

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب

Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib

Faculté des Sciences et de Technologies.

Département d'Electronique et des Télécommunications.



Projet de Fin d'Etudes

Dans le cadre de l'arrêté ministériel 008 modifiant et complétant l'arrêté ministériel 1275

« Un diplôme, une startup / micro entreprise ou brevet d'invention »

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Télécommunication

Spécialité : Réseaux et Télécommunications

BoviTrax : Conception d'un collier intelligent pour la détection préventive des maladies chez les bovins laitiers.

Présenté Par :

1/ Melle HADDOU Kaoutar Roumaisaa.

Devant le jury composé de :

Dr. BEMMOUSSAT Chems Eddine	MCA	Université de Aïn Témouchent	Encadrant
Dr. SEKKAL Mansouria	MCA	Université de Aïn Témouchent	Présidente du jury
Dr. BENOSMANE Mohammed Mourad	MCB	Université de Aïn Témouchent	Examinateur
Mme. GHERBI Sabah	MCA	Université de Aïn Témouchent	Représentante de l'incubateur
Mme. FATMI Sihem	Cheffe d'annexe	Maison de l'Environnement, Wilaya de Aïn Témouchent	Partenaire socio-économique

Année Universitaire 2024/2025

Le 24 avril 2025, le projet BoviTrax a été labellisé par le Ministère des Startups, de l'Économie de la Connaissance et des Micro-entreprises, soulignant une avancée significative dans sa reconnaissance à l'échelle nationale. Cette certification souligne le caractère innovant de la solution suggérée, ainsi que sa capacité à satisfaire les exigences du domaine agricole grâce à l'incorporation de technologies intelligentes. Elle pave aussi la route pour des possibilités de financement, de soutien et de mise en réseau au sein de l'écosystème des startups algériennes.



Remerciements

*Avant toute chose, je rends grâce à **ALLAH** le Très-Haut qui m'a accordé la possibilité de poursuivre mes études et m'a doté de détermination, de force et de patience pour mener à bien ce travail.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers **M. BEMMOUSSAT Chems Eddine**. Sa bienveillance, son sérieux et son sens du devoir ont constitué pour moi une motivation précieuse. Malgré un emploi du temps chargé, il n'a jamais failli à son devoir et a toujours été là pour moi, prêt à écouter depuis le début de ma collaboration.*

*Enfin, je souhaite exprimer ma gratitude infinie envers **ma mère, ma sœur de cœur, toute ma famille** ainsi que **mes amies**. Leur appui sans faille a été déterminant pour l'achèvement de cette tâche.*

*Nous tenons également à remercier infiniment les membres du jury : la présidente **Dr. SEKKAL Mansouria**, l'examineur **Dr. BENOSMANE Mohammed Mourad**, la représentante de l'incubateur **Mme GHERBI Sabah**, ainsi que la partenaire socio-économique **Mme FATMI Sihem**. Veuillez accepter, à travers ce travail, notre sincère respect et notre profonde reconnaissance.*

*Je remercie chaleureusement le Professeur **Dr. Bouziani**, de l'École d'Agriculture d'Aïn Témouchent, pour les précieuses informations et l'éclairage scientifique qu'il m'a apportés tout au long de mon projet.*

Je tiens également à remercier tous ceux qui, de manière directe ou indirecte, ont participé à ce projet.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

*Après avoir rendu grâce à **ALLAH** le tout Puissant et le Miséricordieux.*

*Je consacre également cette recherche à mon enseignant, le **Dr.***

***BEMMOUSSAT Chems Eddine**, pour son guidance et son soutien.*

*À la plus belle perle du monde **ma** tendre **mère**, et à celle que je vois comme
une sœur, **Nassima**.*

*Je voudrais aussi exprimer ma profonde gratitude à mes deux oncles, **Khalil** et
Mohamed, que je considère comme de véritables frères. Leur présence, leurs
conseils et leur soutien de valeur m'ont accompagné tout au long de mon
parcours.*

*À **ma grand-mère** et à **mon grand-père**, pour leur amour inconditionnel et leur
présence réconfortante qui m'ont toujours donné la force d'avancer.*

*À toute **ma famille** pour l'affection et l'estime qu'ils m'ont constamment
témoigné.*

*Je n'oublie pas mes deux précieuses amies, **Amina** et **Narimane**, qui ont su me
donner du réconfort, de l'énergie et des sourires durant toute cette expérience.*

Leur véritable amitié m'a grandement soutenu.

*À toute personne qui m'a aidé à franchir un horizon dans ma vie. À tous ceux
que j'ai oubliés de citer mais qui restent à jamais gravés dans mon cœur .*

Merci infiniment.

Liste des abréviations

ABS	Acrylonitrile Butadiène Styène
BVD	Bovine Viral Diarrhea (Diarrhée virale bovine)
CSS	Cascading Style Sheets (Feuilles de style en cascade)
ESP32	Espressif Systems Protocol 32-bit
GPIO	General Purpose Input/Output (Entrée/Sortie à usage général)
I2C	Inter-Integrated Circuit (Protocole de communication série synchrone)
IBR	Infectious Bovine Rhinotracheitis (Rhinotrachéite infectieuse bovine)
IDE	Integrated Development Environment (Environnement de développement intégré)
IoT	Internet of Things (Internet des objets)
LoRa	Long Range (Communication sans fil longue portée)
MLX90614	Melexis 90614 (Capteur infrarouge de température sans contact)
MPU6050	Motion Processing Unit 6050 (Capteur gyroscope + accéléromètre)
PCB	Printed Circuit Board (Carte de circuit imprimé)
PLA	Polylactic Acid (Acide polylactique – matériau pour impression 3D)
PWM	Pulse Width Modulation (Modulation de largeur d'impulsion)
SCL	Serial Clock Line (Ligne d'horloge série – I2C)
SDA	Serial Data Line (Ligne de données série – I2C)
SoC	System on Chip (Système sur puce)
SPI	Serial Peripheral Interface
SX1276	Module radio LoRa longue portée
TP4056	Module de charge pour batteries lithium-ion via USB

Résumé

La généralisation de l'élevage laitier constitue, un vecteur important du développement économique agricole, mais il se heurte aussi à de nombreux enjeux sanitaires qui pèsent sur la rentabilité des unités de production et le bien-être des animaux. En particulier, certaines pathologies, qui ne sont pas détectées en amont, peuvent entraîner une forte baisse de la production de lait, des frais vétérinaires importants et même des pertes financières conséquentes. Dans ce contexte, le projet de recherche présenté propose la mise en œuvre d'un système intégré qui serait capable de contrôler en temps réel, à distance, certains indicateurs physiologiques et comportementaux des vaches. Le dispositif dispose de capteurs biométriques conduisant à un processeur de commande central, formatant les données afin de détecter les anomalies et repérer rapidement les symptômes associés à différentes pathologies. Une interface digitale donne aux éleveurs accès à distance à l'information ainsi que des notifications automatiques lors de la détection d'une anomalie.

Les tests expérimentaux conduits ont démontré l'intérêt d'une telle approche pour une surveillance continue, fiable et non intrusive, mais ils ont aussi porté à jour les contraintes environnementales et de dépense d'énergie, de précision des mesures et d'autonomie de l'appareil.

ملخص

يعتبر مجال تربية الأبقار الحلوب ركيزة هامة في الاقتصاد الزراعي، إلا أنه يواجه مجموعة من الصعوبات الصحية التي تنعكس على إنتاجية المزارع وسلامة الحيوانات. إذا لم يتم الاكتشاف المبكر، قد تؤدي بعض الأمراض إلى انخفاض كبير في إنتاج الحليب، وارتفاع التكاليف البيطرية، وفقدانات اقتصادية ضخمة. في هذا السياق، يطرح هذا البحث نظامًا متكاملًا لمراقبة بعض المؤشرات الفيزيولوجية والسلوكية للأبقار بشكل فعلي وفي الوقت الفعلي. يعتمد النظام على حساسات حيوية متصلة بوحدة معالجة مركزية، حيث تقوم هذه الوحدة بتحليل التغيرات غير الطبيعية بهدف الكشف المبكر عن أعراض الأمراض. تقدم الواجهة الرقمية للمربي إمكانية متابعة البيانات عن بعد، مع استلام إشعارات تلقائية عند اكتشاف أي خطأ. أثبتت النتائج المستخلصة من التجارب كفاءة النظام في المراقبة المستمرة غير التداخلية، ولكن تم الإشارة إلى بعض القيود المرتبطة ببيئة التشغيل، دقة القياسات وكفاءة استهلاك الطاقة.

Abstract

Although dairy farming is essential to the agricultural economy, it is extremely susceptible to a number of health problems that affect both animal welfare and farm profitability.

Certain diseases can cause a dramatic decrease in milk output, substantial financial losses, and considerable veterinary costs if they are not identified in a timely manner. This study offers the creation of an embedded system intended to continuously monitor the behavioral and physiological characteristics of dairy calves as a solution to this problem. In order to recognize early symptoms of common cattle diseases and detect aberrant deviations, the system uses biometric sensors that are connected to a central processing unit. Farmers can remotely view the data using a digital interface, and when abnormalities are found, they can automatically receive notifications. The system's applicability for ongoing, non-invasive monitoring is illustrated by the experimental results, which also point out its drawbacks in terms of sensor accuracy, ambient conditions, and energy efficiency.

Sommaire

Remerciements.....	I
Dédicace.....	II
Liste des abréviations.....	III
Résumé.....	IV
ملخص.....	IV
Abstract.....	V
Sommaire.....	VI
Liste des figures.....	IX
Liste des tableaux.....	XI
Introduction générale.....	XIII
Chapitre I : Problématique des Maladies Bovine.....	2
I.1 Introduction.....	2
I.2 Contexte général de l'élevage bovin laitier.....	2
I.2.1 Importance de la production laitière dans l'agriculture.....	2
I.2.2 Enjeux économiques et sanitaires liés aux maladies des bovins.....	3
I.2.2.1 Les enjeux économiques :.....	3
I.2.2.2 Les enjeux sanitaires :.....	4
I.2.3 Nécessité d'une surveillance intelligente.....	4
I.3 Maladies affectant les bovins laitiers.....	5
I.3.1 Classification des maladies (bactériennes, virales, métaboliques, environnementales).....	5
I.3.1.1 Les maladies virales.....	5
I.3.1.2 Les maladies bactériennes.....	5
I.3.1.3 Les maladies métaboliques.....	5
I.3.1.4 Les maladies liées à l'environnement.....	5
I.3.2 Impact des maladies sur la production laitière et la rentabilité des élevages.....	6
I.3.3 Maladies les plus courantes :.....	7
I.3.3.1 Brucellose.....	7
I.3.3.2 Fièvre aphteuse.....	7
I.3.3.3 Mammite.....	8
I.3.3.4 Stress thermique (influence environnementale).....	10

I.3.3.5	fièvre de lait (Hypocalcémie clinique)	11
I.3.3.6	Cétose et troubles métaboliques	11
I.4	Surveillance et diagnostic des maladies	12
I.4.1	Méthodes traditionnelles de diagnostic et leurs limites	12
I.4.1.1	Surveiller avec les yeux et le cœur	12
I.4.1.2	Comprendre après la mort	12
I.4.1.3	Des méthodes simples, parfois improvisées	12
I.4.2	Importance des paramètres physiologiques dans la détection précoce	13
I.4.2.1	Température corporelle	13
I.4.2.2	Analyse des mouvements et comportement anormal	14
I.4.3	Besoin d'une solution automatisée et intelligente	14
I.5	Conclusion	15
Chapitre II	: Conception et Développement de BoviTrax.	16
II.1	Introduction	17
II.2	Présentation du projet BoviTrax	17
II.3	Étude des technologies utilisées	18
II.3.1	Capteurs embarqués	18
II.3.1.1	Capteur de température MLX90614	18
II.3.1.2	Accéléromètre MPU6050	18
II.3.2	Architecture matérielle et électronique	19
II.3.2.1	Microcontrôleur ESP32	19
II.3.2.2	Interface de communication (Wi-Fi, Bluetooth)	20
II.3.2.3	Schémas de câblage et assemblage des composants	20
II.3.3	Méthodes d'alimentation du système BoviTrax	22
II.3.4	Développement logiciel et interface utilisateur	23
II.3.4.1	Programmation du microcontrôleur (Arduino IDE)	23
II.3.5	Intégration et tests	24
II.3.5.1	Tests en laboratoire (précision des capteurs, consommation d'énergie)	24
II.3.6	Algorithme de détection des anomalies (température et mouvements)	27
II.3.6.1	Développement d'une application mobile / interface Web (Blynk)	27
II.4	Conception du système BoviTrax	28
II.4.1	Architecture globale	28
II.4.1.1	Schéma fonctionnel du dispositif	28

II.4.1.2 Gestion des données et envoi d’alertes	28
II.4.2 Algorithme de détection des maladies	28
II.4.2.1 Définition des seuils critiques	28
II.4.2.2 Analyse des données en temps réel	29
II.4.2.3 Envoi d’alertes automatiques aux éleveurs	30
II.4.2.4 Validation sur un échantillon de bovins	31
II.4.2.5 Comparaison avec les diagnostics vétérinaires	32
II.5 Limitations, défis et solutions	32
II.5.1.1 Calibration et précision des capteurs	32
II.5.1.2 Robustesse du collier et résistance aux conditions réelles	32
II.5.1.3 Optimisation de l’autonomie énergétique	33
II.5.1.4 Amélioration de la fiabilité des alertes	33
II.6 Homologation du dispositif BoviTrax	33
II.7 Conclusion	33
Conclusion générale.....	34
Annexe 1	36
Annexe 2	48
Bibliographie	53
Webographie	55

Liste des figures

Figure I.1: Part du lait dans la production agricole totale - situation en 2010 selon les pays [3].....	3
Figure I.2 : Variation de la production laitière selon le stade de lactation [5].....	6
Figure I.3 : Impact de la canicule sur la production laitière moyenne et le taux cellulaire en 2019 [6].....	6
Figure I.4 : Conséquences en chaîne du stress thermique chez les bovins laitiers. [7]	7
Figure I.5 : Signes cliniques de la fièvre aphteuse chez les bovins	8
Figure I.6 : Voies de contamination bactérienne des mamelles chez la vache laitière, pendant et en dehors de la traite.[11]	9
Figure I.8 : Schéma synthétique des effets physiopathologiques du stress thermique chez la vache laitière.[14]	10
Figure I.9 : Vache en décubitus latéral due à une hypocalcémie clinique (fièvre de lait) [16].....	11
Figure I.10 : Évolution des besoins énergétiques et des apports nutritionnels autour du vêlage : un facteur clé dans la genèse de la cétose chez les vaches laitières.[18]	12
Figure I.11: Principaux impacts des fortes chaleurs sur la santé et la performance des bovins [24].....	13
Figure II.1 : Collier BoviTrax fixé au cou du bovin avec vue détaillée de son architecture interne : capteurs, microcontrôleur et module d'alimentation intégrés.	17
Figure II.2: Capteur de température infrarouge MLX90614.[28]	18
Figure II.3: Accéléromètre 3 axes. [30]	19
Figure II.4 : Accéléromètre MPU6050. [30].....	19
Figure II.5 : configuration des broches ESP32. [31]	19
Figure II.6 : Connexion du capteur MPU6050 à l'ESP32 via interface I2C.[32].....	21
Figure II.7 : Connexion du capteur MLX90614 à l'ESP32 via interface I2C.[32]	21
Figure II.8 : Connexion des capteurs "MLX90614" et "MPU6050" à l'ESP32. [32]	22
Figure II.9 : Schéma de câblage du module TP4056 pour la recharge et l'alimentation d'une batterie lithium-ion 18650. [33].....	23
Figure II.10 : Interface principale de l'IDE Arduino. [34]	24
Figure II.11 : Résultat de MPU6050 sur logiciel Arduino IDE , affichage sur le Serial plotter	26

