



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

École National Supérieure Agronomique

المدرسة الوطنية العليا للفلاحة

Département : Génie rural

قسم الهندسة الريفية

Spécialité : Agriculture numérique

التخصص : الزراعة الرقمية

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

THEME :

**La détection précoce de la boiterie bovine par
apprentissage automatique
(Random Forest) basée sur des capteurs inertiels (IMU)**

Présenté par :

Soutenu le :

BEDDIAR Selma Hidaya

16/07/2026

Devant le jury composé de :

Président :	Mr. YACHI Abdelouahid	M.C.B (ENSA)
Promoteur :	Mr. ETSOURI Salim	M.C.A (ENSA)
Co-promoteur :	Mr. BOUDHAR Lies	M.C.B (ENSA)
Examineurs :	Mme. FODHIL Fadhela	M.C.B (ENSA)
	Mr. GHOZLANE Mohamed Khalil	M.C.A (ENSA)

Promotion : 2023 – 2026

Résumé : L'élevage bovin occupe une place importante dans le secteur agricole, où la détection précoce de la boiterie représente un enjeu majeur en raison de ses conséquences sur le bien-être animal et les performances zootechniques et économiques des exploitations. La méthode traditionnelle de détection repose principalement sur l'observation visuelle, une approche subjective et peu adaptée à une surveillance continue.

Ce mémoire présente la conception d'un système intelligent de détection précoce de la boiterie bovine basé sur l'Internet des objets (IoT) et le Machine Learning. Le système proposé repose sur un podomètre intelligent fixé à la patte de l'animal et un collier intelligent, tous deux équipés d'une unité de mesure inertielle (IMU). Les données locomotrices sont fusionnées puis traitées afin d'extraire vingt-quatre caractéristiques représentatives pour chacune des douze variables inertielles de la base de données publique CowScreeningDB, conduisant à un vecteur de 288 caractéristiques par enregistrement.

Un modèle de classification Random Forest a été développé pour distinguer automatiquement les vaches saines des vaches boiteuses. Les hyperparamètres du modèle ont été optimisés à l'aide de RandomizedSearchCV. Les résultats expérimentaux obtenus montrent une exactitude de 66,67 %, une précision de 77,27 %, un rappel de 74,63 % et un score F1 de 75,92 %.

Cette étude s'inscrit dans une démarche d'élevage de précision et ouvre la voie au développement d'un système embarqué capable d'assurer une surveillance continue des animaux. À terme, le modèle développé pourra être intégré à l'architecture IoT proposée, reposant sur un Raspberry Pi 5 et une application mobile, afin de fournir aux éleveurs un outil d'aide à la décision favorisant la détection précoce de la boiterie et l'amélioration de la gestion des troupeaux.

Mots-clés : Élevage bovin ; Élevage de précision ; Boiterie bovine ; Surveillance animale ; Détection précoce ; Intelligence artificielle (IA) ; *Machine Learning* ; *Random Forest* ; Internet des objets (IoT).

الملخص : تحتل تربية الأبقار مكانة مهمة في القطاع الزراعي، حيث يمثل الكشف المبكر عن العرج تحديًا رئيسيًا نظرًا لتأثيراته على رفاهية الحيوانات والأداء الإنتاجي والاقتصادي للمزارع. وتعتمد الطريقة التقليدية للكشف عن العرج بشكل أساسي على الملاحظة البصرية، وهي طريقة ذاتية وغير ملائمة للمراقبة المستمرة.

يقدم هذا البحث تصميم نظام ذكي للكشف المبكر عن العرج لدى الأبقار، يعتمد على إنترنت الأشياء (IoT) وتقنيات التعلم الآلي (Machine Learning). يعتمد النظام المقترح على عداد خطوات ذكي مثبت على رجل الحيوان، وطوق ذكي، وكلاهما مزود بوحدة قياس القصور الذاتي (IMU). يتم دمج بيانات الحركة ومعالجتها من أجل استخراج أربع وعشرين خاصية ممثلة لكل واحدة من المتغيرات العطالية الاثني عشر في قاعدة البيانات العمومية CowScreeningDB، مما ينتج عنه متجه مكون من 288 خاصية لكل تسجيل.

تم تطوير نموذج تصنيف باستخدام خوارزمية Random Forest للتمييز تلقائيًا بين الأبقار السليمة والأبقار المصابة بالعرج. وتم تحسين معاملات النموذج باستخدام RandomizedSearchCV. أظهرت النتائج التجريبية دقة عامة بلغت 66.67%، ودقة تصنيف بلغت 77.27%، واسترجاعًا بلغ 74.63%، ودرجة F1 بلغت 75.92%.

