

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI, TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT AUTOMATIQUE

THESE DE DOCTORAT

en **Automatique**

présentée par :

AOUGHLIS Samir

Ingénieur UMMTO
Magister UMMTO

Surveillance et traçabilité d'animaux à l'aide d'un Réseau RFID passif à faible coût

Thèse soutenue le : / 03 / 2022 devant le jury d'examen composé de :

DIAF Moussa
LAGHROUCHE Mourad
DAOUI Mehemed
KOUADRI Abdelmalek
LAGHA Mohand
RAHMOUNE Fayçal

Professeur, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou
Professeur, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou
Professeur, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou
Professeur, Université M'Hamed Bougara, Boumerdès
Professeur, Université Saâd Dahlab, Blida
Professeur, Université M'Hamed Bougara, Boumerdès

Président
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur

Avant-propos

Tout d'abord, je tiens à remercier Dieu, le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force, le courage et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Le présent travail a été réalisé au département Automatique, Faculté Génie Electrique et Informatique, Université Mouloud MAMMERI, Tizi-Ouzou.

Je tiens à remercier vivement Monsieur LAGROUCHE MOURAD, professeur à l'UMMTO pour m'avoir proposé ce thème, suivi et encouragé. Qu'il trouve ici mes plus vifs remerciements pour toute la confiance qu'il m'a accordée pendant ces longues années de thèse et pour le temps qu'il m'a consacré, la patience dont il a fait preuve et les conseils qu'il m'a prodigués. Sa rigueur intellectuelle m'a aidé à finaliser ce travail.

Je remercie aussi vivement Monsieur DIAF Moussa, professeur à l'UMMTO, pour avoir accepté de juger ce travail et pour l'honneur qu'il me fait de présider le jury de cette thèse. Je ne manquerai pas de le remercier pour tous ses conseils et ses encouragements durant les longues années de ce travail.

Je voudrai exprimer ma gratitude à Monsieur DAOUI Mehemed, Professeur à l'UMMTO, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de faire partie du jury de cette thèse.

Mes remerciements vont également à Monsieur KOUADRI Abdelmalek, Professeur à l'Université de Boumerdès, pour m'avoir fait honneur en acceptant de faire partie du jury de cette thèse.

Mes remerciements s'adressent à Monsieur RAHMOUNE Fayçal, Professeur à l'Université de Boumerdès, pour m'avoir fait honneur en acceptant de faire partie du jury de cette thèse.

Je tiens à remercier chaleureusement, Monsieur LAGHA Mohand, Professeur à l'université de Blida qui a accepté de faire partie du Jury de cette thèse.

Je ne manquerais pas de remercier aussi tous les enseignants qui ont contribué à ma formation et leur tête, ma propre maman, AOUGHLIS Farida, Maître de Conférences classe A au département d'Informatique ainsi que Monsieur LALAM Mustapha, professeur au sein de ce même département, sans oublier le professeur BENSIDHOM Tahar.

A tous ceux et celles qui m'ont aidé et encouragé de près ou de loin dans la réalisation de ce travail, je dédie cette thèse.

Je dédie aussi cette thèse à la mémoire de mes enseignants feu DEMRI Mohamed, OULARBI Omar, HAMDANI Chabane, TAYEB Mohand-Larbi rappelés par Dieu à leur dernière demeure. Paix à leurs âmes.

Résumé

La demande en produits d'origine animale et la baisse du nombre d'éleveurs d'animaux dans le monde augmente de façon continue. Cette diminution se fait en parallèle avec une augmentation continue de la taille des élevages sans augmentation de la main d'œuvre associée, ce qui fait que le bénéfice dégagé par l'animal est si faible que les éleveurs sont contraints d'augmenter le nombre d'animaux présents pour pouvoir bénéficier d'un revenu décent. En conséquence, le temps disponible par animal est plus limité, rendant difficile une surveillance de la santé et une gestion individuelles correctes des animaux. Le nombre croissant de technologies qui peuvent être mises en œuvre en élevage offre la possibilité de mesurer avec une précision remarquable des facettes de plus en plus nombreuses du fonctionnement comportement des animaux. Les systèmes de localisation sont devenus récemment importants pour la surveillance de la santé des vaches. Cependant, les principales limites de ces systèmes résident dans le manque d'informations sur les activités des vaches telles que l'alimentation et la boisson dans la zone surveillée. Pour dépasser ces limites, nous avons développé un capteur auriculaire non invasif basé sur une combinaison d'un système d'identification par radiofréquence à faible coût avec une unité de mesure inertielle. Avec cette procédure, les vaches sont localisées et leurs comportements alimentaires sont classés. La localisation est réalisée au moyen d'un accéléromètre et d'un gyroscope permettant l'estimation de trajectoire grâce à l'estime et à la méthode de fusion de capteurs. Cependant, des problèmes liés à l'instabilité émergent et sont résolus avec l'algorithme du filtre à particules. Afin de surveiller la position debout et les comportements alimentaires, la technique de l'arbre de décision est adoptée pour les filtrer. Les résultats obtenus ont prouvé que l'algorithme a atteint des taux de classification et de localisation élevés.

Mots clés: Réseaux de Capteurs sans Fil ; Vache Laitière; Identification par Radio Fréquence, RFID ; Unité de Mesure Inertielle, IMU; Filtre à Particules; Position de Référence ; Arbre de Décision; Comportement Alimentaire.

Abstract

The demand for animal products and the decline in the number of animal farmers worldwide is steadily increasing. This decrease is in parallel with a continuous increase in the size of farms without an increase in the associated labour force, which makes the profit per animal so low that farmers are forced to increase the number of animals present in order to have a decent income. Consequently, the time available per animal is more limited, making it difficult to monitor the health and correct management of animals. The growing number of technologies that can be implemented in livestock provides the opportunity to measure with remarkable precision the increasing facets of operation. Recently, tracking systems have become important in cow health monitoring. However, the main limitations of these systems are the lack of information on cow activities such as feeding and drinking in the monitored area. To overcome these limits, we have developed a non-invasive trial sensor based on a combination of a low-cost radio frequency identification system with an inertial measurement unit. With this procedure, the cows are located and their feeding behaviors are classified. The localization is carried out by means of an accelerometer and a gyroscope allowing the trajectory estimation thanks to the dead reckoning and the sensor fusion method. However, issues related to instability emerge and are resolved with the particulate filter algorithm. In order to monitor the standing position and eating behaviors, the decision tree technique is adopted to filter them. The results obtained proved that the algorithm achieved high classification and localization rates.

Keywords: Wireless Sensor Networks; WSN; Dairy Cow; Radio Frequency Identification; RFID; Inertial Measurement Unit; IMU; Particle Filter; Reference Position; Decision Tree; Feeding Behaviour.

Sommaire

Liste des figures	7
Liste des tableaux	9
Introduction générale	10

Chapitre I : L'élevage de précision

I.1 Introduction.....	12
I.2 Historique de l'élevage de précision.....	12
I.3 Elevage de précision	14
I.3.1 Définitions de l'élevage de précision.....	14
I.3.2 Concepts généraux de l'élevage de précision.....	15
I.4 Exemples d'élevages de précision	16
I.5 Relations Homme/animal	16
I.6 Diversification du capteur électronique en élevage	17
I.7 Dispositifs électroniques.....	17
I.7.1 L'identification	18
I.7.2 Surveillance du comportement (activité et alimentation).....	19
I.7.3 La localisation des vaches	19
I.7.4 Surveillance de la santé animale.....	24
I.7.5 La détection du vêlage.....	24
I.7.6 La détection de chaleurs	28
I.7.7 La surveillance de la morphologie	28
I.8 Limites des outils développés pour l'élevage de précision.....	29
I.8.1 Identifier le niveau d'information	29
I.8.2 Fiabilité du système	30
I.9 Conclusion	30

Chapitre II : Le bien-être animal

II.1 Introduction.....	32
II.2 Le bien-être animal	32
II.2.1 Définitions.....	33
II.2.2 Les indicateurs du bien-être animal	34
II.2.3 Evaluer le bien-être animal	39
II.3 Corrélation entre variables issues des systèmes de localisation et les troubles sanitaire ou reproductifs des vaches laitières.....	42
II.3.1 Corrélations existantes entre les variables issues des systèmes de localisation et les troubles sanitaire.	42
II.3.2 Corrélation entre variable issu des systèmes de localisation et les troubles reproductifs.....	44
II.4 Méthodes d'apprentissages automatiques utilisées dans les systèmes de détection du comportement des vaches laitières.	47
II.5 Conclusion.....	49

Chapitre III : Le système de gestion de l'élevage de précision proposé

III.1 Introduction	50
III.2 Comportements des vaches laitières, indicateurs importants	50
III.3 Systèmes d'identification biométrique et technologie RFID	51
III.4 Conception générale du système de positionnement par RFID	53
III.4.1 Description de la technologie RFID adoptée	56
III.4.2 Description du l'étiquette RFID réalisé	56
III.4.3 Description du lecteur RFID réalisé	59
III.4.4 Système de récupération des informations de traçabilité issues du lecteur RFID	60
III.4.5 Gestion des événements	60
III.4.6 Système de gestion de l'information	61
III.4.7 Interface humaine et système de services (Partie réseau)	62
III.4.8 Raspberry Pi 2 modèle B	63
III.4.9 Architecture du système de localisation et de suivi de comportement du bétail (méthode utilisée)	64
III.5 Présentation du système de localisation adopté	66
III.5.1 Architecture du système embarqué	67
III.6 Conception du système embarqué et matériel utilisé	69
III.6.1 Introduction	69
III.6.2 La mesure inertielle	71
III.6.3 Suivi de mouvement inertiel	71
III.6.4 Fusion de capteurs	73
III.6.5 Hypothèses spécifiques au domaine d'étude	75
III.6.6 Modélisation de capteurs inertiels	75
III.6.7 Méthode de "Dead reckoning"(déduction par l'estimation)	77
III.6.8 Filtrage de données issues d'une unité inertielle de navigation (INS)	81
III.6.9 Modélisation théorique de l'intégration des capteurs :	84
III.6.10 Mesures du capteur inertiel	85
III.6.11 La Fusion de Filtre à particules	85
III.6.12 Pour le gyroscope	86
III.6.13 Pour l'accéléromètre	86
III.6.14 Filtrage de particules SIR	86
III.6.15 Filtre à particules Monte Carlo	88
III.7 Description des capteurs intégrés utilisés	90
III.8 Conclusion	98

Chapitre IV : Expérimentation et Résultats

IV.1 Introduction	100
IV.2 Déploiement de notre système	100
IV.3 Classification des comportements	101
IV.3.1 Collecte de données	101
IV.3.2 Algorithme et données utilisées pour le traitement du comportement	104
IV.3.3 Tests Expérimentaux sur le terrain	105
IV.3.4 Expérience Quantitative	105
IV.3.5 Expérience qualitative	106
IV.3.6 Déploiement des dispositifs montés sur les animaux	107
IV.3.7 Déploiement des lecteurs RFID	108
IV.3.8 Communication sans fil locale via la liaison Bluetooth	109

IV.3.9 Problèmes liés à la calculabilité.....	109
IV.3.10 Considérations liées à la sécurité.....	110
IV.4 Résultats expérimentaux	112
IV.5 Discussion	112
IV.6 Résultats de localisation sur le terrain	118
IV.7 Résultats de la surveillance du comportement alimentaire.....	120
IV.7.1 Analyse statistique et probabiliste	120
IV.7.2 Architecture de l'arbre de décision	122
IV.7.3 Ajustement du seuil par modèle de mélange uni varié	123
IV.8 Comparaison des résultats.....	128
IV.9 Conclusion	129
Bibliographie.....	140

Liste des figures

Fig. I.1	Schéma fonctionnel du système de surveillance du bétail en élevage de précision	14
Fig. I.2	Paramètres suivis en élevage de précision pour le bien-être de la vache laitière	18
Fig. I.3	Equipements électroniques utilisés dans le suivi du comportement alimentaire des vaches laitières	22
Fig. I.4	Equipement de localisation utilisée dans l'étude Anderson et al (2012)	23
Fig. I.5	Composants du système de mesure de la localisation utilisé dans Bloch and Pastell (2020). (a) Tag à l'intérieur d'une boîte en plastique protectrice, (b) étiquette sur le collier de la vache, (c) station de réception installée sur une construction de l'étable	23
Fig. I.6	Plan du bâtiment d'élevage équipé du système conçu dans Wolfger et al (2017) [94]	25
Fig. I.7	Equipement installé dans la zone d'alimentation et tag RFID attachés sur les vaches.	25
Fig. I.8	Outils de détection du vêlage fondés sur la mesure de la température vaginale.	27
Fig. I.9	Photo du capteur ALERT'VEL® placé à la base de la queue des vaches gravides proches du terme pour détecter les mouvements de la queue au moment du vêlage	28
Fig. I.10	Vache équipée de la ceinture Agribelt de Databelagri monitor	28
Fig. I.11	Position du capteur AfitagPodometres® sur le membre antérieur droit d'une vache...	29
Fig. I.12	Collier placé à l'encolure des vaches	29
Fig. I.13	Caméras qui veillent sur le bon déroulé des vêlages	30
Fig. I.14	Développement de système de mesure de poids vif par analyse d'image System opticow et optiscanHolscher et Emsburengermany	31
Fig. I.15	Différents niveaux d'information des systèmes de surveillance [113]	32
Fig.II.1	Schéma économique d'après McInerney [116].	36
Fig. II.2	Altération causées par l'apparition des mammites sur l'alimentation des vaches selon [7].	46
Fig. II.3	Corrélation entre stade de boiterie et la durée de marche selon [8]	47
Fig. II.4	Les données de 2 vaches typiques présentant des changements dans le comportement alimentaire avant le diagnostic de la cétose	48
Fig. II.5	Évolution du temps de rumination (ligne continue), de la consommation de matière sèche (ligne pointillée) et du temps d'alimentation (ligne discontinue) par intervalles de 2 heures, de 48 heures avant (-48) à 24 heures après le vêlage (selon [134])	50
Fig.III.1	Système de gestion	56
Fig.III.2	L'architecture du système de gestion général basé sur la RFID.	58
Fig.III.3	Modèle de codage de vache en Algérie.	59
Fig.III.4	Schéma synoptique de l'étiquette RFID.	61
Fig.III.5	Exemple de signal démodulé, sortie du démodulateur. Le premier signal série est un signal de préambule, le deuxième signal série est la commande du lecteur.	61
Fig.III.6	Le diagramme d'étage d'amplificateur de puissance attaché au lecteur utilisé.	62
Fig.III.7	Schéma de bloc du lecteur RFID de type LF.	63
Fig.III.8	L'organigramme de l'accès au system RFID par l'utilisateur dans l'application de service.	66
Fig.III.9	Gestion des services sur le réseau local.	67
Fig.III.10	Raspberry PI sert d'unité de gestion centrale pour les lecteurs d'une ferme.	68
Fig.III.11	Schéma fonctionnel du système de surveillance du bétail.	69
Fig.III.12	Vue d'ensemble du système de l'environnement de gestion du bétail.	71
Fig.III.13	Architecture du prototype utilisé.	72
Fig.III.14	RFID reader and tag sensor emplacements.	73
Fig.III.15	Comparaison des performances de dérive de position des systèmes de navigation inertiels commerciaux.	77
Fig.III.16	Exemple de dérive du gyroscope dans le temps qui se produit dans un système.	78
Fig.III.17	Diagramme du modèle de capteur et ses relations.	80
Fig.III.18	Illustration de la méthode de "dead-reckoning", où les mesures de l'accéléromètre et du gyroscope (vitesse angulaire) sont intégrées à la position et à l'orientation.	81
Fig.III.19	Object en mouvements cas possible de modélisation par la technique de "dead-reckoning".	83
Fig.III.20	Approximations successives obtenues à l'aide de filtre particulaire sur un délai de 30 secondes.	87
Fig.III.21	Fusion de capteurs avec le filtrage à particules	88
Fig.III.22	Schéma du filtre de fusion de capteur.	92
Fig.III.23	MPU-6050 and HMC5583Lsolution de boussole pour la fusion de capteurs à 9 axes à l'aide de	95

	l'interface I2C.	
Fig.III.24	Performance de l'accéléromètre et du gyroscope pendant une période de 16 secondes	95
Fig.III.25	Orientation des axes de sensibilité et polarité de rotation.	96
Fig.III.26	Schéma fonctionnel du capteur d'étiquette RFID proposé pour le système de localisation et de surveillance du comportement.	98
Fig.III.27	Prototype du système vu de haut et d'arrière du circuit du tag sensor utilisé. Dimensions : 3,9 x 2,1 x 0,16 cm ³ .	98
Fig.III.28	Comparaison entre la dérive gyroscopique avec et sans combinaison d'un filtre à particules (voir version en ligne pour les couleurs).	102
Fig.IV.1	Déploiement du matériel au niveau du mangeoire des vaches	105
Fig.IV.2	Lecteur d'un tag emplacements	105
Fig.IV.3	La première zone d'alimentation	106
Fig.IV.4	La deuxième zone d'alimentation	106
Fig.IV.5	Déplacement des vaches entre la zone de traite et la zone d'alimentation	107
Fig.IV.6	Le système d'annotation du comportement alimentaire par caméra	107
Fig.IV.7	Temps de calcul effectué par la carte basée autours de la carte Raspberry -PI en fonction de volume de données mesuré pendant un temps T.	114
Fig.IV.8	Simulation erreurs d'orientation avec pour les deux filtres MCL et SIR	117
Fig.IV.9	Résultat de fusion des deux filtres particuliers MCL et SIR en termes d'erreur sur la position	118
Fig.IV.10	Trajectoires simulées avec différents nombres de particules. Le filtre améliore clairement les estimations de position même lorsque le nombre de particules est petit.	120
Fig.IV.11	Résultat du déplacement des vaches de l'abreuvoir pour vaches à la mangeoire pour vaches jusqu'à la fabrique se terminant au bâtiment E, en stimulant les portes de j et A et B, avec et sans filtre à particules.	122
Fig.IV.12	Les trois fonctions de densité des classes de position d'alimentation, de position debout et de transition entre l'alimentation et la position debout en utilisant l'axe des x de l'accéléromètre à une fréquence de 1 Hz.	124
Fig.IV.13	Les trois fonctions de densité des classes d'alimentation, debout et de transition entre la position d'alimentation et la position debout en utilisant l'axe y de l'accéléromètre à une fréquence de 1 Hz.	125
Fig.IV.14	Les trois fonctions de densité des classes d'alimentation, debout et de transition entre la position d'alimentation et la position debout en utilisant l'axe z de l'accéléromètre à une fréquence de 1 Hz.	126
Fig.IV.15	L'algorithme d'architecture des arbres de décision.	126
Fig.IV.16	Modèle de mélange de deux lois normales de l'axe des x de l'accéléromètre à la fréquence de 1Hz.	127
Fig.IV.17	Modèle de mélange de trois lois normales de l'axe y de l'accéléromètre à la fréquence de 1 Hz.	128
Fig.IV.18	Organigramme du logiciel de capteur sans fil basé sur une architecture déclenchée dans le temps.	130

Liste des tableaux

Tab.I.1	Relation entre les maladies qu'une vache peut avoir et les capteurs utilisés	27
Tab.II.1	La relation entre les différentes composantes de trois cadres d'évaluation du bien-être	45
Tab.II.2	Valeurs quotidiennes moyennes et erreur standard du temps de rumination et des caractéristiques de l'alimentation par vache pendant le jour de référence ¹ et les jours autour de l'insémination selon [132]	49
Tab.III.1	Différents modèles de capteurs inertiels et leurs caractéristiques	80
Tab.III.2	Vue d'ensemble des différentes propriétés des trois systèmes RFID LF, HF et UHF	103
Tab.IV.1	Description de l'ensemble de données servant pour la gestion du comportement	108
Tab.IV.2	Précautions de sécurité	115
Tab.IV.3	RMSE entre le SIR et le filtre de Monte Carlo (MCL)	122
Tab.IV.4	Un exemple de la durée et du comportement des vaches pendant une journée	123
Tab.IV.5	Résultats de la classification des classes debout, d'alimentation et de transition	128

Introduction générale

Vu la population en constante croissance ; une consommation dont les modes sont de plus en plus diversifiés, pour aboutir à une sécurité alimentaire, le monde doit y faire face [1]. L'élevage de précision (EdP) est fondé pour assurer une meilleure production des produits d'élevage [2]. Il se base sur l'utilisation de techniques modernes, comme les capteurs, les caméras, les microphones, couplés à des technologies de l'information qui permettent de mesurer différents paramètres directement sur l'animal lui-même, afin d'adapter habilement la manœuvre de la production et notamment la conduite des animaux d'élevage [3]. Les méthodes de l'élevage de précision proposent un nombre important de possibilités pour le vétérinaire et l'éleveur afin d'utiliser les symptômes comportementaux des animaux pour accompagner leur état de bien-être [4], qu'il s'agisse relations sociales, leur santé, relation homme/animal ou de stress attachés à des événements ou un environnement pénible, et ceci grâce aux qualités techniques des capteurs [5]. Toutes les maladies des vaches laitières ont la capacité d'affecter la population humaine directement ou indirectement [6, 7, 8]. Certaines maladies peuvent avoir un impact important sur la production, tandis que certaines peuvent entraîner un risque important sur la longévité dans le cas de la vache. Certaines peuvent influencer la santé complète du troupeau, et certaines peuvent causer des problèmes commerciaux internationaux. Certaines maladies peuvent causer des risques zoonotiques répandus qui peuvent être une grande préoccupation pour le commerce et la santé humaine aussi. En effet, lorsqu'une maladie affecte une vache, son comportement montre des altérations et la qualité de son lait se déprécie [7, 8]. Un éleveur peut détecter ces changements en quelques minutes ou quelques heures. Néanmoins, garder un œil sur un grand troupeau peut être un défi et les étapes pour la prévention ou le traitement risquent être pris un peu trop tard dans certains cas. C'est là que survient le besoin de moniteur de santé basé sur les capteurs. La collecte de variables comportementales par des capteurs offre le potentiel d'améliorer les processus de suivi sanitaire et reproductifs [9, 10]. Les progrès des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication (NTIC) ont permis de surveiller et de classer automatiquement les activités comportementales de nombreux animaux, y compris les espèces domestiquées telles que les vaches laitières [11, 12, 13]. La classification automatisée des comportements a le potentiel d'améliorer les processus de surveillance de la santé et du bien-être animal [14]. Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes intéressés au développement de systèmes de localisation des vaches laitières. L'une des principales limites des systèmes de localisation modernes réside dans le manque d'informations sur les activités des vaches telles que l'alimentation et l'abreuvement dans la zone surveillée. Pour surmonter cette limite, nous allons développer un capteur non invasif fixé à l'oreille, basé sur la combinaison d'un système d'identification par radiofréquence à faible coût et d'une unité de mesure inertielle (IMU). Le modèle de localisation et classification utilisé est basé sur : la méthode du point estimé (dead-reckoning) [15], la fusion de données [16], les filtres de particules [17], les modèles de mélanges finis [18] et les arbres de décision [19]. Grâce à notre approche, les vaches sont localisées et en même temps leurs comportements alimentaires sont classés. Les résultats obtenus par ce système sont prometteurs et produisent des performances (précision de localisation et de détection du comportement alimentaire) meilleures comparativement à celles obtenues par d'autres travaux de recherche. Les différentes phases de collecte de données, de tests et de validation du système ont été réalisées dans la ferme commerciale SOFLAIT, située dans la région de Draa Ben Khedda, Wilaya de Tizi-Ouzou.