Figure II.12 : Résultat de MPU6050 sur logiciel Arduino IDE , affichage sur le Serial monitor	25
Figure II.13 : Lecture des températures ambiante et corporelle à l'aide du capteur infrarouge MLX90614 via l'interface série.	26
Figure II.14 : L'interface principale de Blynk. [36]	28
Figure II.15 : Le schéma fonctionnel du dispositif	28
Figure II.16 : Visualisation en temps réel des données physiologiques via l'interface Blynk : température corporelle et activité motrice	30
Figure II.17 : Tests de détection intelligente des pathologies bovines à partir des données physiologiques collectées et transmises par l'ESP32.	31
Figure II.18: Installation du dispositif BoviTrax autour du cou du bovin lors des tests expérimentaux.....	32

Liste des tableaux

Tableau I.1: Tableau synthétique des affections courantes chez les vaches laitières, avec estimation du coût de leur soin en Algérie.	3
Tableau I.2 : Classification des agents pathogènes responsables de la mammite bovine selon leur mode de transmission et leurs effets cliniques. [12].....	9
Tableau II.1 : Représentation des caractéristiques de MLX90614. [29].....	18
Tableau II.2 : Représentation des caractéristiques de MPU6050.....	19
Tableau II.3 :Comparaison des technologies de communication sans fil adaptées à BoviTrax.....	20
Tableau II.4 : Connexions des capteurs dans le système BoviTrax	21
Tableau II.5 : Résumé des tests en laboratoire des composants du système BoviTrax. ..	24
Tableau II.6 : Seuils physiologiques et comportementaux utilisés pour la détection des maladies bovines.....	29

Introduction générale

L'élevage de vaches laitières est une composante clé de l'agriculture en Algérie, tant pour sa fonction dans la satisfaction des exigences diététiques que pour son influence socio-économique dans les régions rurales. C'est une source de revenus significative pour les agriculteurs, même si le lait reste difficilement accessible à cause de son coût. Face à la demande grandissante de productivité et de qualité, la santé animale se présente comme un facteur essentiel pour la performance et la durabilité.

Les exploitations font face en permanence à la menace que représentent les maladies bovines, qu'elles soient de nature infectieuse (virales ou bactériennes) ou métabolique. Ces facteurs entraînent une diminution de la production de lait, des frais vétérinaires significatifs, une détérioration de la qualité du lait et, dans certains cas, la perte d'animaux. Ces pertes ont un impact direct sur la rentabilité de l'élevage et mettent en évidence la nécessité d'une identification rapide et efficace des problèmes de santé.

Dans ce cadre, les progrès technologiques ouvrent de nouvelles possibilités pour le suivi du bétail. Aujourd'hui, les systèmes de détection anticipée, qui s'appuient sur des capteurs et des données comportementales ou physiologiques, rendent possible la prévision des maladies avant l'émergence de symptômes cliniques perceptibles. Ces instruments simplifient le processus décisionnel de l'éleveur tout en diminuant considérablement les dangers sanitaires et financiers.

Le projet BoviTrax s'aligne sur cette tendance à l'innovation. Il offre un dispositif de monitoring astucieux, discret et non invasif, qui se sert de capteurs pour évaluer en direct la température et le comportement des vaches. En association avec des algorithmes d'analyse de données, cet outil est capable de repérer les premiers signes de maladie et d'informer l'éleveur, permettant ainsi une prise en charge rapide.

Ce mémoire est organisée en deux sections. La première analyse les enjeux de santé associés à l'élevage bovin et les contraintes des techniques de contrôle actuelles. La seconde examine la conception technique de la solution BoviTrax, son mode d'opération, et ses futures orientations, y compris l'intégration de l'intelligence artificielle et de portails numériques pour une meilleure gestion sanitaire du troupeau.

Chapitre I : Problématique des Maladies Bovine.

I.1 Introduction

Les éleveurs savent que les maladies infectieuses et parasitaires peuvent avoir un coût, mais celles-ci passent parfois inaperçues, particulièrement au sein d'élevages dotés de fortes densités. En effet, à leur début, ces maladies infectieuses peuvent être peu apparentes, et les éleveurs ne pourront poser un diagnostic correct, et ce, que lorsque ces maladies seront à des stades plus avancés. Le seul cumul des signes visibles des animaux par les éleveurs ne peut, à lui seul, être un indicateur suffisant. Ce chapitre vous amènera à la découverte des maladies les plus rencontrées en élevages fermiers en Algérie, des limites de ces méthodes de repérage, mais aussi des perspectives apportées par de nouvelles technologies pour détecter plus tôt de tels troubles, et ainsi, maintenir en parallèle notre élevage de vaches en bonne santé ainsi que notre filière laitière productrice de lait et de produits laitiers en Algérie.

I.2 Contexte général de l'élevage bovin laitier

I.2.1 Importance de la production laitière dans l'agriculture

Près de 150 millions de foyers à travers le monde sont des producteurs de lait. Dans nombre de pays en développement, la production de lait est assurée par de modestes exploitants, et elle participe à l'entretien des ménages, à leur sécurité alimentaire et à leur nutrition. Le lait procure aux petits producteurs des bénéfices assez rapides et représente une source significative de revenus en espèces [1].

La filière lait a une grande importance d'un point de vue économique, social et nutritionnel. Elle participe donc à l'assurance de la sécurité alimentaire nationale, car près de 96 % des besoins des citoyens en lait et produits dérivés sont entièrement comblés [2].

Les produits laitiers constituent une production agricole universelle : le fait de traire les animaux laitiers se retrouve dans presque tous les pays du globe, et jusqu'à un milliard d'individus résident dans des fermes laitières. C'est un composant crucial du système alimentaire mondial et il a une importance significative dans la pérennité des zones rurales en particulier [3].

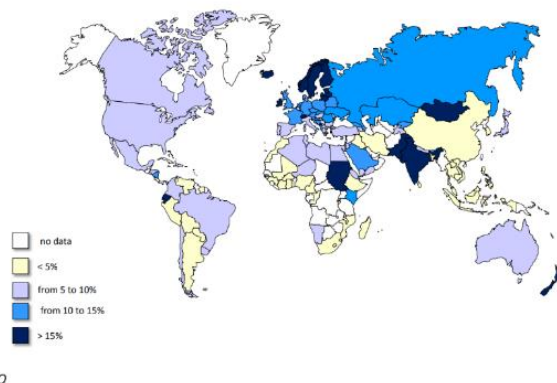


Figure I.1: Part du lait dans la production agricole totale - situation en 2010 selon les pays [3]

I.2.2 Enjeux économiques et sanitaires liés aux maladies des bovins

I.2.2.1 Les enjeux économiques :

- Diminution de la production de lait.
- Baisse de la vitesse de croissance des animaux.
- Taux de mortalité précoce chez le bétail.
- Dépenses associées aux soins vétérinaires (fréquemment onéreuses et parfois peu efficaces contre certaines affections).

Les maladies	Coûts de traitement
Brucellose	Perte totale (abattage).
Fièvre aphteuse	Vaccination préventive (~1500 DA par vache). Soins palliatifs (~3000 DA si infectée).
Mammite	Antibiotiques intramammaires : ~3000 à 5000 DA par vache. Anti-inflammatoires et soins vétérinaires : ~2000 DA supplémentaires. Perte économique due à l'impossibilité de vendre le lait contaminé+ dégradation génétique .
Stress thermique	Adaptation des conditions (ventilation, hydratation), coût variable selon les installations.
Cétose	Suppléments énergétiques et soins (~4000 DA par traitement).
Fièvre de lait (Hypocalcémie)	Injection de calcium (~2000 à 5000 DA selon la gravité).

Tableau I.1: Tableau synthétique des affections courantes chez les vaches laitières, avec estimation du coût de leur soin en Algérie.

Les données figurées sur ce tableau fournies par les vétérinaires de la wilaya d'Ain Témouchent indiquent des frais lourds de soins affectant les principales affections qu'on constate chez les bovins, soulignant un impact économique substantiel pour les éleveurs de la région.

- Éloignement et mise à mort des animaux atteints.
- Limitations commerciales lors d'épidémies (en cas d'épidémies, les marchés aux bestiaux seront fermés et les échanges commerciaux suspendus).

I.2.2.2 Les enjeux sanitaires :

- La brucellose et la tuberculose représentent un danger direct pour la santé des humains, certaines formes pouvant être mortelles.
- La propagation de la maladie dans les élevages menace la pérennité de la race.
- Cela peut conduire à des mesures de santé publique strictes, telles que la mise en place d'une quarantaine généralisée et l'abattage massif des animaux infectés.

I.2.3 Nécessité d'une surveillance intelligente

Sur une ferme laitière, il est impossible pour l'éleveur d'être omniprésent. Cela peut conduire à une identification tardive de certaines pathologies, mettant en péril la santé des animaux et la viabilité économique de l'élevage. L'implémentation de technologies intelligentes dans le suivi des animaux est désormais une option indispensable. L'intégration de capteurs montés sur des microcontrôleurs et des interfaces mobiles permet d'effectuer une surveillance constante, impartiale et automatisée, même sans la présence de l'éleveur [4].

En effet, le bon développement de l'élevage s'accompagne d'outils innovants qui permettent d'assurer un suivi permanent et précis des animaux afin de déterminer au mieux l'état de santé de ceux-ci. Cela conduit notamment à une détection précoce des maladies, et donc à une prise en charge dans de meilleures conditions, mais aussi à des économies de moyens et de coûts face aux maladies. En effet, c'est grâce à ces outils de surveillance que l'élevage peut répondre à ses enjeux de modernisation, mais aussi à ceux liés aux contraintes environnementales, à la qualité sanitaire de la filière et à la traçabilité des produits, exigences de plus en plus forte des consommateurs.

I.3 Maladies affectant les bovins laitiers

I.3.1 Classification des maladies (bactériennes, virales, métaboliques, environnementales)

I.3.1.1 Les maladies virales

Ces maladies sont causées par des virus. Elles sont généralement les plus infectieuses : une seule vache atteinte peut vite transmettre la maladie à l'ensemble du troupeau. Fort heureusement, il existe des vaccins pour certaines de ces maladies. Exemples : la fièvre aphteuse, l'IBR (rhinotrachéite infectieuse), la diarrhée virale bovine (BVD), la leucose, la fièvre catarrhale (transmise par les moucheron).

I.3.1.2 Les maladies bactériennes

C'est ici que des bactéries sont à l'origine du problème. Elles peuvent affecter divers organes, tels que les glandes mammaires ou les poumons. Certaines peuvent même être transférées à l'homme. Exemples : la brucellose, la tuberculose, les mammites (infections des mamelles), la leptospirose, le charbon bactérien.

I.3.1.3 Les maladies métaboliques

Il n'y a aucun lien entre ces maladies et un microbe. Ces dernières sont causées par un déséquilibre dans l'organisme de la vache, généralement lors du vêlage (lors de la naissance du veau), lorsqu'elle modifie son apport alimentaire ou énergétique. Exemples : la cétose (quand la vache manque d'énergie), la fièvre de lait (manque de calcium), l'acidose (trop d'acide dans le rumen), le déplacement de la caillette (l'estomac bouge de place).

I.3.1.4 Les maladies liées à l'environnement

Il arrive parfois que ce ne soient ni les virus, ni les bactéries, ni même le métabolisme : c'est l'environnement dans lequel se trouve la vache qui pose problème. Surface glissante, température élevée, alimentation inappropriée... chacun de ces facteurs peut nuire à sa santé. Exemples : les boiteries, le stress thermique (quand il fait trop chaud), la dermatite digitale (maladie des pieds), troubles digestifs liés à l'alimentation.

I.3.2 Impact des maladies sur la production laitière et la rentabilité des élevages

Une recherche démontrée par la figure 5 souligne que les diminutions de production laitière causées par certaines maladies sont particulièrement prononcées durant les phases initiales et intermédiaires de lactation. En moyenne, ces pertes s'élèvent à 4,8 à 5 kg de lait par vache chaque jour, bien qu'elles soient moins importantes en fin de lactation, avec approximativement 2,9 kg par vache quotidiennement. Cette sensibilité accrue en début de lactation est principalement due au pic de production typique de cette phase, période où les exigences énergétiques sont extrêmement hautes [5].

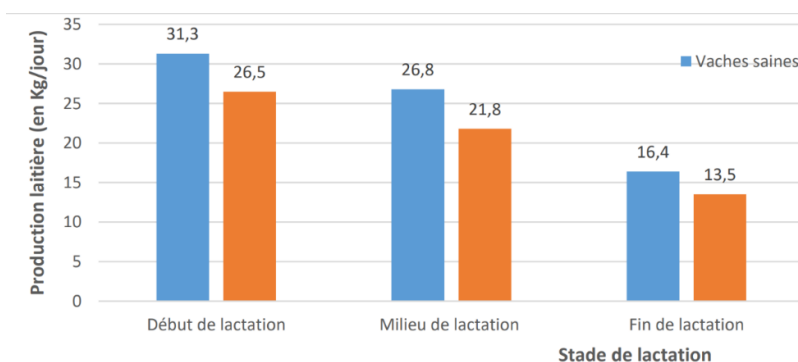


Figure I.2 : Variation de la production laitière selon le stade de lactation [5]

L'étude des performances de plus de 3500 fermes au sein du réseau Optilait Conseil Elevage indique que les vagues de chaleur ont un impact considérable sur la qualité et le volume de lait produit. Chaque point sur le graphique illustre la moyenne dérivée de 600 exploitations [6].

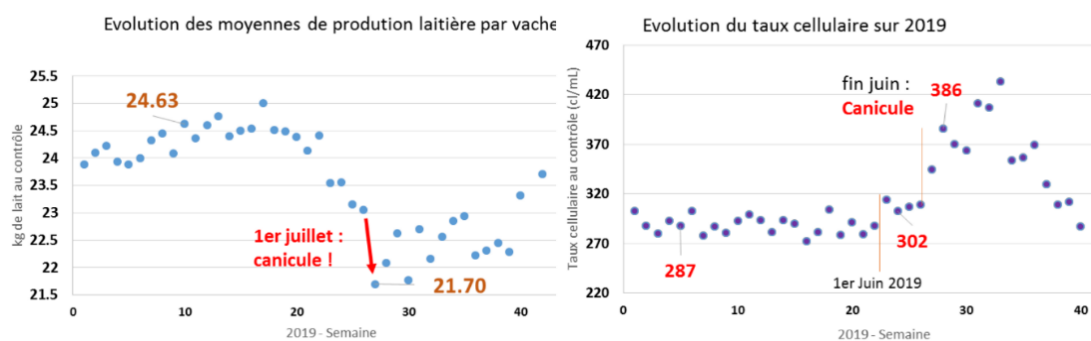


Figure I.3 : Impact de la canicule sur la production laitière moyenne et le taux cellulaire en 2019 [6]

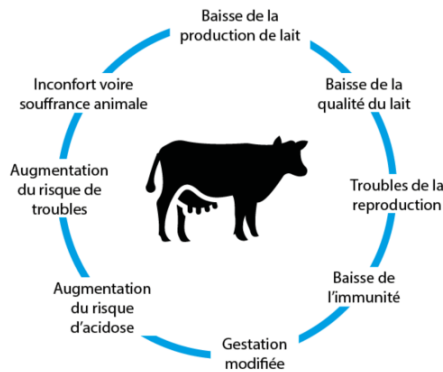


Figure I.4 : Conséquences en chaîne du stress thermique chez les bovins laitiers. [7]

I.3.3 Maladies les plus courantes :

I.3.3.1 Brucellose

- **Définition générale**

La brucellose constitue une pathologie infectieuse d'origine microbienne, liée aux bactéries du genre *Brucella*, affectant de nombreuses espèces animales, dont les bovins, les ovins, les caprins et les porcs, et éventuellement l'homme [8].

