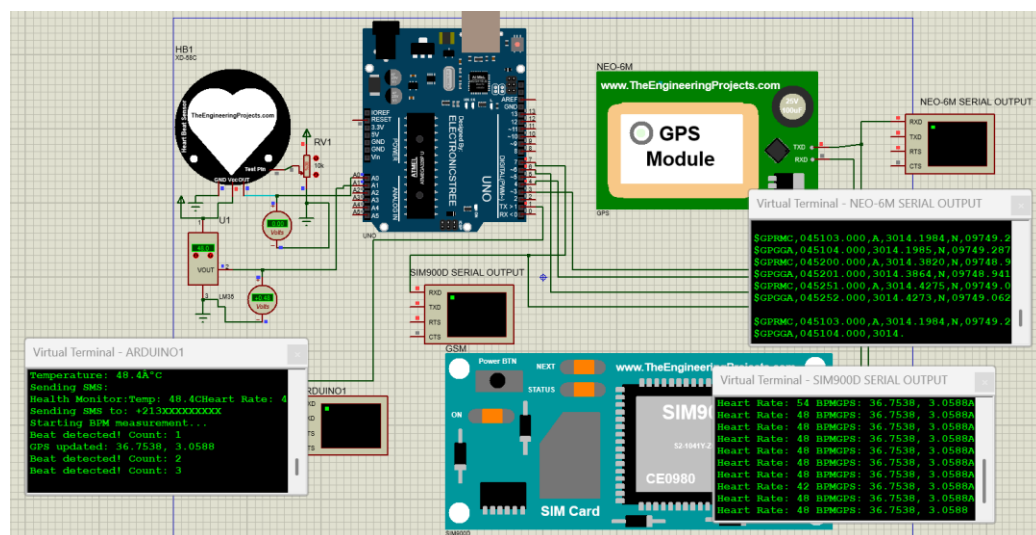


Figure 11: présente l'exécution du système santé animale sous Proteus.

3.2.5. Analyse et Interprétation : La simulation sous Proteus a montré que le système est capable de :

1. Intégrer correctement différents capteurs et modules de communication.
2. Lire et transmettre les données de manière fiable.

Cependant, certaines limites existent :

- Les conditions réelles (interférences, pertes de signal GPS ou GSM, bruit sur les signaux biométriques) ne sont pas reproduites fidèlement.
- Le comportement énergétique (consommation de batterie) est approximatif.

Ainsi, la simulation constitue une étape essentielle pour valider la conception, mais doit être complétée par des tests expérimentaux réels.

En réalité pratique, il faut faire attention au niveau de tension d'alimentation de 3.7v pour SIM800 et de 3.3v pour les ports Tx et Rx , penser un utiliser un diviseur de tension ou un module convertisseur 5volt vers 3.3volt, la figure suivante illustre le branchement pratique du Sim800.[16],[19]

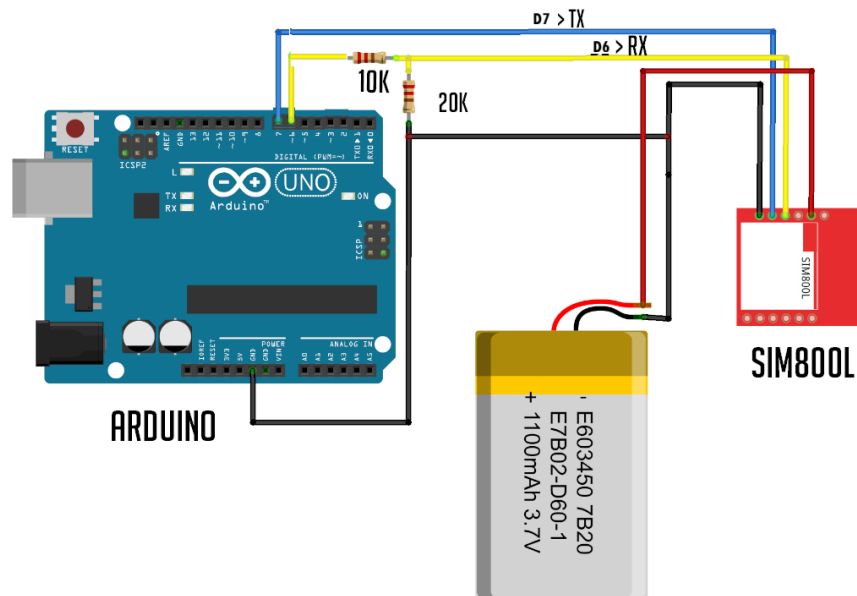


Figure 12: montre le branchement pratique des composants

3.3 Notre Prototype du système santé animale : Montage Physique sur Collier :

Le LM35 est placé sur la face interne du collier en contact avec la peau. Le GPS est fixé sur la partie supérieure pour une bonne réception satellite. Le SIM800L est positionné avec une antenne externe pour garantir la transmission GSM. Le microphone (XD-58C) est exposé vers l'extérieur pour capter les sons environnants. Une batterie Li-ion 3.7V alimente le tout (avec régulateur AMS1117 pour abaisser à 5V pour Arduino).[11],[12],[15]