Ainsi, cette thèse est organisée en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous présentons une synthèse sur le domaine de l'élevage de précision. Ensuite, nous décrivons un ensemble de dispositifs utilisés dans les fermes modernes. Ce premier chapitre a pour objectif de déceler les limites des systèmes de localisation des vaches laitières. Pour assurer une meilleure utilisation coordonnée de notre système avec ceux déjà existants dans les fermes modernes, nous avons étudié l'intérêt, l'avantage, la limite et le fonctionnement des équipements déployés en fermes modernes.

Dans le deuxième chapitre, nous donnons un aperçu du concept de bien-être animal et ses exigences afin de les prendre en considération lors de la phase de conception de notre capteur pour choisir l'emplacement des capteurs sur le corps de la vache. De plus, nous décrivons les principales corrélations qui existent entre les variables comportementales et les troubles de la santé et de la reproduction. L'objectif est de mieux définir l'impact d'une maladie sur le comportement de la vache laitière, ce qui nous permet de sélectionner les comportements importants à suivre.

Dans le troisième chapitre, nous présentons la phase de conception de notre contribution. Durant cette phase, nous montrerons comment nous avons conçu le matériel nécessaire au fonctionnement du système et comment nous avons élaboré et implémenté les différentes méthodes et algorithmes de localisation et de détection du comportement des vaches.

Dans le quatrième chapitre, nous présenterons les résultats obtenus lors des différentes étapes d'élaboration, de déploiement, de test et de validation du système ainsi que l'étude comparative des résultats que nous avons obtenus avec ceux fournis par rapport dans d'autres études scientifiques.

Nous terminons cette thèse par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I

L'élevage de précision

I.1 Introduction

Les nouvelles techniques appelées élevage de précision donnent beaucoup de données et d'informations à l'éleveur pour lui permettre de prendre des décisions facilement et rapidement.

L'élevage de précision [20] obéit à des techniques offrant multitude de possibilités d'évaluation à travers les comportements propres à l'animal de son état de bien-être (santé, relation Homme/Animal, stress liés et autres). De plus, l'enregistrement en continu des troubles de bien-être (de santé ou autres) [21, 22]. Le développement de ce type d'élevage au cours des dernières années est dû à un certain nombre de raisons.

La première concerne la taille des exploitations agricoles dans le monde, qui augmente chaque année, sans augmentation de la population active associée d'aucun type ou espèce. La seconde concerne le coût sans cesse croissant des matières premières, qui affecte négativement les marges de profit. Troisième est que le profit étant devenu un atout majeur d'où la nécessité de veiller à l'amélioration de la production. Enfin, les éleveurs doivent tenir compte d'un certain nombre de facteurs régissant le bien-être des animaux et la protection de l'environnement. En effet, les éleveurs aspirent de plus en plus à une baisse de leurs contraintes comme la traite, la distribution de l'alimentation et donc à un meilleur contrôle du temps et du confort de travail et ce grâce aux sauts technologiques dans la microélectronique, l'informatique, les télécommunications et désormais les nanotechnologies. Les coûts de ces technologies et particulièrement ceux des capteurs de mouvement, de température, de caméras, de microphones etc. commencent baisser considérablement et peuvent, ainsi, être mis en œuvre en élevage pour mesurer avec une précision remarquable des facettes de plus en plus nombreuses du fonctionnement des animaux. Ces technologies de l'information et de la communication, ainsi que des algorithmes en temps réel, sont capables de détecter ou de prédire la survenue d'incidents au cours même du processus de production. L'élevage de précision est donc devenu une science pluridisciplinaire dans laquelle scientifiques, physiologistes, vétérinaires, éthologistes, ingénieurs et experts en technologies de l'information et de la communication collaborent en permanence.

I.2 Historique de l'élevage de précision

La notion de l'élevage de précision existe depuis une décennie. Il a été conçu en Grande-Bretagne l'institut de recherche Siloe et en Belgique à l'université catholique de Louvain puis adopté en Allemagne, au Danemark,

aux Pays-Bas et en Finlande [23]. En 2002, l'idée a été exportée en Australie, et plus dernièrement en Amérique du Nord, en Asie, au Brésil et en Afrique du Sud [24]. L'analyse des comportements des animaux a permis d'établir des paramètres comportementaux notamment la position debout/couchée, et ceux de la queue et le temps de rumination. Pour cela des capteurs ont été mis aux points afin de mesurer les paramètres comportementaux. D'autres améliorations ont été faites au niveau des traites. En effet des robots de traite permettent de définir la composition du lait (matière grasse, protéique, de lactose, etc.). Il est de même pour la détection précoce de la période de vêlage, des troubles de santé (infectieux ou métaboliques).

D'autres perfectionnements ont été apportés en ce qui concerne le bien-être animal et la surveillance à distance. En même temps, un grand nombre de systèmes ont été mis à l'essai dans le cadre de projets de recherche. Par exemples l'analyse de la vocalisation en tant qu'indicateur du bien-être des animaux [25], mesurer le temps qu'il faut pour ingérer l'herbe sur les pâturages. [26], l'étude vidéo de la posture ou de la démarche pour détecter les boiteries [27], la notation d'état corporel à partir d'images numériques [28]. Des dispositifs de surveillance ont été développés pour les systèmes d'élevage plus extensifs (production ovine [29]). Malgré que l'idée d'élevage de précision soit apparue au milieu des années 70, ce n'est que récemment qu'un réel accroissement de l'offre en divers outils et surtout leur présence dans les élevages, a lieu. Le premier robot de traite en France date de 1992 mais un fort développement de leur présence en élevage n'est observé que depuis 2008 en Bretagne en 2012 et 2013 [30]. Par la suite, une forte concurrence apparaît entre différentes filières, ce qui a incité les éleveurs à augmenter la taille des cheptels [31], ce qui rend la charge de travail plus en plus importante [32]. Ceci a nécessité l'installation de capteurs ou de caméras pour alléger les travaux d'astreinte (traite, alimentation etc.) [33] et faire face à des contraintes liées aux nouvelles réglementations (sur les normes environnementales et sanitaires, sur le bien-être animal et aux nouvelles attentes des consommateurs (qualité sanitaire, traçabilité, réduction des antibiotiques) auxquelles font face ces éleveurs [34].

Des capteurs couplés, mesurent les paramètres biologiques avec les techniques de l'information assistent l'éleveur dans ses prises de décision rapides, la réalisation des activités liées à l'élevage.

La figure I.1 reprend le schéma fonctionnel du système de surveillance du bétail en élevage de précision.

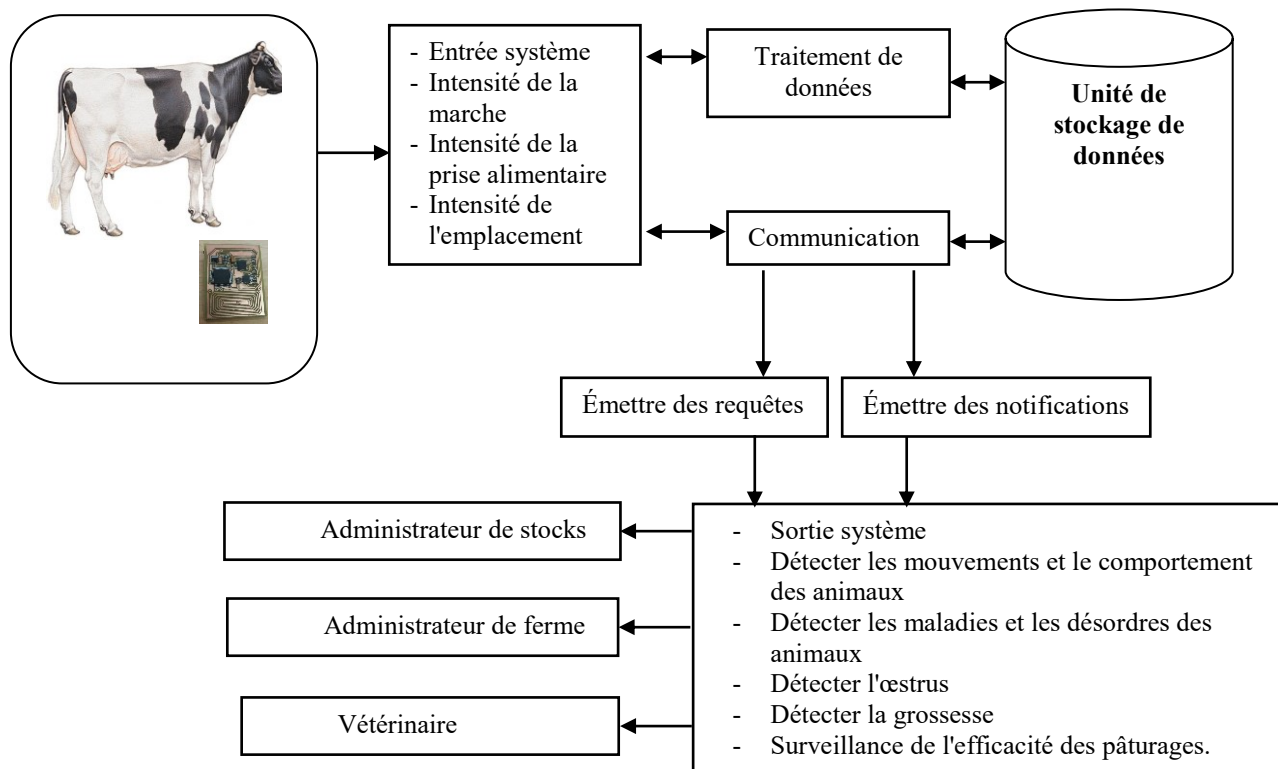


Fig.I.1 : Schéma fonctionnel du système de surveillance du bétail en élevage de précision.

I.3 Elevage de précision

I.3.1 Définitions de l'élevage de précision

La littérature offre diverses définitions de l'élevage de précision. Selon l'utilisation de technologies, Bewley [35] définit l'élevage de précision comme l'utilisation de technologies permettant de calculer des indicateurs comportementaux, physiologiques ou de production sur les animaux pour bonifier les stratégies de management du troupeau et les performances de l'élevage. Ces performances sont économiques, sociales ou environnementales [35]. Selon Berckmans [36], une définition de l'élevage de précision, relativement consensuelle aux différentes filières animales est présentée et consiste en l'utilisation des paramètres de capteurs pour mesurer les données comportementaux, physiologiques ou de production sur les animaux, de Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) pour l'échanger, le stockage, la transformations et la restitution de ces informations à l'éleveur pour sa prise de décision, outre ses commentaires [37]. Selon Aerts [38], Berckmans [34] et Whates [40], Il y a plusieurs conditions à remplir pour permettre une surveillance et un contrôle continu de l'élevage. La première concerne les variables animales qui doivent être constamment mesurées et analysées à une échelle temporelle appropriée à l'aide de capteurs fiables. Dans un second, un modèle prédictif (algorithme de détection) est créé pour chaque variable mesurée de la solution de l'animal aux exigences environnementales (milieu, alimentation, etc.) doit

être étendu. Ensuite, une comparaison est réalisée entre ce qui est attendu par ce modèle et ce qui est calculé grâce aux capteurs pour pouvoir détecter les animaux ou les situations (œstrus par exemple) sollicitant une attention particulière de la part de l'éleveur. En dernier lieu, une information sous forme d'alerte ou d'indicateur est envoyée [41].

I.3.2 Concepts généraux de l'élevage de précision

Selon Bocquier [29], dans le cas des systèmes d'élevage de précision à basse intensité, la principale spécificité des dispositifs envisagés réside dans leur application aux animaux éparpillés sur de grandes superficies. L'élevage de précision (PLS) peut être défini comme un élevage dans lequel les actions effectuées sur les animaux sont distinguées par unité du troupeau (individu ou lot) grâce aux mesures automatisées. Ces mesures automatisées sont transmises puis intégrées dans un Système d'Information [43]. En élevage de ruminants à faible intensité, le défi technique se base essentiellement sur la collecte d'informations au niveau animal (grands troupeaux) fréquemment éparpillés car ils paissent sur de grandes surfaces. Ces informations sont souvent liées aux caractéristiques physiques, aux comportements physiologiques, à l'état de santé et aux activités productives. Les informations obtenues dans ce système d'information sont analysées puis transformées afin de prendre des décisions étroitement liées au système de production animale. Ainsi, un élevage précis admet de caractériser la diversité au milieu d'un troupeau en mesurant des indicateurs au niveau individuel, et de mieux gérer cette différence. Des indicateurs sont recommandés pour ajuster la gestion au niveau individuel afin de perfectionner les performances du troupeau.

Dans les élevages qui n'utilisent pas d'équipements de précision [44], les actions sont personnalisées uniquement dans les situations critiques (naissance, problèmes de santé, etc.) et le traitement par lots d'effectifs importants, voire de tout troupeau, est dominant.

Dans la seconde situation, l'information caractérisée y est généralement faible voir absente. Nous sommes dans une configuration d'élevage de précision où l'information caractérisée existe, même si elle ne concerne que l'observation d'animaux spécifiques du troupeau (animaux « pilotes ») dont le statut ou le comportement va influencer la décision d'actions de conduite pour la totalité du troupeau.

Les pratiques d'élevage, pourtant simples, qui particularisent les traitements à partir de l'observation attentive des animaux, sans utiliser les mesures objectives et automatisées, devraient logiquement être des élevages exacts. Il convient de noter qu'en pratique, le terme « élevage de précision » est destiné aux situations où la collecte et/ou le traitement des informations sont automatisés. Le terme élevage de précision montre des propriétés à grand nombre d'animaux, avec une main-d'œuvre disponible réduite, où les activités de gestion sur des individus ou des lots d'un troupeau sont activées en référence à des informations récentes traitées par le système d'information.

I.4 Exemples d'élevages de précision

Compte tenu de la demande de produit d'élevage en constante évolution, l'élevage de précision s'étend sur d'autres filières telles que la porcine, la volaille et autres [45]. L'élevage laitier de précision s'est fortement développé ses dernière années. la traite avec comptage électronique s'est largement répandue. Un suivi par méthode électronique permet de détecter toute anomalie quelconque en termes de troubles métabolique, stress et autres. Il en est de même pour la période de vêlage, détection des mammites.

I.5 Relations Homme/Animal [46, 47, 48]

Malgré tous les progrès introduits par les mécanismes, management et tous les captages électroniques de l'information concernant le comportement et la santé animale, la relation homme/animal reste primordiale [49]. En effet la confiance entre ces deux êtres ne peut être élaborée qu'avec des contacts directs, de confiance, dans les étables, les prairies, moment des traites. Cette relation directe qui se construit au fil des jours, instaure entre L'homme et l'animal un climat de confiance [50, 51, 52], une compréhension mutuelle voire une familiarisation (la peur de l'animal vis à vis de l'homme sera alors quasiment bannie).

Les éleveurs ne se fient pas tous aux données fournies par l'outil informatique. La majorité des éleveurs laitiers examinent visuellement que la vache indiquée par le détecteur comme étant en chaleur, l'est bien avant d'appeler l'inséminateur [52]. À noter que la relation homme /animal est assurée différemment d'un éleveur a un autre.

Certains favorisent les données des paramètres fournis par le système de gestion électronique, par contre d'autres, malgré tous les moyens électroniques dont ils disposent assoient leur gestion en priorité au contact direct avec l'animal [50].

I.6 Diversification du capteur électronique en élevage

La technologie des capteurs électroniques évolue très vite avec une diversification élargie à toute forme d'élevage [54, 55, 56] et, sans cesse, renouvelés [57, 58, 59].

La figure I.2 donne un aperçu des capteurs pour bovins sur le marché en précisant l'emplacement du capteur, les paramètres mesurés et les événements suivis [42].

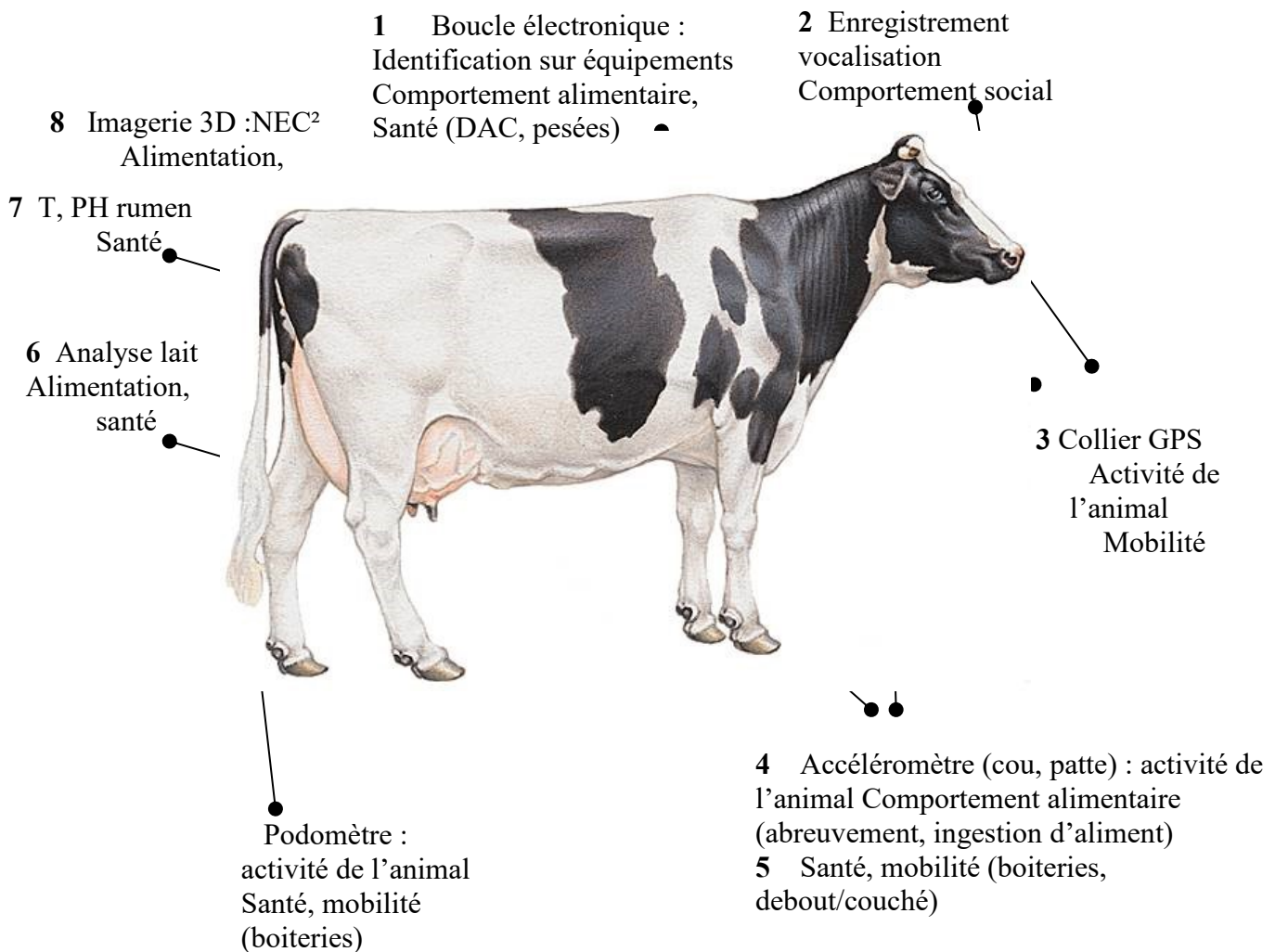


Fig.I.2 le bien être des vaches laitières en élevage de précision nécessite la connaissance des paramètres suivants [42].

Les différents outils utilisés dans la figure précédente sont :

- 1- la boucle électronique : identification sur équipements [60];
- 2- l'enregistrement et vocalisations [61];
- 3- collier GPS, activité de l'animal, mobilité [62];
- 4- l'accéléromètre : (cou, patte), activité de l'animal comportement alimentaire (abreuvement, ingestion d'aliments) [63];
- 5- la santé, mobilité (boiteries, debout/couché) [64] ;
- 6- l'analyse du lait [65];
- 7- le Ph, Rumen, santé [66, 67].
- 8- l'imagerie 3D : NEC, alimentation, santé [68] caméra BSC.

I.7 Dispositifs électroniques

Plusieurs dispositifs électroniques, diversifiés et sans cesse renouvelés, sont utilisés en élevage. Ils peuvent être classifiés selon leur utilisation en

des capteurs dédiés à l'identification animale, à la surveillance de la santé, de la reproduction, de la morphologie, du comportement, de l'environnement ou du bien-être animal.

I.7.1 L'identification

Les outils d'identification des vaches laitières peuvent être classés en outils classiques et biométriques [69]. Les outils d'identification biométrique se basent sur des approches d'analyse d'images permettant de reconnaître les vaches. Des images de vaches sont prises et analysées pour extraire une région d'intérêt tel que le museau [70], la tête de queue [71] et l'iris qui utilisée comme marque d'identification biométrique [72]. La plupart des méthodes biométriques sont à un stade précoce de leur développement et ne sont pas encore utilisées dans les fermes. Plusieurs problématiques restent à résoudre tel que l'efficacité de ces approches à faire une reconnaissance et la scalabilité des tests sur des milliers d'animaux et dans plusieurs fermes. Les méthodes classiques sont largement utilisées dans les fermes [69]. L'utilisation de la technologie RFID (Identification par Radio Fréquence) est maintenant très courante dans de nombreuses fermes [73]. Trois types de capteurs RFID sont utilisés, ces capteurs sont des doses de médicament, une grosse pilule (boluses), étiquettes d'oreille (ear tags), et étiquettes en verre injectable (injectable glass tags). Parmi ces capteurs les marques auriculaires électroniques s'avèrent être les plus efficaces et lisibles [74]. La puce RFID destinée à l'identification électronique des animaux [75, 76, 77] est déployé dans la majorité des fermes modernes. Tous les animaux sont dotés individuellement d'un numéro d'identité. Un lecteur placé à proximité produit un champ magnétique qui active les transpondeurs RFID, signalant ainsi le numéro d'id »entité de l'animal.

Tous les travaux menés sur ces dispositif [77] on aboutis en 1996 à l'établissement de deux normes ISO 11784 et 11785 qui permettent l'identification des animaux d'élevage sur le plan règlementaire assurant ainsi sur le plan sanitaire la traçabilité des animaux.

À noter que les transpondeurs sont programmés directement en usine. Donc aucune information manuelle ne peut y être stockée. Compte tenu de ce qui précède, un autre système normalisé est en train de se mettre en place (ISO 14223) qui permettrait la conservation des anciennes données avec la possibilité d'introduction et de conservation de nouvelles données.

Pour les équins et aux animaux de compagnie on utilise des puces introduite dans du verre qui sont injectables sous la peau [76]. Des bracelets équipés de puces RFID sont utilisés chez les chèvres (placé au niveau de la patte arrière). A noter que dès la fin de l'année 2014, une réglementation européenne a fait obligation systématique d'une identification électronique des caprins et ovins [77]. Le lecteur RFID, dans l'élevage de précision, joue un rôle très important en définissant le moment et l'endroit où se fait la lecture de qui est identifié.