تندرج هذه الدراسة ضمن نهج الزراعة الدقيقة، وتمهّد لتطوير نظام مدمج قادر على ضمان المراقبة المستمرة للحيوانات. وعلى المدى البعيد، يمكن دمج النموذج المطوّر ضمن البنية المقترحة لإنترنت الأشياء، التي تعتمد على Raspberry Pi 5 وتطبيق للهواتف المحمولة، بهدف توفير أداة مساعدة على اتخاذ القرار للمربين، تساهم في الكشف المبكر عن العرج وتحسين إدارة القطعان.

الكلمات المفتاحية: تربية الأبقار؛ التربية الدقيقة للحيوانات؛ عرج الأبقار؛ المراقبة الحيوانية؛ الكشف المبكر؛ الذكاء الاصطناعي؛ التعلم الآلي؛ Random Forest؛ إنترنت الأشياء.

Abstract : Cattle farming plays an important role in the agricultural sector, where early detection of lameness represents a major challenge due to its consequences on animal welfare and the zootechnical and economic performance of farms. The traditional method of detection relies mainly on visual observation, a subjective approach that is not well suited to continuous monitoring.

This dissertation presents the design of an intelligent system for the early detection of bovine lameness based on the Internet of Things (IoT) and Machine Learning. The proposed system consists of a smart pedometer attached to the animal's leg and a smart collar, both equipped with an Inertial Measurement Unit (IMU). The locomotion data are merged and processed to extract twenty-four representative features from each of the twelve inertial variables of the public CowScreeningDB dataset, resulting in a 288-feature vector for each recording.

A Random Forest classification model was developed to automatically distinguish between healthy and lame cows. The model hyperparameters were optimized using RandomizedSearchCV. The experimental results achieved an accuracy of 66.67%, a precision of 77.27%, a recall of 74.63%, and an F1-score of 75.92%.

This study is part of a precision livestock farming approach and paves the way for the development of an embedded system capable of ensuring continuous animal monitoring. In the future, the developed model could be integrated into the proposed IoT architecture, based on a Raspberry Pi 5 and a mobile application, in order to provide farmers with a decision-support tool that promotes the early detection of lameness and improves herd management.

Keywords: Cattle farming; Precision livestock farming; Bovine lameness; Animal monitoring; Early detection; Artificial Intelligence (AI); Machine Learning; Random Forest; Internet of Things (IoT).

Table des matières

Introduction générale.....	1
Étude bibliographique et état de l'art	4
Introduction du chapitre	4
1. Élevage bovin en Algérie et ses enjeux	5
1.1 Importance économique et sociale	6
1.2 Rôle dans la sécurité alimentaire	6
1.3 Valorisation des sous-produits et équilibre agro-écologique	8
1.4 Gestion et hétérogénéité du cheptel bovin.....	10
2. La boiterie bovine : un enjeu zootechnique majeur	11
2.1 Définition de la boiterie	11
2.2 Anatomie fonctionnelle de l'onglon bovin	12
2.2.1 Structure de l'onglon bovin.....	12
2.2.2 Rôle biomécanique de l'onglon.....	14
2.2.3 Lien avec la boiterie : zones sensibles et pathologies	14
2.3 Étiologie multifactorielle de la boiterie bovine.....	14
2.3.1 Causes infectieuses (Lésions cutanées et interdigitales)	15
2.3.2 Causes non infectieuses (Lésions de la corne - CHDL).....	16
2.3.3 Facteurs de risque environnementaux et de gestion	17
2.3.4 Facteurs propres à l'animal (Hôte)	17
2.3.5 Facteurs nutritionnels.....	18
2.4 Conséquences de la boiterie bovine sur l'animal et le bien-être	18
2.4.1 Réponses physiologiques : douleur et stress chronique	19
2.4.2 Modifications comportementales et emploi du temps.....	19
2.4.3 Impacts sur l'état général et le système immunitaire.....	20
2.4.4 Conséquences indirectes et fin de vie productive	21
2.4.5 Bien-être et exigences de l'élevage durable	21
2.4.6 Impact sur la production laitière et la croissance.....	22
2.4.7 Répercussions sur les performances de reproduction	23
2.4.8 Risque de réforme précoce et de mortalité.....	23
2.4.9 Incidence et prévalence	23