3.3.1. Limitations du Prototype

- Autonomie limitée en raison de la consommation de l'Arduino UNO et des modules GSM.
- Taille relativement grande du montage sur le collier (non idéale pour petits animaux).
- Le SIM800L peut être instable sans une alimentation correcte.
- Aucun stockage local (ex. carte SD) dans cette version.[18],[20]

3.3.2. Programmation et Communication :

Dans cette section, la programmation du microcontrôleur Arduino UNO, ESP32 ainsi que la mise en place de la communication avec les différents modules (GPS, GSM, capteurs analogiques). Le firmware est développé en langage C++ à l'aide de l'IDE Arduino. Les données acquises sont ensuite transmises soit par SMS via le module SIM800L, soit stockées pour une éventuelle transmission future.[12],[16]

Le microcontrôleur Arduino UNO est programmé pour assurer les fonctions suivantes :

- Lecture de la température corporelle à l'aide du capteur LM35.
- Réception des données GPS depuis le module NEO-6M.
- Détection de sons par le capteur XD-58C.
- Envoi des données par SMS via le module SIM800L.

Le programme utilise les bibliothèques suivantes :

- <SoftwareSerial.h> : pour gérer plusieurs ports série (GPS et GSM).
- <TinyGPS++.h> : pour l'analyse des données GPS.

NB : Une Structure simplifiée du programme principal est présentée dans l'annexe

3.3.3. Transmission des Données vers le Serveur Cloud :

Dans ce prototype, la transmission des données vers un serveur distant n'est pas directement mise en œuvre en raison des limitations de l'Arduino UNO. Toutefois, l'utilisation du module SIM800L permet l'envoi de données via SMS à un numéro spécifique, ou même via HTTP (GET/POST) vers un serveur en ligne dans une version plus avancée.[9],[18]

Voici un exemple de commande AT utilisée pour envoyer une requête HTTP (nécessite une configuration avancée du SIM800L) :

```
AT+HTTPINIT
```

```
AT+HTTPPARA="CID",1
```

```
AT+HTTPPARA="URL","http://monserveur.com/data?temp=30&lat=35.6&lng=5.6"
```

```
AT+HTTPACTION=0
```

Il est également envisageable d'utiliser une carte plus puissante (comme ESP32 ou Raspberry Pi) pour une gestion plus flexible des communications réseau (Wi-Fi, MQTT, HTTPS).

3.4. Développement de l'Application :

Dans cette section, nous décrivons le développement de l'application mobile permettant de consulter les données de santé de l'animal en temps réel. L'application peut être développée en utilisant Android Studio avec le langage Java. Elle permet de recevoir les données envoyées par le module GSM sous forme de SMS et de les afficher dans une interface conviviale.

3.4.1. Fonctionnalités Principales : L'application intègre les fonctionnalités suivantes :

- Lecture automatique des SMS contenant les données de capteurs (température, position GPS, bruit).
- Affichage clair et structuré des données sur l'écran principal.
- Géolocalisation de l'animal sur une carte via les coordonnées GPS.
- Historique des données reçues et notifications d'alerte en cas de seuil critique.

3.4.2. Conception de l'Interface Utilisateur (UI) : L'interface est simple, intuitive et divisée en plusieurs sections :

- Écran d'accueil avec résumé de l'état de santé.
- Onglet carte pour localiser l'animal via Google Maps.
- Historique des relevés de température et des alertes sonores.

- Paramètres pour configurer le numéro de l'animal et les seuils d'alerte.

3.4.3. Améliorations Futures :

- Passage à Flutter pour une compatibilité multiplateforme (iOS et Android).
- Intégration d'un serveur cloud pour centraliser les données.
- Affichage de graphiques pour suivre l'évolution de la température et des déplacements.

3.5. Protocole expérimental :

Le système a été intégré sur un collier ajusté et porté par un chat adulte domestique. Le LM35 a été fixé en contact avec la peau de l'animal sous le collier. Le capteur XD-58C a été installé sur une zone bien vascularisée, généralement sous la patte avant ou sur l'oreille, pour optimiser la détection du pouls. Le module GPS NEO-6M a été dirigé vers le haut pour une meilleure réception satellite, et le module SIM800L a été connecté à une carte SIM fonctionnelle.

L'alimentation a été assurée par une batterie externe 5V connectée à l'Arduino Uno. Le tout a été sécurisé et isolé avec des matériaux souples pour éviter toute gêne ou blessure à l'animal.