I.7.2 Surveillance du comportement (activité et alimentation)

Les progrès de la biotechnologie ont permis de surveiller et de classer automatiquement les activités comportementales de nombreux animaux, y compris les espèces domestiquées telles que les vaches laitières. La classification automatisée des comportements a le potentiel d'améliorer les processus de surveillance de la santé et du bien-être animal. Une augmentation considérable de l'utilisation de dispositifs de télésurveillance telle que le système de positionnement global (GPS), les capteurs de localisation, les enregistreurs de proximité et les accéléromètres pour l'enregistrement automatisé du comportement humain et animal a conduit à la nécessité de méthodes plus efficaces et plus précises pour analyser les vastes quantités de données sur le mouvement et le comportement qui sont recueillies. Les données des accéléromètres ont été fréquemment utilisées pour surveiller, classer et inférer le comportement. Les enregistrements automatisés continus du comportement peuvent être utilisés pour identifier les malades au début du processus pathologique. Le suivi du comportement de la vache est devenu de plus en plus important dans la compréhension de la nutrition, la production, la gestion du bien-être et la santé globale. La surveillance du comportement alimentaire donne aux éleveurs plusieurs bénéfices,

- une détection précoce de trouble de santé,
- une sélection d'animaux plus efficaces,
- une rentabilité d'élevage et ressource alimentaire,
- un meilleur pilotage de l'alimentation.

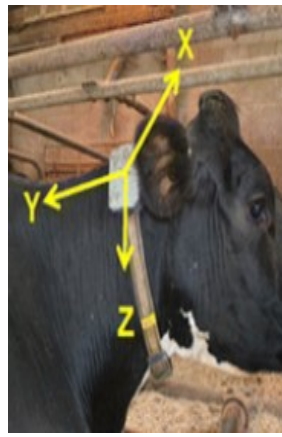
Plusieurs outils ont été développés pour assurer le suivi du temps de rumination et d'ingestion des animaux et de signaler toute anomalie. L'ingestion est l'aptitude d'un animal à consommer plus au moins un aliment distribué à volonté. La rumination est l'action de ramener dans la bouche les aliments qui ont déjà séjourné dans le rumen pour les mâcher. Les Microphone, les capteurs de pression et les accéléromètres sont les outils les plus déployés dans les fermes modernes pour assurer ce suivi. La Fig.I.3 montre ces trois outils.

I.7.3 La localisation des vaches

La localisation automatique des vaches laitières permet de suivre l'état sanitaire [79] et permet aussi de suivre les événements reproductifs [80]. Généralement des capteurs de positionnement sont attachés au corps du bétail permettant de récolter des données, ces données seront ensuite analysées par des algorithmes afin d'en déduire la position et le comportement (alimentaire et activité) du bétail [81, 82, 83, 80]. Il a été démontré dans plusieurs études que les maladies ont un impact considérable sur la modification du comportement alimentaire, l'activité des vaches laitières [84, 85, 86]. Par exemple, une vache boiteuse mange plus rapidement qu'une vache saine [87]. Une vache en mammite mange moins qu'une vache saine [88]. Les outils développés dans le cadre du monitoring



(a) Accéléromètre



(b) Capteur de Pression



(c) Microphone

Fig.I.3 Équipements électroniques utilisés dans le suivi du comportement alimentaire des vaches laitières [13].

des modifications comportementales sont utilisés comme outils de soutien et permettent de mieux informer l'éleveur sur son bétail. La détection de modifications du comportement des vaches laitières peut servir d'entrée aux systèmes prédictifs qui avertissent l'éleveur en cas de problèmes sanitaires ou physiologiques particuliers à un stade précoce [89].

De plus, Le suivi de la position de chaque animal peut être nécessaire pour quantifier les principaux indices liés au bien-être animal, ainsi que pour identifier les éventuelles préférences des vaches concernant les différentes zones de l'étable. Dans ce contexte, plusieurs études [90, 91] ont été menées afin de développer des systèmes adaptés à la localisation de chaque vache dans le troupeau. Ces systèmes sont sans cesse renouvelés et mis à jour afin d'augmenter leurs performances. Les GPS, les capteurs positionnement intérieur, les puces RFID et les systèmes UWB sont les systèmes de localisation les plus utilisés dans les fermes modernes.

- Les systèmes de positionnement global

Le système de positionnement global (GPS) est un outil révolutionnaire permettant d'obtenir des données de localisation des animaux à chaque seconde. Les GPS appliqués aux vaches pourraient fournir un moyen de surveiller les troupeaux au pâturage tout en surmontant les efforts considérables requis pour l'observation manuelle. L'avantage des GPS est qu'aucune infrastructure de réseau de capteurs n'est nécessaire à son déploiement. Selon Anderson et al (2012) [91], pendant deux ans, 17 vaches accompagnées de veaux ont été équipées d'un système de positionnement global (GPS) programmé pour enregistrer des positions GPS non corrigées à des intervalles de 1 seconde. La Fig.I.4 montre le système utilisé. Les données de localisation récoltées ont été utilisées pour détecter les activités des vaches. Les résultats de cette étude suggèrent que les données GPS positionnelles de 1 seconde non corrigées sont satisfaisantes pour classer le

comportement des vaches de boucherie en liberté en activités de recherche de nourriture, de marche et d'immobilité.



Fig.I.4 Équipement de localisation utilisée dans l'étude Anderson et al (2012)[91].

- Les capteurs positionnement intérieur

Les systèmes de localisation qui se base sur GPS ont de bonne performance de localisation en milieu extérieur. Cependant, à l'intérieur des étables cette performance se détériore. Afin d'assurer cette localisation à l'intérieur des étables, plusieurs recherches ont étudié la possibilité d'utiliser différents systèmes de positionnement intérieur (Bluetooth, UHF, etc.) pour la localisation des vaches. Dans [92], les auteurs proposent un système à faible coût pour la localisation de vaches, basé sur la réception de signaux envoyés par un système de mesure d'accélération et utilisant le protocole Bluetooth à très faible consommation. Le système se compose d'étiquettes et de stations de réception à faible coût comme le montre la Fig.I.5. Deux expériences d'évaluation de la précision de la localisation ont été menées avec 35 et 19 vaches pendant deux jours. La précision de localisation (écart-type moyen) était d'environ 3 mètres.

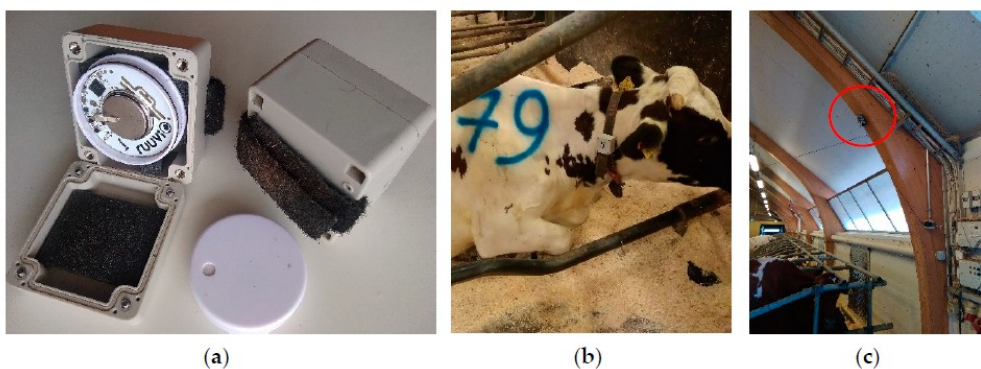


Fig.I.5 Composants du système de mesure de la localisation utilisé dans Bloch and Pastell (2020) [92]. (a) Tag à l'intérieur d'une boîte en plastique protectrice, (b) étiquette sur le collier de la vache, (c) station de réception installée sur une construction de l'étable [13].

- La technologie RFID

En plus d'être utilisée comme outil d'identification, la technologie RFID a été aussi évaluée dans le but de localiser les vaches [93]. Trois types de liaison sont utilisées BF (Basse Fréquence), UWB (Ultra Large Bande Fréquence) et UHF (Ultra Haute Fréquence). Les technologies RFID basées sur la haute fréquence (HF) et l'UHF sont utilisées pour localiser des animaux individuels dans des zones fonctionnelles spécifiques des bâtiments d'élevage intensif, bien que des erreurs de localisation élevées aient été observées, les systèmes RFID ont démontré qu'il est possible de détecter des animaux dans des zones spécifiques (traite, repos, etc.). Dans [94], Wolfger et al. (2017) proposent un système commercial de suivi de la position en temps réel. La localisation des vaches a été surveillée en permanence grâce aux étiquettes 'Smartbow) montées sur l'oreille des vaches, qui envoient des signaux à basse fréquence (BF) à des récepteurs qui transmettent ensuite les informations à un serveur. La Fig.I.6 montre la disposition de la bâtisse d'élevage et l'emplacement des récepteurs installés au mur. Grâce aux données entrantes, le serveur triangule l'emplacement de la vache dans l'environnement de l'étable en temps réel. Le résultat de cette étude montre que la distance moyenne entre les mesures laser des observateurs et le Smartbow était comprise entre 1,22 et 1,80 mètre.

Dans Adrion et al (2020) [95], l'objectif était de mettre en place, de tester et de valider un système d'identification par radiofréquence (RFID) à ultra-haute fréquence (UHF) pour mesurer le temps passé par les vaches laitières en utilisant des d'étiquettes auriculaires passives UHF. La Fig.I.7 montre les différents équipements utilisés pendant l'expérience. Le résultat du système RFID UHF a été validé par des observations vidéo et comparé aux mesures du temps de mastication d'un capteur de pression installé sur le museau des vaches. La validation des données vidéo a montré une sensibilité moyenne élevée ($93,7 \pm 5,6$ %, moyenne $\pm$ écart-type), une spécificité ($97,8 \pm 1,1$ %), une précision ($93,8 \pm 2,3$ %) et une exactitude ($96,9 \pm 0,9$ %). La comparaison avec le capteur de pression et la localisation en temps réel a donné lieu à des corrélations élevées avec un coefficient de corrélation de $r = 0,95$.

- La technologie Ultra Wide Band

La fiabilité de la localisation fournie par les systèmes RFID basés sur les technologies HF et UHF pourrait être améliorée en utilisant la technologie Ultra Large Bande (UWB). L'avantage de cette technologie est fourni par le mode de transmission du signal qui serait basé sur des impulsions de courte durée. Dans Hindermann et al (2020) [96], un Système de Localisation en Temps Réel (RTLS) a été développé dans le but d'obtenir une localisation précise de plusieurs étiquettes (installé sur des vaches) en temps réel. Le RTLS est basé sur la technologie à bande ultra-large (UWB). Le RTLS peut gérer jusqu'à cent étiquettes simultanément. Les performances du système global ont été évaluées dans deux étables laitières différentes. D'après les essais sur le terrain, le système tel que développé peut être utilisé pour la localisation individuelle des vaches laitières. La précision de localisation obtenu été très élevé (0,5 m).

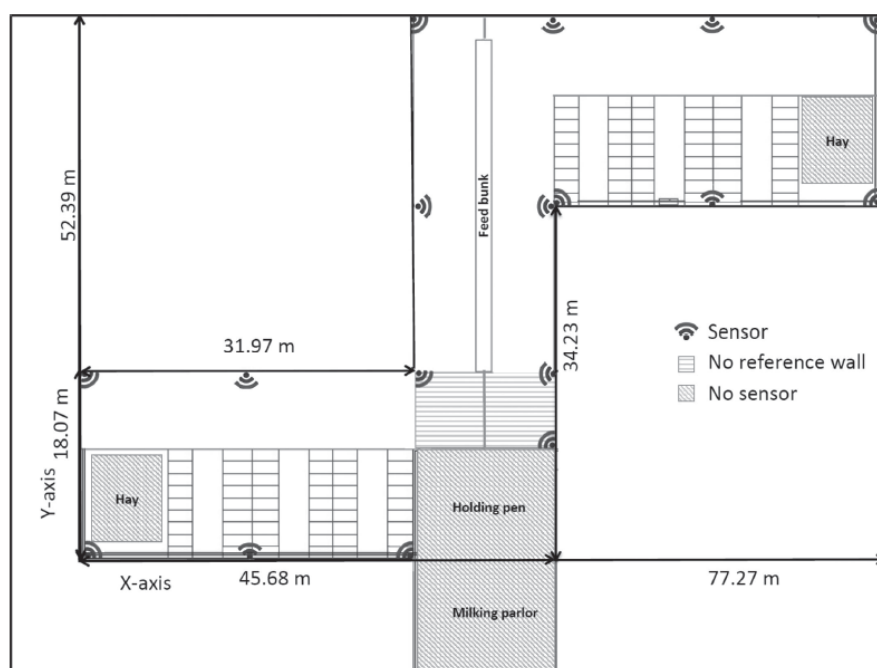


Fig.I.6 Plan du bâtiment d'élevage équipé du système conçu dans Wolfger et al (2017) [94].



Fig.I.7 Équipement installé dans la zone d'alimentation et tag RFID attachés sur les vaches [13].

Les systèmes de localisation n'indiquent pas la durée de participation aux différents comportements d'intérêt, mais seulement si le bétail se trouve ou non à l'endroit où il pourrait participer à l'activité [97]. Pour surmonter cette limite, dans la présente thèse nous allons concevoir un système qui permet de localiser les vaches et de détecter le comportement courant de la vache. Les données de localisation permettent d'extraire des informations sur les activités des vaches telles le temps de présence dans la mangeoire, la traite, la zone de repos, etc. et d'autres informations sur les mouvements de la vache telle marche, stationnaire etc. Ces informations sont utilisées pour assurer le suivi des signes cliniques, morphologiques et reproductifs. Dans la section suivante nous allons présenter un panorama des différents outils

utilisé dans le cadre du monitoring sanitaire, de morphologie et reproductifs. Cela permettra d'assurer une meilleure intégration du système conçu dans le cadre de cette thèse.

I.7.4 Surveillance de la santé animale

Il existe de nombreux types de technologies qui ont été déployés en pratique pour une surveillance efficace de la santé, que ce soit pour les humains ou les animaux. Elles se basent sur des capteurs. Rappelons qu'un capteur est un dispositif qui mesure un paramètre physiologique ou comportemental et permet une détection automatisée des changements dans ces paramètres. Ce changement est lié à un événement de santé (une maladie) et nécessite une action de l'éleveur (un traitement). Les capteurs se répartissent en deux catégories. Ceux qui sont attachés et ceux qui ne le sont pas [98]. Les capteurs attachés « capteurs sur/dans l'animal » sont montés à l'extérieur ou à l'intérieur du corps de l'animal (par exemple bolus dans le rumen). Les capteurs non attachés sont des capteurs hors animal. On peut distinguer deux types distincts de capteurs non attachés. Les capteurs prennent des mesures dans un flux continu des produits, d'autres capteurs analysent des prélèvent d'un échantillon (lait, par exemple). Les approches existantes pour l'acquisition de données par capteurs en élevage de précision peuvent aussi être classées en deux catégories: les capteurs non invasifs et les capteurs invasifs. Plusieurs recherches ont été établies pour trouver une relation entre les maladies du bétail et divers dispositifs électroniques pour le développement d'un système de surveillance de la santé du bétail parmi ces recherches on retrouve essentiellement celle qui concerne les maladies du bétail laitier, le Tableau I.1 est un résumé des résultats de la conférence intitulée «Technologie des capteurs pour la surveillance de la santé animale» publié dans le Journal international sur la détection intelligente et les systèmes intelligents [99]. Le but est d'examiner la nature des maladies qu'une vache peut avoir et de le relier à un ou plusieurs capteurs qui sont appropriés pour la mesure précise des changements de comportement.

I.7.5 La détection du vêlage [39]

La surveillance avant et après le vêlage (36h à 48h qui suivent) ou mise bas chez les bovins est cruciale, il est utilisé pour décider s'il faut déplacer une vache à la maternité et s'il devrait avoir une surveillance humaine [100, 101], principalement la nuit. En effet des pertes de veaux apparaissent autour du vêlage, et pendant les deux jours suivant [102].

- Mesure de la température vaginale [39]

Une sonde cylindrique ou d'un thermomètre introduite dans le vagin de la vache permet de mesurer la température vaginale.

Tab.I.1 Lien entre les maladies qu'une vache peut Contracter et les capteurs utilisés [13].

Symptôme physique	Changements comportements	Capteurs
Fièvre		
Haute température Malaise Détresse	Moins d'activité Meuglement	Température (cou) Accéléromètre (cou) Microphone (cou)
Boiterie		
Changement de mouvement Réduction de l'apport alimentaire	Position debout ou assis Moins de pâturage Augmentation d'activité	Accéléromètre (cou, pied, mamelle) Accéléromètre (cou), caméra (emplacement externe) Capteur de charge (sous pieds)
Œstrus		
Niveau d'hormone œstrogène, progestérone) Rendement Position à cheval	Agitation Moins de pâturage Augmentation d'activité	Accéléromètre (cou, pieds) Accéléromètre (cou, pieds, près de la queue)
Mastite		
Position couché Réactivité pendant la traite La répartition du poids Douleur, inconfort, hurlement Réduction de l'apport alimentaire	Moins de temps couché Levage et coups de pied Faiblesse/changement de poids Agitation Moins de pâturage	Accéléromètre (cou) Accéléromètre (cou, pieds) Capteurs de poids (sous les pieds) Microphone

A une semaine avant le vêlage, l'éleveur introduit la sonde dans le vagin de la vache tout en veillant aux conditions d'hygiène (Fig.I.8) [103].

C'est ainsi qu'il peut intervenir pour assister et aider au vêlage dès perception du message d'alerte.



Fig.I.8 Equipment de détection du vêlage fondé sur la mesure de la température vaginale [39].

- Mesure des mouvements de la queue [39]

Le mouvement de la queue de la vache (accélération et d'inclinaison) est signe de l'approche de la période de vêlage. Par ce, les capteurs (accéléromètre et inclinomètre) et émetteur radiométrique équipent une

pince queue qu'on fixe sur le haut de la queue avec du ruban adhésif ou autres, deux à trois jours avant la date prévue de vêlage (Fig.I.9).



Fig.I.9 Photo du capteur ALERTVEL® placé à la base de la queue des vaches gravides proches du terme pour détecter les mouvements de la queue au moment du vêlage [39].

- Mesure des contractions abdominales (Fig.I.10)

Les contractions abdominales qui précèdent le moment du vêlage sont détectées par une ceinture dotée d'un capteur de pression, qu'on place une semaine avant le vêlage autour de l'abdomen de la vache [39].



Fig.I.10 Vache équipée de la ceinture Agribelt de Databelagri monitor [39].

- Locomoteur de la vache (Fig.I.11) [39]

Une semaine avant le vêlage on place un capteur au niveau d'un membre antérieur de la vache qui à travers les piétinements signale l'approche du vêlage uniquement sans émettre de signal d'alerte juste avant le vêlage. Mais ne donne pas d'alerte au moment de l'expulsion du veau.



Fig.I.11 Position du capteur AfitagPodometres® sur le membre antérieur droit d'une vache [39].

- Temps de trituration (Rumination) [39]

Un collier doté d'un accéléromètre (détection de chaleur) et un microphone (évalué les bruits liés à la rumination) est placé autour du cou de la vache. Approximativement 24 heures avant le vêlage, un message est émis alertant l'éleveur de l'approche du vêlage (Fig.I.12).



Fig.I.12 Collier placé au cou des vaches [177].

- Vidéo surveillance

Un moyen de très fiable est très rentable à la longue, réduisant ainsi le taux de mortalité des veaux et assurant une intervention et une assistance rapide de l'éleveur (le gain de temps), voir même du vétérinaire. Cette surveillance continue assurée par caméras infrarouges installées en hauteur dans l'étable permet à l'éleveur de savoir à tout moment (idem nuit), à travers un écran installé ou branchée à cet effet tous les mouvements de ces animaux (enregistrées par la caméra) (Fig.I.13).



Fig.I.13 Caméras qui veillent sur le bon déroulé des vêlages

I.7.6 La détection de chaleurs

La détection des chaleurs est d'une importance capitale en élevage car elle influence le nombre d'inséminations et le temps qui s'écoule entre les vêlages [104]. Plusieurs recherches ont été faites pour l'automatiser en se basant sur les modifications comportementales et physiologiques des vaches en période de chaleur [105, 106].

La modification du comportement des bovins laitiers en période de chaleur se manifeste par l'acceptation du chevauchement. Une vache est considérée comme acceptant le chevauchement si elle reste statique au moins deux secondes, sans être bloquée, sous l'un de ses congénères qui la surmonte. Plusieurs outils de détection de chaleur se basent sur la surveillance du comportement tel que les détecteurs de chevauchement électroniques et les détecteurs d'activité basée sur l'utilisation de podomètre ou basée sur l'utilisation de d'accéléromètre ont été développées [107, 108].

I.7.7 La surveillance de la morphologie

La morphologie a toujours été considérée comme un indicateur de la performance et de la bonne condition physique des animaux. Le suivi de la morphologie varie en fonction des espèces animales. Pour les chevaux, par exemple, la morphométrie permet de caractériser la conformation du cheval de façon objective. Pour le bétail, le suivi de la morphologie est désigné par le suivi du poids vif et de l'état corporel. En effet, l'utilisation des réserves corporelles joue un rôle important dans la gestion de l'énergie des bovins. Ces réserves permettent aux vaches de produire beaucoup de lait en début de lactation et de manière continue. La mesure de l'état des réserves corporelles et plus précisément de leur variation est aussi un indicateur zootechnique très intéressant du point de vue de l'alimentation, de la fertilité, de la santé et du bien-être animal. Pour les bovins laitiers, lorsque la production laitière atteint son pic, les réserves corporelles sont au plus bas, puis la baisse de production s'accompagne d'une reconstitution des réserves corporelles jusqu'au prochain vêlage. Cette utilisation accrue de l'énergie pour la production de lait peut cependant affecter les fonctions de santé et de reproduction. La mesure du poids corporel par pesée nécessite la construction d'un lieu de pesage dans les fermes ou de placer une plate-

forme de pesage dans les zones traversées par le bétail. Il peut y avoir des problèmes dans le fonctionnement des outils de pesage qui sont exposés aux conditions environnementales. Et parfois le bétail pourrait être exposé à de petites blessures au cours de la pesée. Par conséquent, les éleveurs ne préfèrent pas allouer de l'espace, du personnel ou des ressources financières à des outils de pesage [109]. Grâce au développement des techniques de traitement d'image plusieurs systèmes ont été développés pour mesurer le poids vif. Un des systèmes validés est celui de l'estimation du poids vif des vache Holstein [110, 111]. Ce système est illustré à la Fig.I.14. Durant la validation du système les résultats du traitement d'image issue par 4 cameras ont été comparés aux données acquises par capteur (capteur à laser mesure hauteur au garrot) ou manuellement par (ruban à mesurer de la hauteur de la hanche, règle pliante pour la mesure de la longueur du corps), bâton de mesure de la largeur de la hanche)).