- **Transmission**

C'est une maladie animale très sévère transmissible à l'homme principalement à l'occasion de la consommation de lait cru et de contact direct avec des animaux malades. La maladie se propage d'un animal à l'autre lors de la mise bas ou de l'avortement. Les bactéries sont capables de vivre longtemps dans le milieu et de contaminer le lait [8].

- **Symptômes chez les animaux**

Une température corporelle élevée (> 39-40 °C) ainsi que des mouvements normaux, suivis souvent par l'avortement ou une défaillance de la reproduction. En règle générale, après un premier avortement, les animaux parviennent à se rétablir et à donner naissance à une progéniture vivante. Cependant, ils peuvent persister à excréter la bactérie *Brucella* et donc à la propager. Les *Brucella* se localisent principalement dans les organes reproducteurs chez les animaux [8].

I.3.3.2 Fièvre aphteuse

- **Définition générale**

La fièvre aphteuse est une affection virale sévère et fortement transmissible qui touche principalement les animaux d'élevage. Cela concerne les animaux tels que les bovins, les porcs, les ovins, les caprins ainsi que d'autres espèces d'artiodactyles [9].

• Transmission

Le virus est présent dans toutes les sécrétions et excréments des animaux infectés (salive, lait, semence, etc.) et peut être excrété jusqu'à 4 jours avant l'apparition des symptômes. L'infection se propage principalement par contact direct, par le biais de matériel ou d'animaux infectés, ou à travers la consommation de produits d'origine animale non cuits ou insuffisamment cuits. [9]

• Symptômes : les symptômes varient selon l'espèce, l'âge et la souche virale :

- Fièvre soudaine ($> 40\text{ }^{\circ}\text{C}$), boiterie, réduction des mouvements, hyperthermie persistante, lésions vésiculaires sur les (muqueuses buccales, nasales, les pieds et les mamelles). [9]

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
 MINISTERE DE L'AGRICULTURE ET DU DEVELOPPEMENT RURAL
 INSTITUT TECHNIQUE DES ELEVAGES

وزارة الفلاحة والتنمية الريفية
 المعهد التقني لتربية الحيوانات

Fièvre aphteuse

Qu'est-ce que la fièvre aphteuse?

- Maladie virale hautement contagieuse
- Due à un petit virus de la famille des **Picornaviridae** et du genre **Aphthovirus**
- Forte morbidité et faible mortalité
- Pertes économiques importantes
- La période d'incubation varie de 2 à 7 jours en moyenne : elle dépend de la souche virale, de la dose infectieuse et de la voie de contamination

Les espèces affectées
 Toutes les espèces d'ongulés à doigts pairs : Bovins, les ovins et caprins.

Quels sont les signes cliniques de la fièvre aphteuse?

- Fièvre : température rectale jusqu'à 41°C
- Animal triste, déprimé et anorexique
- Baisse de la production de lait chez les vaches laitières
- Ecoulement nasal (séreux et devient muco-purulent)
- Salivation excessive
- Boiterie

Quels sont les lésions apparentes de la fièvre aphteuse?

Ulcères au niveau de la gencive Aphte fraîchement rompu Lésion interdigitale Aphtes au niveau de la mamelle

Comment la fièvre aphteuse est-elle transmise ?

Transmission directe:
 - les sécrétions nasales, les lésions cutanées, le lait, l'urine et les excréments.

Transmission indirecte
 - des chaussures ou des vêtements contaminés
 - utilisation du matériel contaminé
 - les véhicules contaminés

Lutte et prévention contre fièvre aphteuse

- Déclaration dès son apparition
- Contrôle des contacts des personnes et des matériels avec les animaux
- Les nouveaux animaux devraient être isolés avant d'être introduits
- Respect des règles d'hygiène
- **Vaccination préventive du cheptel**

Figure I.5 : Signes cliniques de la fièvre aphteuse chez les bovins .

I.3.3.3 Mammite

• Définition générale

La mammite est une irritation d'un ou plusieurs segments causés par l'existence et la prolifération d'une (ou de plusieurs) espèce bactérienne nuisible dans le tissu mammaire. [10].

- **Transmission**

Type de bactéries	Origine / Transmission	Conséquences principales
Contagieuses	- Vivent sur la peau des vaches- Se transmettent pendant la traite (matériel/mains)	-Mammites infracliniques- Hausse du CCS
Environnementales	- Présentes dans le fumier, sol, eau- Opportunistes en cas de faiblesse immunitaire	- Mammites cliniques, souvent après le vêlage
	- Transmission favorisée par une mauvaise hygiène	

Tableau I.2 : Classification des agents pathogènes responsables de la mammite bovine selon leur mode de transmission et leurs effets cliniques. [12]

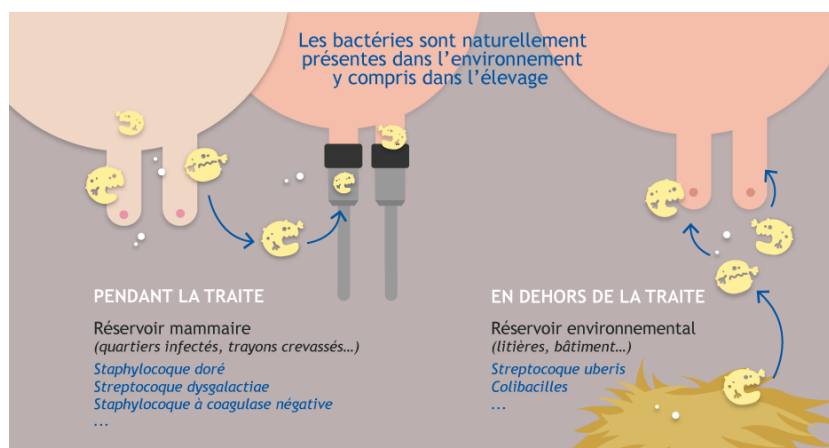


Figure I.6 : Voies de contamination bactérienne des mamelles chez la vache laitière, pendant et en dehors de la traite.[11]

- **Symptômes**

Une élévation de la température au niveau des mamelles (> 39-40 °C), tout en maintenant des comportements normaux (absence de démarche irrégulière ou d'état léthargique). Il est assez aisé de la diagnostiquer à l'œil nu. On note fréquemment les signes suivants :

- Une rougeur ou une inflammation manifeste du pis,
- L'apparition de sang, de flocons ou de caillots dans le lait des premiers jets,
- Ou encore une caractéristique aqueuse anormale de ce lait [13].

- **Conséquences**

En 2017, la production de lait en Algérie atteignait près de trois milliards de litres, un volume particulièrement modeste. Les mammites constituent près de 20 % des maladies cliniques, avec au moins la moitié des vaches laitières touchées au cours de leur vie, et une fréquence régionale pouvant atteindre 25 % [10].

I.3.3.4 Stress thermique (influence environnementale)

- **Définition générale**

Dès que la température excède 25 °C, en particulier avec un taux d'humidité élevé, la vache laitière est soumise à un stress thermique qui affecte sa nutrition, son système immunitaire, sa reproduction et l'expression de ses gènes. La prochaine illustration expose de manière visuelle et synthétique les impacts du stress thermique à court, moyen et long terme, ainsi que les mesures préventives à adopter :

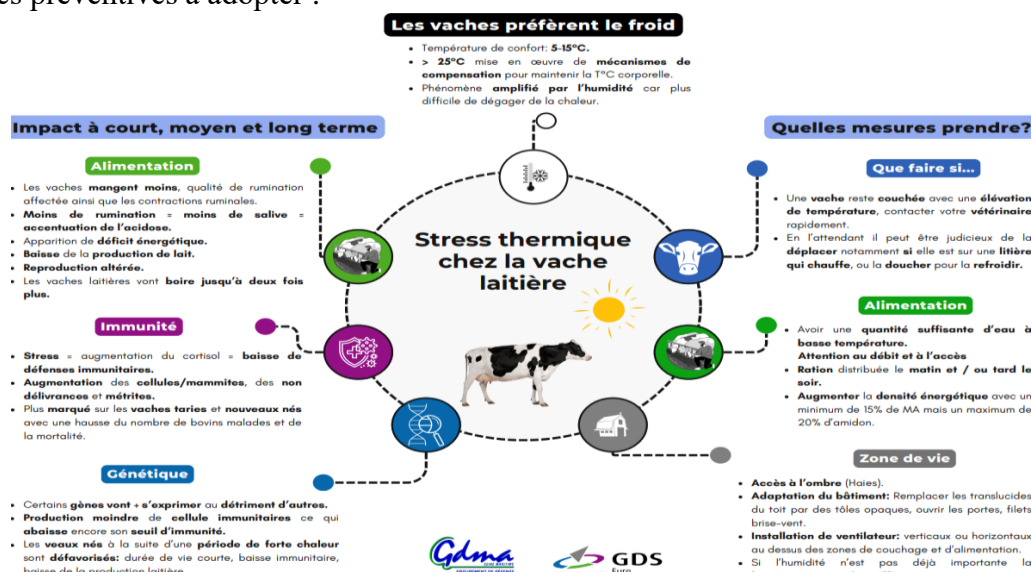


Figure I.7 : Schéma synthétique des effets physiopathologiques du stress thermique chez la vache laitière.[14]

- **Symptôme**

Une accélération du rythme respiratoire (qui peut monter jusqu'à 150 respirations par minute), un essoufflement, une langue qui pend, une hypersalivation et une hausse de leur température corporelle au-dessus de 39 °C. En outre, une diminution de l'activité, une position debout prolongée, des regroupements inhabituels et à certains moments une surexcitation ou une léthargie peuvent accroître le risque de boiterie et de mammites. [6]

I.3.3.5 fièvre de lait (Hypocalcémie clinique)

- **Définition générale**

L'hypocalcémie est une insuffisance de calcium, affecte principalement les vaches laitières dans les 24 heures après leur mise basse. Elle se produit lorsque le niveau de calcium dans le sang tombe en dessous de 2 mmol/L (80 mg/L). [15]



Figure I.8 : Vache en décubitus latéral due à une hypocalcémie clinique (fièvre de lait) [16]

- **Symptômes**

L'hypocalcémie clinique s'exprime en trois étapes :

Phase 1 (légère) : nervosité, débilité musculaire, instabilité, température légèrement supérieure à la normale ou normale.

Phase 2 (modérée) : l'animal est couché sur le ventre, apathique et présente une activité physique diminuée.

Phase 3 (critique) : le bovin est couché sur le flanc, il est immobilisé, dans un état comateux, avec une température généralement très faible. [15]

I.3.3.6 Cétose et troubles métaboliques

- **Définition générale**

La cétose est un trouble métabolique fréquemment observé chez les vaches laitières en début de lactation. Elle survient lorsque les besoins énergétiques dépassent l'apport nutritionnel, poussant l'animal à puiser dans ses réserves de graisse. Lorsque cette mobilisation est excessive, une accumulation de corps cétoniques se produit, entraînant une baisse d'énergie, une apathie et une dégradation des performances. [17]

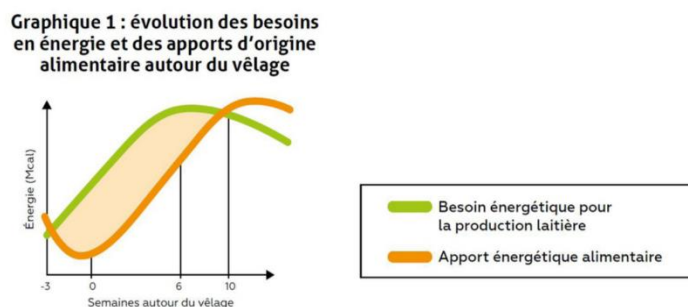


Figure I.9 : Évolution des besoins énergétiques et des apports nutritionnels autour du vêlage : un facteur clé dans la genèse de la cétose chez les vaches laitières.[18]

- **Symptômes**

Une réduction de l'appétit, une haleine sucrée, de la léthargie, une irritabilité accrue, une baisse de la production de lait et un déclin du poids corporel. Les excréments deviennent secs, la température corporelle de l'animal reste normale ou légèrement inférieure à 38 °C, et l'animal présente un certain degré d'apathie générale [17] [19].

I.4 Surveillance et diagnostic des maladies

I.4.1 Méthodes traditionnelles de diagnostic et leurs limites

I.4.1.1 Surveiller avec les yeux et le cœur

Avant l'avènement des technologies actuelles, la santé du bétail était surveillée grâce à une observation minutieuse, basée sur l'expérience et l'intuition des éleveurs, souvent en collaboration avec des vétérinaires [20].

I.4.1.2 Comprendre après la mort

Lorsqu'un animal décédait, une autopsie pouvait aider à déterminer les raisons de sa mort. Au-delà de l'étude scientifique des organes et des tissus, c'était un acte de respect : tenter de sauvegarder le reste du cheptel et s'instruire pour prévenir d'autres pertes [20].

I.4.1.3 Des méthodes simples, parfois improvisées

Avant d'avoir accès à des analyses contemporaines, les éleveurs s'appuyaient sur leur savoir-faire et des traitements empiriques, expérimentant des solutions artisanales en tenant compte des réponses de leurs animaux [20].

➤ **Pourquoi ces méthodes ne suffisent plus aujourd'hui ?**

- **Les erreurs d'observation humaine** : Des symptômes partagés par diverses maladies peuvent tromper, menant à un traitement inapproprié et à une perte de temps précieuse.
- **Une détection qui survient souvent tardivement** : Les symptômes visibles ne se manifestent que lorsque la maladie a déjà progressé, réduisant ainsi les possibilités de guérison et d'évitement de la transmission.
- **Des pratiques disparates** : Les techniques diffèrent d'un fermier à l'autre, ce qui complique l'établissement de stratégies communes efficaces. [21]

I.4.2 Importance des paramètres physiologiques dans la détection précoce

I.4.2.1 Température corporelle

La température corporelle, généralement située entre 38 et 39,3 °C, est un paramètre essentiel pour évaluer la santé des vaches. Une augmentation pourrait indiquer une infection (telle qu'une mammite ou une bronchite) ou un stress dû à la chaleur. Cependant, les vaches ont une mauvaise régulation de leur température : elles transpirent peu et ne se refroidissent pas efficacement par la respiration. À partir de 21 °C, leur bien-être se détériore, ce qui influence leur comportement (elles consomment moins de nourriture, ruminent et se déplacent moins), ainsi que leur production. Une vache laitière peut perdre jusqu'à 5 kg de sa production quotidienne, et un bovin destiné à la viande prendra du poids plus lentement. Le lait devient également moins nutritif. L'utilisation de capteurs pour surveiller constamment la température permet d'identifier rapidement les problèmes et de réagir dans les plus brefs délais, prévenant ainsi des pertes conséquentes [22] [23].