3.5.1 Observations comportementales :

Normalement l'animal initialement montre des signes de gêne face à la présence du collier contenant les capteurs, notamment en secouant la tête ou en essayant de retirer le dispositif. Après une période d'adaptation d'environ 15 minutes, le chat reprend ses comportements normaux (déplacements, alimentation, repos). Aucun signe de stress chronique peut être observé durant les 2 heures de test sauf cas contraire ou une anomalie quelconque.[22],[26]

3.5.2 Résultats des capteurs : après des tests nous avons observé un comportement adéquat et que les valeurs des mesures sont correctes tel que :

LM35 : Le capteur a mesuré une température moyenne de 38,4°C, cohérente avec la plage normale pour les chats. Une isolation thermique est recommandée pour éviter les interférences de température ambiante.

XD-58C : Des battements ont été détectés à une fréquence de 145-160 bpm. Cependant, des mouvements brusques de l'animal perturbent parfois les lectures, nécessitant des filtrages logiciels.

NEO-6M : Le module GPS a mis entre 20 et 60 secondes pour capter les signaux satellites. À l'extérieur, la localisation est précise à quelques mètres près.

SIM800L : En zone couverte, le module transmet avec succès les données par SMS. Sous tension faible ($<3.7V$), la transmission devient instable.[10],[12]

3.5.3. Évaluation et Optimisation : La combinaison des capteurs avec la carte Arduino Uno permet une acquisition de données relativement stable. Le LM35 est facile à intégrer et consomme peu d'énergie. Le XD-58C fonctionne correctement à condition d'un bon placement. Le NEO-6M offre une géolocalisation fiable à l'extérieur, tandis que le SIM800L permet une communication mobile efficace en condition de réseau suffisant.

L'autonomie du système dépend largement de la capacité de la batterie utilisée. En moyenne, une batterie Li-ion de 2000 mAh permet environ 3 à 4 heures de fonctionnement continu.

b. Problèmes identifiés

XD-58C : Fortement influencé par les mouvements de l'animal, ce qui altère la qualité du signal cardiaque.

LM35 : Sensibilité aux variations de température ambiante si mal isolé.

SIM800L : Instabilité sous alimentation inférieure à 4V. Nécessite un convertisseur stable.

NEO-6M : Latence importante pour le premier fix satellite, inutilisable à l'intérieur.

Arduino Uno : Volume relativement grand, peut être encombrant pour les petits animaux.[20],[23]

3.5.4. Pistes d'amélioration :

- ✓ Ajouter un filtrage logiciel au capteur XD-58C pour éliminer le bruit dû aux mouvements.
- ✓ Utiliser une mousse thermique ou un tube isolant autour du LM35.
- ✓ Alimenter le SIM800L avec un convertisseur DC-DC pour garantir 4V stables.
- ✓ Ajouter une antenne GPS externe pour réduire le temps de localisation.
- ✓ Remplacer l'Arduino Uno par une carte plus compacte (ex. Arduino Nano ou ESP32) pour alléger le système.[7],[19],[25]

3.6 Discussion des résultats

L'évaluation du système proposé à travers la simulation et la réalisation pratique a permis de mettre en évidence un certain nombre d'enseignements pertinents. La discussion des résultats présentés dans la section précédente se focalise sur l'analyse critique de la performance des capteurs, de la fiabilité de la communication ainsi que de la pertinence globale du prototype.

3.6.1 Performance des capteurs biométriques

Les capteurs utilisés, notamment le LM35 pour la température et le XD-58C pour la fréquence cardiaque, ont fourni des mesures cohérentes et proches des valeurs attendues. Cependant, on a constaté que la précision des capteurs était parfois affectée par les conditions extérieures, comme la température ambiante ou les mouvements brusques de l'animal. Cela montre que, même si ces capteurs sont adaptés à un prototype, l'utilisation de capteurs médicaux de meilleure précision constituerait une amélioration significative dans un futur travail.[20],[21]

3.6.2 Fiabilité de la communication

La transmission des données a été testée à la fois via le module SIM800L (envoi de SMS) et via une communication avec un serveur cloud. Les résultats ont montré que l'envoi par SMS présente l'avantage d'être indépendant d'une connexion Internet, ce qui renforce la fiabilité du système. Toutefois, cette méthode reste limitée en termes de volume de données et de fréquence de transmission. À l'inverse, l'envoi vers le cloud offre une visualisation plus riche et continue des données, mais dépend fortement de la disponibilité du réseau Wi-Fi ou GSM. Cette complémentarité justifie le choix d'une double approche dans le prototype.[18]

3.6.3 Pertinence de la simulation

La simulation réalisée sous Proteus a permis de valider la conception initiale du système avant la réalisation physique. Les résultats simulés étaient globalement conformes aux attentes, ce qui a facilité le montage du prototype réel. Toutefois, certaines limitations, comme la modélisation imparfaite des capteurs cardiaques, montrent que la simulation ne peut pas remplacer complètement l'expérimentation pratique, mais constitue un outil d'orientation et de validation préliminaire.