2.5	Conséquences économiques liées à la boiterie	24
2.6	Le scoring visuel et ses limites critiques	25
2.6.1	Principe et application du Locomotion Score (LS)	25
2.6.2	Échelles d'évaluation et critères de classification	26
2.6.3	Importance et limites de la méthode de référence	29
2.6.4	Analyse critique : sous-estimation et impact sanitaire	29
2.7	Traitement et enjeux de durabilité	30
2.7.1	Le parage correctif et fonctionnel	30
2.7.2	Risques liés aux substances chimiques (Pédiluves)	30
2.7.3	Les antibiotiques et leurs effets	30
2.7.4	L'approche « One Health »	31
3.	L'élevage de précision (PLF) et les techniques de détection automatisée	34
3.1	Approches basées sur la vision artificielle	35
3.1.1	Principe des méthodes de vision artificielle	35
3.1.2	Modèles d'intelligence artificielle pour la détection de la boiterie bovine	36
3.1.3	Limites techniques de la vision artificielle pour la surveillance animale	42
3.2	Approches basées sur les capteurs portables (Unités de Mesure Inertielle - IMU)...	43
3.2.1	Nature des données mesurées	45
3.2.2	Résolution temporelle et Signaux dérivés	46
3.2.3	Méthodes d'analyse et modélisation	47
3.2.4	Stratégies d'Entraînement et de Validation	50
3.2.5	Avantages des IMU en élevage de précision	50
3.2.6	Limites techniques des systèmes basés sur les capteurs portables	52
3.3	Extraction des indicateurs biomécaniques	53
3.3.1	Indicateurs comportementaux et budget temps	53
3.3.2	Analyse cinématique et traits de démarche	54
3.4	Analyse critique de la disponibilité des données	55
3.4.1	État de la disponibilité des données de vision par ordinateur	55
3.4.2	Disponibilité des données issues des capteurs inertiels (IMU)	56
3.5	Logique de décision et classification	56
3.5.1	Lissage temporel	57
3.6	Stratégies d'entraînement et généralisation	58
3.6.1	Data augmentation	58

3.6.2	Déséquilibre des classes	58
3.6.3	<i>Transfer learning</i>	59
3.6.4	Méthodes de validation	59
3.6.5	Limites de généralisation.....	59
4.	Impact et durabilité des technologies de détection de la boiterie bovine.....	60
4.1	Amélioration du bien-être animal et précocité du diagnostic	61
4.2	Performance économique et efficacité opérationnelle.....	61
4.3	Durabilité environnementale et réduction des intrants chimiques.....	62
5.	Plateformes embarquées (Edge AI)	62
5.1	Justification scientifique et paradigme du calcul en périphérie.....	63
5.2	Architecture Edge et Optimisation	63
5.2.1	Architecture Edge : Dispositifs et Traitement Local	64
5.2.2	Contraintes matérielles et environnementales	64
5.2.3	Optimisation des modèles : Quantification et Compression	65
5.3	Architecture Système End-to-End	66
	Conclusion bibliographique.....	69
	Matériels et méthodes.....	71
	Introduction du chapitre	71
	Partie I : Réalisation du système d'acquisition des données.....	72
1	Analyse des besoins du système.....	72
1.1	Contraintes du milieu d'élevage.....	72
1.2	Besoins fonctionnels	73
1.3	Besoins techniques	74
1.4	Contraintes économiques et pratiques	75
1.5	Objectifs retenus pour la conception	75
2	Architecture matérielle du système proposé	77
2.1	Présentation générale du système	77
2.2	Architecture de communication.....	77
2.2.1	Premier niveau — Acquisition locale	77
2.2.2	Deuxième niveau — Transmission	78
2.2.3	Troisième niveau — Traitement Edge AI et restitution	78
3	Réalisation matérielle du podomètre intelligent.....	79
3.1	Choix des composants matériels.....	79

3.1.1	Microcontrôleur ESP32-C3 Mini	79
3.1.2	Capteur inertiel IMU (MPU-9250).....	80
3.1.3	Batterie rechargeable et le Convertisseur DC-DC Boost Step Up	85
3.1.4	Boîtier de protection.....	86
3.2	Schéma de câblage.....	87
3.3	Développement du programme embarqué sous Arduino IDE.....	88
3.4	Conception mécanique et fixation sur le membre	88
3.5	Prototype final du podomètre	89
4	Réalisation matérielle du collier intelligent	90
4.1	Choix des composants matériels.....	90
4.1.1	Microcontrôleur ESP32-S3	90
4.1.2	Capteur inertiel MPU-9250	91
4.1.3	Batterie rechargeable et le Convertisseur DC-DC Boost Step Up	91
4.1.4	Boîtier de protection.....	92
4.2	Schéma de câblage.....	92
4.3	Développement du programme embarqué sous Arduino IDE.....	93
4.4	Intégration mécanique du collier	94
4.5	Prototype final du collier	94
5	Étude et choix de la technologie de communication.....	94
5.1	Wi-Fi.....	95
5.2	Bluetooth Low Energy (BLE)	95
5.3	LoRa	96
5.4	Choix retenu	96
6	Développement logiciel embarqué.....	96
6.1	Développement logiciel embarqué du podomètre	96
6.1.1	Acquisition des données IMU	97
6.1.2	Prétraitement local.....	97
6.1.3	Transmission vers le collier.....	97
6.1.4	Organigramme du programme	98
6.2	Développement logiciel embarqué du collier intelligent.....	98
6.2.1	Réception des données du podomètre	99
6.2.2	Acquisition des données locales.....	99
6.2.3	Fusion et prétraitement des données	99