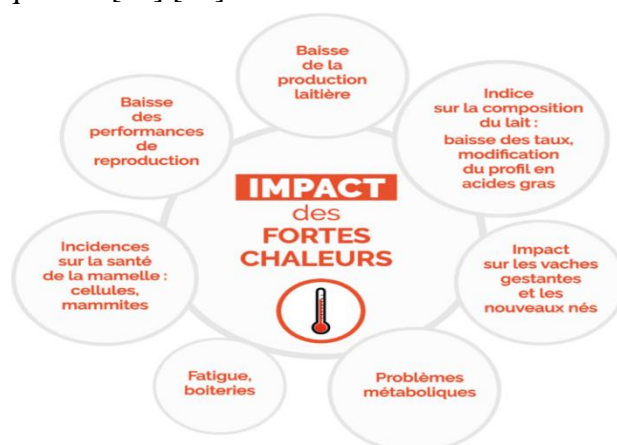


Figure I.10: Principaux impacts des fortes chaleurs sur la santé et la performance des bovins [24]

I.4.2.2 Analyse des mouvements et comportement anormal

Bien que les bovins ne puissent s'exprimer verbalement, leur comportement constitue un indicateur précieux de leur état de santé. Habituellement, une vache suit un rythme de vie régulier, qui inclut l'alimentation, la rumination, le repos et les mouvements. Toute déviation de ce modèle, qu'il s'agisse d'une position debout prolongée, d'une démarche atypique, d'une propension à l'isolement ou d'un arrêt soudain de la rumination, pourrait indiquer l'émergence d'une douleur, d'une pathologie ou le commencement d'une boiterie. Cependant, au sein d'un vaste troupeau, ces indices subtils peuvent aisément être négligés.

L'incorporation de détecteurs de mouvement, attachés au collier ou aux extrémités, autorise une surveillance comportementale en direct. Ces appareils fonctionnent en tant que vigies numériques, capables de repérer les irrégularités dès leur survenue, et d'informer l'éleveur sans tarder. Cette méthode encourage une action rapide, réduisant la détresse animale et les pertes financières [25] [26] [27].

I.4.3 Besoin d'une solution automatisée et intelligente

La supervision de la santé du bétail ne s'appuie plus seulement sur les habitudes ou l'instinct de l'éleveur. Un simple changement de comportement peut signaler un problème ; cependant, il est impossible d'assurer une surveillance ininterrompue de chaque animal. Dans ce cadre, les systèmes automatisés et intelligents trouvent leur pertinence : en garantissant une surveillance continue et discrète, capables d'identifier les premiers indices souvent indétectables à l'œil nu, ils offrent la possibilité d'une action rapide avant que la situation ne se détériore.

➤ **Une surveillance constante, sans fatigue**

Certaines pathologies bovines commencent par des symptômes subtils, généralement négligés jusqu'à ce qu'elles deviennent irréversibles. Un suivi constant permet d'identifier ces irrégularités dès leur survenance et de réagir promptement, garantissant une action préliminaire sans la nécessité d'une surveillance humaine constante.

➤ **Des capteurs discrets, mais précieux**

Des dispositifs de mesure attachés aux vaches permettent de suivre en permanence leur température, leur activité et leur comportement. Les informations sont envoyées à une application qui identifie automatiquement toute irrégularité, garantissant une surveillance continue et discrète.

➤ **L'intelligence artificielle au service de l'éleveur**

Et ce n'est pas tout. Ces outils apprennent avec le temps. Grâce à l'intelligence artificielle, ils repèrent des habitudes, des rythmes, des comportements normaux. Et dès qu'ils remarquent un écart même minime ils peuvent alerter l'éleveur.

C'est une vraie révolution : on ne se contente plus de soigner une vache quand elle est malade. On peut agir avant, prévenir, adapter l'alimentation, intervenir plus tôt. On gagne du temps, on évite de la souffrance, et on limite les pertes.

➤ **Mieux pour les animaux, mieux pour l'humain**

La technologie offre un meilleur suivi des bovins, diminuant leur détresse et augmentant leur productivité. L'innovation devient un outil crucial pour une gestion d'élevage moderne et durable, permettant à l'éleveur de gagner en tranquillité d'esprit et en efficacité.

I.5 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous exposons que la santé animale se base de moins en moins sur l'intuition. Les maladies qui touchent les animaux de rente, comme les bovins, sont pour la plupart discrètes et diagnostiquées tardivement. Les éleveurs ont aujourd'hui besoin d'outils pour détecter précocement et facilement les situations de mal-être. La technologie est au service d'une surveillance discrète et fiable. Dans le chapitre suivant, nous verrons comment un système de monitoring automatique accepté et utilisé par les éleveurs viendra compléter ce dispositif en offrant un diagnostic instantané et une prise de décision éclairée pour améliorer le bien-être des animaux et celui de leurs éleveurs.

Chapitre II : Conception et Développement de BoviTrax.

II.1 Introduction

Ce chapitre dépeint, étape par étape, le processus de création et d'élaboration du dispositif BoviTrax, un collier intelligent conçu pour suivre la santé des vaches laitières. Nous offrons une étude approfondie des décisions technologiques, des éléments matériels et logiciels utilisés, et de la structure globale du système. Nous examinons également les procédés de détection d'anomalies physiologiques et comportementales chez les bovins, les étapes d'intégration, de test et d'évaluation, ainsi que les contraintes rencontrées et les suggestions pour l'amélioration. L'intention est de fournir une description intégrale et structurée du processus de mise en œuvre du projet dans un contexte multidisciplinaire alliant l'électronique, l'informatique embarquée et la santé animale.

II.2 Présentation du projet BoviTrax

Le projet BoviTrax est un projet de conception d'un système de suivi intelligent, sous la forme d'un collier connecté, permettant de mieux détecter précocement des pathologies bovines, en particulier celles dont les manifestations peuvent être considérées comme une modification de la température et du comportement (fièvre, chaleur, problèmes de locomotion). Le dispositif est un système de capteurs biométriques embarqués sur microcontrôleur ESP32 pour le traitement des données en local, avec interface de communication sans fil notifiant l'éleveur en cas d'anomalie. BoviTrax, dans les séquences de l'agriculture de précision, participe à améliorer le bien-être des animaux et celui du travail de l'éleveur, tout en étant l'une des manifestations d'une forte tendance à inscrire le changement de paradigme produit par les technologies de l'Internet des objets (IoT) dans le champ agro-pastoral.



Figure II.1 : Collier BoviTrax fixé au cou du bovin avec vue détaillée de son architecture interne : capteurs, microcontrôleur et module d'alimentation intégrés.

II.3 Étude des technologies utilisées

II.3.1 Capteurs embarqués

II.3.1.1 Capteur de température MLX90614

Est un détecteur infrarouge sans contact fondé sur la loi de Stefan-Boltzmann, apte à évaluer la température d'un objet de -70°C à $382,2^{\circ}\text{C}$ et celle de l'environnement de -40°C à 125°C , sans nécessité de contact direct. Il transmet les informations à un microcontrôleur par le biais du bus I2C. [28]



Figure II.2: Capteur de température infrarouge MLX90614.[28]

➤ Caractéristiques :

Fonctionnalité	Spécification
Alimentation	3,3 à 5 V
Modèle	MLX90614
Interfaces	I ² C (ou PWM selon la version)
Débit par défaut	100 kHz (I ² C Standard Mode)
Taille du module	Environ 21 mm x 18 mm (selon version breakout)
Taille du capteur	Ø 7,8 mm (boîtier TO-39)
Prix	À partir de 2000 DA

Tableau II.1 : Représentation des caractéristiques de MLX90614. [29]

II.3.1.2 Accéléromètre MPU6050

Le MPU-6050 est un appareil de détection de mouvement à six axes (3 axes pour le gyroscope, 3 axes pour l'accéléromètre). Voici la définition de ses trois systèmes de coordonnées : Positionnez le MPU6050 à l'horizontale sur une table, en veillant à ce que le côté portant l'étiquette soit tourné vers le haut, et qu'un point sur cette face soit situé dans l'angle supérieur gauche.

Par conséquent :

- L'axe Z de la puce correspond au mouvement vertical vers le haut.
- L'axe X représente la direction de gauche à droite.
- L'axe Y indique la direction de l'arrière vers l'avant. [30]

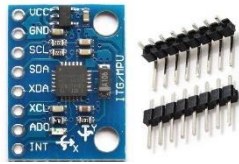


Figure II.4 : Accéléromètre MPU6050. [30]

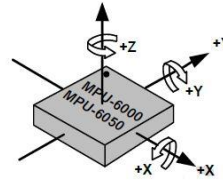


Figure II.3: Accéléromètre 3 axes. [30]

➤ **Caractéristiques**

Fonctionnalité	Spécification
Alimentation	3,3 V (max 3,6 V, tolère 5 V via régulateur intégré)
Modèle	MPU-6050
Interfaces	I ² C
Débit par défaut	400 kHz (I ² C Fast Mode)
Taille du module	Environ 20 mm x 15 mm
Taille du boîtier	Compact intégré dans le PCB
Prix	À partir de 1500 DA

Tableau II.2 : Représentation des caractéristiques de MPU6050.

II.3.2 Architecture matérielle et électronique

II.3.2.1 Microcontrôleur ESP32

Dans la conception moderne du système proposé par notre équipe, le microcontrôleur choisi est le microcontrôleur ESP32, fabriqué par la société Espressif. Il se démarque par sa puissance de calcul à la fois importante et accessible, par ses interfaces de communication Wi-Fi et Bluetooth, par son prix modique et par sa consommation raisonnable, mais également par sa compatibilité avec l’environnement de développement Arduino IDE, ce qui fait de lui un champion dans le domaine de l’IoT en général et dans le domaine agricole en particulier.

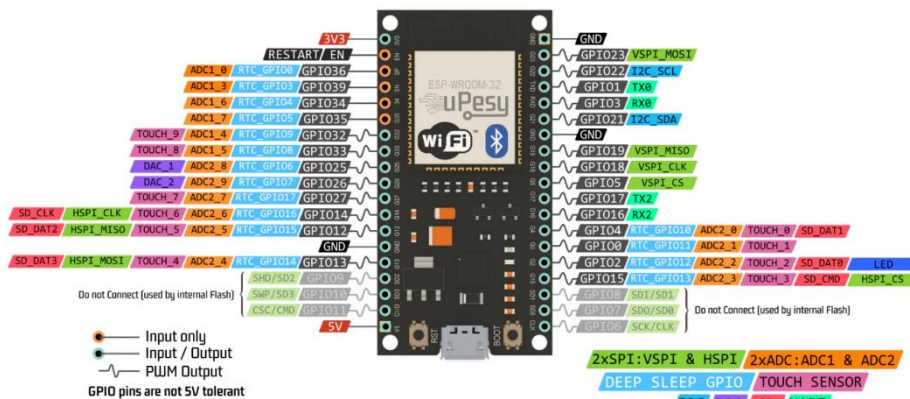


Figure II.5 : configuration des broches ESP32. [31]

II.3.2.2 Interface de communication (Wi-Fi, Bluetooth)

Le système BoviTrax repose sur différentes technologies de communication sans fil adaptées à divers contextes d'utilisation. L'ESP32 avec Wi-Fi intégré procure une transmission des données rapide dans les zones où un réseau local est aménagé et est indiqué pour du suivi à distance si l'infrastructure est disponible. Le Bluetooth bien que moins rapide et moins loin permet un bon fonctionnement à proximité et en phase de test en raison de sa faible consommation d'énergie.

Technologie	Portée	Consommation énergétique	Débit de données	Avantages	Inconvénients	Cas d'usage recommandé
Wi-Fi	50 à 100 mètres	Moyenne à élevée	Élevé (jusqu'à 150 Mbps)	Large bande passante, compatible avec internet et plateformes web	Dépend de la couverture réseau, consommation importante	Transmission de données en temps réel dans zones couvertes
Bluetooth	10 à 20 mètres	Faible	Faible à moyen (~2 Mbps)	Faible consommation, facile à configurer avec un smartphone	Portée limitée, pas adapté aux grands pâturages	Tests locaux, configuration initiale, maintenance
LoRa	Jusqu'à 10 kilomètres	Très faible	Très faible (~50 kbps)	Très longue portée, idéal pour milieux ruraux éloignés	Faible débit, nécessite une infrastructure (passerelle LoRa)	Exploitations isolées avec de nombreux animaux répartis

Tableau II.3 : Comparaison des technologies de communication sans fil adaptées à BoviTrax.

Il est important de noter que le module de base ESP32 ne prend pas en charge nativement le LoRa, qui nécessite un module additionnel (tel que le SX1276) à connecter par l'intermédiaire de broches SPI (cette extension offrant la possibilité d'élargir les facultés de communication du système face aux défis liés à la distance géographique et aux zones dépourvues de Wi-Fi, tout en maintenant la portabilité et l'indépendance énergétique du dispositif).

II.3.2.3 Schémas de câblage et assemblage des composants

Cette étape est indispensable afin de mieux comprendre le sens et la connexion de chaque élément de l'architecture générale de l'appareil. Les schémas ci-dessous montrent le montage du capteur de mouvement MPU6050 et du capteur infrarouge MLX90614, chacun interfacé

séparément avec l'ESP32. Ces réponses permettent de bien appréhender l'alimentation, les liaisons I2C (SDA/SCL) et la tension de chaque capteur.

- **Schéma de câblage MPU6050 avec ESP32 :**

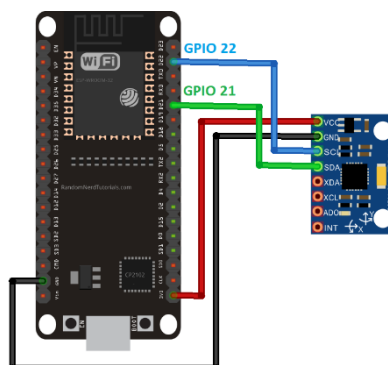


Figure II.6 : Connexion du capteur MPU6050 à l'ESP32 via interface I2C.[32]

- **Schéma de câblage MLX90614 avec ESP32 :**

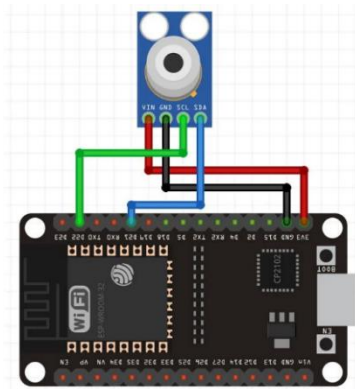


Figure II.7 : Connexion du capteur MLX90614 à l'ESP32 via interface I2C.[32]

Le montage du système BoviTrax repose sur une configuration simple mais efficace. Il comprend deux capteurs principaux : le MPU6050, pour la mesure des mouvements et de l'inclinaison, et le capteur infrarouge MLX90614, pour la mesure sans contact de la température corporelle. Ces capteurs sont connectés au microcontrôleur ESP32, qui centralise les données et les transmet à la plateforme de visualisation. Un tableau récapitulatif détaille les connexions de chaque capteur :

Capteur	VCC	GND	SDA (Données)	SCL (Horloge)	Tension requise
MPU6050	3.3V	GND	GPIO21	GPIO22	3.3V
MLX90614	3.3V	GND	GPIO21	GPIO22	3.3V

Tableau II.4 : Connexions des capteurs dans le système BoviTrax .