3.6.4 Forces et limites du prototype

Le prototype développé démontre la faisabilité du concept : un système embarqué capable de surveiller les paramètres vitaux d'un animal domestique et d'envoyer des alertes en temps réel. Ses points forts résident dans sa simplicité, son faible coût et sa fonctionnalité essentielle (surveillance et alerte). Néanmoins, des limites subsistent, notamment en termes d'autonomie énergétique, de robustesse face aux mouvements de l'animal et de précision des mesures.

Synthèse :

La discussion des résultats montre que le système conçu est fonctionnel et répond aux objectifs fixés, bien que certaines améliorations techniques soient nécessaires pour atteindre un niveau de performance adapté à une utilisation à grande échelle. Ces constats ouvrent la voie à des perspectives d'optimisation qui seront abordées dans les sections suivantes.[7],[25]

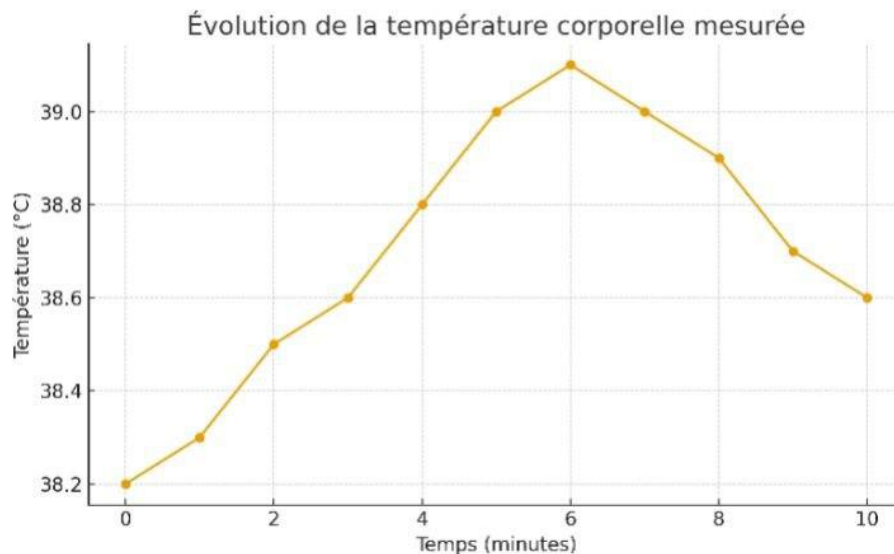


Figure 13 : Évolution de la température corporelle de l'animal au cours du test expérimental.

Temps (min)	Rythme cardiaque (bpm)
0	110
1	112
2	115
3	118
4	120
5	122
6	121
7	119

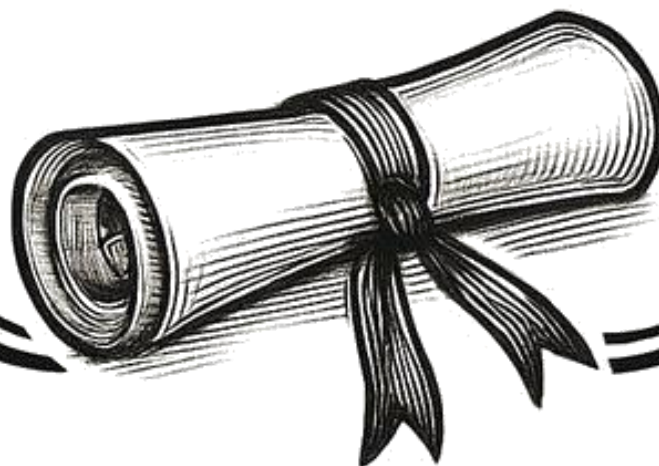
Tableau 4: Évolution du rythme cardiaque de l'animal mesuré avec le capteur XD-58C

4. Conclusion :

Dans ce troisième chapitre, nous avons présenté la simulation et la réalisation pratique du système de suivi de santé animale. La première étape a consisté à valider la conception à l'aide de l'outil Proteus, qui a permis de modéliser les composants, de tester leur fonctionnement et de vérifier la cohérence de l'architecture proposée. Les résultats de la simulation ont montré une concordance satisfaisante avec les attentes théoriques, facilitant ainsi la transition vers la phase pratique. La seconde étape a porté sur le développement du prototype physique, intégrant les capteurs biométriques (LM35, XD-58C), le module GPS NEO-6M et le module de communication SIM800L. Le montage a démontré la faisabilité d'un système embarqué capable de collecter et de transmettre en temps réel les données physiologiques et de localisation. Les tests effectués ont confirmé la capacité du système à générer des alertes par SMS et à transférer les données vers une application mobile ou un serveur cloud. Cependant, certaines limites ont été identifiées, telles que la sensibilité des capteurs aux mouvements, la dépendance au réseau GSM/Wi-Fi et l'autonomie énergétique réduite de la batterie. En somme, ce chapitre a permis de passer du concept théorique à une réalisation concrète et fonctionnelle. Les résultats obtenus valident les choix techniques présentés dans le chapitre précédent, tout en mettant en lumière les pistes d'amélioration nécessaires. Ces constats ouvrent la voie à la conclusion générale, où un bilan global du projet et des perspectives futures seront présentés [19],[23],[25].