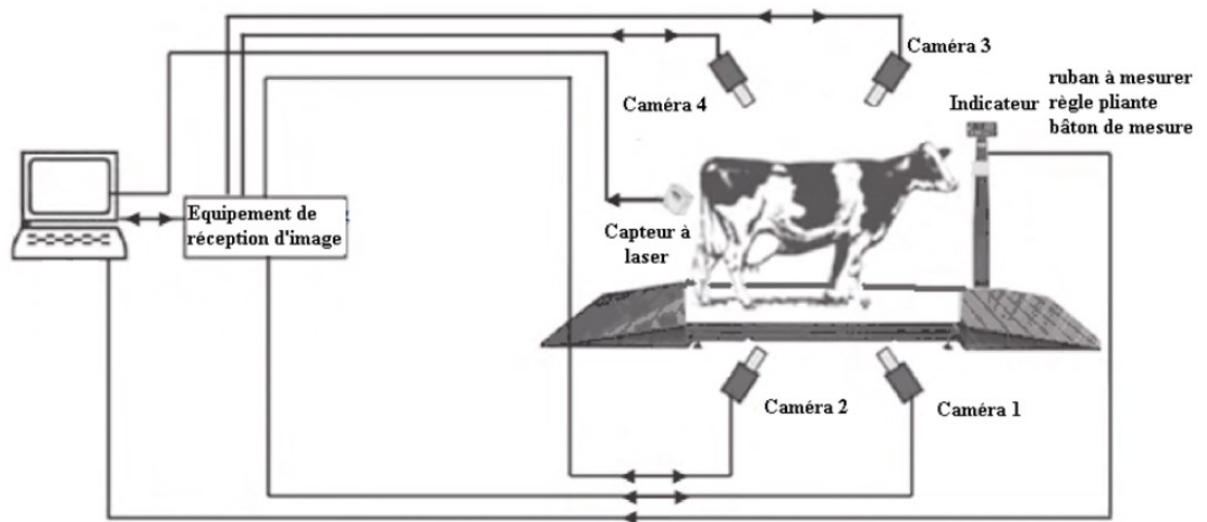


Fig.I.14 Développement de système de mesure de poids vif par analyse d'image System Opticow et OptiscanHolscher et Emsburen Germany [110, 111].

I.8 Limites des outils développés pour l'élevage de précision

Plusieurs critères peuvent être utilisés pour évaluer les outils à disposition sur le marché (Dolecheck et al. 2013) [112]. Ici, l'analyse est réalisée de la même façon que celle proposée par Rutten et al. (2013) [113]. L'évaluation proposée consiste à :

I.8.1 Identifier le niveau d'information

Quatre niveaux d'informations peuvent être analysés (Rutten et al. (2013) [113] (Fig.I.15). Le premier niveau d'information apporté par les systèmes correspond à une information compréhensible (hauteur d'herbe en cm, nombre de chevauchements par jour, niveau d'activité moyen, etc.) obtenue à partir d'un algorithme qui utilise les données brutes du capteur. Le second niveau correspond à une information directement transposable en

action (détection d'un début de chaleur, d'un inconfort, etc.) obtenue via un algorithme de détection basé sur les sorties de l'algorithme précédent. Le troisième niveau correspond à une information transposable en action qui prend en compte des données connexes (données économiques ou relatives à la stratégie de l'éleveur). Enfin, le dernier stade repose sur le niveau d'automatisation de la décision. Selon les applications, la décision peut soit être prise par l'éleveur, soit être gérée directement par le système.

I.8.2 Fiabilité du système

L'évaluation de la fiabilité du système se fait via des indicateurs appropriés au système en question (Fig.I.15).

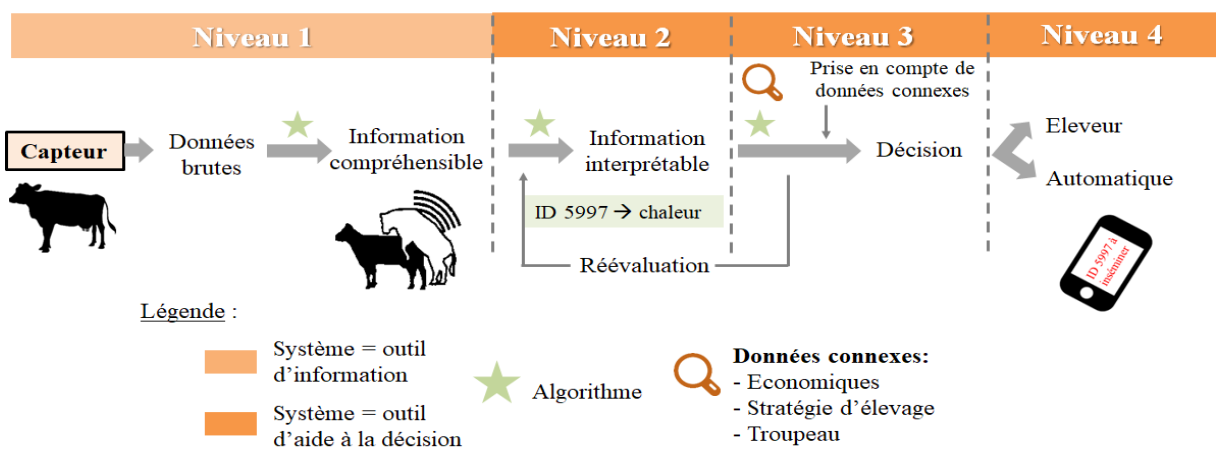


Fig.I.15 Différents niveaux d'information des systèmes de surveillance [113].

I.9 Conclusion

L'élevage de précision en est à ses premiers balbutiements. Plusieurs problématiques restent encore à résoudre pour l'améliorer surtout en ce qui le transfert de compétences d'éleveur du « savoir observer l'animal » à « savoir interpréter les données informatiques », la gestion de l'énergie des divers dispositifs électroniques utilisés et aussi faire une recherche pour une auto-alimentation énergétique des capteurs ainsi que le bien-être de l'éleveur et des animaux, le passage de l'échelle délivrance d'alerte vers la fourniture de conseil. Tous ces points doivent être améliorés pour produire des systèmes plus fiables robustes et qui peuvent relever les défis qu'attend l'élevage du futur. Les vétérinaires peuvent jouer un rôle important dans l'élevage de précision grâce à leur profonde connaissance des attentes des éleveurs, de la santé animale et peuvent fournir des conseils cruciaux pour de meilleurs systèmes automatisés. L'élaboration du système d'élevage de précision exige une connaissance approfondie de l'environnement de l'élevage (chemins, pâturage, lieu de repos, zone d'abreuvement) et des animaux marqueurs (races, âges, chefs - subordonnés, niveaux physiologiques particuliers). Une bonne connaissance du fonctionnement du

troupeau dans ce milieu est une des clés de la réussite du développement souhaité. Aucune simulation ne peut remplacer les troupeaux et faire des tests réels de la plus haute nécessité. De ce chapitre, nous pouvons conclure que les systèmes de localisation ont un rôle majeur dans le monitoring des vaches laitières. Cependant, ces systèmes sont limités de fait qu'ils ne fournissent aucune information sur le comportement réel des vaches mais indiquent seulement la zone dans laquelle les vaches sont présentes. Pour surmonter cette limite, dans le cadre de cette thèse, nous allons concevoir un système de localisation permettant à la fois de localiser les vaches mais aussi d'indiquer le comportement courant. Cependant, les vaches peuvent présenter jusqu'à 40 comportements individuels et les troubles sanitaires ou reproductifs n'influencent que quelques comportements majeurs. Pour cela, dans le deuxième chapitre, nous donnerons les corrélations qui existent entre les variables comportementales et les troubles sanitaires et reproductifs. Cela nous permettra de choisir les comportements que notre système va suivre. De plus nous allons détailler le concept du bien-être animal afin de la prendre en évidence lors de la phase de conception de notre capteur.

Chapitre II

Le bien-être animal

II.1 Introduction

Au fil des années, la technologie a permis de faciliter la réalisation des activités d'élevage traditionnel. Actuellement, il est possible de traiter les données collectées quotidiennement liées au contrôle des vaches laitières. Les technologies de l'information et de la communication appliquées au secteur de l'élevage ont permis d'exploiter ces données pour prédire et décrire le comportement associé à une production laitière plus efficace. Pour extraire des informations de localisation et détecter le comportement (activités et alimentation) des vaches on utilise souvent les algorithmes d'apprentissage automatique. En général, ces informations permettent de déterminer les besoins des animaux, en fournissant une attention personnalisée et optimale au profit de la production. Il s'agit donc de trouver le meilleur endroit du corps des vaches où le capteur de localisation (qui sera conçu dans le cadre de cette thèse) sera attaché. Cet endroit doit être minutieusement choisi pour tenir en compte du bien-être animal. Pour cela nous allons consacrer la première partie du chapitre à l'étude du bien-être animal. Il est aussi nécessaire de trouver la meilleure zone de surveillance qui permet de maximiser l'intérêt du système pour la détection des différents troubles métabolique et reproductif. Pour cela, dans la deuxième partie du chapitre nous allons détailler les corrélations qui existent entre les variables issues des systèmes de localisation (temps de repos, d'alimentation, etc.) et les différents troubles sanitaires et reproductifs. Il faut aussi trouver la meilleure méthode de classification automatique qui permettra de maximiser la durée de vie du capteur, la précision de localisation et l'exactitude de détection du comportement. Pour cela, dans la troisième partie du chapitre nous allons nous focaliser sur les méthodes de classification automatique utilisées dans le domaine de classification des activités des vaches laitières.

II.2 Le bien-être animal

Les besoins mondiaux en termes de produits laitiers, viandes et autres placent la production animale au cœur des préoccupations. D'où la nécessité absolue d'assurer un bien être croissant des animaux à travers des élevages de qualité répondant aux règles mise en place, notamment, la connaissance des animaux, l'application vigoureuse des pratiques d'élevage et la mise en place conditions de bien-être des animaux, etc.

Dans le domaine de la production laitière la préservation des jeunes femelles et males étaient essentielle, ce qui permettra le renouvellement logique et permanent des troupeaux. la production et la productivité sont étroitement liées au bien être des vaches, vachettes et males de l'élevage [114].

Les organisations internationales régissant la santé animale (OIE), l'organisation des nations unies pour l'agriculture et l'alimentation (FAO) avec la fédération internationale du lait (FIL) ont statué et fixé un guide en ce sens.

Il faudra prendre en compte [114] l'observation du comportement animal qui indique un stress ou une souffrance, l'évaluation de l'état physique, de la motricité, d'indicateurs physiologiques significatifs, des facteurs de stress environnementaux (chaleur ou froid excessif), du niveau d'expérience et de compétence des éleveurs/soigneurs, et disponibilité de soins vétérinaires, de la capacité des ressources en alimentation et en eau pour les besoins des animaux et des programmes de soins et du suivi des traitements des animaux. Le respect du bien-être animal reste conditionné par le respect des cinq mesures que nous résumons ci-après.

Assurer une bonne prévention sanitaire en évitant les souffrances, diverses maladies, voire les blessures ou autres. Assurer un espace convenable en matière d'élevage qui prend en charge les conditions appropriées pour l'hébergement adéquate (espace, humidité, température, ventilation). aussi la nutrition, l'abreuvement doivent être respectés. Épargner les animaux de bruits et de tous chocs anormaux pouvant provoquer des stress et autres. Laisser la liberté à l'animal de manifester ses comportements qui peuvent être propres à l'espèce.

Il y'a lieu de tenir compte aussi de la bonne planification du personnel d'élevage, bonnes conditions de l'alimentation et abreuvement, un bon environnement physique, de bonnes pratiques d'élevage en constante amélioration et en fin une bonne prise en charge de la gestion de la santé [114].

II.2.1 Définitions

L'état d'insalubrité des lieux d'élevage ; la situation économique de la ferme et l'environnement immédiat, nous permet plus ou moins de définir l'état du bien-être animal. Le bien-être animal où l'individu est en harmonie avec son environnement a d'abord été défini dans un premier temps comme un état de complète santé mentale et physique [4]. L'environnement doit être harmonieux pour l'animal, ces besoins essentiels doivent être assurés en qualité et en quantité. Les conditions d'hygiène et de prévention doivent être réunies pour éviter toute forme de stress, de peur et autres.

Le concept du «coping» est associé par Broome 1986. L'animal s'ajuste alors à son environnement. En effet, le changement de son environnement provoque un stress. L'animal peut percevoir de la souffrance [115], une émotion pénible telle que la peur ou la frustration, pouvant aller jusqu'à la mort en cas d'ajustement trop important. Ensuite, nous devons considérer la perception de l'environnement de l'animal, le stress, les émotions et les possibilités qu'a l'animal de s'ajuster. Et selon une structure économique, le schéma, défini par John McNerney [116] (Fig.II.1), décrit l'état du bien-être animal comme suit (en production) :

- Point A : Etat sauvage ou naturel

La vie en état sauvage ou naturel fait que l'animal n'atteint pas un état de bien être optimal et ce à cause des maladies des prédateurs ; manque, voir absence de nourriture et d'abreuvement.

- Point B : niveau maximum du bien-être animal

Les conditions nécessaires pour assurer un état de bien être de l'animal sont plus ou moins réunies (santé, nourriture, abreuvement, prévention et autres).

- Point C :

Toutes les actions menées pour améliorer la production peuvent influencées négativement sur le bien-être de l'animal.

- Point D :

La courbe peut alors aboutir à un **point D** auquel la conduite intensive de la production atteint ou dépasse les limites biologiques de l'animal, ce qui altère de manière très importante son bien-être (point « cruauté ») [116] a suggéré qu'une détérioration rapide du bien-être animal peut survenir en conduite d'élevage pour une production très intensive, si elle ne fournit pas les ressources permettant de répondre aux besoins individuels des animaux appropriés à leur capacité de production.

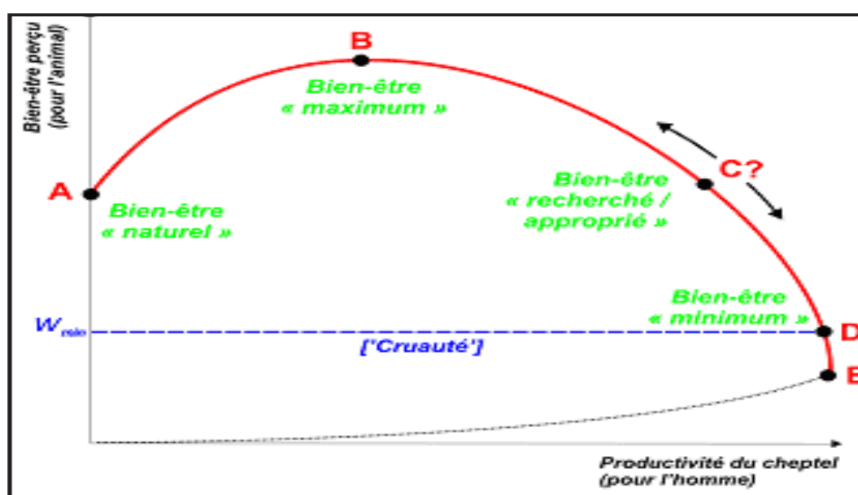


Fig.II.1 Economie Structurel (d'après McInerney) [116].

II.2.2 Les indicateurs du bien-être animal

Afin d'examiner le respect des cinq (05) libertés déterminant le bien-être animal, il est obligatoire de trouver quels sont les indicateurs significatifs

d'un état de mal-être ou d'une condition compatible avec le bien-être. Le concept de bien-être animal est multidimensionnel et reste encore en cours de réalisation. Ils existent des méthodes d'évaluation qui ont été élaborées et il est nécessaire de pouvoir :

- comprendre sur quels principes elles ont été construites,
- identifier ce qu'elles permettent d'évaluer et ce qu'elles laissent dans l'ombre,
- s'exercer à observer, mesurer et enregistrer certains indicateurs d'évaluation,
- analyser les résultats obtenus et les critiquer.

Les procédés d'évaluation du bien-être des animaux d'élevage ont été définis par le Farm Animal Welfare Council en 1992. Le respect de cinq (05) libertés fondamentales suivantes est nécessaire:

- l'absence de :
 - 1- maladies, de lésions ou des douleurs,
 - 2- insalubrité,
 - 3- déséquilibre qualitatif et quantitatif des aliments, et des abreuvements,
 - 4- vacarmes et de mauvais traitements (provoquant la peur et le stress),
 - 5-absences de liberté de l'animal d'exprimer naturellement ses comportements et autres (cette façon d'agir peut être propre à chaque espèce).

Pour assurer un état de bien-être d'un animal en élevage, il est nécessaire de respecter ces 5 libertés. Cependant, certaines méthodes d'évaluation ont redéfini les 5 libertés en 4 principes déclinés en 12 critères.

II.2.3 Indicateurs du bien-être animal en fonction des domaines d'action

Pour la mise en œuvre des systèmes de gestion de la qualité, il est indispensable de donner une considération importante au bien-être animal en prenant compte, principalement les domaines suivants qui sont en nombre de cinq [114]. Il s'agit:

- du personnel d'élevage,
- de l'alimentation et abreuvement,
- de l'environnement physique,
- des pratiques d'élevage,
- de la gestion de la santé.

Les indicateurs révélateurs d'un état de mal-être ou d'une condition compatible avec cette notion de bien-être doivent être identifiés afin d'évaluer le respect des cinq libertés.

II.2.3.1 L'environnement physique en bâtiment

Voici quelques règles de bien-être animal extraites du guide pour le bien-être animal [114] et présentées dans d'un travail de synthèse

bibliographique faisant partie de la formation Systèmes d'élevage, cursus Ingénieur agronome de Montpellier SupAgro [117].

- Lieu à l'auge

L'auge doit être installée de telle sorte à ce que l'animal s'alimente aisément sans aucune contrainte ou fatigue. Afin d'éviter les comportements agressifs entre animaux, comportements d'écartement social, indicateur de stress [118].

- Clauses de traite

La conception de sol étant primordiale pour le bien être des vaches. En effet un sol ante dérapant, ses logettes spacieuses (de telles sortes à ce que les déjections ne gênent ni la vache ni le voisinage immédiat). La surface de la logette doit permettre à l'animal de se coucher et de se lever à l'aise. Les couloirs de circulations et les logettes doivent être facilement nettoyable. Assurer une bonne ventilation et un bon nettoyage pour réduire au maximum les concentrations de dioxyde de carbone et d'ammoniac.

- Salle de traite et de soins

L'aménagement de salle de traite obéi à des règles strictes en termes de sécurité et d'hygiène. Aucun obstacle ne doit gêner la vache à son arrivée lors de la traite et sa sortie du bâtiment. Les opérateurs sont aussi sont concernées (ne pas mettre en danger l'animal ou l'opérateur).

- Emplacement d'engraissement et endroit d'attente

Des aires de repos adéquates doivent être conçue et aménagées en conséquence pour permettre aux animaux de se reposer.

- Conditions climatiques extrêmes

Les animaux doivent protégés des fortes chaleurs et des froids hivernaux. L'étable doit être conçue de telle sorte à protéger au maximum les animaux des conditions climatiques défavorables :

- Durant les fortes chaleurs, assurer un abreuvement conséquent tout en renforcent les zones d'abreuvement,
- En hiver assurer la nourriture en abondant et protéger au mieux les animaux notamment les veaux.

II.2.3.2 La conduite sanitaire (gestion de la santé)

Un état de mal être peut être dû à la détection tardive de soucis de santé chez l'animal. Il y'a lieu de tenir compte de :

- Boiterie, mammite, blessures, acidose pour les vaches laitières;

- Diarrhée et anémie pour les veaux;
- Maladies respiratoires;
- Afin de prévenir les animaux de toutes maladies (contagion) il est indispensables de veuillez à la prévention sanitaire et aux conditions d'hygiènes [114].

La prévention sanitaire et des conditions d'hygiène sont indispensables pour le bien-être des animaux.

II.2.3.3 Le comportement

Le comportement de l'animal est significatif, raisons pour laquelle il y'a lieu de rechercher une explication pour les raisons qui motivent tel ou tel changement au niveau du comportement de l'animal (blessure, stress, etc..) et y rechercher rapidement [120]. Les vocalisations peuvent se révéler être des indicateurs de stress et de souffrance [121].

II.2.3.4 Relation éleveur / animal

Le comportement affectif de l'homme vis-à-vis de l'animal, met ce dernier en confiance et déclenche en lui un besoin d'approche au fil du jour, ce climat de confiance se met en place et ce à travers les petits gestes affectif du personnel (caresses, mises à dispositions de la nourriture, de l'eau, proliférations de soins) [114, 122]. Cette façon d'agir, développer une compréhension mutuelle entre l'homme et l'animal. Ce qui permettra à l'éleveur de comprendre instantanément et ce à travers les geste et comporteent de l'animal, ses besions son état d'être.

Ainsi, la compétence, l'expérience du personnel permet d'assurer les soins animaliers complets. la connaissance de l'aspect et du comportement normaux des animaux est essentielle pour la surveillance de leur santé et bien être animal [123, 124]. Le comportement animal permet à l'éleveur de se pencher immédiatement sur son cas et de détecter les origines de telles ou telles souffrances.

La prévention est de mise entre l'homme et l'animal (anticipation de tous problèmes pouvant affecter d'animal).

Les pivots centraux d'un système d'élevage laitier sont l'homme et l'animal, évoluant dans une structure conçue et aménagée en conséquence.

Le bien être animal, assuré et assumé par l'homme à travers une astreinte permanente permet d'assurer une bonne productivité et une réduction des frais quotidiens à travers des geste et des actions préventifs évident ainsi des accidents du gaspillage de nourriture, d'eau, etc..).

Pour alléger les tâches de surveillance et autres l'homme fait appel à la technologie qui lui permet d'observer, de surveiller en temps réel son bétail. Ainsi l'outil numérique introduits dans le système d'élevage soulage énormément l'éleveur notamment en matière [125]:

- De prévention (surveillance en temps réel 24h/24h, intervention même en cas de besson, etc.),
- Maîtrise des paramètres biobiologiques,
- Maîtrise des paramètres comportementaux,
- Suivi quotidiens de l'état physique,
- Suivi de l'état physiologique et psychologique du fermiers.

II.2.3.5 Alimentation et abreuvement (guide, 2008) [114, 117]

Le bien-être animal est assuré à travers une mise à disposition de quantités suffisantes en nourriture et en eau car tout déficit peut entraîner des problèmes de santé, de tresse, influent directement sur la productivité.

La qualité et la composition des aliments doivent être en rapport avec la lactation, la croissance, la gestation et voire les conditions climatiques. Au même titre que la nourriture, l'eau doit faire l'objet de contrôles régulières afin d'éviter la présence de substances biologiques, cliniques et autres. Afin de permettre aux veaux d'atteindre une croissance optimale, il y a lieu de leur assurer un espace en conséquence et une alimentation et abreuvement sains.

Les contrôles physiques de l'animal doivent être effectués régulièrement notamment durant :

- Période de vêlage ;
- Lactation ;
- Tarsissement.

Afin d'éviter des stress et autres, les doses individuelles d'aliments peuvent être servies aux animaux à l'étable pour ce, ils seront doter d'une boucle dont la lecture est faite par le système de distribution d'aliments. Ainsi l'animal peut consommer sa nourriture à sa guise et à tout moment.