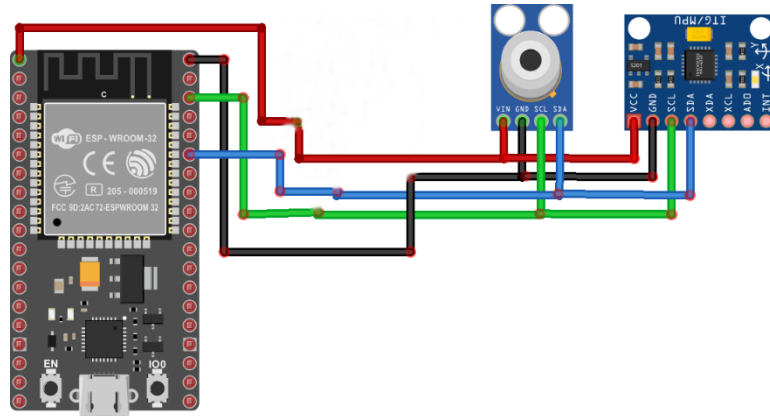


Figure II.8 : Connexion des capteurs "MLX90614" et "MPU6050" à l'ESP32. [32]

II.3.3 Méthodes d'alimentation du système BoviTrax

Durant l'étape de conception du système BoviTrax, diverses méthodes ont été examinées pour fournir de manière optimale l'énergie au microcontrôleur ESP32 et à ses capteurs.

- **Alimentation filaire via câble USB :**

Dans un premier temps, le module ESP32 a été alimenté via une liaison USB câblée à un ordinateur. La simplicité et la stabilité du programme ont facilité l'ensemble des tests initiaux et de débogage dans un environnement maîtrisé.

- **Utilisation d'une batterie externe rechargeable (power bank) :**

Ainsi, pour tester le système dans un contexte de mobilité, l'utilisation d'une batterie externe rechargeable a été mise en place. Cette option offre une autonomie appropriée, un voltage constant et une certaine propreté qui autorise les tests sur site.

- **Intégration d'une batterie lithium-ion (type 18650) :**

Pour améliorer l'autonomie d'une zone rurale dépourvue d'électricité, une batterie lithium-ion a été incorporée. Ce genre de batterie peut offrir une capacité énergétique nettement supérieure à celle des piles traditionnelles, possède une tension stable de 3,7V et se recharge grâce à un module approprié (TP4056). Il s'agit donc d'une solution appropriée pour de longues durées de fonctionnement autonome.

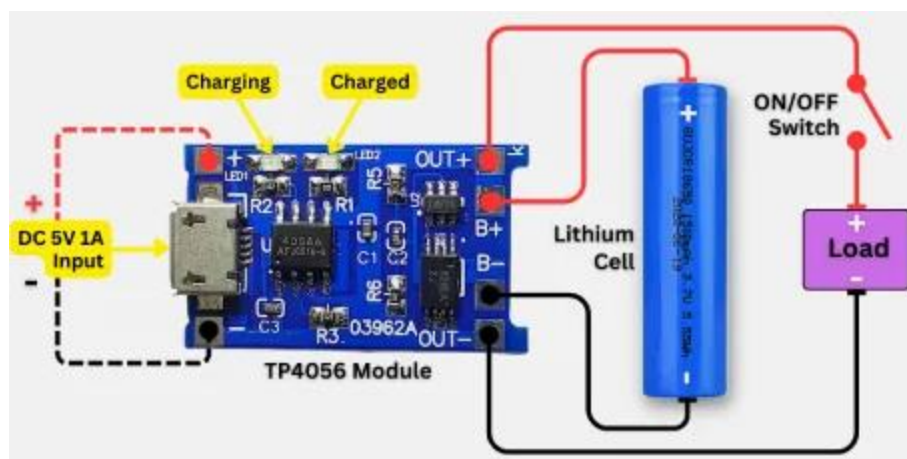


Figure II.9 : Schéma de câblage du module TP4056 pour la recharge et l'alimentation d'une batterie lithium-ion 18650. [33]

- **Évolution vers l'énergie solaire :**

Dans une perspective d'amélioration continue, l'installation éventuelle de panneaux solaires serait bien sûr envisagée. Effectivement, cela offrirait une autonomie prolongée au système sans avoir besoin de l'approvisionnement de l'opérateur humain, y compris dans les endroits les plus reculés.

Nous nous retrouvons donc à réévaluer le choix final du système de nutrition en fonction de l'application pratique, parfois en favorisant la stabilité plutôt que l'autonomie, l'accessibilité énergétique plutôt que la durabilité environnementale.

II.3.4 Développement logiciel et interface utilisateur

II.3.4.1 Programmation du microcontrôleur (Arduino IDE)

L'environnement de développement intégré Arduino ou logiciel Arduino (IDE) contient un éditeur de texte pour écrire du code, une zone de message, une console de texte, une barre d'outils avec des boutons pour les fonctions communes et une série de menus. Il se connecte au matériel Arduino et Genuino pour télécharger des programmes et communiquer avec eux. Dans le but de réaliser la programmation du microcontrôleur ESP32, socle de développement logiciel du système, son environnement Arduino IDE est mis en place. Dans ce cadre, pour faciliter, la communication I2C ainsi que le traitement des données brutes, sont également disponibles, des bibliothèques dédiées (notamment celles relatives au MPU6050 et à la MLX90614). Le programme principal fonctionne autour d'un cycle d'obtention, de traitement et de transmission des données :

pour la collecte récurrente des données des capteurs, pour la détection des anomalies par rapport aux seuils de critique et pour l'émission des alertes, un cadre de fonctionnalités est prévu, alors qu'un dispositif de filtrage (moyennes glissantes, seuils dynamiques) est intégré pour réduire le bruit et éviter les fausses alertes.

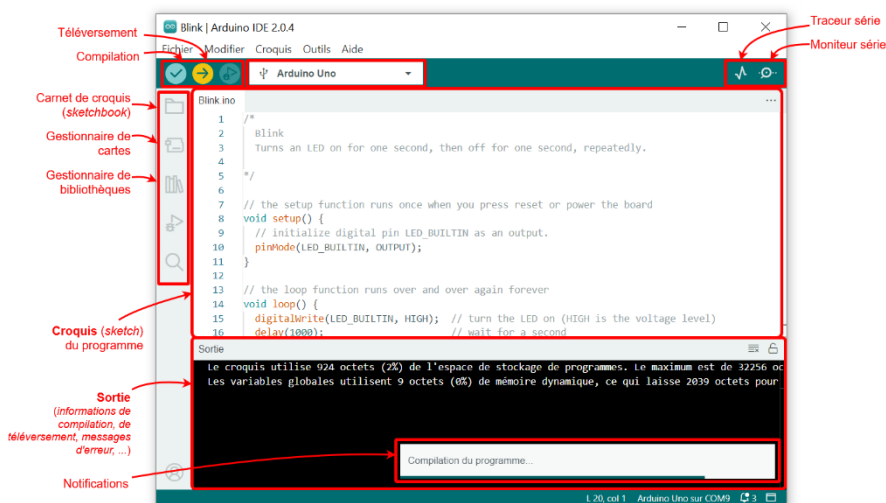


Figure II.10 : Interface principale de l'IDE Arduino. [34]

II.3.5 Intégration et tests

II.3.5.1 Tests en laboratoire (précision des capteurs, consommation d'énergie)

Les capteurs ont été testés en conditions contrôlées, comparés à des appareils de mesure de référence. Le comportement de l'ESP32 a été évalué en conditions normales et extrêmes.

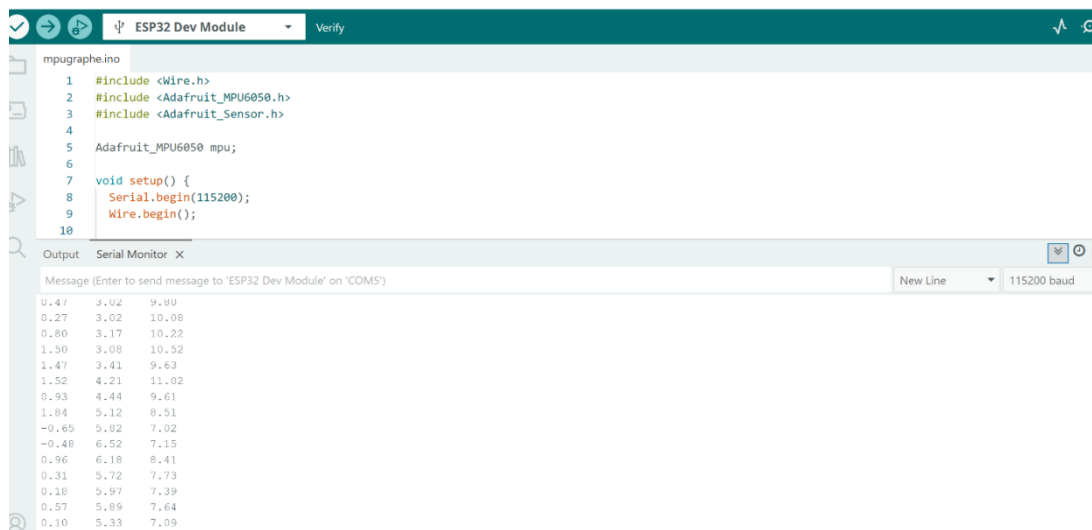
Composants testés	Objectif du test	Méthode d'alimentation	Résultat attendu	Résultat observé
ESP32 + MPU6050	Détecter les mouvements	Câble USB connecté au PC	Valeurs d'accélération filtrées	Détection cohérente du mouvement
ESP32 + MLX90614	Mesurer la température corporelle sans contact	Câble USB connecté au PC	Température précise et stable	Résultats fiables et réactifs
ESP32 + Batterie Li-ion	Tester l'autonomie du système intégré	Batterie 18650 rechargeable	Fonctionnement sans interruption	Fonctionnement stable pendant la période de test

Tableau II.5 : Résumé des tests en laboratoire des composants du système BoviTrax.

➤ Test d'intégration du capteur MPU6050 avec le microcontrôleur ESP32

Dans le cadre de l'expérimentation en cours avec l'ESP32 et le capteur MPU6050, il sera possible de mettre en évidence les mouvements du bovin grâce à l'accéléromètre et au gyroscope. Pour cela, un programme dédié à l'IDE Arduino va être développé, permettant à l'ESP32 de recevoir, d'interpréter et d'afficher les données d'accélération selon les trois axes (X, Y, Z) dans le Moniteur Série. **X, Y et Z**, correspondant respectivement aux directions **avant/arrière, gauche/droite et haut/bas** du collier porté par l'animal. Ces valeurs traduisent les variations de vitesse linéaire du dispositif dans l'espace en m/s^2 ou en unités brutes (selon le mode choisi), et permettent de détecter les déplacements, les changements de posture ou les secousses. Par exemple, une variation significative sur l'axe X peut indiquer que l'animal avance ou recule, tandis qu'un pic sur l'axe Z peut signaler un mouvement vertical comme le fait de se lever ou de se coucher. Ces données sont envoyées en temps réel à l'ESP32, qui les affiche dans le Moniteur Série via l'IDE Arduino, afin d'en faciliter l'interprétation et le traitement dans le cadre du système BoviTrax.

Les images enregistrées dans le Moniteur série traduisent par ailleurs la façon dont l'ESP32 reçoit et convertit toutes ces données en direct, d'une part, et comment elles sont gérées dans le cas présent, d'autre part.



```
mpugraphe.ino
1 #include <Wire.h>
2 #include <Adafruit_MPU6050.h>
3 #include <Adafruit_Sensor.h>
4
5 Adafruit_MPU6050 mpu;
6
7 void setup() {
8   Serial.begin(115200);
9   Wire.begin();
10
```

Output Serial Monitor X

Message (Enter to send message to 'ESP32 Dev Module' on 'COM5')

Time	X	Y	Z
0.47	3.02	9.00	
0.27	3.02	10.08	
0.80	3.17	10.22	
1.50	3.08	10.52	
1.47	3.41	9.63	
1.52	4.21	11.02	
0.93	4.44	9.61	
1.84	5.12	8.51	
-0.65	5.82	7.02	
-0.48	6.52	7.15	
0.96	6.18	8.41	
0.31	5.72	7.73	
0.18	5.97	7.39	
0.57	5.89	7.64	
0.10	5.33	7.09	

Figure II.11 : Résultat de MPU6050 sur logiciel Arduino IDE , affichage sur le Serial monitor .

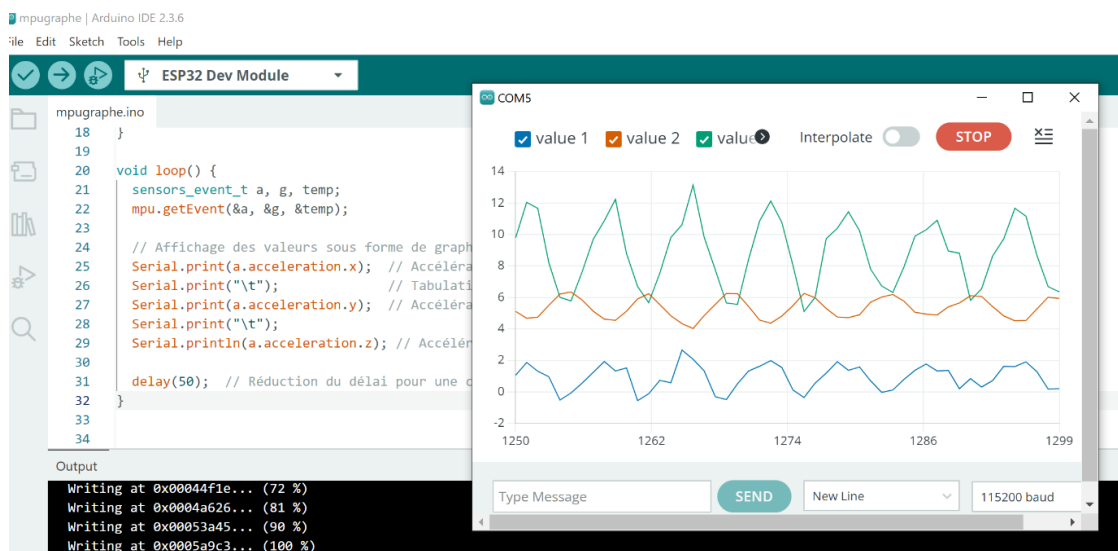


Figure II.12 : Résultat de MPU6050 sur logiciel Arduino IDE , affichage sur le Serial plotter .

➤ Test d'intégration du capteur MLX90614 avec le microcontrôleur ESP32

Le code développé sur l'IDE Arduino interroge à intervalle régulier le capteur MLX90614 afin d'obtenir la température en degrés Celsius, qui est affichée dans le Moniteur Série. Cette température est déterminante pour pouvoir identifier les symptômes de la fièvre, qui peuvent être révélateurs de certaines maladies chez les bovins. Les visuels relatifs au code et au Moniteur Série illustrent la manière dont les données de température sont acquises, puis sont affichées en temps réel.