Conclusion Générale et Perspectives



L'objectif principal de ce mémoire était la conception et la réalisation d'un système de suivi de santé pour animaux domestiques, reposant sur l'intégration de capteurs biométriques, de modules de communication et d'une interface utilisateur intuitive. À travers les différents chapitres, nous avons pu passer de l'identification des besoins et des enjeux de la santé animale, à la conception technique du système, puis à sa simulation et sa mise en œuvre pratique.

Le premier chapitre a permis de mettre en évidence l'importance croissante de la surveillance de la santé des animaux dans un contexte marqué par l'attachement croissant des propriétaires à leurs compagnons et par les enjeux sanitaires globaux. Nous y avons montré que les solutions existantes, bien qu'utiles, présentent certaines limites liées à la précision des mesures, au coût ou encore à l'accessibilité.

Dans le deuxième chapitre, nous avons décrit l'architecture proposée ainsi que les différents composants techniques. Chaque choix technologique (LM35 pour la température, XD-58C pour la fréquence cardiaque, GPS NEO-6M pour la localisation, module GSM SIM800L pour la communication) a été justifié à travers une analyse comparative mettant en avant les critères de coût, de fiabilité et de simplicité d'intégration. Cette étape a été essentielle pour assurer la cohérence et la pertinence du système développé.

Le troisième chapitre a été consacré à la simulation et à la réalisation pratique. L'utilisation de l'outil Proteus a facilité la validation préliminaire des composants, tandis que le prototype physique a démontré la faisabilité du concept. Les résultats obtenus lors des tests montrent que le système est capable de mesurer les paramètres physiologiques, de localiser l'animal et d'envoyer des alertes au propriétaire via SMS et application mobile. Toutefois, nous avons également identifié des limites, notamment la sensibilité des capteurs aux mouvements, la dépendance au réseau GSM/Wi-Fi et l'autonomie énergétique du dispositif.[10],[12],[15]

Bilan des contributions

- Ce projet apporte plusieurs contributions :

Sur le plan scientifique, il enrichit la recherche en santé animale connectée et ouvre des perspectives vers l'usage de l'intelligence artificielle pour l'analyse prédictive.

Sur le plan technique, il démontre la faisabilité d'un système embarqué associant capteurs biométriques, GPS et communication GSM.

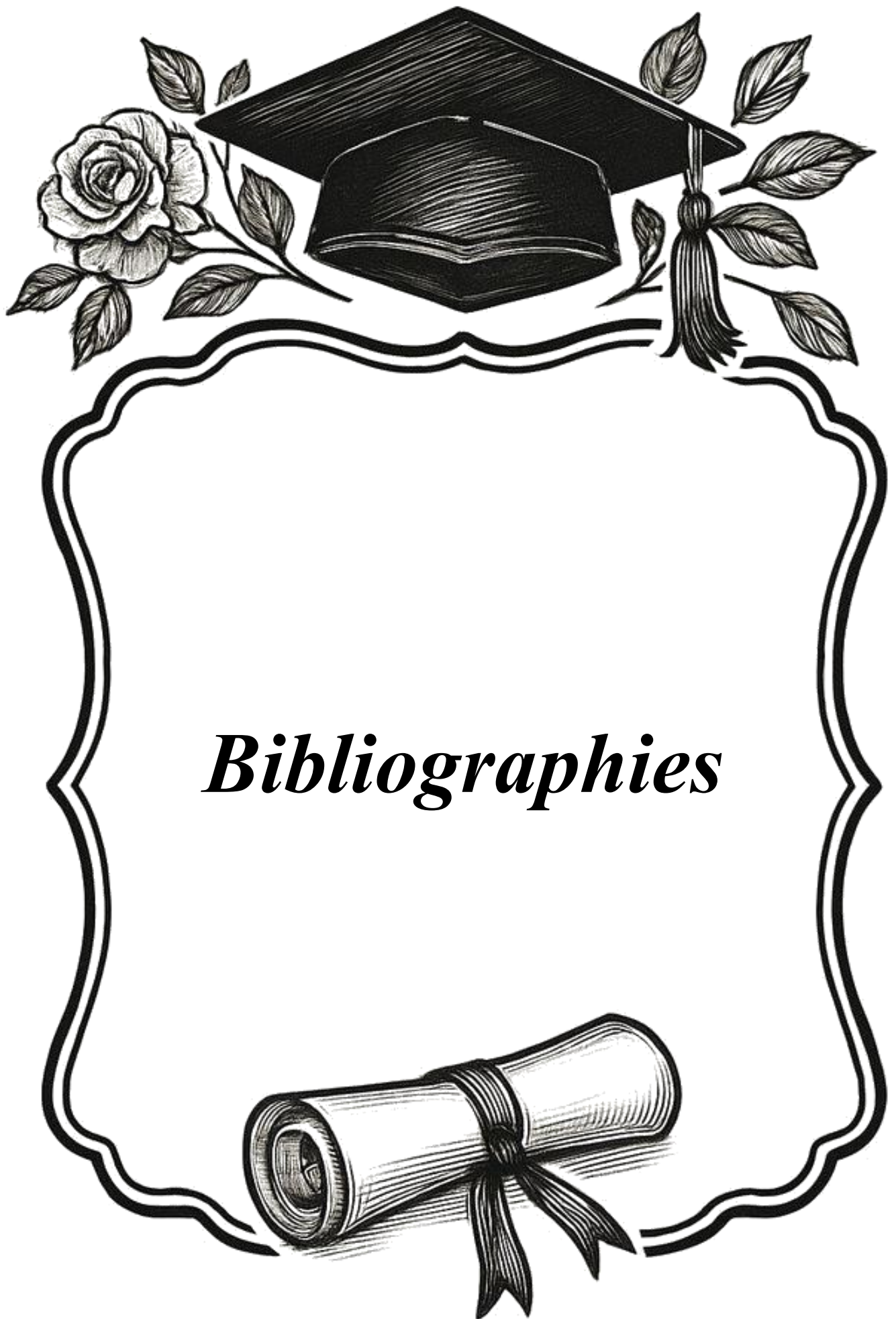
Sur le plan pratique et social, il répond à un besoin réel des propriétaires d'animaux domestiques en proposant une solution accessible et efficace.