II.2.3.6 Technique d'élevage

Les manipulations désagréables des animaux sont à bannir. De telles actions provoquent un grand stress auprès des animaux qui se détient négativement sur la relation Homme/Animal, provoquant ainsi une méfiance grave (retour à la case de départ)

Ces atteintes physiques et mentales sont à éviter en prenant des mesures adéquates lors de la manipulation des animaux.

Voici quelques recommandations extraites de guide, 2008 [114]:

- Manipulation des animaux

Toute manipulation d'un troupeau doit être faite de telle sorte à éviter toutes souffrances et blessures aux animaux. Éviter la brutalité tout en prouvant la douceur dans les gestes et autres pendant le traite (dans les

enclos ou dans l'étable) chaque vache doit être examinée afin de détecter tout changement de comportement éventuel.

L'approche, le contact avec les jeunes veaux (taureaux, vaches), constitue la base de bonne relation Homme/Animal. Il faut aller dans leurs sens caractériels et docilité.

La perception des choses par l'animal est différente de celle de l'homme. Les vacarmes et grand bruits dérangent l'environnement des animaux et les met dans un état de stress absolu.

Les accessoires (anneaux, chaînes, etc..) doivent être appropriés et sans gêne pour l'animal quel que soit sa position (au repos, en déplacement).

- Traite

La mamelle et des trayons doivent être préservés en évitant des excès de traites et des traites aléatoires (incomplètes) ceci reste valable pour les traites mécanisées ou à la main.

- Mouvement des animaux

Les moyens de transport utilisés pour le déplacement des animaux doivent être adaptés de telles sortes à ce que :

- Chaque animal ait l'espace requis et éviter tout entassement.
- Le conducteur du véhicule de transport doit être un professionnel en la matière.
- Seuls les animaux en bonne santé physique et autres peuvent être déplacés.
- Les veaux doivent recevoir une partie de leur ration alimentaire avant le transport.
- Le déplacement doit se faire séparément afin d'éviter qu'ils soient étouffés ou écrasés.
- Pour les longs trajets, un temps de repos étant indispensable accompagné de rations alimentaires et d'eau pour tout le bétail.

II.2.4 Évaluer le bien-être animal

L'action des éleveurs est en constante évolution pour assurer un bien-être animal. Ailleurs, diverses méthodes nous permettent de nos jours d'arrêter des évaluations quant au bien-être animal.

II.2.4.1 Bien être qualité (WelfareQuality)

Les quatre principes arrêtés par le projet européen pour l'évaluation globale constituent les éléments clefs d'évaluation et de certification du bien-être animal [126] :

- Une excellente alimentation ;
- Un meilleur environnement ;
- Une bonne santé ;
- Des opportunités d'exprimer les comportements appropriés.

Sur cette base 12 critères ont été développés (WelfareQuality).

II.2.4.2 Programme national des fermes laitières (National DairyFarm Program)

Quatre (04) thématiques ont été développées sous forme de guides pratiques utilisés directement par les éleveurs. Ces quatre thématiques se présentent comme suit :

- La santé de l'animal de la naissance à la fin de vie ;
- L'environnement dans lequel il vit ;
- La nutrition et les manipulations ;
- Les déplacements, les transports [114].

L'évaluation est faite sur trois (03) années par un technicien conseillé avec une participation volontaire des éleveurs ce qui leur assure une amélioration continue.

II.2.4.3 Évaluation simplifié élevage- bovin « BoviWell » [127, 128, 129]

Les techniciens chargés de l'élevage ont à leur disposition un outil informatique qui leur permet de diagnostiquer le bien-être animal bovin.

Le BoviWell [129, 130], s'articule sur des fondements liberticides et s'inspirant directement du WelfareQuality (protocole / Européen).

Il est le premier moyen d'évaluation du bien-être animal et plus spécialement de la filière bovine [129]. Il doit à se développer pour aider les éleveurs à noter et comparer leurs pratiques d'élevage. Les trois (03) objectifs de BoviWell sont :

- Sensibiliser accrue de toutes les personnes impliquées dans l'élevage bovins pour le bien-être animal ;
- Évaluation du bien-être des bovins d'une exploitation ;
- Identification des points d'amélioration et les bonnes pratiques à diffuser largement et classés en 4 niveaux :
 - Entre 0 à 20 : non classés,
 - Entre 20 à 25 : acceptable,
 - Entre 55 à 80 : Supérieur,
 - Entre 80 à 100 : Excellent.

Cet outil est conçu avec les acteurs économiques et des experts scientifiques. Il est basé à priori sur les résultats de l'entretien avec l'éleveur ou il détaillé.

- Sa vision globale sur les attentes de la société,
- Les résultats enregistrés quant au bien-être animal,
- Présentation des détails concernant sur exploitation.

BoviWell est construit en concertation avec la filière laitière qui l'utilise également.

La filière bovine a la volonté d'intégrer une note minimale de cet outil dans le cahier des charges du Label Rouge gros bovins. Au-delà d'obtenir une note globale sur le bien-être de leurs animaux, ce qui intéresse les éleveurs, c'est aussi d'identifier, avec l'assistance d'un technicien, leurs points forts, leurs points faibles et les leviers d'action, souvent techniques, pour s'améliorer.

II.2.4.4 La relation entre les différentes composantes de trois cadres d'évaluation du bien-être

Notons que les tentatives d'établissement d'indicateurs d'«icebergs» simples du bien-être animal (c'est-à-dire en n'utilisant qu'un ou quelques facteurs) n'ont pas abouti jusqu'à présent.

Tab.II.1 La relation entre les différentes composantes de trois cadres d'évaluation du bien-être.

Les cinq (05) libertés	Principes	Critères	Domaines
Aménagement matériel permettant l'accès facile à l'alimentation, l'abreuvement et autres permet d'assurer la vigueur et la santé animale	Bonne alimentation	Absence prolongée de faim et soif Liberté 3	Nutrition Indicateur Évaluer la quantité distribuée et ingérée
Le confort qui est assurée par une structure d'accueil appropriée, étable avec une conception assurant des logettes spacieuses, une ventilation et humidification et température appropriées	Confort	Le confort au repos Confort thermique Liberté 2	Environnement Logement Indicateur comment se couche la vache au repos
Suivi quasi quotidien permet de palier rapidement à toute éventualité en ce qui concerne notamment les blessures, maladie et autres (actions préventives)	Bonne santé	Absence de maladie, blessure et de douleur causée par les procédures de prise en charge Liberté 1	Santé
Liberté d'exprimer une attitude normale en fournissant un espace suffisant, des installations appropriées et une compagnie du genre de l'animal	Bonne santé	Expression de comportements sociaux et autres Bonne relation homme / animal Liberté 5	Comportement
Protégé de la peur et de la détresse en fournissant les conditions éliminant la souffrance mentale	Comportement approprié	Relation émotionnelle positive Liberté 4	Comportement Indicateurs de stress et de souffrance Vocalisations

II.3 Corrélation entre variables issues des systèmes de localisation et les troubles sanitaire ou reproductifs des vaches laitières

II.3.1 Corrélations existantes entre les variables issues des systèmes de localisation et les troubles sanitaire.

- Les mammites

La mammite est une maladie répandue dans les troupeaux laitiers et peut avoir des effets néfastes sur la productivité et le bien-être des animaux. Les vaches laitières souffrant de mammite montrent une altération des signes de comportement. Notamment, les changements dans le temps de repos, l'activité et le comportement alimentaire [6]. Il est à noter que les systèmes de localisation permettent de mesurer avec une précision suffisante ces trois variables comportementales. La Fig.II.2 montre le résultat de l'étude [7]. Cette étude a pour objectif de déceler les meilleures variables adaptées à la détection précoce des mammites. D'après cette étude, Les résultats actuels suggèrent que l'apport alimentaire pourrait être un indicateur précoce de la mammite car il diminue de 7 à 10% pendant plus de quatre (04) jours avant le constat et le traitement de la mammite. Il n'est pas possible de savoir si l'apport alimentaire est réduit en raison de l'apparition d'une infection ou si la diminution de l'apport alimentaire précède l'infection et entraîne un risque accru d'infection. La diminution de l'apport alimentaire persiste après le traitement par antibiotique, il peut être un indicateur de l'état de récupération après la période de traitement antibiotique.

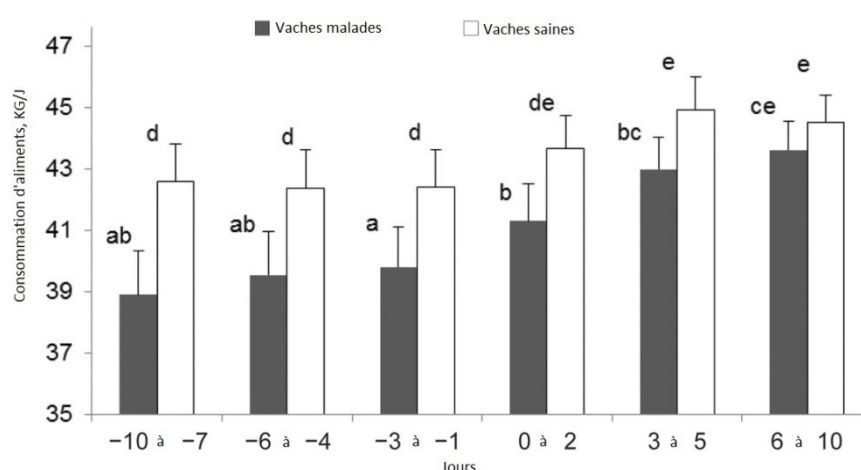


Fig.II.2 Altération causées par l'apparition des mammites sur l'alimentation des vaches selon [7].

- La boiterie

Les boiteries constituent un problème majeur de santé et de bien-être dans les troupeaux laitiers. En effet, cette maladie affecte négativement la production laitière la longévité des vaches, l'alimentation et la rumination des vaches, etc. Avec l'augmentation de la taille des troupeaux, l'évaluation visuelle de tous les individus à une fréquence suffisante est de plus en plus difficile à réaliser, et de nombreux cas de boiterie peuvent donc passer inaperçus. Dans [8], une étude visait à étudier les effets de la boiterie sur les variables de comportement. Selon le degré de la boiterie les vaches sont notées en : 1. Vache saine, 2. Vache légèrement boiteuse, 3. Vache boiteuse. 4. Boiterie sévère. La Fig.II.3 montre la corrélation qui existe entre la variable durée de marche et le degré de boiterie. Les résultats de cette étude montrent que pour la détection automatique de la boiterie, l'utilisation de la vache comme son propre moyen de contrôle est meilleure que la comparaison avec les données établie à partir de vache saine. La variabilité d'activité (notamment, la durée de la marche) au sein de la vache semble avoir des informations importantes et utiles pour la détection de la boiterie.

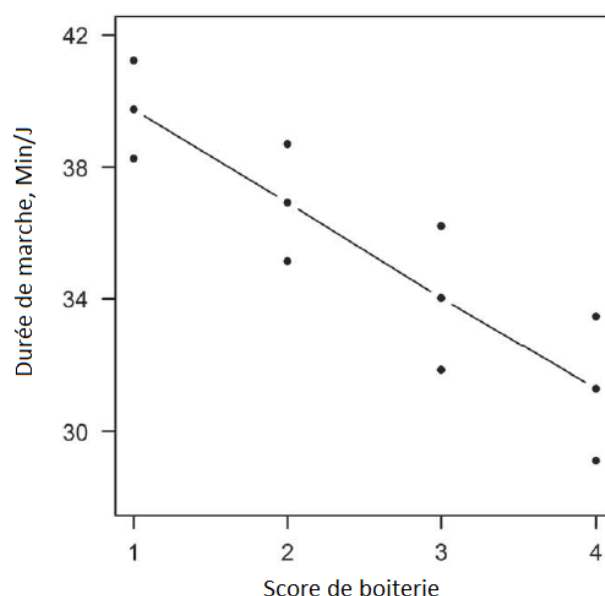


Fig.II.3 Corrélation entre stade de boiterie et la durée de marche selon [8].

- La cétose

La cétose est parmi les troubles métaboliques qui peuvent entraîner des réductions importantes de la production laitière et de la consommation d'aliments. Dans [131], l'objectif était d'identifier des changements caractéristiques dans les comportements alimentaires à court terme associés à l'apparition des troubles de santé (cétose) et à quantifier ces changements. La Fig.II.4 montre les résultats de deux vaches. On constate que lorsque les vaches ont été diagnostiquées comme souffrant de cétose, la consommation d'aliments avait déjà considérablement diminué de $10,38 \text{ kg}$ de matière fraîche (MF)/j au cours des $3,6 \pm 0,9$ jours précédents. De même, le temps d'alimentation quotidien a diminué de $45,5 \text{ min/j}$ et le taux d'alimentation

de 25,3 g de MF/min par jour avant le diagnostic. Le nombre de jours avant le jour du diagnostic au cours desquels les changements ont été observés variait de 3 à 5 jours pour le temps d'alimentation quotidien. La tendance à la diminution de la consommation d'aliments se reflète également dans la diminution du nombre de repas et de visites.

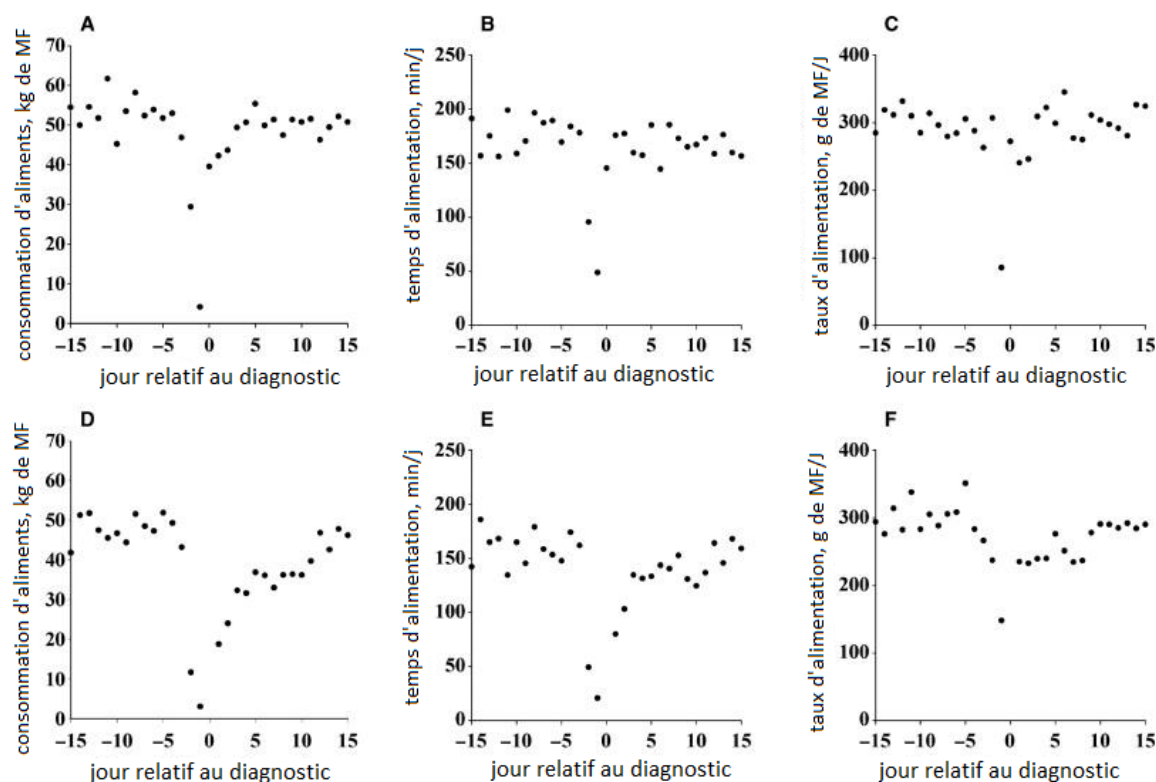


Fig.II.4 Les données de deux(02) vaches typiques présentant des changements dans le comportement alimentaire avant le diagnostic de la cétose [131].

II.3.2 Corrélation entre variable issu des systèmes de localisation et les troubles reproductifs.

Une gestion efficace de la reproduction a un effet immédiat sur la production laitière. En effet, la détection des vaches aptes à l'insémination est toujours considérée comme un problème essentiel en élevage laitier.

La méthode traditionnelle et la plus utilisée pour détecter les vaches en chaleur, consiste en l'observation directe par le personnel de la ferme. Cependant l'efficacité de la détection des chaleurs basée sur l'observation varie de moins de 50 % à 90 %. D'où la nécessité de procéder à cette opération d'une façon automatique. Donc la période des chaleurs de la vache ainsi que le vêlage nécessitent une fiabilité avec une toutes les précisions et données nécessaires pour le suivi de chaque vache.

- Les chaleurs

Le comportement des vaches laitières pendant la phase de chaleur est caractérisée par des caractéristiques spécifiques. Le fait de se tenir debout pour être montée par ses congénères est souvent considéré comme le facteur le plus significatif pour la détection des chaleurs. D'autres comportements caractérisant sont : l'agitation, le toilettage, etc. Les modifications du comportement des vaches pendant l'œstrus indiquent une activité physiologique accrue, expression de la recherche d'un partenaire compatible. Les chaleurs s'accompagnent de modifications de l'alimentation et de la rumination. Dans [132], les auteurs ont évalué les caractéristiques de l'alimentation et le temps de rumination des vaches laitières dans les jours et les heures entourant la période des chaleurs. Les résultats de cette étude sont mentionnés dans le Tableau II.2. D'après cette étude, la consommation d'aliments était plus faible le jour de l'insémination, et le temps d'alimentation était plus faible à une journée avant et pendant le jour de l'insémination par rapport au jour de référence.

Tab.II.2 Valeurs quotidiennes moyennes et erreur standard du temps de rumination et des caractéristiques de l'alimentation par vache pendant le jour de référence¹ et les jours autour de l'insémination selon [132].

	Jour de référence	Journée autour de l'IA				
		-2	-1	0	+1	+2
Temps de rumination (min)	389 ^a ± 18	381 ^a ± 19	312 ^b ± 18	314 ^b ± 18	381 ^a ± 18	389 ^a ± 18
Prise alimentaire (kg de MS)	20,0 ^a ± 0,44	20,0 ^a ± 0,46	19,2 ^a ± 0,45	17,5 ^b ± 0,45	19,5 ^a ± 0,45	19,9 ^a ± 0,45
Temps d'alimentation (min)	245 ^a ± 8,4	249 ^a ± 7,6	213 ^b ± 7,4	187 ^b ± 7,4	232 ^a ± 7,5	242 ^a ± 7,5
Taux d'alimentation (kg/min)	0,094 ^a ± 0,006	0,093 ^a ± 0,005	0,106 ^{ab} ± 0,005	0,110 ^b ± 0,005	0,098 ^{ab} ± 0,005	0,095 ± 0,005
Durée de la visite de la mangeoire (min)	3,7 ^a ± 0,32	3,8 ^a ± 0,30	3,2 ^a ± 0,29	3,1 ^a ± 0,31	4,1 ^a ± 0,31	3,9 ^a ± 0,30

a,b : Les moyennes au sein d'une ligne avec des exposants différents diffèrent ($P < 0,05$).

Jour de référence : valeur moyenne de j -7 à -3 avant insémination et j +3 à +7 après insémination.

- Le vêlage

Dans la période entourant le vêlage, la vache laitière est vulnérable ; le vêlage lui-même est physiquement éprouvant et douloureux, et la transition vers la lactation est associée à de nombreux changements physiologiques et à un risque accru de maladies. Le suivi individuel des vaches proches du vêlage est nécessaire pour que l'éleveur puisse estimer le moment du vêlage, prendre des mesures de gestion et aider au vêlage si nécessaire. Plusieurs études ont identifié des changements dans les comportements associés au vêlage qui peuvent être suivis automatiquement à la ferme. Dans [133], les auteurs ont évalué visuellement le temps d'alimentation pendant les 24 heures précédant le vêlage et l'ont comparé avec les enregistrements de base et ont constaté une diminution du temps d'alimentation pendant les 6 heures précédant le vêlage. Dans [134], Les objectifs étaient de décrire les changements dans la rumination et le comportement alimentaire autour du vêlage. Le temps de rumination, le temps d'alimentation et la consommation de matière sèche ont été suivis chez 11 vaches en stabulation libre de 96 heures avant à 48 heures après le vêlage. La Fig.II.5 montre le résultat de cette étude. D'après cette étude, La consommation de matière sèche a eu tendance à diminuer (de $3,8 \pm 1,9$ kg) au cours de la période de 24 heures précédant le vêlage ($P = 0,06$), mais ne différait pas entre les valeurs de référence ($15,7 \pm 1,5$ kg de MS/24 h) et 24 heures après le vêlage ($17,3 \pm 1,5$ kg de MS/24 h ; $P = 0,4$). Le temps passé à s'alimenter a diminué de $66,2 \pm 15,7$ min dans les 24 heures précédant le vêlage par rapport à la période de référence ($205,1 \pm 13,2$ min/24 h). Le temps passé à s'alimenter est resté abaissé dans les 2 jours suivant le vêlage (de $82,1 \pm 17,9$ min dans les 24 h après le vêlage et de $74,6 \pm 18,5$ min dans la période de 24 à 48 h après le vêlage).

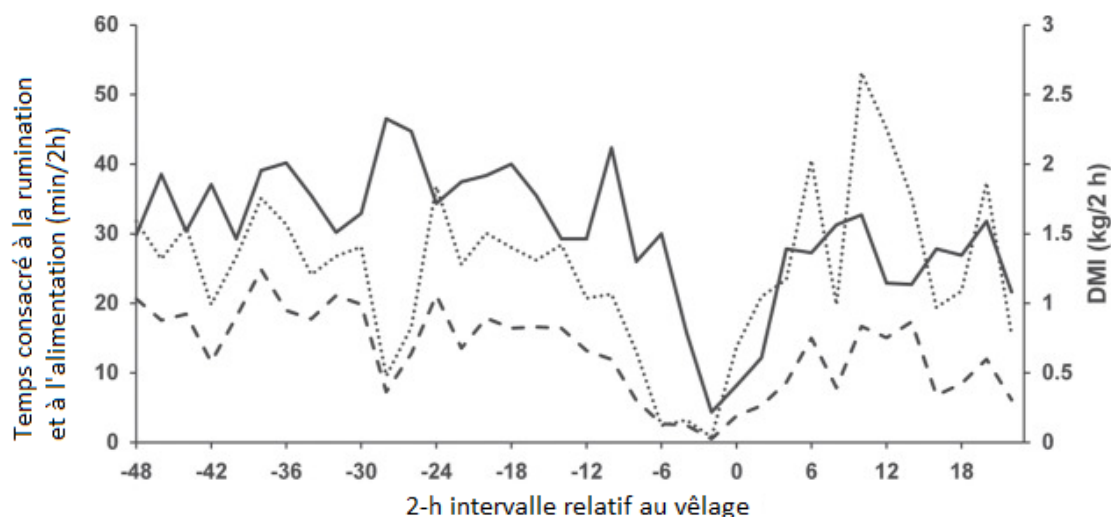


Fig.II.5 Évolution du temps de rumination (ligne continue), de la consommation de matière sèche (ligne pointillée) et du temps d'alimentation (ligne discontinue) par intervalles de 2 heures, de 48 heures avant (-48) à 24 heures après le vêlage (selon [134]).

II.4 Méthodes d'apprentissages automatiques utilisées dans les systèmes de détection du comportement des vaches laitières.