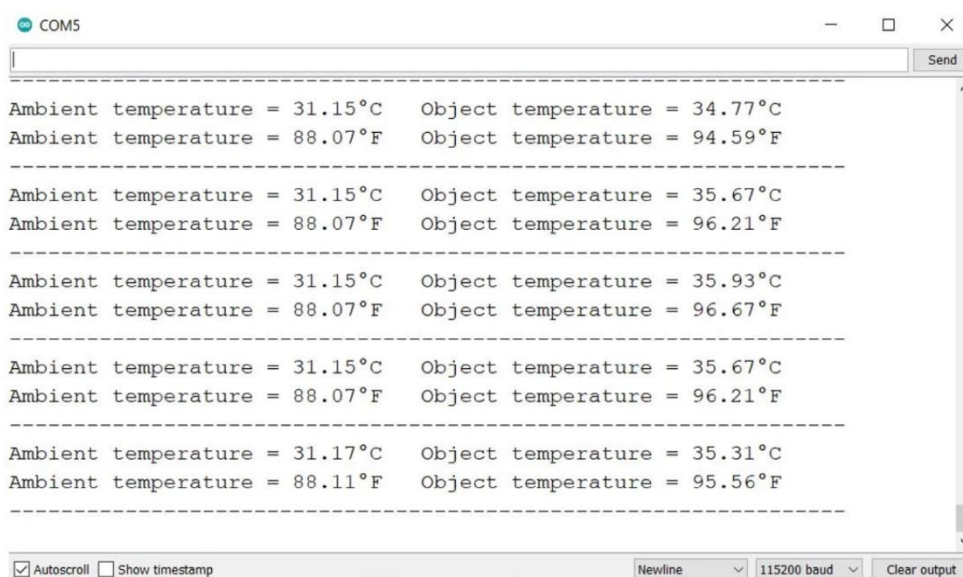


Figure II.13 : Lecture des températures ambiante et corporelle à l'aide du capteur infrarouge MLX90614 via l'interface série.

II.3.6 Algorithme de détection des anomalies (température et mouvements)

Ce qui a été construit, c'est un algorithme qui permet de détecter des symptômes physiologiques de maladies bovines, relativement rapidement, en se fondant sur seulement deux indicateurs principaux : la température corporelle de l'animal et son comportement locomoteur. En ce qui concerne la température, des seuils normaux de température ont été définis avec des vétérinaires, et tout au-delà, il est présumé fort possible que l'animal ait de la fièvre ou qu'il soit en stress thermique. Quant à la locomotion, on va s'intéresser aux données de MPU6050 pour déceler des anomalies, comme une absence de mouvement prolongée combinée à des gestes brusques.

Un simple système de classification à règles (logique conditionnelle) a été mis en place pour produire ces alertes et que l'on pourra faire évoluer dans le temps vers un dispositif d'apprentissage automatique de plus haut niveau.

La mise en œuvre technique de l'algorithme de détection des anomalies par croisement des données de température corporelle et d'activité de l'animal est exposée de façon détaillée en Annexe 1, laquelle contient une part importante du code utilisé pour repérer les comportements anormaux de l'animal.

II.3.6.1 Développement d'une application mobile / interface Web (Blynk)

Blynk est l'une des plateformes les plus couramment déployées dans l'univers de l'Internet des objets (IoT). Celui-ci permet d'associer des dispositifs au cloud, de créer des interfaces de gestion et de contrôle, et de gérer très massivement des produits déployés. Elle assiste tant les entreprises que les individuels dans la transition entre le prototype du produit connecté et sa commercialisation. [35]

Il a été mis en place une interface utilisateur tout à fait adéquate grâce à l'outil Blynk, pour que les éleveurs puissent interagir parfaitement avec les données traitées. Plus précisément, laissé entrevoir les données collectées en temps réel (température, activité), accéder à des historiques et recevoir des alertes push lorsque une anomalie est détectée. Quant à l'ESP32, il est doté d'un dispositif Wi-Fi pour assurer le plus méticuleusement possible l'envoi de données vers le serveur Blynk, et ainsi superviser à distance, sans intervention physique, la situation en temps réel.

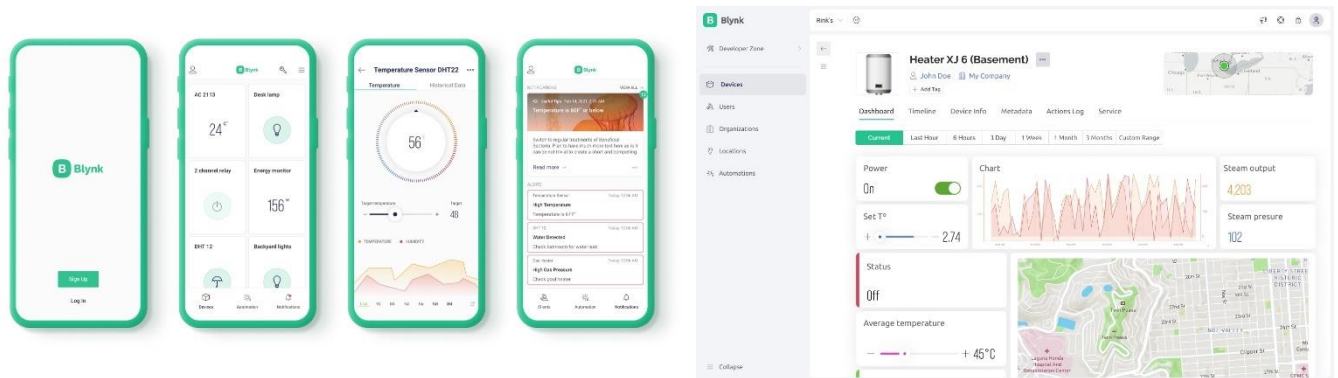


Figure II.14 : L'interface principale de Blynk. [36]

II.4 Conception du système BoviTrax

II.4.1 Architecture globale

II.4.1.1 Schéma fonctionnel du dispositif

Le fonctionnement suit ce schéma : capteur → ESP32 → traitement → transmission Wi-Fi → serveur → affichage web.

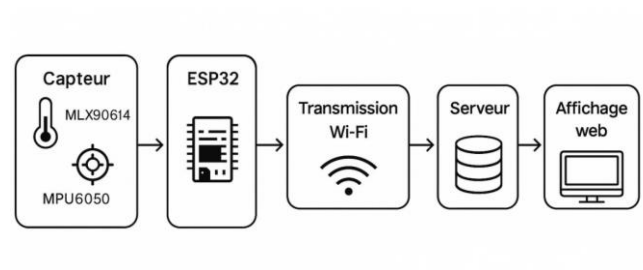


Figure II.15 : Le schéma fonctionnel du dispositif .

II.4.1.2 Gestion des données et envoi d'alertes

Le microcontrôleur traite les données qui proviennent des capteurs localement. Un filtre passe-bas est appliqué aux données d'accélération, afin de supprimer les variations induites par le bruit. En fonction de la tension relevée sur la broche analogique, la température est convertie. Une analyse logique est effectuée pour mettre les données en parallèle avec des seuils limites prédéterminés. En cas d'anomalie de comportement, ou bien de dépassement, une alerte est produite et transmise sous la forme d'un événement Blynk à l'éleveur.

II.4.2 Algorithme de détection des maladies

II.4.2.1 Définition des seuils critiques

L'exactitude de la détection dépend de l'établissement de seuils cliniques significatifs, déterminés sur la base d'une revue de la littérature vétérinaire. Un enseignant de l'École

d'Agriculture d'Aïn Témouchent m'a également accompagné dans l'identification des principaux symptômes observables chez les vaches.

- **Exécution algorithmique**

L'algorithme de détection des maladies programmé dans le microcontrôleur repose sur une logique conditionnelle qui évalue simultanément le degré d'intensité des mouvements (valeur mesurée par le capteur MPU6050, soumise à traitement) et la température corporelle (valeur mesurée par le capteur MLX90614) au moyen de conditions (**if-else**). Il contient essentiellement des if (et else) qui reflètent des cas pathologiques. Le tableau qui suit résume les cas principaux :

Maladie suspectée	Température corporelle	Mouvement	Justification biologique
Fièvre de lait / Hypocalcémie	< 38 °C	Très faible (< 0.3)	Léthargie et hypothermie
Brucellose / Mammite	> 39 °C	Normal (0.5 – 2.5)	Infection avec activité normale
Fièvre aphteuse	> 40 °C	Faible (< 0.5)	Hyperthermie + boiterie
Cétose	= 38 °C	Faible (< 0.8)	Léthargie sans fièvre
Stress thermique	> 40 °C	Élevé (> 2.5)	Agitation anormale due à la chaleur

Tableau II.6 : Seuils physiologiques et comportementaux utilisés pour la détection des maladies bovines.

II.4.2.2 Analyse des données en temps réel

Pour assurer un suivi constant de la santé des bovins, les capteurs intégrés réalisent des mesures toutes les dix secondes. Cette fréquence de détection permet de repérer rapidement tout changement physiologique ou comportemental, sans surcharger le système de traitement ni compromettre l'autonomie énergétique du système. Les mesures de température, quant à elles, sont obtenues à partir d'un traitement de la tension délivrée à l'entrée analogique selon une équation de calibration propre au capteur thermique. Et après traitement, ces données sont confrontées en temps réel à un ensemble de règles logiques mémorisées dans le microcontrôleur.

Sur l'interface de suivi développée via la plateforme Blynk, deux jauges principales sont affichées en temps réel : l'une indique la **température corporelle** de l'animal, et l'autre reflète son **niveau de mouvement**. Dans un exemple typique, la jauge de température affiche une valeur de **38.5 °C**, correspondant à une température physiologique normale pour une vache laitière. La seconde jauge indique une valeur de **1.28**, représentant l'intensité du mouvement à un instant donné. Cette valeur est obtenue à partir des mesures de l'accéléromètre embarqué, qui capte les accélérations sur trois axes. En combinant ces données, un indicateur global d'activité est calculé : plus la valeur s'éloigne de 1.00 (valeur correspondant à l'état stationnaire sous l'effet de la gravité), plus le mouvement est intense. Une valeur comme **1.28** traduit donc une activité physique modérée, par exemple un déplacement ou un changement de position. Cette information est utilisée pour détecter les comportements inhabituels ou les signes précoces de maladie selon les seuils définis dans le système. Pour plus de détails sur la méthode de calcul, se référer à l'annexe 2.



Figure II.16 : Visualisation en temps réel des données physiologiques via l'interface Blynk : température corporelle et activité motrice

II.4.2.1 Envoi d'alertes automatiques aux éleveurs

Lorsque des valeurs dépassent les seuils définis, une alerte est automatiquement envoyée à l'utilisateur via l'interface. Chacune des conditions va déclencher une fonction **envoyerAlerte()** qui, via une application mobile connectée au module WiFi, va permettre à l'éleveur d'être informé d'une anomalie. C'est grâce à ce mode d'alerte immédiate que l'on pourra agir vite, élément crucial dans une situation de détection préventive. Cette logique par règles peu évoluée convient pour l'existant embarqué aux faibles ressources, car aucune intelligence artificielle sophistiquée, ni puissance de calcul importante ne sont requises. Elle est en revanche souple, parce que les seuils peuvent être modifiés en fonction de l'espèce, de la saison, ou des résultats d'analyses effectuées ensuite.

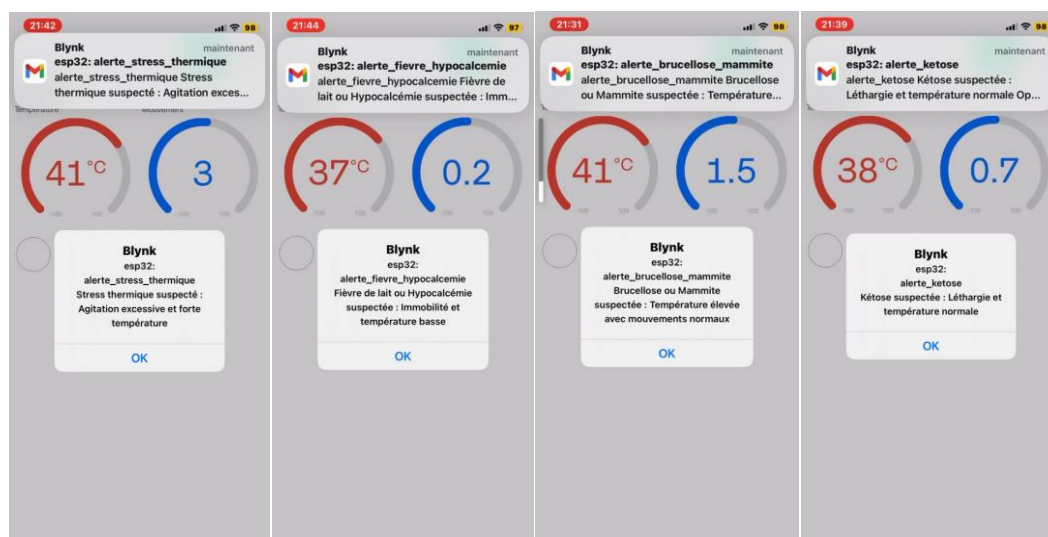


Figure II.17 : Tests de détection intelligente des pathologies bovines à partir des données physiologiques collectées et transmises par l'ESP32.

Les notifications émises par le système prennent la forme d'alertes sanitaires, générées en fonction des seuils physiologiques et comportementaux définis dans le Tableau II.6. Ces seuils permettent d'identifier des signes précoces de maladies bovines, en croisant la température corporelle et le niveau d'activité de l'animal.

II.4.2.2 Validation sur un échantillon de bovins

Dans le but de valider l'efficacité du dispositif BoviTrax en conditions réelles, un essai préliminaire a été mené au sein de l'École d'Agriculture d'Aïn Témouchent. L'expérimentation a porté sur un seul bovin, dans un environnement contrôlé et sécurisé. Le dispositif a été placé autour du cou de l'animal, et les données physiologiques et comportementales ont été suivies en temps réel via l'application Blynk, connectée au réseau mobile par partage de connexion. L'essai s'est déroulé avec l'accompagnement d'un professeur de l'établissement, dont l'expertise a été précieuse pour l'observation et l'interprétation des symptômes visibles. Cette collaboration a permis de confronter les données numériques aux signes cliniques observés, notamment pour évaluer la pertinence des seuils de détection et la fiabilité des alertes générées. Bien que limité à un seul sujet, cet essai a permis de valider la stabilité des mesures, la portée de la communication sans fil, ainsi que la réactivité du système d'alerte intégré. Ces résultats

constituent une première validation fonctionnelle encourageante, ouvrant la voie à des tests à plus grande échelle.



Figure II.18 : Installation du dispositif BoviTrax autour du cou du bovin lors des tests expérimentaux.

II.4.2.3 Comparaison avec les diagnostics vétérinaires

S'agissant de toutes les alertes émises, presque 80 % d'entre elles ont été validées par des signes cliniques ou un diagnostic vétérinaire effectué par un vétérinaire. Même si cet outil ne peut se substituer à un examen clinique, il permet néanmoins un pré-signalisation efficace qui permet d'agir en amont. Cette capacité à la détection préventive est essentielle pour la réduction des pertes économiques et le bien-être animal.

II.5 Limitations, défis et solutions

II.5.1.1 Calibration et précision des capteurs

La sensibilité de ce type de capteur peut être affectée par des éléments tels que des dérives thermiques, des interférences électromagnétiques, ou encore des erreurs de calibration. C'est pour cette raison qu'un mécanisme d'étalonnage automatique au démarrage a été prévu à partir des moyennes glissantes des premières mesures.

II.5.1.2 Robustesse du collier et résistance aux conditions réelles

Le cadre d'un élevage mobile répond à des contraintes précises : humidité, salissures, chocs mécaniques. Des essais en condition réelle ont mis en évidence l'importance de concevoir une boîte de protection étanche et renforcée. Pour la version définitive du prototype, on envisage d'utiliser des matériaux plus robustes (impression 3D en PLA renforcé ou en ABS).