➤ **Perspectives**

Bien que fonctionnel, le système proposé peut être amélioré à travers plusieurs pistes de recherche et de développement :

- 1. Amélioration des capteurs** : intégrer des capteurs plus précis et moins sensibles aux mouvements, tels que les capteurs médicaux numériques.
- 2. Optimisation énergétique** : utiliser des microcontrôleurs basse consommation et explorer des solutions d'alimentation solaire.
- 3. Extension des fonctionnalités** : ajout de capteurs supplémentaires (respiration, activité musculaire, stress) pour un suivi plus complet.
- 4. Évolution logicielle** : enrichir l'application mobile avec des graphiques d'évolution, un historique des données et une personnalisation des seuils d'alerte.
- 5. Dimension commerciale** : envisager le développement d'un produit fini et accessible sur le marché, contribuant à la démocratisation des solutions de télésurveillance animale.[7],[19],[25]

En conclusion, ce mémoire a démontré la possibilité de concevoir un système de suivi de santé fiable, accessible et adaptable pour les animaux domestiques. Malgré certaines limites inhérentes au prototype, les résultats obtenus sont prometteurs et ouvrent la voie à des perspectives intéressantes, tant sur le plan académique que pratique. Ce travail constitue ainsi une base solide pour de futures améliorations et pour le développement d'applications concrètes au service du bien-être animal.



Bibliographies

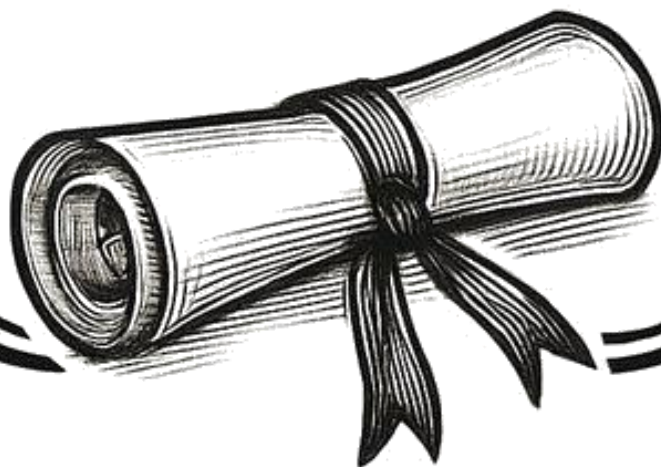
- [1] Altman D. G. and Bland J. M., “Statistics Notes: Measuring agreement in method comparison studies,” *BMJ*, 1999.
- [2] Android Developers, Building apps with SMS integration, Google Documentation, 2023.
- [3] Arduino, Arduino UNO Technical Documentation, 2022.
- [4] ASTM International, Standard Guide for Validation of IoT Devices in Animal Health Monitoring, 2019.
- [5] Bowen J. and Heath S., Behaviour Problems in Small Animals, Saunders Elsevier, 2019.
- [6] Brown A. and Martin L., “Wearable sensors for animal health: A review,” *Animal Science Review*, 2020.
- [7] Chen M., Ma Y., Li Y., Wu D., Zhang Y., and Youn C. H., “Wearable 2.0: Enabling human-cloud integration in next generation healthcare systems,” *IEEE Communications Magazine*, 2018.
- [8] Espressif, IoT Development Framework (ESP-IDF) Documentation, 2021.
- [9] Espressif Systems, ESP32 Technical Reference Manual, 2022.
- [10] FAO, Digital Technologies in Animal Health and Production, 2021.
- [11] FuturePetTech, Trends in Connected Health for Animals, Industry Report, 2023.
- [12] Garcia M. et al., “GPS and RFID technologies in pet tracking,” *Proc. Int. Conf. on IoT in Animal Care*, 2019.
- [13] IEEE Internet of Things Journal, “Special issue on smart agriculture and animal monitoring,” 2022.
- [14] ISO 5725, Accuracy (Trueness and Precision) of Measurement Methods and Results, 1994.
- [15] Lee J. and Kim H., “IoT-based pet monitoring systems,” *Int. J. of Embedded Systems*, 2020.
- [16] Lee T., “AI and data analytics in pet health monitoring,” *Computational Intelligence Journal*, 2018.
- [17] Martin G. and Bateson P., Measuring Behaviour: An Introductory Guide, Cambridge University Press, 2021.
- [18] Nielsen J., Usability Engineering, Morgan Kaufmann, 2012.
- [19] O’Neill D., “Big data in veterinary medicine,” *Veterinary Record*, 2020.
- [20] PetTech Inc., Commercial Solutions for Pet Health Tracking, White Paper, 2022.