La détection du comportement des vaches laitières par capteur attaché comprend généralement les trois étapes. La première est le traitement du signal. Cette étape permet d'améliorer la qualité de données récoltées. La deuxième est l'extraction de caractéristiques. La plupart des auteurs se sont concentrés sur cette étape en sélectionnant le meilleur ensemble de caractéristiques. La troisième étape est l'apprentissage. Différents algorithmes de classification ont déjà été comparés pour identifier le classificateur le plus approprié. En effet, Les méthodes récemment proposées sont principalement basées sur différents algorithmes d'apprentissage automatique tels que les arbres de décision, les k-means, les SVM et les HMM. Les SVM et les HMM ont un coût de calcul élevé, ce qui rend peu pratique la mise en œuvre d'un tel algorithme dans un dispositif attaché aux vaches. Par contre, les arbres de décision ont un coût de calcul beaucoup plus faible et peuvent facilement être mis en œuvre en temps réel.

Lors du suivi du comportement des vaches, la collecte de données est souvent effectuée à l'aide d'accéléromètres fixés à différentes parties du corps de la vache. Ces accéléromètres sont fixés à la tête, aux pattes et au dos des vaches. Cependant, le comportement alimentaire n'a pas d'impact sur les pattes ou le dos, mais affecte uniquement la tête de l'animal, c'est pourquoi cet emplacement est le plus adapté au suivi de l'alimentation. Sur la base de ces confirmations, nous avons opté pour l'utilisation de l'oreille de l'animal pour collecter des données inertielles pour le suivi du comportement alimentaire. Il est à noter que cet emplacement est le moins stressant aux vaches et il est facilement accessible (par exemple, en cas d'installation du capteur sur les vaches). Le comportement des animaux peut être classé dans différentes catégories et avec différents capteurs. Dans [11], les auteurs ont utilisé un algorithme qui se base sur les k- plus proches voisins. Dans [12], les auteurs ont proposé l'utilisation d'une méthode ML hiérarchique pour classer le comportement du bétail. Tout d'abord, ils ont classé le comportement du bétail en deux catégories de comportement : actif ou inactif. Chacune de ces deux catégories est ensuite décomposée au niveau suivant en catégories comportementales plus spécifiques. Ensuite, ils ont testé la méthodologie proposée en utilisant deux classificateurs couramment utilisés : Random Forest (RF), les SVM. Une autre approche de détection des comportements des vaches laitières est l'apprentissage non supervisé. L'objectif de [13] était de développer un modèle de classification non supervisé efficace des données collectées par des unités de mesure inertielles (IMU), fixées sur le dos des vaches laitières logées en stabulation libre. Les données ont été agrégées selon différentes fréquences d'échantillonnage et fenêtres de segmentation. Les différents moments des comportements : couché, debout, se coucher, se lever, marche et stationnaire ont été observés et enregistrés en temps réel. Le modèle de classification conçu est basé sur des modèles de mélange fini (FMM) uni variés et multivariés et sur les arbres de décision. Les transitions valides entre les comportements debout et couché sont garanties par des contraintes imposées par un automate fini-

état déterministe. Les résultats obtenus ont révélé que 99% des comportements sont bien classés. L'avantage de cette étude est que les seuils des vaches sont ajustés d'une façon individuelle. Cela permet à l'algorithme de tenir en compte le fait que les vaches ont des stades de morphologie différents (taille, poids, etc.). Les différents algorithmes de détection des comportements des vaches laitières peuvent aussi être classés en deux catégories : les algorithmes distribués et les algorithmes centralisés. Les algorithmes distribués sont caractérisés par le fait que les calculs sont effectués sur plusieurs nœuds du système. En effet, le capteur collecte les données, effectue le prétraitement et la classification, puis une synthèse des activités des vaches laitières est transmise à l'utilisateur. Il est à noter que dans les algorithmes distribués toutes les opérations de prétraitement et de classification des données sont réalisées en temps réel dans le capteur. La limitation de ces algorithmes distribués est que les méthodes de classification doivent être exécutées sous des restrictions de mémoire et de puissance de calcul. Cependant, l'avantage est que les capteurs auront une efficacité énergétique élevée. Cela est dû au fait que seule une synthèse comportementale est transmise, ce qui limite les communications sans fils. Les algorithmes centralisés sont caractérisés par le fait que le calcul est effectué par une seule entité centrale. Lorsque ces algorithmes sont utilisés pour détecter les activités des vaches laitières, les capteurs fixés aux vaches laitières sont utilisés comme enregistreurs de données, et toutes les opérations de prétraitement et de classification sont effectués dans un terminal centralisé. L'avantage de ces algorithmes est que les algorithmes d'apprentissage avec des niveaux de calcul élevés (SVM, HMM) peuvent être implémentés dans des terminaux centralisés, ce qui permet une précision de classification élevée. Le problème de ces algorithmes est le flux de données entre les capteurs et le terminal, ce qui a un impact sur la consommation d'énergie des capteurs et limite donc le temps de déploiement du système. Dans [14], un algorithme dirigé par le temps (Time-Driven) utilisant une méthode de veille/réveil (sleep/wake-up) est proposé pour assurer la mise en œuvre en temps réel d'un modèle de classification comportementale. Cet algorithme permet également de contrôler le taux de calcul et de transmission. La synthèse comportementale est transmise sur des réseaux de capteurs sans fil par le biais d'un réseau de radiofréquences en utilisant une approche événementielle. L'exactitude de classification été de 99%. Pour estimer la durée de vie de ce système, les auteurs ont utilisé une batterie de 2,6 Ah avec un facteur de décharge de 15%. Les résultats montrent qu'avec une fréquence de 1Hz, le capteur consomme environ 0,086465 mA. L'espérance de vie du système est d'environ 2 ans 334 jours et 23 h.

Selon [135], les émetteurs-récepteurs sans fil consomment une quantité importante d'énergie par rapport aux processeurs. L'énergie des nœuds sans fil est principalement dissipée pendant les processus de réception et de transmission. La radio des nœuds de capteurs peut passer en mode veille via la stratégie de veille/réveil afin de réduire la consommation d'énergie des composants RF des WSN. Aucune communication de données n'a lieu pendant le mode veille. Les nœuds de capteurs se réveillent pour collecter et transmettre des données pendant une certaine période, puis retournent en mode veille pour conserver l'énergie.

II.5 Conclusion

L'évaluation du bien-être animal passe nécessairement par [136]:

- Les actions préventions de veilles à l'état de santé de l'animal,
- La mise de cette disposition dans un lieu d'élevage approprié (étable) répondant aux normes existantes en la matière (espace, humidité, ventilation, etc...)
- Une bonne relation humain/animal [137].

À travers ses actions, il y a lieu de suivre de très près les comportements des animaux à travers lesquels des évolutions peuvent être constatées notamment [138]

- Comportement environnemental,
- Relation entre animaux
- Expressions pouvant amener à l'amélioration de certains gestes quotidiens de l'animal, voire même d'ajustement structurel et matériel.

Chapitre III

Le système de gestion de l'élevage de précision proposé

III.1 Introduction

Le développement récent de la production laitière se caractérise par l'augmentation de la taille des troupeaux et par conséquent une observation visuelle de plus en plus compliquée du comportement des vaches. Ce comportement constitue traditionnellement la base du diagnostic des maladies de production. Cette limitation implique un besoin croissant de systèmes de détection automatisée des changements dans les comportements afin d'identifier les vaches qui présentent un comportement malade. Les systèmes de capteurs peuvent être utilisés pour mesurer les variables comportementales telles que l'activité, le repos et l'alimentation. Ces variables changent avec l'apparition de la maladie mais interagissent également avec des facteurs externes. L'objectif de ce chapitre est de décrire le système de gestion de l'élevage de précision proposé par cette thèse. Ce système permet la surveillance du comportement et la traçabilité des vaches laitières à l'aide de réseaux de capteurs RFID (Radio Fréquence Identification) sans fil à faible coût.

III.2 Comportements des vaches laitières, indicateurs importants

Les comportements des vaches laitières, comme se nourrir, se tenir debout et marcher, sont des indicateurs importants pour diagnostiquer la santé et les maladies des vaches [139, 140]. Il a été démontré dans plusieurs études que la maladie a un impact significatif sur la variation du comportement alimentaire et de l'activité des vaches laitières. Par exemple, Thorup et coll [141] ont noté qu'une vache boiteuse se nourrit plus rapidement qu'une vache en bonne santé. Fogsgaard et coll [142] ont rapporté qu'une vache mammitique se nourrit moins qu'une vache en bonne santé.

Pour cette raison, de nombreuses études tentent de développer des systèmes de positionnement des vaches laitières basés sur différentes technologies telles que le GPS [143], le système de localisation en temps réel [144], les caméras vidéo [145] et des systèmes basés sur l'identification par radiofréquence (RFID)[146].

Ces approches et technologies offrent différentes manières d'aborder le problème de localisation et de suivre en temps réel les vaches laitières. Cependant, la limitation majeure des systèmes de localisation est de ne pas indiquer la durée de participation aux différents comportements d'intérêt (alimentation, boisson, etc.).

Les systèmes de localisation et de surveillance du comportement des vaches laitières pourront garantir l'identification individuelle des vaches. Les systèmes d'identification peuvent être divisés en systèmes conventionnels et biométriques [147].

III.3 Systèmes d'identification biométrique et technologie RFID

Les systèmes d'identification biométrique sont basés sur des approches d'analyse d'images pour identifier les vaches. Des images de vaches sont prises et analysées pour extraire des zones d'intérêt telles que le museau [148], la queue [149], etc. Cette région est utilisée comme marque d'identification biométrique. La plupart des méthodes biométriques sont à un stade précoce de leur développement et ne sont toujours pas utilisées dans les exploitations agricoles, plusieurs problèmes restent à résoudre comme l'efficacité de ces approches pour faire l'identification sur une longue période (voire des années) et l'évolutivité des tests sur des milliers d'animaux et dans plusieurs fermes. La Fig.III.1 est un exemple du système de gestion.

Les méthodes conventionnelles utilisent des capteurs attachés tels que des puces RFID pour assurer l'identification individuelle des vaches laitières.

L'utilisation de la technologie RFID devient très courante dans plusieurs exploitations [150]. Trois types de capteurs RFID sont utilisés, ces capteurs sont les boules, les étiquettes auriculaires et les étiquettes injectables. Parmi ces capteurs, les marques auriculaires électroniques se sont avérées les plus efficaces et lisibles [151].

En plus d'être utilisée comme système d'identification, la technologie RFID a également été évaluée à des fins de localisation des vaches [152]. La RFID semble avoir émergé comme l'une des meilleures solutions disponibles grâce à sa robustesse, son prix bas et sa flexibilité [146, 153].

L'architecture de base d'un système RFID est composée d'une étiquette comprenant une antenne, une puce, un lecteur équipé d'une antenne et d'un émetteur-récepteur, un poste de travail pour héberger le middleware et la base de données.).

Fondamentalement, il existe deux types d'étiquettes RFID, à savoir les étiquettes actives et passives [154, 155]. Les étiquettes actives sont celles avec une source d'alimentation par batterie interne utilisée pour générer des signaux en réponse au lecteur RFID [154]. Le compromis est une taille plus grande, un coût plus élevé et une durée de vie plus courte, en fonction du type de batterie utilisé et de la température de fonctionnement.

Quant aux passifs, ils n'ont pas de source d'alimentation interne, ils sont donc alimentés directement par l'émetteur-récepteur du lecteur RFID. Ces types d'étiquettes sont beaucoup plus légers que les étiquettes actives, moins chers et ont une durée de vie opérationnelle plus longue. Leur inconvénient réside dans les plages de lecture plus courtes par rapport aux plages actives nécessitant donc un lecteur très puissant [156].

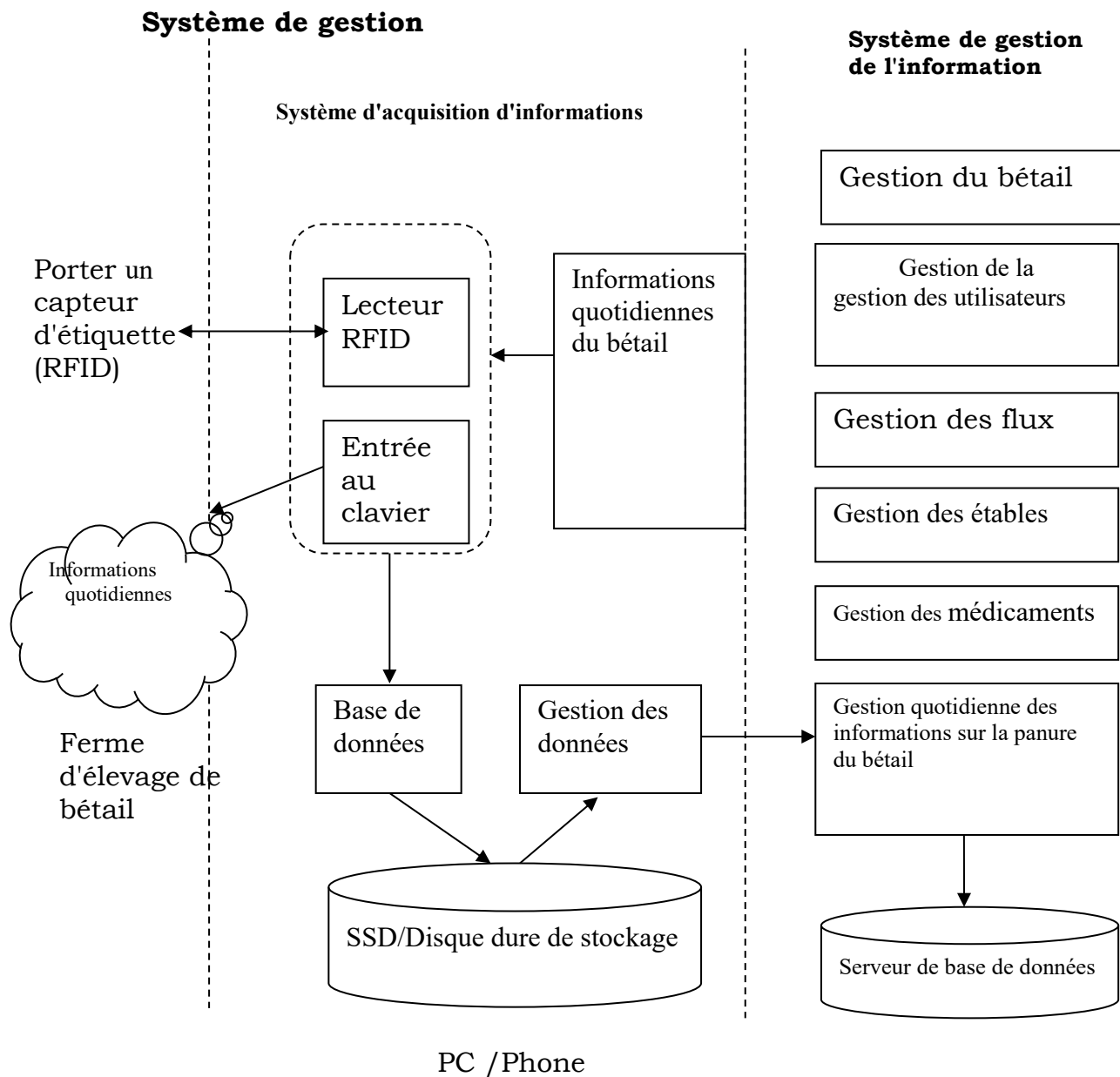


Fig.III.1 Système de gestion.

Le système est conçu pour l'acquisition de données pendant le processus d'élevage du bétail. Le gardien du troupeau lit le code d'identification figurant sur l'étiquette auriculaire du bétail et saisit les informations relatives à l'élevage par le serveur combiné au lecteur RFID.

Les informations sont ensuite stockées dans la mémoire du lecteur et transmises à la base de données attachée à la plateforme Raspberry PI.

Le module de gestion basé sur PC est conçu pour l'identification du bétail et la gestion quotidienne. Il peut fournir les fonctions de gestion des informations sur la ferme, recevoir des données de réseau Bluetooth et l'écriture des informations d'identification du bétail dans l'unité de détection des étiquettes RFID. Ce module de gestion est illustré à la Fig.III.1.

III.4 Conception générale du système de positionnement par RFID

La RFID est un système d'acquisition automatisée de données qui permet la collecte et le transfert sans fil (ondes radio) de données liées à la production et à l'entreprise. Le système RFID comprend : un ordinateur ou un microcontrôleur, un lecteur RFID, une antenne (qui peut être intégrée dans un lecteur RFID) et un transpondeur - étiquette. L'antenne est utilisée pour amplifier le signal, qui est émis par le lecteur vers l'étiquette, ainsi que le signal, qui est renvoyé au lecteur par l'étiquette, ce qui augmente la portée de lecture de l'étiquette (tag).

Le lecteur RFID peut être un appareil fixe ou portable, qui peut activer et capter les signaux émis par les étiquettes. Depuis un ordinateur ou un serveur, le lecteur reçoit des instructions générées par le logiciel dédié. L'unité de contrôle à l'intérieur du lecteur exécute les instructions reçues.

Les lecteurs diffèrent par la portée et la fréquence de fonctionnement. Semblables aux balises, les lecteurs peuvent avoir une petite portée (jusqu'à plusieurs centimètres), une portée moyenne (jusqu'à 1 mètre) et une longue portée (des dizaines de mètres, avec une antenne supplémentaire). Les composants des systèmes RFID sont sélectionnés en fonction du domaine d'application. Dans la plupart des pays, les fréquences de fonctionnement des systèmes RFID sont strictement définies. Une fois que l'étiquette RFID entre dans la plage de fonctionnement du lecteur, le lecteur détecte son signal d'activation. Le lecteur décode ensuite les données codées dans le circuit intégré de l'étiquette et les données sont transférées vers l'ordinateur pour traitement. Le principal avantage des systèmes RFID est qu'ils ne nécessitent pas de contact pour fonctionner correctement.

Les étiquettes peuvent être lues dans n'importe quel environnement industriel, ce qui peut impliquer de la neige, du brouillard, de la glace, des taches de couleur, de la saleté et autres. Les étiquettes RFID lisent également rapidement - dans la plupart des cas, la réponse est de l'ordre de 100 millisecondes. La nouvelle génération de lecteurs a la possibilité de lire simultanément plusieurs étiquettes.

L'identification des bovins en 'Algérie n'est pas obligatoire. Elle est réalisée dans les 20 jours après la naissance ou avant de quitter la ferme de naissance, par des étiquettes à double oreille sur les deux oreilles fixées à travers l'oreillette.

Les étiquettes auriculaires ont un code unifié pour l'identification de chaque vache individuellement. Ce code se présente sous la forme d'un code à barres avec la structure représentée sur la Fig.III.3. Les deux premières

lettres représentent le code du pays, tandis que le numéro à dix chiffres représente le numéro unique attribué à l'animal particulier. Le premier chiffre est le code du pays (3 - Algérie), le deuxième chiffre est le code de la race bovine (1 - vache), le troisième chiffre est un chiffre de contrôle attribué par la base centrale et les 7 chiffres restants sont l'identifiant de l'animal.

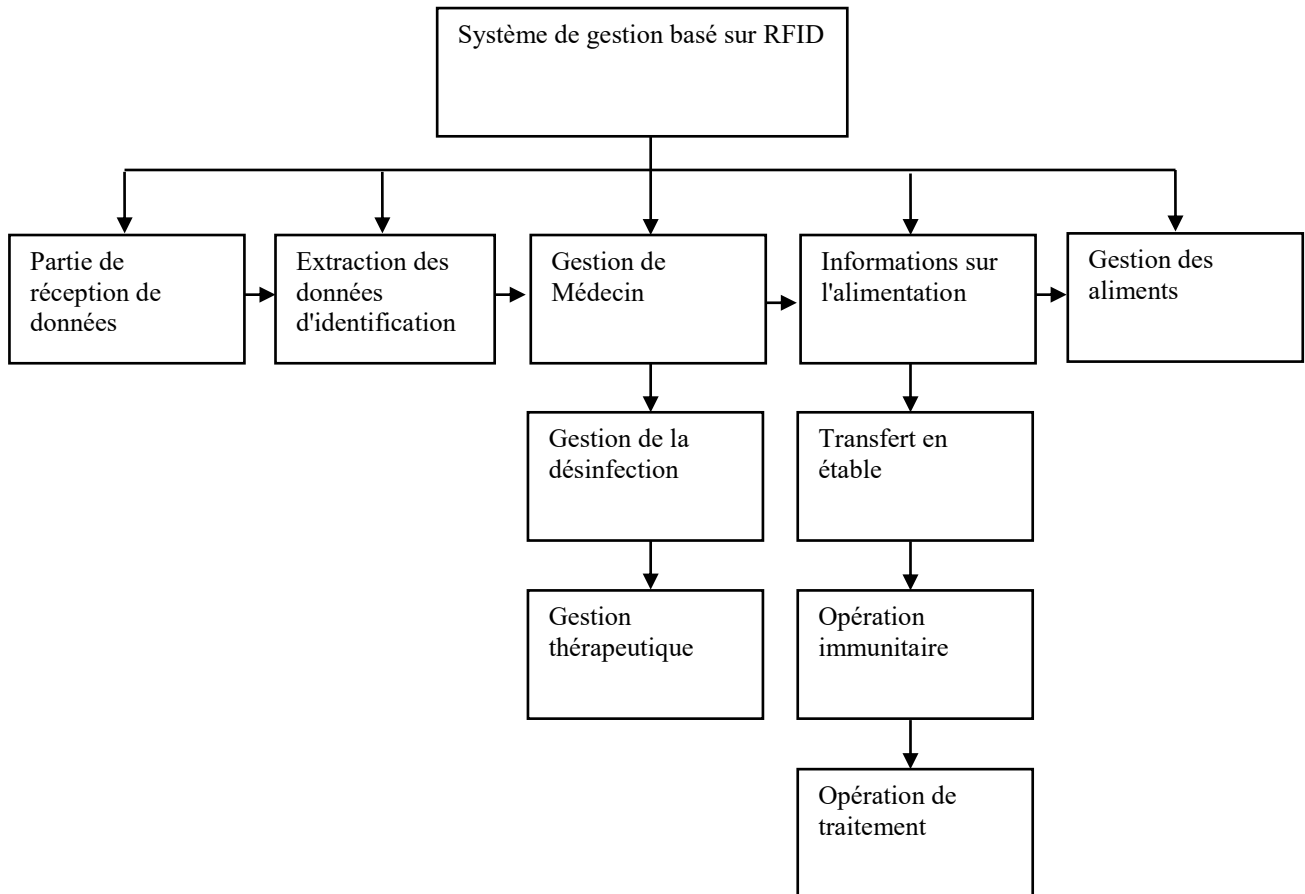


Fig.III.2 L'architecture du système de gestion général basé sur la RFID.