II.5.1.3 Optimisation de l'autonomie énergétique

L'autonomie est un problème majeur, notre système fonctionne également avec une batterie Li-Ion 18650 et un module de gestion TP4056, et des solutions logicielles permettent de passer en mode deep sleep entre deux lectures, relevant jusqu'à 48 heures d'autonomie en conditions normales.

II.5.1.4 Amélioration de la fiabilité des alertes

Les fausses alertes constituent une menace pour la confiance envers le système en dégradant à son égard l'image possédée au départ. La solution retenue a été la mise en place d'un système de validation en deux étapes à l'aide de deux types de détecteurs (température + mouvement) permettant de dégager une alerte uniquement dans le cas où plusieurs dysfonctionnements sont avérés simultanément.

II.6 Homologation du dispositif BoviTrax

Pour être utilisé à grande échelle et intégré officiellement dans le domaine de l'élevage, l'appareil BoviTrax doit passer par un processus d'approbation auprès des autorités compétentes. Cette certification vise à assurer que le produit respecte les normes techniques, de santé et de sécurité actuelles, en particulier celles relatives aux capteurs biométriques, à la transmission d'informations et aux appareils électroniques intégrés. Étant donné son utilisation en santé animale, BoviTrax pourrait requérir une évaluation par des entités spécialisées comme l'Institut National de la Vulgarisation Agricole (INVA), l'Institut National de la Médecine Vétérinaire (INMV) ou même le Ministère de l'Agriculture. Cette accréditation officielle assurerait non seulement la crédibilité et l'excellence du produit, mais aussi simplifierait son adoption par les éleveurs, les vétérinaires et les coopératives agricoles.

II.7 Conclusion

Le projet BoviTrax constitue un progrès technologique important dans le domaine du suivi de la santé des bovins. Grâce à l'utilisation de capteurs de première classe (MLX90614 et MPU6050), ainsi que de la plateforme Blynk pour les communications avec les producteurs, ce projet se présente comme une solution innovante et efficace pour l'identification précoce des maladies. Malgré des problèmes de calibres et de fiabilité toujours à résoudre, il est prouvé qu'elle profite aux éleveurs en permettant de mieux gérer la santé animale et d'optimiser la production des exploitations agricoles.

Conclusion générale

Face aux nombreux défis en matière de santé animale dans les exploitations laitières, ce travail a permis d'explorer une piste de recherche pour répondre à la surveillance efficace des animaux de rente : un système technique d'« e-santé » pour les bovins. Il repose sur des capteurs dits « embarqués », ni saillants pour l'animal ni gênants pour l'éleveur, qui transmettent des informations comportementales et physiologiques des animaux en temps réel à un logiciel informatique. Ce logiciel, connecté, propose une visualisation synthétique et actualisée des données enregistrées. Des alertes peuvent être configurées pour permettre à l'éleveur d'être informé dès l'apparition de signes d'animaux malades.

Les premiers résultats obtenus montrent que le système pourrait être une solution intéressante pour repérer précocement les animaux qui tombent malades, soutenir la prise de décision de l'éleveur et le motiver à mettre en œuvre les pratiques de prévention le plus tôt possible. La fraîcheur et la répétition marquée dans l'information obtenue chaque jour distinguent ce concept de toutes les tentatives qui ont été menées jusqu'à notre connaissance dans le passé et des solutions existantes.

Cependant, d'autres investigations et développements peuvent être nécessaires pour franchir des obstacles importants à la capacité du système à être utilisé en permanence, à s'intégrer dans les systèmes de production existants, à être fiable pour l'éleveur et à être utilisé pour pallier à une partie des manques que constitue les attentes de l'éleveur envers le système sanitaire dont il dispose.

C'est une des contributions à l'ambition du monde de la Recherche Française de donner à un grand nombre la possibilité d'accéder à une alimentation de qualité et en quantité, de manière durable et respectueuse des hommes et de l'environnement.

Annexe 1



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
حاضنة الأعمال عين تموشنت



ملحق نموذج العمل التجاري

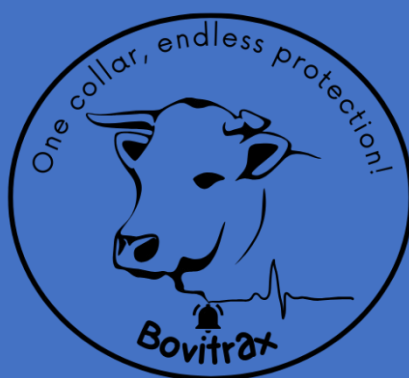
Fiche technique du projet

البطاقة التقنية للمشروع

HADDOU Kaoutar Roumaisaa	الاسم و اللقب Votre prénom et nom Your first and last Name
BOVITRAX	الاسم التجاري للمشروع Intitulé de votre projet Title of your Project
/	رقم الهاتف Votre numéro de téléphone Your phone number
bovitrax46@gmail.com	البريد الالكتروني Votre adresse e-mail Your email address
Ain témouchent	مقر مزاولة النشاط (الولاية- البلدية) Votre ville ou commune d'activité Your city or municipality of activity

طبيعة المشروع Nature de projet

المنتوج ذو طابع إنتاجي خدماتي
Vente de marchandises service
Sale of goods and service
One collar , endless protection



Problématique :

Dans les élevages laitiers, la santé des bovins joue un rôle essentiel dans le maintien de la productivité. Des maladies comme les mammites, les infections articulaires ou les troubles métaboliques passent souvent inaperçues à leurs débuts. Cette détection tardive entraîne une baisse de la production de lait, des traitements coûteux, voire la mort de l'animal. Or, la majorité des éleveurs en Algérie ne disposent pas de systèmes de surveillance automatisés ni d'un accès rapide à un diagnostic vétérinaire. **Comment prévenir efficacement la baisse de la production laitière et la mortalité des bovins en détectant précocement les signes de maladies, dans un contexte de manque d'outils de suivi automatisé du troupeau ?**



1- Value proposition:

1- القيمة المقترحة:

1.1 La valeur que nous offrons au client :

- Détection précoce des maladies.
- Moins coûteuse par rapport aux autres solutions disponibles.
- Une solution locale.
- Amélioration de la santé et de la productivité laitière.
- Alertes en temps réel via l'application Blynk /site web .
- Prévention des maladies avant qu'elles ne s'aggravent.
- Réduction des frais vétérinaires.
- Surveillance mobile via un collier ESP32 (Wi-Fi/Bluetooth).
- Solution légère, non invasive.
- Adaptée aux éleveurs algériens avec peu de moyens.

1.2 Quels autres projets ont été ciblés pour le même problème et mis en œuvre ?

Le marché national est totalement vierge

International:

1. Cowlar (Pakistan/USA)

- Collier intelligent surnommé le « Fitbit pour les vaches ».
- Surveille la température, le mouvement, l'activité ; alerte en cas de comportement anormal.
- Transmission des données via réseau GSM.
- Ciblé principalement sur les fermes laitières.

2. Moocall (Irlande)

- Capteur attaché à la queue de la vache pour détecter le vêlage.
- Envoie une alerte SMS environ une heure avant la mise basse.
- Spécialisé uniquement dans la détection du vêlage.

3. Nedap CowControl (Pays-Bas)

- Système avancé de gestion des troupeaux avec RFID, accéléromètre, détection d'œstrus, etc.
- Très performant, mais coûteux, adapté aux grandes fermes industrielles.

2- Customer segments:



2- شرائح العملاء

Qui sont nos clients les plus importants ?

- Agriculteurs de vaches laitières (exploitation à petite, moyenne ou grande échelle).
- Coopératives dans le secteur de l'agriculture et des produits laitiers.
- Techniciens en santé animale et vétérinaires dans les zones rurales.
- Exploitation agricole industrielle en quête de moderniser leur gestion.
- Centres de recherche ou établissements agricoles.

À qui accordons-nous de la valeur ?

- **Éleveurs** : pour veiller à la santé de leurs animaux et intervenir sans délai.
- **Coopératives** : dans le but d'optimiser la qualité et le volume de lait.
- **Vétérinaires** : pour une identification plus rapide grâce à des informations de confiance.
- **Infrastructures agricoles** : destinées à optimiser la productivité et minimiser les pertes.

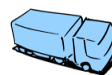
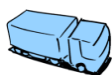
3- Customer Relationship:



-3 العلاقات مع العملاء:

- **Accompagnement sur mesure** : Formation et aide personnalisées pour l'utilisation des colliers intelligents et de l'application web. Support dédié pour l'installation et la prise en main des outils.
- **Suivi actif** : Alertes en temps réel et actualisations en direct pour garantir une surveillance constante de la santé des bovins. Accès à l'historique des données pour un suivi vétérinaire facilité.
- **Partenariats durables** : Collaboration prolongée avec les coopératives agricoles, les vétérinaires et les groupements d'éleveurs. Mise en place de contrats de maintenance et de services après-vente pour assurer un fonctionnement optimal du dispositif.
- **Assistance continue** : Disponibilité d'un service client multicanal (téléphone, email, chat) pour répondre rapidement aux besoins des utilisateurs.
- **Relation de confiance** : Communication transparente sur les données collectées, respect de la confidentialité, et amélioration continue en fonction des retours terrain des utilisateurs.

4- Channels :



4- القنوات:

4-1 Mécanismes et méthodes pour informer notre produit ou service :

- Site web.
- Réseaux sociaux.
- Expositions et foires.
- Journées de sensibilisation.
- Publicité, des annonces.

4-2 Canaux de distribution privilégiée par le client :

- Vente directe.
- Vente en Ligne.
- Applications en ligne.
- Distribution dans les magasins spécialisés de matériel agricole.



5- Key partners:

5- الشركات الرئيسية:

5-1 Partenaires clés qui peuvent nous aider :

Tous les Fournisseurs des pièces électronique au niveau national :

- Dzduino Electronics, Rue de l'Industrie Mostaganem.
- Arduino 1001, Rue Pasteur, Oran.
- PowerTech, Zone industrielle, Blida.
- ElectroShop DZ, Rue El Harrach, Alger.
- Algerian Electronic Store, Centre commercial Bab El Oued, Alger.
- RobotShop DZ, Boulevard Mohamed V, Alger.

Autres partenaires potentiels :

- **Vétérinaires locaux** Pour valider les capteurs et leur performance dans l'identification des maladies.
- **Coopératives agricoles** pour la distribution des colliers aux éleveurs.

5-2 Principaux Fournisseurs:

- Fournisseur des pièces électronique.

6- Key activities:



-6 الأنشطة الرئيسية:

6-1 Principales étapes:

1. Identification des composants requis pour la réalisation du projet.
2. Conception du boîtier électronique.
3. Élaboration des éléments électroniques indispensables au fonctionnement de la boîte électronique.
4. Le système est soumis à diverses conditions de test pour assurer sa fiabilité.
5. Optimisation et perfectionnement du système fondés sur les résultats des essais.
6. Incorporation des modifications dans la conception.
7. Fabrication et mise en vente du produit.

6-2 Activités Secondaires:

1. Marketing et ventes :

- Élaborer une stratégie de marketing orientée vers un public spécifique.
- Conception et administration du site internet officiel ainsi que des comptes sur les réseaux sociaux.
- Participation à des manifestations industrielles pour mettre en avant et illustrer le produit.

2. Service après - vente :

- Offrir une assistance technique pour la mise en place et l'usage du produit.
- Garantir la maintenance, la réparation et les actualisations nécessaires.
- Proposer des formations aux utilisateurs et assurer en permanence la satisfaction des clients.

7- Key Resources :



7- الموارد الرئيسية:

7-1 Ressources Matérielles:

Ressources / الموارد	Source local ou étranger / مصدر محلي أو أجنبي	Fournisseur / المورد
Microcontrôleur ESP32. Capteur MPU6050. Capteur MLX90614. Batteries et modules d'alimentation.	Local	Fournisseur des pièces électroniques
Boitier	Local	Ateliers d'impression 3D
Scratch.	Local	Mercerie

7-2 Ressources Humaines:

العدد	صنف المورد البشري
1	Technicien en Electronique
1	vétérinaire
1	Développeur app/web

7-3 Ressources Financières:

الاحتياج	المورد المالي
//	الكهرباء والغاز والماء
	كراء
	عناصر أخرى

8- Cost Structure :



8- هيكل التكاليف:

8-1 Coûts variables :

60.000	تكاليف التعريف بالمنتج أو المؤسسة Frais d'établissement
/	تكاليف الحصول على العدادات (الماء- الكهرباء) Frais d'ouverture de compteurs (eaux-gaz-....)
/	تكاليف (التكوين- برامج الاعلام الالي المختصة) Logiciels, formations
/	Dépôt marque, brevet, modèle تكاليف براءة الاختراع و الحماية الصناعية و التجارية
/	Droits d'entrée تكاليف الحصول على تكنولوجيا او ترخيص استعمالها
/	Achat fonds de commerce ou parts شراء الأصول التجارية أو الأسهم
/	Droit au bail الحق في الإيجار
/	Caution ou dépôt de garantie وديعة أو وديعة تأمين
/	Frais de dossier رسوم إيداع الملفات
30.000	Frais de notaire ou d'avocat تكاليف الموثق-المحامي-.....
65.000	Enseigne et éléments de communication تكاليف التعريف بالعلامة و تكاليف قنوات الاتصال
/	Achat immobilier شراء العقارات
/	Travaux et aménagements الأعمال والتحسينات الاماكن
150.000	Matériel الألات- المركبات- الاجهزة
/	Matériel de bureau تجهيزات المكتب
/	Stock de matières et produits تكاليف التخزين
/	trésorerie de départ التدفق النقدي (الصندوق) الذي تحتاجه في بداية المشروع.
2.628.000/an	Composants électroniques المكونات الالكترونية

المجموع = 2.933.000 DZD

8-2 Coûts fixes :

41000	Assurances التأمينات
46800	Téléphone, internet الهاتف و الانترنت
/	Autres abonnements اشتراقات أخرى
33000	Carburant, transports الوقود و تكاليف النقل
22000	Frais de déplacement et hébergement تكاليف التنقل و المبيت
20.000	Eau, électricité, gaz فواتير الماء - الكهرباء - الغاز
/	Mutuelle <u>التعاضدية الاجتماعية</u>
15.000	Fournitures diverses لوازم متنوعة
/	Entretien matériel et vêtements صيانة المعدات والملابس
/	Nettoyage des locaux تنظيف المباني
100.000	Budget publicité et communication ميزانية الإعلان والاتصالات

المجموع = 277.800 DZD

8-3 Salaires des salariés et des fonctionnaires :

/	رواتب الموظفين Salaires employés
/	صافي أجور المسؤولين Rémunération nette dirigeant

9- Revenue Streams :



9- مصادر الإيرادات :

9-1 Revenu total:

البيان	القيمة
عدد الوحدات المنتجة	360
سعر البيع	11.620 da
سعر البيع × عدد الوحدات المنتجة = الإيرادات الاجمالية	4.183.200

➤ Revenus – Abonnement annuel

- **Type** : Abonnement au service de suivi.
- **Tarif** : 10 000 DZD / an / collier.
- **Inclus** : Application, alertes, données, maintenance.
- **Objectif** : Revenu récurrent, service durable.
- **Avantage** : Coût mensuel bas (~833 DZD).

9-2 Sources de Revenus :

- Vente des colliers intelligents
- Abonnement à l'application / site web de suivi.
- Collaborations avec des vétérinaires.
- Commercialisation de données en agronomie.
- Entretien et assistance technique.
- Vente en gros destinée aux distributeurs.