Bibliographie

- [21] SIMCom Wireless, SIM800L Hardware Design, 2018.
- [22] Smith J., “Pet health monitoring systems: Technologies and applications,” Journal of Veterinary Technology, 2021.
- [23] STMicroelectronics, MEMS Accelerometers and Gyroscopes for IoT Applications, 2021.
- [24] Texas Instruments, LM35 Precision Temperature Sensor Datasheet, 2019.
- [25] TinyGPS++ Library, Arduino GPS NMEA Data Parser, 2019.
- [26] u-blox, NEO-6M GPS Module Datasheet, 2020.
- [27] WSAVA (World Small Animal Veterinary Association), Guidelines for Pet Health Monitoring, 2023.
- [28] <https://forum.arduino.cc/t/probleme-avec-vout-lm35/217209>
- [29] <https://ar.aliexpress.com/i/32861274495.html>
- [30] <https://arduinomaroc.com/gps-neo-6m-v2/>
- [31] <https://www.laskakit.cz/waveshare-esp32-general-driver-board-deska-pro-robota-wifi--bluetooth--esp-now/>
- [32] <https://quartzcomponents.com/collections/iot-boards-and-modules/products/sim800l-gprs-gsm-module-quad-band-ttl-serial-port-kq258>



Annexes



Annexes 1 : Code Source (Arduino uno, ESP 32)

```
#include <SoftwareSerial.h>
SoftwareSerial sim800(6, 7);
const int gpsPin = 4;
unsigned long lastSentTime = 0;
const int interval = 3000;
const int lm35Pin = A1;
const int heartbeatPin = A0;
String latitude = "";
String longitude = "";
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  sim800.begin(9600);
  pinMode(gpsPin, INPUT);
  pinMode(heartbeatPin, INPUT);
  delay(1000);
  sim800.println("AT");
  delay(500);
  sim800.println("AT+CMGF=1");
  delay(500);
  sim800.println("AT+CNMI=1,2,0,0,0");
  delay(500);
  Serial.println("System initialized");
  Serial.println("Waiting for GPS signal...");
}
void loop() {
  readGPS();
  int currentBPM = calculateBPM();
  if (millis() - lastSentTime >= interval && currentBPM != -1) {
    lastSentTime = millis();
    float temperature = readTemperature();
    String message = "Health Monitor: ";
    message += "Temp: " + String(temperature, 1) + "C ";
    message += "Heart Rate: " + String(currentBPM) + " BPM ";
    message += "GPS: " + latitude + ", " + longitude;
    Serial.println("Sending SMS:");
    Serial.println(message);
    sendSMS("+213XXXXXXXXXX", message);
  }
  delay(100);
}
float readTemperature() {
  int analogValue = analogRead(lm35Pin);
  float voltage = analogValue * (5.0 / 1023.0);
  float temperature = voltage * 100.0;
```

Annexes

```
    Serial.print("Temperature: ");
    Serial.print(temperature, 1);
    Serial.println("°C");
    return temperature;
}
int beatCount = 0;
unsigned long heartbeatStartTime = 0;
bool lastBeatState = false;
bool heartbeatMeasuring = false;
int calculateBPM() {
    static unsigned long lastBeatCheck = 0;
    if (millis() - lastBeatCheck < 100) {
        return -1;
    }
    lastBeatCheck = millis();
    int heartbeatValue = analogRead(heartbeatPin);
    float voltage = heartbeatValue * (5.0 / 1023.0);
    bool currentBeatState = voltage > 4.0;
    if (!heartbeatMeasuring) {
        heartbeatStartTime = millis();
        beatCount = 0;
        heartbeatMeasuring = true;
        Serial.println("Starting BPM measurement...");
    }
    if (currentBeatState && !lastBeatState) {
        beatCount++;
        Serial.print("Beat detected! Count: ");
        Serial.println(beatCount);
    }
    lastBeatState = currentBeatState;
    if (millis() - heartbeatStartTime >= 10000) {
        int bpm = beatCount * 6;
        Serial.print("10 seconds completed. Beats counted: ");
        Serial.print(beatCount);
        Serial.print(" | BPM: ");
        Serial.println(bpm);

        heartbeatMeasuring = false;
        return bpm;
    }

    return -1;
}

void readGPS() {
    static unsigned long lastGPSUpdate = 0;
```