Dans les recherches menées dans les exploitations agricoles, l'identification RFID s'est avérée efficace pour de nombreuses raisons, par exemple :

- 1) Pour identifier l'animal, la lecture RFID étant possible sur de courtes et moyennes distances, il faut s'approcher physiquement de l'animal sans le déranger.
- 2) L'ouvrier agricole n'a pas à passer son temps de travail à lire des données, ce qui influence directement la productivité et les dépenses de l'exploitation.
- 3) Les erreurs ne se produisent pas lors de l'entrée des données sur le PC.
- 4) L'enregistrement des modifications sur les données individuelles des animaux est possible localement, car la RFID possède une mémoire où

les données peuvent être stockées, il n'est pas nécessaire de modifier les données dans une base de données unifiée, qui peut être accessible pour différentes raisons (pas d'infrastructure adéquate, etc.), et ne nécessite pas non plus d'implication supplémentaire de l'utilisateur.

- 5) RFID dédié à un animal peut être utilisé en continu, une modification des données est possible.
- 6) RFID lorsqu'il est crypté est difficile à dupliquer, ce qui n'ouvre pas les possibilités d'abus.

Compte tenu du fait que l'identification des bovins (vaches laitières) est nécessaire, et qu'elle est effectuée de la manière décrite ci-dessus, ainsi que des problèmes constatés dans les exploitations, l'idée est venue d'utiliser la technologie RFID pour l'identification et suivi du comportement de chaque veau (ou vache laitière), en raison de l'importance des cycles de suivi réguliers. Il s'agit de l'un des principaux paramètres influençant la réalisation d'un cycle de surveillance de meilleure qualité.

L'identification des vaches par transpondeur RFID, fonctionne à une fréquence de 134 kHz et stocke un code d'identification de 128 bits dans la mémoire du lecteur.

La fréquence utilisée convient pour éviter les collisions de données à faible distance de lecture. Le taux de lecture est relativement faible mais correspond à notre objectif en raison du fait que seul le code d'identification est nécessaire. Ainsi, notre étude peut être généralisée à tout autre système RFID tel que l'adoption d'autres fréquences, ou d'autres types de technologies, car nous avons basé notre étude sur le pire des cas avec la bande HF avec ses nombreuses limitations. Notre objectif est de traiter ces problèmes et de prendre en compte certaines limites des normes ISO.

Actuellement, seuls les transpondeurs passifs et en lecture seule sont autorisés pour l'identification des animaux. Dans notre travail, seules des étiquettes (tags) passives sont utilisées.

L'identification se fait grâce à un numéro d'identification individuel de l'animal composé de quinze (15) chiffres contenus dans une puce RFID qui est fixée à un collier attaché au cou de la vache, il offre l'avantage d'être lu avec précision et rapidement au moyen de la RFID lecteurs. Nous avons utilisé le codage suivant, selon la norme ISO.

XXX Trois (3) : code du pays,

XXXXXXXXXXXXXT (12) : chiffres Numéro d'identification unique de l'animal,

Dans notre cas la codification de la vache est comme suit :

213	XXXXXXXXXXXXXX
-----	----------------

213 : code du pays = Algérie

Fig.III.3 Modèle de codage de vache en Algérie.

III.4.1 Description de la technologie RFID adoptée

La RFID, ou identification par radiofréquence, est une technologie dans laquelle les informations stockées sur une micro-puce peuvent être lues à distance, sans contact physique en utilisant l'énergie du spectre RF. Un système RFID se compose d'un lecteur, ou interrogateur, qui émet un signal RF via une antenne. La micro-puce reçoit l'énergie via une antenne attachée (appelée étiquette RFID) et fait varier la réponse électromagnétique de son antenne de manière à ce que les informations puissent être transférées au lecteur.

Suite à la comparaison de ces différentes technologies d'identification [31, 32, 33, 34], la technologie RFID a été adoptée comme méthode d'identification et support des informations de traçabilité dans le domaine de l'agriculture intelligente.

La transformation des données et la transmission des données d'identification, de localisation et de surveillance du comportement sont plus complexes. Afin d'atteindre la vitesse rapide de transmission des données lors de la transformation des unités traçables, il était nécessaire de choisir un type d'appareil plus efficace capable de lire / écrire des données en même temps. Considérant que la RFID UHF avait la capacité de lire simultanément un grand nombre d'étiquettes allant de 3 à 9 m à une vitesse de lecture élevée, l'étiquette RFID UHF pourrait être adoptée comme support d'échange de données dans notre processus de traitement. Mais la RFID LF est adoptée à des fins économiques et pratiques. Composants de notre système d'acquisition de données basé sur RFID (partie tag sensor)

Dans ce travail, nous avons conçu et réalisé un système de localisation et de suivi des vaches basé sur RFID. Le système assure une liaison avec le lecteur RFID sur une fréquence de 134Khz et avec une modulation en amplitude ASK de l'onde porteuse. Le circuit de lecture permet de fournir la fréquence porteuse de 134 KHz et de la transmettre à l'étiquette et de détecter le couplage magnétique de l'étiquette. Afin d'interpréter ces données, la fréquence porteuse doit être supprimée et les fréquences enveloppantes doivent être amplifiées et transformées en une grandeur mesurable.

III.4.2 Description de l'étiquette RFID réalisée

La fonction principale de l'étiquette réalisée est d'envoyer l'information et converser avec le lecteur RFID en utilisant une fréquence porteuse de 134 KHz spécifique à la bande de surveillance des animaux. Le lecteur interroge l'étiquette et détecte le couplage magnétique leur permettant d'échanger des informations. Il est composé du processeur STM32-ARM utilisé pour stocker et traiter les informations, moduler et démoduler le signal radiofréquence (RF) et d'autres fonctions spécialisées telles que la détection. La Fig.III.4 montre le schéma de principe du lecteur RFID avec l'unité centrale de traitement. L'étiquette RFID est composée essentiellement d'un démodulateur, d'un amplificateur de puissance et d'une antenne avec un rectificateur que nous allons décrire dans ce qui suit.

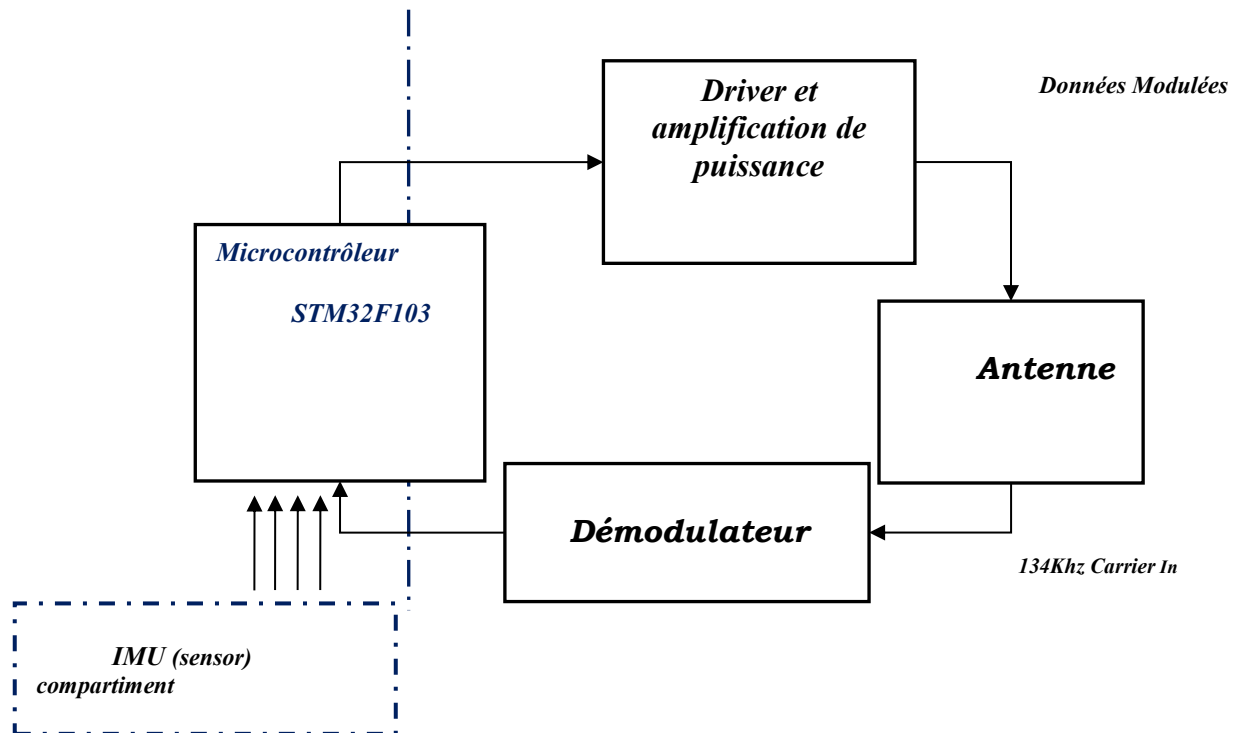


Fig.III.4 Schéma synoptique de l'étiquette RFID.

III.4.2.1 Démodulateur

Le démodulateur détecte le signal modulé ASK du Lecteur. La Fig.III.5 montre le circuit de base du démodulateur ASK.

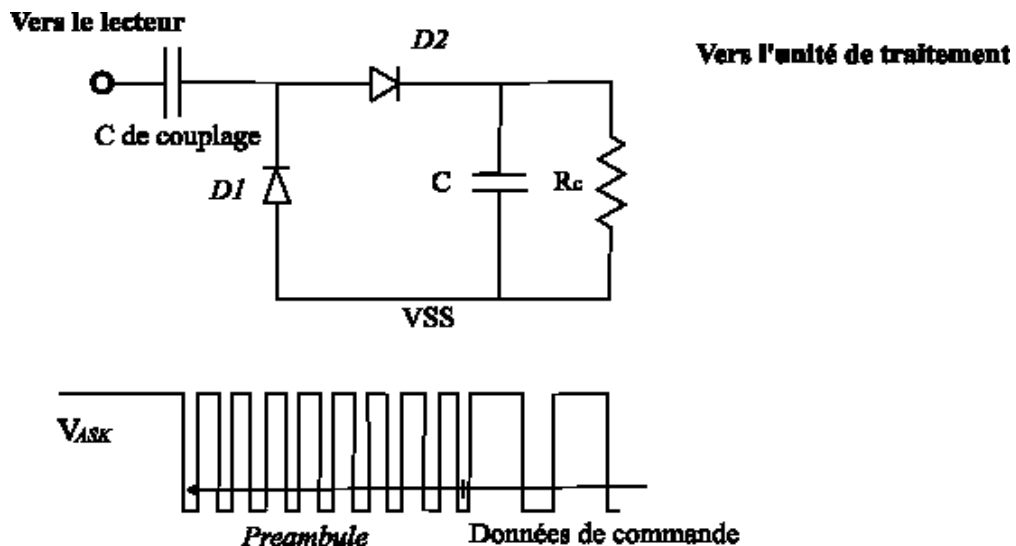


Fig.III.5 Exemple de signal démodulé, sortie du démodulateur. Le premier signal série est un signal de préambule, le deuxième signal série est la commande du lecteur.

III.4.2.2 Driver RF et amplificateur de puissance

Le circuit de la Fig.III.6 ci-dessous est une self RF suivie d'un tampon de courant et d'un amplificateur à demi-pont. La self RF est utilisée pour filtrer la plupart, sinon toutes les fréquences harmoniques supérieures trouvées dans la sortie d'onde carrée du MCU, laissant la fréquence fondamentale, 134 KHz, sous forme d'onde sinusoïdale à amplifier. Le générateur d'onde carrée vu dans la figure ci-dessous est, en réalité, la sortie du MCU et un ensemble d'onduleurs pour augmenter le courant. Des diodes sont utilisées dans le demi-pont pour aider à réduire la distorsion de croisement causée par des points différents de l'un ou l'autre des transistors dans le demi-pont qui s'allume et s'éteint.

Dans notre conception, nous avons utilisé les transistors 2N3904 et 2N3906 NPN et PNP BJT du laboratoire, car ils étaient bon marché et pratiques. Afin d'obtenir un meilleur gain de l'amplificateur, et ainsi augmenter la plage de lecture de notre circuit, nous aurions pu utiliser des MOSFETS de puissance à la place pour le demi-pont, mais nous avons trouvé que les BJT nous donnaient un niveau de gain généralement acceptable, surtout une fois le circuit réglé. .

L'étage de puissance est normalement utilisé pour augmenter la puissance de sortie RFID jusqu'au levier nécessaire correspondant à la couverture de distance souhaitée. L'atténuateur est utilisé pour contrôler le gain ou la puissance de sortie du PA. Un circuit d'adaptation est nécessaire pour un transfert de puissance optimal entre l'entrée et la porte du transistor. La polarisation du transistor se fait via une self RF. L_d et la self accordent le circuit à la fréquence LF de 134Khz. Le circuit PA (Amplificateur de puissance/Power amplifier) est illustré à la Fig.III.6.

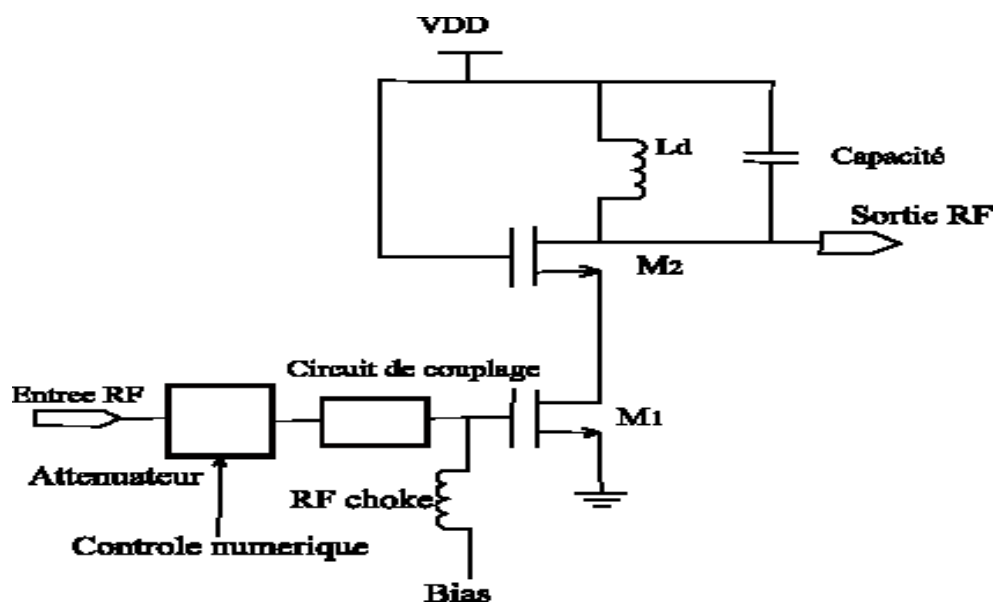


Fig.III.6 Le diagramme d'étage d'amplificateur de puissance attaché au lecteur utilisé.

III.4.2.3 Sous-système d'antenne

Le sous-système d'antenne se compose d'une ou plusieurs antennes et des interfaces et de la logique de prise en charge qui permet aux lecteurs RFID d'interroger les étiquettes.

III.4.2.4 Rectification et filtrage demi-onde

Cette partie du circuit est consacrée à séparer la fréquence porteuse de l'enveloppe de modulation, car c'est seulement l'enveloppe qui contient les données qui nous intéressent. La première étape consiste à redresser le signal en demi-onde pour simplifier les choses, puis à le filtrer légèrement avec un filtre R-C. Comme c'est la norme pour filtrer les signaux CA de cette manière, il y a une ondulation de 134 KHz, mais en choisissant de bonnes valeurs, nous pourrions faire ressortir les fréquences enveloppantes de l'ondulation. Pour cela, nous avons choisi $R = 390 \text{ KOhms}$ et $C = 2,2 \text{ nF}$.

III.4.3 Description du lecteur RFID réalisé

La fonction principale du circuit de lecture est de fournir une fréquence porteuse de 134 KHz spécifique à la bande de surveillance des animaux. Le lecteur interroge l'étiquette et détecte le couplage magnétique leur permettant d'échanger des informations. Il est composé du processeur STM32-ARM utilisé pour stocker et traiter les informations, moduler et démoduler le signal radiofréquence (RF) et d'autres fonctions spécialisées telles que la détection. La Fig.III.2 montre le schéma de principe du lecteur RFID avec l'unité centrale de traitement.

Le schéma fonctionnel et l'organigramme de notre circuit de lecteur est montré dans la Fig.III.7 :

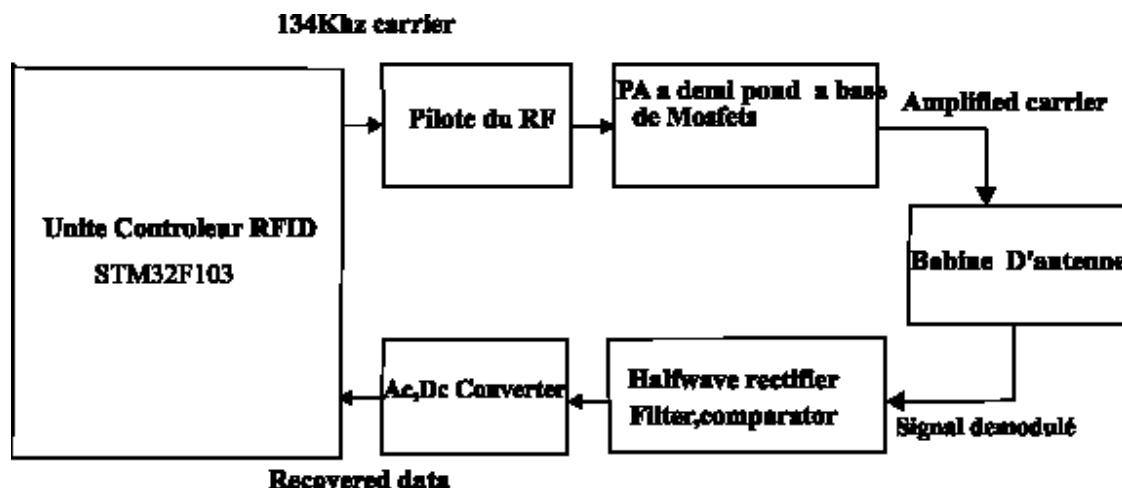


Fig.III.7 Schéma de bloc du lecteur RFID de type LF.

L'idée générale du fonctionnement du circuit est la suivante : Le microcontrôleur STM32 fournit une onde carrée de 16.75 KHz puis

multipliée par 8 grâce à un multiplicateur de fréquence externe afin d'obtenir notre fréquence porteuse de 134Khz. Ceci est ensuite envoyé à travers une self RF, qui est essentiellement un filtre passe-bas passif avec une forte atténuation des harmoniques supérieures et nous laisse avec seulement une onde sinusoïdale qui est l'onde porteuse. L'onde sinusoïdale est ensuite amplifiée à l'aide d'un transistor PNP émetteur suiveur et d'un demi-pont pour maximiser le courant. Étant donné que notre circuit résonnant est un circuit série L-C, la résonance maximale est obtenue avec une impédance minimale, il est donc très important que nous fournissions une amplification de courant adéquate pour ne pas surcharger notre microcontrôleur.

Du côté de la réception, le signal est d'abord redressé en demi-onde, car la partie négative du signal ne fait pas vraiment de différence, puis est alimenté à travers un filtre RC demi-onde pour aider à éliminer la plupart de la porteuse à 134 KHz et détecter le signal d'enveloppe. Ce signal est ensuite filtré passe-bande en utilisant une série de filtres passe-bande actifs, et filtré filtre Butterworth passe bas actif pour diminuer davantage le gain dans les fréquences en dehors de l'onde porteuse et augmenter le gain des signaux d'enveloppe tels qu'il sature les amplis-op des filtres. En dernière étape, le signal est passé à travers un comparateur et un diviseur résistif pour produire une onde carrée à des niveaux logiques et interprété dans le MCU.

III.4.4 Système de récupération des informations de traçabilité issues du lecteur RFID

Le système de récupération fournit une interface permettant aux gestionnaires de récupérer les informations issues des étiquettes RFID de localisation. Le gestionnaire peut récupérer les données de comportement et traçabilité via plusieurs types de dispositifs de saisie, à savoir le clavier, le PC, le Smartphone ou n'importe quel terminal pouvant accéder au serveur et cela via le réseau local ou via le net. Les informations récupérées par le terminal, qui affichera toutes les informations complémentaires, les informations du fermier (nom, adresse, numéro de contact et site Web de l'entreprise), les informations sur l'élevage (date de naissance, lieu de naissance, poids de naissance, registres de vaccination, registres de traitement, registres d'alimentation, registres de désinfection et registres de transfert de l'étable) et les informations sur le traitement (le statut de quarantaine, le numéro d'agrément, l'heure du traitement et les informations de certification), etc.

III.4.5 Gestion des événements

Lorsqu'un lecteur RFID détecte une étiquette de traçage (tag sensor), alors il effectue une observation. Une observation qui diffère des observations précédentes est appelée un événement. L'analyse des observations est appelée filtrage d'événements. La gestion des événements définit quels types d'observations sont considérés comme des événements et détermine quels événements sont suffisamment intéressants pour mériter d'être soit mis dans un rapport, soit envoyés immédiatement à une application externe sur le réseau. Dans notre application tout événement

consistant de l'interaction de lecteur RFID et tag sensor est un événement, car les données envoyées sont continuellement analysées via le processeur locale (Raspberry -PI) et qui calcule la position d'animal à cet instant mais il récupère également les données des positions antérieurs estimées grâce à l'algorithme du de "Dead-reckoning" qui s'exécute continuellement sur la même unité de traitement à savoir la Raspberry PI. Par ailleurs, des données de comportement sont récupérées sur les lecteurs affiliés à l'endroit relatifs à la mangeoire etc., et dont les données de l'accéléromètre embarqué sont récupérés puis analysées afin de déduire le comportement de l'animal.

III.4.6 Système de gestion de l'information

Le système RFID se concentre sur la collecte et la mise à jour des informations. Par conséquent, contrôler directement le matériel n'est pas la fonction principale du système RFID. Cependant, la plupart des étiquettes RFID avec la mémoire limitée ne peuvent pas fournir et enregistrer de nombreuses informations. Pour améliorer la mémoire limitée de l'étiquette RFID de traçage, toutes les informations doivent être simplifiées en fonction de la conversion du code. Chaque code peut indiquer que «Quel événement situé à Où (région, lieu) et Quand (heure, date, etc.)».

Par exemple, l'aquiculture ou l'industrie de l'élevage crée les registres ou fermage de chaque bétail, l'élevage de vache dans le cas présent. Dans le passé, le bétail de la ferme était marqué par chaque agriculteur. Le bétail de la ferme porte l'étiquette RFID spécialement conçu. Par exemple, une étiquette d'oreille est l'étiquette RFID qui est attachée à l'oreille de l'animal. Lorsque les informations telles que la mise à jour de l'emplacement, etc., doivent être transférées, le gestionnaire peut insérer l'étiquette RFID via le système RFID portable (Smartphone en vue de suivre l'évolution le plus proche de l'animal pour des fins de suivi de testes). Lorsque le système RFID obtient les informations de l'étiquette RFID, le lecteur RFID transmet les informations au système principal.

Le principal système sert de pont pour les différentes applications tierces. Par exemple, lorsque la vache change la position de sa tête, le système RFID présenté l'étiquette RFID pour l'identification de cette vache en premier. Ensuite, les valeurs de l'identification unique de l'étiquette RFID sont écrites dans l'application tierce (l'algorithme implémenté) et stockées en tant que base de données. Chaque identifiant unique d'étiquette RFID est lié aux données affichées dans la base de données. La chaîne d'approvisionnement du bétail peut obtenir les informations et retracer les informations possibles telles que la maladie infectieuse, la situation actuelle de la transmission.