6.2.4	Exécution du modèle <i>Random Forest</i> et transmission des résultats.....	100
6.2.5	Organigramme du programme	100
7	Infrastructure énergétique du système.....	101
7.1	Alimentation solaire des équipements fixes	101
7.2	Intérêt de l'alimentation photovoltaïque pour le système proposé	102
8	Mise en œuvre de la plateforme Edge AI.....	102
8.1	Choix de l'ESP32-S3 comme plateforme Edge AI	102
8.2	Architecture Edge AI proposée.....	103
8.3	Réception des données du podomètre	103
8.4	Fusion et prétraitement local	104
8.5	Exécution du modèle et génération des alertes.....	104
9	Gestion des alertes et transmission des résultats par le Raspberry Pi 5	105
Partie II : Réalisation du système intelligent d'aide à la décision		106
10	Environnement de développement	106
10.1	Langage Python	106
10.2	Bibliothèques utilisées	106
10.2.1	La bibliothèque Pandas	107
10.2.2	La bibliothèque NumPy	107
10.2.3	La bibliothèque Scikit-Learn.....	107
11	Base de données et préparation des données.....	108
11.1	Présentation de la base CowScreeningDB.....	108
11.1.1	Nature et Objectif de la Base de Données.....	108
11.1.2	Collecte des Données et Sujets :	108
11.1.3	Matériel et Capteurs Utilisés	109
11.1.4	Structure des Signaux et Variables	109
11.1.5	Classification et Étiquetage (Ground Truth)	109
11.2	Analyse biomécanique de la locomotion bovine.....	111
11.2.1	Similitude du schéma locomoteur chez les bovins.....	111
11.2.2	Différences fonctionnelles entre les membres antérieurs et postérieurs	112
11.2.3	Influence de la boiterie sur la locomotion.....	113
11.2.4	Conséquences pour le choix du membre instrumenté.....	113
11.3	Choix du membre étudié.....	113
11.4	Chargement des données	114

11.5	Création des étiquettes (labels).....	115
11.6	Nettoyage des données	116
11.7	Sélection des variables IMU	117
11.8	Division Train / Test	118
11.9	Prétraitement des signaux inertiels	119
11.10	Extraction des caractéristiques.....	120
11.11	Construction de la matrice d'apprentissage.....	121
12	Fusion des données multi-capteurs	122
12.1	Transmission des données entre le podomètre et le collier intelligent.....	122
12.2	Principe de la fusion des données	122
12.3	Intérêt de la fusion multi-capteurs pour la détection de la boiterie.....	122
12.4	Flux global de fusion et de traitement des données	123
12.5	Limites de l'expérimentation réalisée.....	123
13	Conception du modèle Random Forest	124
13.1	Principe du modèle Random Forest	124
13.2	Optimisation des hyperparamètres du modèle Random Forest	125
13.3	Entraînement du modèle	127
14	Mise en œuvre du système de prise de décision.....	127
14.1	Chaîne globale de traitement.....	128
14.2	Détection automatique de la boiterie	129
14.3	Génération des alertes	129
14.4	Notification à l'éleveur	130
	Conclusion du chapitre.....	131
	Résultats et discussion.....	132
	Introduction du chapitre	132
1.	Validation du système embarqué et acquisition des données	132
2.	Configuration expérimentale.....	133
3.	Résultats du modèle Random Forest.....	134
3.1	Répartition du jeu de données	135
3.2	Performances globales du modèle	135
3.3	Matrice de confusion	136
3.4	Courbe ROC	138
3.5	Exactitude par classe	138

4.	Analyse des performances du modèle	139
4.1	Influence des caractéristiques extraites	139
4.2	Influence des douze variables inertielles	140
4.3	Influence de la séparation des données par vache	140
4.4	Influence du déséquilibre des classes	141
4.5	Influence du choix du membre postérieur droit (Rear Right)	141
4.6	Synthèse de l'analyse.....	142
5.	Discussion	142
6.	Limites de l'étude.....	144
	Conclusion du chapitre.....	145
	Conclusion générale	147
	Perspectives	148
	RÉFÉRENCES.....	150