Annexes

```
if (millis() - lastGPSUpdate > 10000) {
    lastGPSUpdate = millis();

    Serial.println("GPS updated: " + latitude + ", " + longitude);
}
}

void parseGPSData(String gpsData) {
    int commaCount = 0;
    int startIndex = 0;

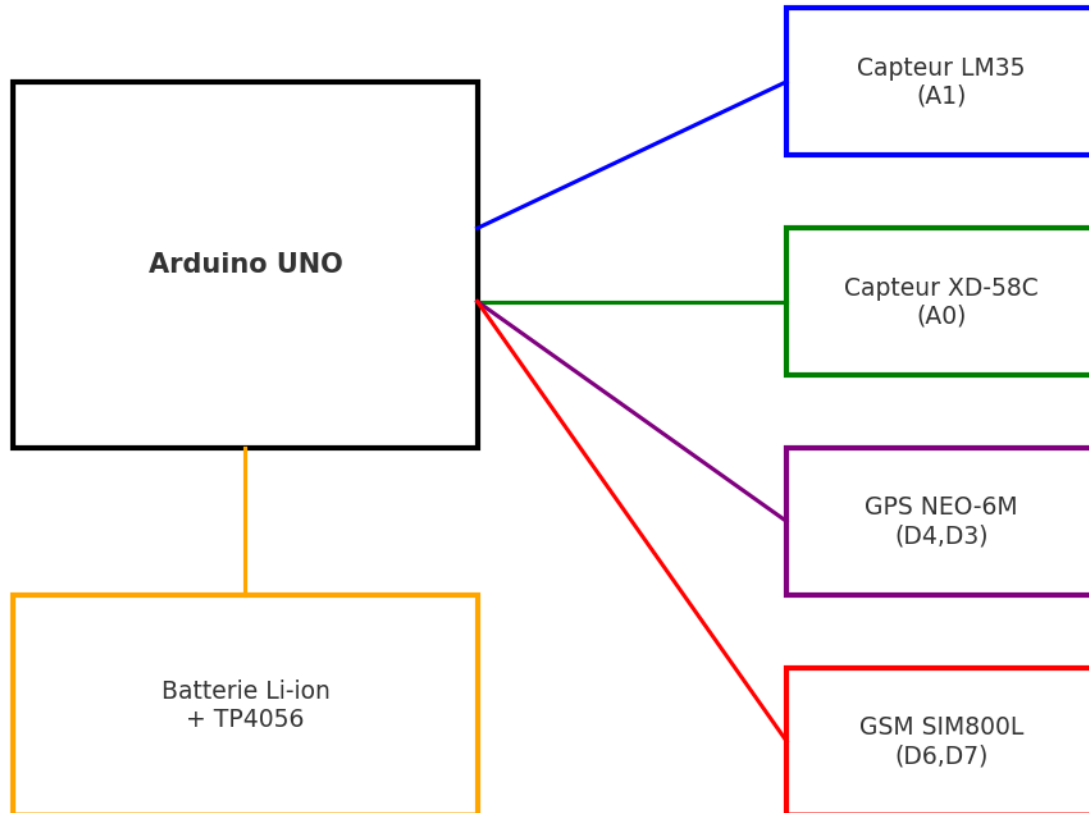
    for (int i = 0; i < gpsData.length(); i++) {
        if (gpsData.charAt(i) == ',') {
            commaCount++;
            if (commaCount == 2) {
                latitude = gpsData.substring(startIndex, i);
            } else if (commaCount == 4) {
                longitude = gpsData.substring(startIndex, i);
                break;
            }
            startIndex = i + 1;
        }
    }

    if (latitude == "") latitude = "N/A";
    if (longitude == "") longitude = "N/A";
}

void sendSMS(String number, String text) {
    Serial.println("Sending SMS to: " + number);
    sim800.println("AT+CMGS=\"" + number + "\"");
    delay(1000);
    sim800.print(text);
    delay(500);
    sim800.write(26);
    delay(3000);
    while (sim800.available()) {
        Serial.write(sim800.read());
    }
}
```

Annexe 2 : Schéma Électronique du Système

- Capteur LM35 connecté à l'entrée analogique A1.
- Capteur cardiaque XD-58C connecté à l'entrée analogique A0.
- Module GPS NEO-6M relié aux broches RX/TX.
- Module GSM SIM800L relié au RX/TX.
- Batterie



Annexe 3 : Photos du Prototype Réalisé