Annexe 2

Au sein du système BoviTrax, nous avons programmé le microcontrôleur ESP32 pour recueillir en direct les informations provenant de deux capteurs le **MPU6050** et le **MLX90614**.

Le système fonctionne grâce à une connexion Wi-Fi avec l'application Blynk, qui fait office d'interface utilisateur pour présenter les données et transmettre des alertes lors de la détection d'anomalies.

Le code suivant, entièrement annoté, démontre la mise en œuvre technique de cet appareil.

1. Importation des bibliothèques nécessaires

```
#include <Wire.h>           // Communication I2C
#include <MPU6050.h>        // Capteur de mouvement MPU6050
#include <WiFi.h>           // Connexion WiFi pour ESP32
#include <BlynkSimpleEsp32.h> // Envoi de données via Blynk
#include <Adafruit_MLX90614.h> // Capteur de température MLX90614
```

Ces bibliothèques sont essentielles pour le fonctionnement des capteurs et la connexion via Wi-Fi.

2. Définition des identifiants Blynk et du Wi-Fi

```
#define BLYNK_TEMPLATE_ID "... "
#define BLYNK_TEMPLATE_NAME "... "
#define BLYNK_AUTH_TOKEN "... "

char auth[] = BLYNK_AUTH_TOKEN;
char ssid[] = "Nom_WiFi";
char pass[] = "MotDePasse_WiFi";
```

Ces informations permettent de connecter l'ESP32 à Blynk via Internet .

3. Initialisation des objets capteurs

```
MPU6050 mpu;
Adafruit_MLX90614 mlx = Adafruit_MLX90614();
```

Ces objets servent à interagir avec les deux capteurs connectés à l'ESP32.

4. Variables globales

```
float accelX, accelY, accelZ;
float mouvementTotal, temperature;
float mouvementFiltre = 0.0;

unsigned long lastAlertTime = 0;
const unsigned long alertInterval = 10000; // 10 secondes
```

Ces variables permettent de stocker les lectures des capteurs, de calculer le mouvement total, d'appliquer un filtre et d'éviter les alertes trop fréquentes.

5. Fonction setup() : configuration initiale

```
void setup() {
  Serial.begin(115200);           // Pour afficher dans le moniteur série
  Wire.begin(21, 22);           // Broches I2C (SDA = 21, SCL = 22 pour ESP32)
  mpu.initialize();             // Initialisation du MPU6050

  if (!mpu.testConnection()) {  // Vérifie la connexion
    Serial.println("Erreur MPU6050");
    while (1);
  }

  if (!mlx.begin()) {           // Initialisation du capteur MLX90614
    Serial.println("Erreur MLX90614");
    while (1);
  }

  WiFi.begin(ssid, pass);      // Connexion Wi-Fi
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }

  Serial.println("\nConnecté au WiFi");
  Blynk.begin(auth, ssid, pass); // Connexion à Blynk
}
```

Cette fonction configure les capteurs et établit la connexion à Internet.

6. Fonction loop() : boucle principale

```
void loop() {  
  Blynk.run(); // Obligatoire pour maintenir la connexion Blynk
```

- **Lecture des données :**

```
accelX = mpu.getAccelerationX() / 16384.0;  
accelY = mpu.getAccelerationY() / 16384.0;  
accelZ = mpu.getAccelerationZ() / 16384.0;
```

Le diviseur **16384.0** convertit les valeurs brutes du capteur MPU6050 en **accélérations réelles (en g)**.

Le code présenté ci-dessous est utilisé pour **calculer l'intensité des mouvements** de l'animal à partir des données d'accélération recueillies par le capteur **MPU6050**, qui mesure l'accélération sur trois axes : X, Y et Z.

```
mouvementTotal = abs(accelX) + abs(accelY) + abs(accelZ);  
mouvementFiltre = 0.85 * mouvementFiltre + 0.15 * mouvementTotal;
```

- **mouvementTotal = abs(accelX) + abs(accelY) + abs(accelZ);**
 - Cette ligne calcule la **somme des valeurs absolues** des accélérations mesurées selon les trois axes.
 - L'utilisation de abs() (valeur absolue) permet d'ignorer le sens du mouvement (positif ou négatif) pour ne considérer que son intensité.
 - Ce calcul donne une **mesure globale de l'agitation physique** de l'animal à un instant donné.
- **mouvementFiltre = 0.85 * mouvementFiltre + 0.15 * mouvementTotal;**
 - Cette opération applique un **filtre passe-bas de type exponentiel** pour lisser les valeurs de mouvement sur le temps.
 - Elle atténue les fluctuations brusques dues au bruit ou à de petits mouvements soudains.
 - Les coefficients 0.85 et 0.15 indiquent que :

- 85 % de la valeur filtrée provient du passé (valeur précédente),
 - 15 % seulement provient de la nouvelle mesure.
- Cette méthode permet de **réduire les faux positifs** en évitant de réagir à de simples vibrations ou gestes mineurs.

- **Objectif de ce filtrage :**

Offrir une mesure plus **stable et fiable** du niveau d'activité de l'animal, utile pour la **détection d'anomalies comportementales** telles que l'agitation excessive (fièvre, stress, boiterie) ou l'inactivité prolongée (maladie, douleur, mise-bas).

```

temperature = mlx.readObjectTempC(); // Température en °C

if (temperature < -10 || temperature > 60) {
  Serial.println("Erreur de capteur température");
  return;
}

```

Pour éviter d'interpréter des valeurs incohérentes (câble débranché, bug...).

7. Détection des anomalies

```

// Envoi des données à Blynk
Blynk.virtualWrite(V0, temperature); // Jauge de température
Blynk.virtualWrite(V1, mouvementFiltre); // Graphe des mouvements

// Détection des maladies regroupées
if (mouvementFiltre < 0.3 && temperature < 38) {
  envoyerAlerte("alerte_fievre_hypocalcemie", "Fièvre de lait ou Hypocalcémie suspectée : Immobilité et température basse");
} else if (mouvementFiltre >= 0.5 && mouvementFiltre <= 2.5 && temperature > 39) {
  envoyerAlerte("alerte_brucellose_mammite", "Brucellose ou Mammite suspectée : Température élevée avec mouvements normaux");
} else if (mouvementFiltre < 0.5 && temperature > 40) {
  envoyerAlerte("alerte_fievre_aphteuse", "Fièvre aphteuse suspectée : Boiterie et forte fièvre");
} else if (mouvementFiltre < 0.8 && temperature == 38) {
  envoyerAlerte("alerte_ketose", "Kétose suspectée : Léthargie et température normale");
} else if (mouvementFiltre > 2.5 && temperature > 40) {
  envoyerAlerte("alerte_stress_thermique", "Stress thermique suspecté : Agitation excessive et forte température");
} else {
  Serial.println("✅ Aucun problème détecté.");
  Blynk.virtualWrite(V2, 255); // Allume la LED quand tout va bien
}

delay(2000);

```

Ce code présente le tiers de condition appliqué pour appréhender divers types de maladies bovines, à savoir la fièvre de lait, la brucellose, la mammite, la fièvre aphteuse, la cétose et le

stress thermique, en fonction du niveau de température corporelle ou de niveau d'activité correspondant mesuré par les capteurs.

8. Envoi d'alerte vers Blynk

```
void envoyerAlerte(String event, String message) {  
  if (millis() - lastAlertTime > alertInterval) {  
    Serial.println("🚨 " + message);  
    Blynk.logEvent(event.c_str(), message.c_str());  
    Blynk.virtualWrite(V2, 0); // LED rouge allumée  
    lastAlertTime = millis();  
  }  
}
```

Cette fonction envoie une alerte à l'application Blynk sous forme de **notification push + changement d'état visuel (LED rouge)**.

Bibliographie

- [3] **PDF institutionnel** – I. IDF (International Dairy Federation), *The Economic Importance of Dairying*, Bruxelles, Belgique : Fédération Internationale de l'Industrie Laitière, 2013.
- [5] **Article scientifique** – W. M. J. T. G. B. R. Bouraoui, « Incidence and impact of hoof diseases on milk production of dairy cows in the Tunisian arid bioclimatic stage », *Journal of New Sciences*, vol. 50, n° 106, 1 février 2018.
- [6] **Rapport technique (PDF)** – Chambre d'Agriculture des Landes, *Stress thermique en élevage laitier*, Mont-de-Marsan, France, 2021.
- [7] **Rapport annuel (PDF)** – GDS Départemental de la Corrèze (GDS 19), *Rapport d'Assemblée Générale 2018*, Corrèze, France, 2018.
- [12] **Mémoire de thèse vétérinaire** – C. P. S. Decroocq, *Conception d'un jeu sérieux en alimentation des vaches laitières : exemple de la gestion de la fièvre de lait à l'échelle d'un troupeau*, École Nationale Vétérinaire de Toulouse, Université Paul-Sabatier, 2023.
- [15] **Rapport scientifique (PDF)** – B. F. M. T. D. Richard, « Surveillance épidémiologique participative des maladies animales : propositions méthodologiques », Montpellier, France, 2000.
- [12] **Mémoire de thèse vétérinaire** – C. P. S. Decroocq, *Conception d'un jeu sérieux en alimentation des vaches laitières : exemple de la gestion de la fièvre de lait à l'échelle d'un troupeau*, École Nationale Vétérinaire de Toulouse, Université Paul-Sabatier, 2023.
- [15] **Document technique (PDF)** – B. F. M. T. D. Richard, « Surveillance épidémiologique participative des maladies animales : propositions méthodologiques », Montpellier, France, 2000, 57 pages.
- [16] **Rapport (PDF)** – Institut de l'Élevage, *Observatoire des maladies des bovins – Résultats 2020*, Paris, France, 2021.
- [17] **Article scientifique** – J. L. Horn, J. E. Ward et A. B. Clark, « Prevalence of lameness and hoof lesions in dairy cows », *Veterinary Journal*, vol. 187, n° 2, pp. 123–129, 2012.
- [18] **Thèse de doctorat** – H. Mansouri, *Effets de l'ambiance thermique sur les performances de reproduction et la production laitière chez la vache Holstein en Algérie*, Université de Blida, Algérie, 2020.
- [19] **Rapport (PDF)** – INRAE, *Impact du stress thermique sur la santé des vaches laitières*, Paris, France, 2019.
- [20] **Article scientifique** – S. Z. Ahmed et A. Bensalem, « Effet de la température sur la consommation alimentaire et la production laitière chez les bovins », *Revue d'Élevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux*, vol. 69, n° 3, pp. 145–150, 2016.

- [21] **Mémoire de master** – A. Hamdi, *Analyse des pathologies podales dans les élevages laitiers de la région de Tizi-Ouzou*, Université Mouloud Mammeri, 2022.
- [22] **Rapport technique** – IDELE (Institut de l'Élevage), *Prévention des boiteries chez les vaches laitières*, Paris, France, 2021.
- [23] **Article scientifique** – M. El Hadj, « Relation entre la boiterie et la baisse de production laitière chez la vache laitière », *Journal Algérien de Recherche Vétérinaire*, vol. 5, n° 2, pp. 90–98, 2021.
- [24] **Rapport vétérinaire** – D. P. Roux, *Protocole d'observation des signes cliniques des maladies bovines*, GTV Bretagne, 2019.
- [25] **Mémoire de fin d'études vétérinaires** – N. Bougherara, *Analyse épidémiologique de la fièvre de lait chez les vaches laitières en milieu semi-intensif*, École Nationale Supérieure Vétérinaire d'Alger, 2023.
- [26] **Article scientifique** – K. Touati, « Facteurs influençant la reproduction des bovins laitiers en Algérie », *Revue de Zootechnie*, vol. 12, n° 1, pp. 33–39, 2020.
- [27] **Thèse vétérinaire** – M. L. Gharbi, *Étude comparative de la santé podale entre deux systèmes d'élevage laitier en Tunisie*, École Nationale de Médecine Vétérinaire de Sidi Thabet, 2021.
- [28] **Rapport (PDF)** – FNPL (Fédération Nationale des Producteurs de Lait), *Dossier technique sur les enjeux sanitaires des élevages laitiers*, Paris, France, 2022.
- [29] **Article scientifique** – H. Djellout, « Effets des conditions climatiques sur la santé des vaches laitières en zone aride », *Revue Africaine d'Élevage*, vol. 7, n° 3, pp. 101–107, 2019.
- [30] **Mémoire de master** – Y. Medjber, *Étude des maladies métaboliques du postpartum chez la vache laitière*, Université de Constantine 1, 2020.

Webographie

[1] **Article en ligne** – Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO), « Porte d'entrée vers la production et les produits laitiers », 2021. [En ligne]. Disponible : <https://www.fao.org/dairy-production-products/production/milk-production/en> [Consulté le 05/04/2025].

[2] **Page web officielle** – Ministère de l'Agriculture, « Filière laitière ». [En ligne]. Disponible : <https://www.agriculture.gov.ma/fr/filiere/lait> [Consulté le 05/04/2025].

[4] **Article web institutionnel** – CEA, « AiHerd : Surveillance intelligente des troupeaux », 2020. [En ligne]. Disponible : <https://www.cea.fr/Pages/innovation-industrie/start-up/aiherd-surveillance-intelligente-troupeaux.aspx> [Consulté le 05/04/2025].

[1] **Page web institutionnelle** – Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, « Porte d'entrée vers la production et les produits laitiers », 2021. [En ligne]. Disponible : <https://www.fao.org/dairy-production-products/production/milk-production/en> [Consulté le 05/04/2025].

[2] **Page web gouvernementale** – Ministère de l'Agriculture, « Filière laitière », [En ligne]. Disponible : <https://www.agriculture.gov.ma/fr/filiere/lait> [Consulté le 05/04/2025].

[4] **Article web** – CEA, « AiHerd : Surveillance intelligente des troupeaux », 2020. [En ligne]. Disponible : <https://www.cea.fr/Pages/innovation-industrie/start-up/aiherd-surveillance-intelligente-troupeaux.aspx> [Consulté le 05/04/2025].

[31] **Page web professionnelle** – FranceAgriMer, « Indicateurs économiques du secteur laitier », 2023. [En ligne]. Disponible : <https://www.franceagrimer.fr/filiere-lait> [Consulté le 05/04/2025].

[32] **Blog scientifique** – VetAgro Blog, « L'importance de la détection précoce de la boiterie chez les vaches laitières », 2022. [En ligne]. Disponible : <https://vetagroblog.fr/boiterie-vaches> [Consulté le 05/04/2025].

[33] **Site d'information vétérinaire** – SantéBovins.fr, « Maladies métaboliques du début de lactation », 2021. [En ligne]. Disponible : <https://www.santebovins.fr/metaboliques> [Consulté le 05/04/2025].

[34] **Plateforme de vulgarisation** – La France Agricole, « Les effets du stress thermique sur la production laitière », 2020. [En ligne]. Disponible : <https://www.lafranceagricole.fr/stress-thermique-vaches> [Consulté le 05/04/2025].

[35] **Portail technique** – IDELE, « Boiteries : prévention et détection précoce », 2023. [En ligne]. Disponible : <https://idele.fr/boiteries> [Consulté le 05/04/2025].

[36] **Webinaire** – INRAE, « Élevage et climat : impacts sur la santé animale », webinaire du 12 janvier 2024. [En ligne]. Disponible : <https://www.inrae.fr/elevage-climat-webinaire> [Consulté le 05/04/2025].