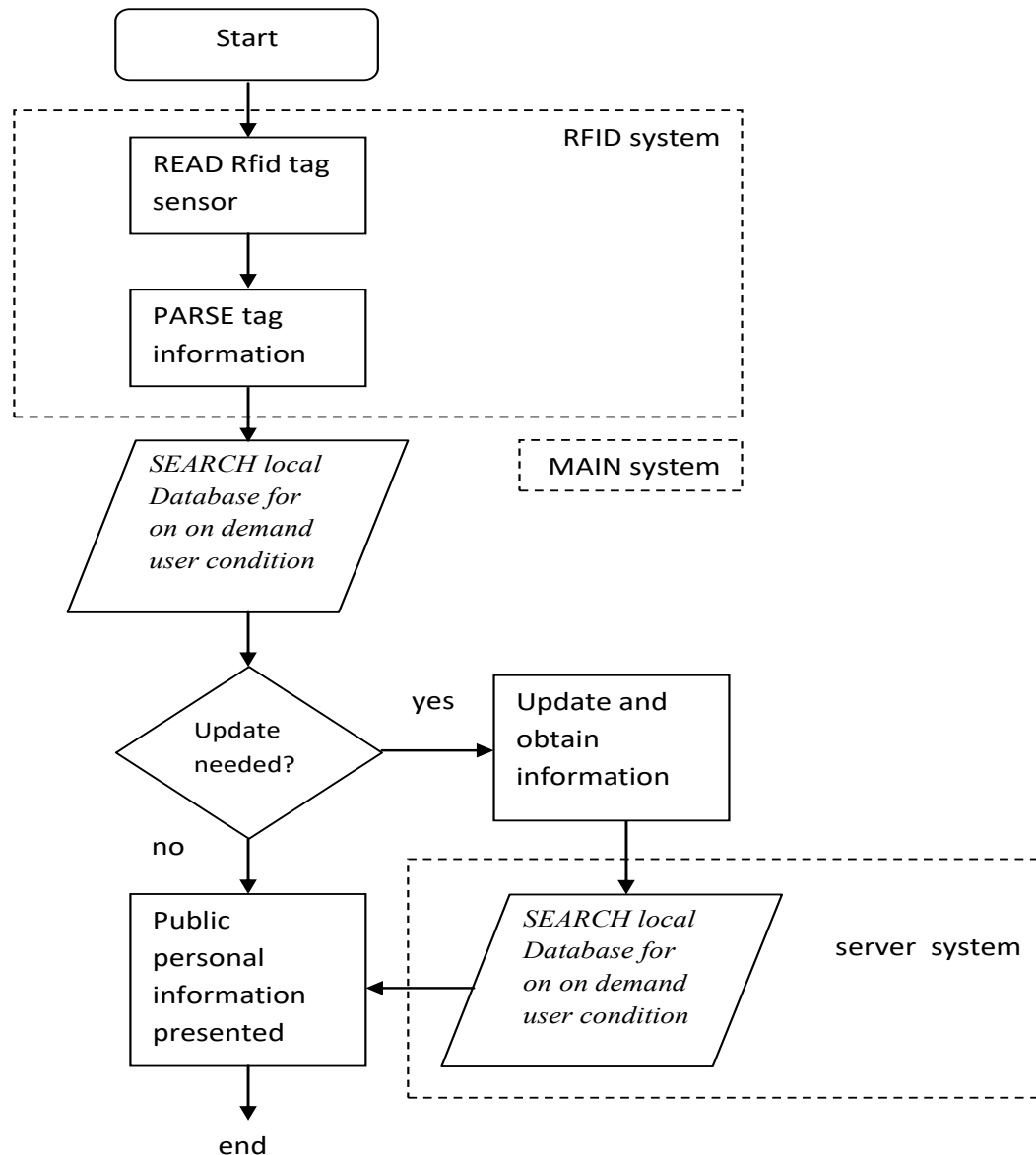


Fig.III.8 L'organigramme de l'accès au system RFID par l'utilisateur dans l'application de service.

III.4.7 Interface humaine et système de services (Partie réseau)

Contrairement au service RFID basé sur un PC serveur, Le serveur est basé sur Raspberry Pi et dédié à l'unité de traitement principale et au serveur local pour le système d'acquisition RFID. Certains appareils portables peuvent supporter l'accès également au système RFID embarqué. En outre, si l'utilisateur demande des informations supplémentaires, l'appareil portable peut obtenir les services ou les informations via une connexion réseau Internet. L'appareil portable peut également communiquer avec le serveur principal basé sur PC. Par conséquent, les autres services tels que l'interrogation de la base de données peuvent être obtenus via le serveur. Par exemple, les personnes qui s'installent dans une zone différente peuvent avoir besoin des services individuels. Les services peuvent être activement fournis aux utilisateurs via un serveur local. Ou bien,

l'utilisateur peut utiliser les appareils portables mobiles pour accéder activement aux services à partir du serveur local ou du serveur principal.

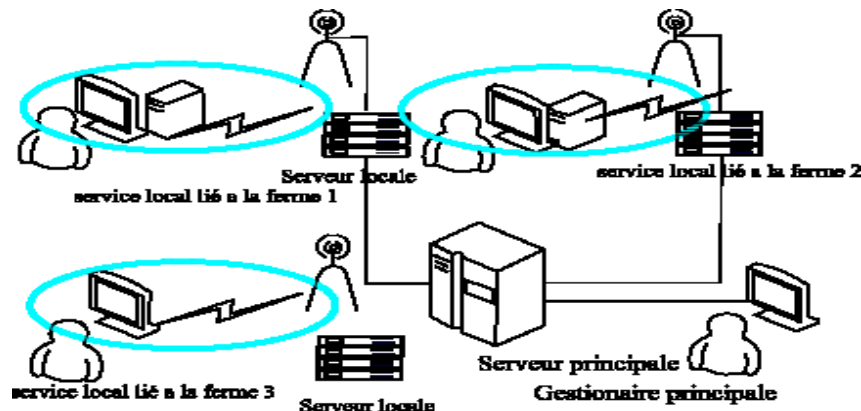


Fig.III.9 Gestion des services sur le réseau local.

Lorsque l'utilisateur a besoin des services publics ou personnels de la zone locale, l'utilisateur doit se trouver dans la minuscule zone couverte par la liaison WIFI dans notre cas présent. Ensuite, L'unité de traitement à base de Raspberry PI est connectée au réseau WIFI du serveur local placé dans la zone spécifique qui lui permet d'accéder entre autres aux lecteurs RFID via la liaison Bluetooth et obtient les informations d'identification et de localisation de l'étiquette RFID de traçage. Le lecteur du système RFID envoie les informations au serveur central via Internet. Après avoir reçu les informations, le serveur répond aux services requis à la demande correspondant à la zone locale spécifique à laquelle les services requis à la demande ont été enregistrés dans la base de données auparavant. Enfin, l'utilisateur peut obtenir les informations ou les services de localisation via l'interface utilisateur.

De plus, la base de données peut enregistrer l'historique des besoins de l'utilisateur. Les exigences statistiques des utilisateurs peuvent être utilisées pour classer le type de service le plus demandé par l'utilisateur. La prochaine fois, le serveur de services pourra fournir les services personnels en fonction des résultats classés. En d'autres termes, les utilisateurs peuvent être servis avec les services auxquels ils accordent le plus d'attention à savoir les données de localisation ou du comportement. La Fig.III.8 indique l'organigramme de l'utilisation du dit système.

III.4.8 Raspberry Pi 2 modèle B

Le Raspberry Pi (Fig.III.10) est le contrôleur de tous les capteurs, et où notre algorithme s'exécute. De petite taille et à moindre coût. Il se connecte sur un moniteur d'ordinateur ou un téléviseur et utilise un clavier et une souris standard. La Raspberry PI est composée de :

- cent Bases Ethernet,
- Quatre ports USB ou sera connecté la carte WIFI
- Quarante broches GPIO
- Port HDMI complet
- Prise audio 3,5 mm combinée

- Emplacement pour carte Micro SD
- Noyau graphique vidéo Core IV 3D



Fig.III.10 Raspberry PI sert d'unité de gestion centrale pour les lecteurs d'une ferme.

III.4.9 Architecture du système de localisation et de suivi de comportement du bétail (méthode utilisée)

- Aperçu sur le fonctionnement

Comme le montre la Fig.III.11, afin de clarifier la portée de l'application cible, le travail présenté dans cette thèse considère le suivi de la marche, de l'intensité de la prise alimentaire et de l'emplacement des bovins afin de détecter les anomalies du comportement, la grossesse, les maladies animales telles que la mammite ou la boiterie et efficacité réduite des pâturages et des enclos (c.-à-d. parties clôturées des pâturages).

La localisation des animaux fait référence à l'association entre la position de l'étiquette référencée au lecteur situé dans un enclos ou dans chaque pâturage ou aux portes d'une grange. Les animaux peuvent être déplacés entre les granges, les pâturages et les enclos, ce qui rend leur emplacement pas toujours évident pour le personnel de la ferme. Le système envisagé est destiné à une entreprise agricole, qui peut posséder plusieurs pâturages et étables où sont détenus des animaux. Les utilisateurs de ce système sont les éleveurs, les chefs d'exploitation et les vétérinaires. Les éleveurs peuvent utiliser ce système afin de détecter les troubles des animaux et de mieux en prendre soin. En particulier, la détection d'une maladie ou d'un comportement anormal peut informer les éleveurs lorsque les animaux peuvent être imprégnés avec succès.

Le contrôle de l'efficacité des pâturages permettra aux éleveurs de savoir quand déplacer les animaux vers un pâturage différent, ce qui augmente l'efficacité de l'élevage et améliore la santé et le bien-être des animaux. Enfin, ce système peut les informer de l'emplacement actuel d'un animal d'intérêt. Les gestionnaires de ferme peuvent utiliser le système cible pour surveiller le travail des éleveurs et évaluer l'efficacité de la ferme. Ils peuvent utiliser les données sur l'efficacité des pâturages pour développer leur politique concernant l'utilisation des terres, l'achat ou la vente de propriétés et la modification du nombre de têtes de bétail. Les vétérinaires

peuvent utiliser le système pour mieux comprendre les conditions des animaux malades.

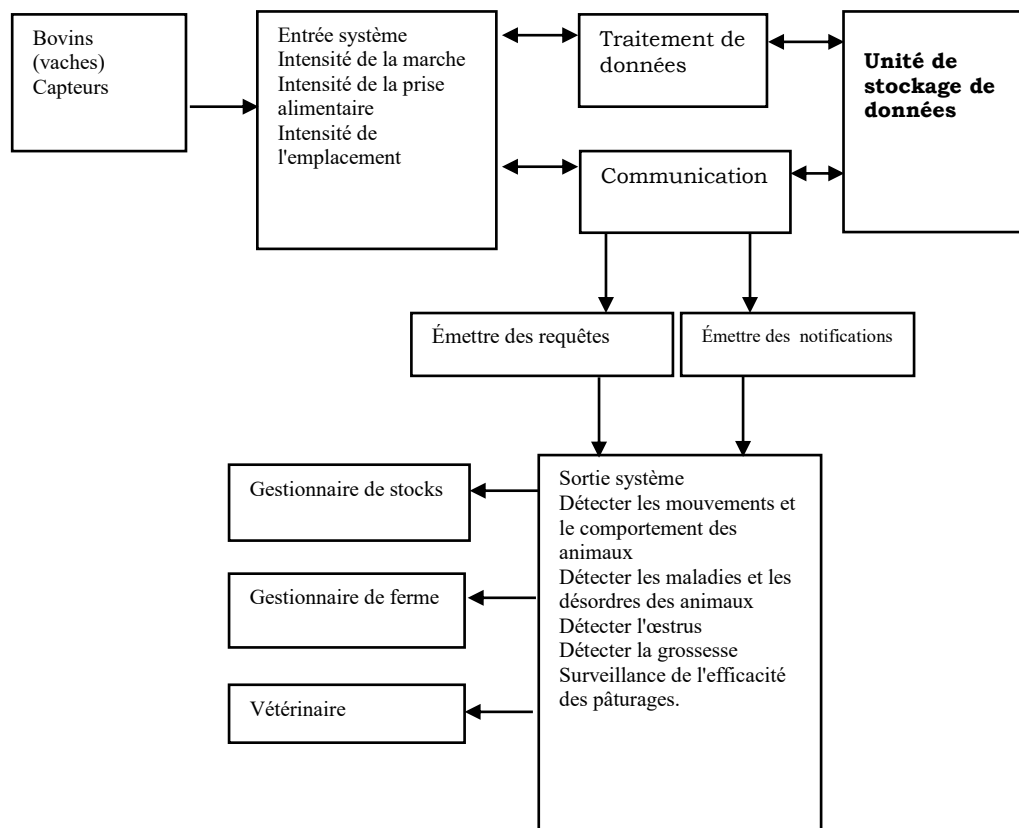


Fig.III.11 Schéma fonctionnel du système de surveillance du bétail.

Le nombre moyen de bovins détenus par les exploitations moyennes en Algérie est de 20, ce qui donne une idée de l'échelle requise du système de suivi. Dans les cas extrêmes, une entreprise agricole peut avoir beaucoup plus d'animaux que cela. Le bétail est gardé toute l'année en continu sur les pâturages ou toute l'année dans l'étable, mais la pratique la plus courante est de les garder sur les pâturages pendant la moitié la plus chaude de l'année et à l'intérieur pendant l'autre période restante. Le système proposé peut être utilisé pour surveiller les animaux, qu'ils soient maintenus en permanence sur les pâturages ou en permanence dans une grange et qu'ils produisent ou non actuellement du lait. Selon les conditions, la densité de peuplement des pâturages peut aller de 2 à 7 animaux par ha, ce qui se projette directement sur la densité de la topologie sans fil.

Le système cible devrait alors surveiller les animaux gardés à la fois dans les étables et sur les pâturages, dans cette fourchette de densité d'élevage. L'intensité de la marche est généralement mesurée et la prise d'alimentation (comportement) par un accéléromètre monté qui fait partie de la conception du capteur de balise. La détection des œstrus et des maladies animales nécessite des données historiques, qui sont également utiles pour l'examen vétérinaire. Par conséquent, les données brutes et traitées doivent

être conservées en toute sécurité tant que l'animal reste dans la soute de l'éleveur. Afin de répondre aux exigences identifiées au chapitre 2, l'accès aux données collectées doit être assuré par des requêtes et des notifications (Fig.III.11).

Les utilisateurs doivent pouvoir interroger les données en temps réel et historiques, brutes et traitées. Pour rendre les données collectées par le système plus accessibles à tous les types d'utilisateurs, l'interrogation doit être possible depuis les terminaux de l'exploitation, à distance via Internet, depuis les téléphones portables, les ordinateurs personnels et de bureau. Selon les besoins identifiés, les utilisateurs, même ceux qui travaillent actuellement sur le terrain, devraient être informés dès que possible de la détection des maladies et des œstrus. Par conséquent, en fonction des contraintes financières de l'entreprise agricole et de la préférence des utilisateurs, des notifications devraient être envoyées aux téléphones portables des utilisateurs.

III.5 Présentation du système de localisation adopté

Le système est composé d'un dispositif IMU et d'un émetteur-récepteur RFID où les sorties du capteur sont envoyées sans fil aux lecteurs RFID. Les capteurs inertiels sont fixés à l'oreille de la vache. L'attitude et la position du capteur monté sur la tête sont calculées à l'aide du système de navigation inertielle. Les positions des lecteurs sont prédéfinies et localisées sur une carte programmée et stockée au niveau de l'unité centrale travaillant autour d'une Raspberry PI et d'un dispositif de stockage. Chaque fois qu'un capteur d'étiquette est trouvé à proximité d'un lecteur, le lecteur alimente l'étiquette et la fait sortir de son ancien état (le mode veille est utilisé pour être dans cet état à ce moment-là). Immédiatement, l'étiquette de capteur transmet les données de la mémoire (FIFO) comprenant toutes les positions antérieures qui sont calculées par le processeur embarqué (composant STM32 de l'étiquette) lors de ses déplacements depuis la rencontre du premier lecteur.

Chaque donnée transmise et reçue par le lecteur est immédiatement retirée de la mémoire de l'étiquette pour libérer la mémoire. Lorsque toutes les données de l'étiquette sont transférées et que sa mémoire FIFO est vide, le lecteur envoie alors l'instruction suivante pour réinitialiser l'algorithme qui effectue les opérations de calcul de la position en remettant à zéro les conditions initiales éliminant ainsi toutes les erreurs accumulées pendant le temps passé entre deux lecteurs. Dans le cas où le transfert est interrompu avant la fin de l'opération, le lecteur suivant rencontré continuera là où le dernier s'est arrêté.

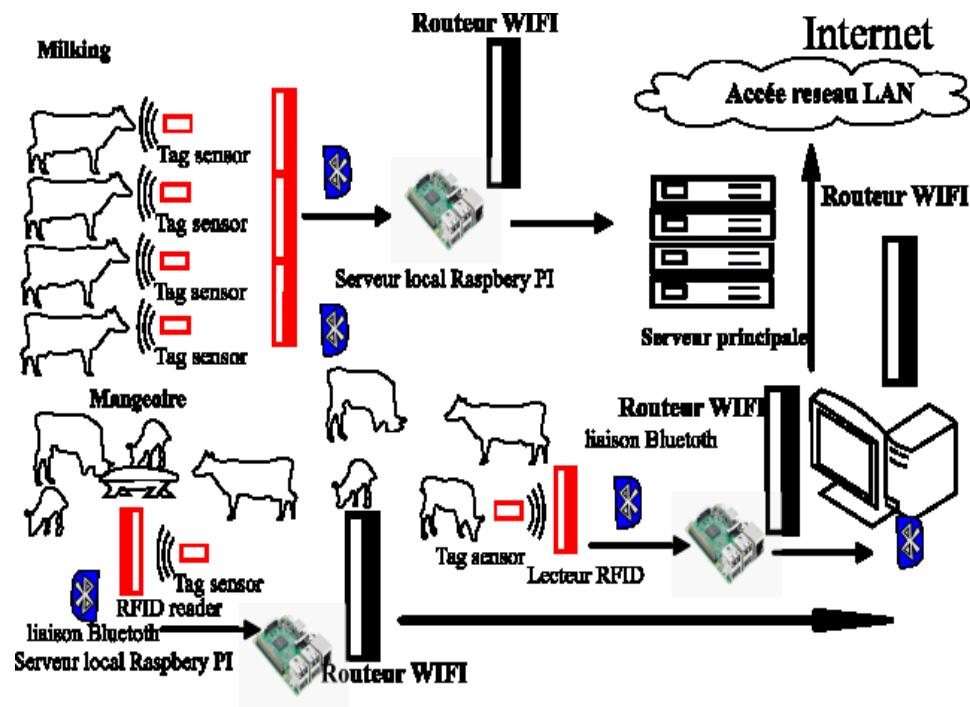


Fig.III.12 Vue d'ensemble du système de l'environnement de gestion du bétail.

La tâche qui synchronise les opérations des lecteurs RFID est effectuée par l'unité centrale (Raspberry Pi) présentée sur la Fig.III.12, permettant aux différents lecteurs de travailler dans un système de mise en réseau automatisé. Plusieurs unités Raspberry Pi sont réparties sur un plus grand air de ferme ou même sur différentes fermes adjacentes et constitueront un réseau plus vaste. Chaque module Raspberry Pi communique via Bluetooth à faible énergie avec ses lecteurs RFID les plus proches placés dans des endroits stratégiques où les animaux mangent ou dorment et aux portes etc. Ainsi, il collecte leurs données pour un traitement et une surveillance en temps réel.

III.5.1 Architecture du système embarqué

L'architecture du système proposé sur les deux Fig.III.12 et Fig.III.13 est un dispositif monté sur un animal qui a la forme d'un collier avec une unité de microcontrôleur intégrée et RFID, des capteurs inertiels à des fins de localisation et de surveillance du comportement. Les mouvements et le comportement de marche sont mesurés par le même appareil monté, et l'algorithme implémenté implémente les fonctions de localisation et la surveillance du comportement à l'aide du (modèle de classification des mélanges finis). Les mesures de l'unité de détection d'étiquettes sont acquises par le système via une communication sans fil, les mesures des capteurs sont stockées et traitées par le lecteur afin de répondre aux requêtes in situ de l'unité serveur Raspberry Pi (c'est-à-dire les requêtes émises par les utilisateurs localisés avec les animaux) et de déclencher l'envoi de données au réseau (Fig.III.12).

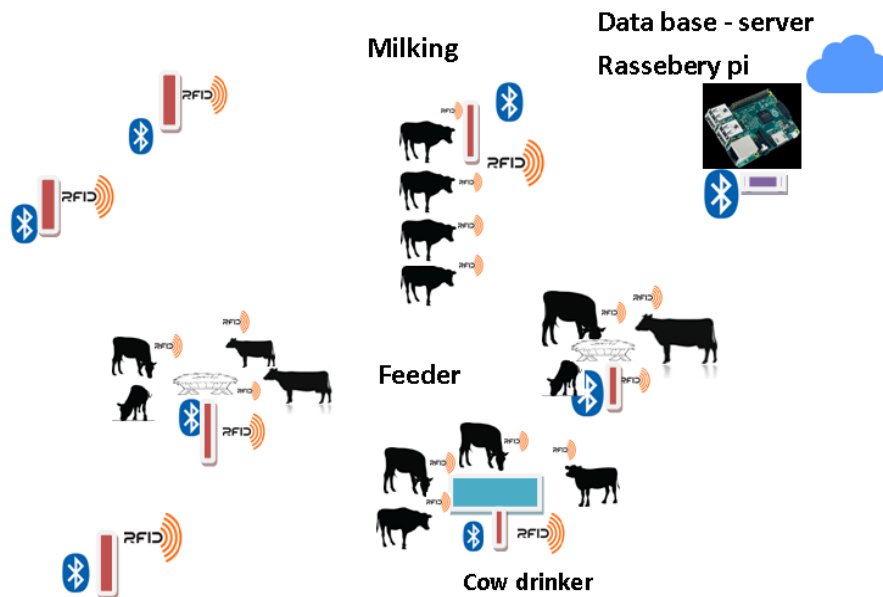


Fig.III.13 Architecture du prototype utilisé.

Le capteur et les lecteurs d'étiquettes attachés au collier sont alimentés par batterie. Illustré à la Fig.III.14.

L'utilisation de sources d'énergie renouvelables est difficile dans ce scénario. Les batteries solaires ne sont pas efficaces lorsque les animaux sont gardés à l'intérieur, peuvent nécessiter un nettoyage manuel et nécessitent des batteries rechargeables à durée de vie limitée. Le traitement des données effectué par des appareils montés sur des animaux vise à détecter les comportements anormaux, les grossesses, les maladies animales, etc. Ils disposent d'interfaces réseau sans fil et transmettent les données brutes et traitées au serveur de la ferme via les lecteurs RFID (illustré à la Fig.III.9).

Les lecteurs sont des éléments d'un réseau qui transmet les données collectées et traitées par des appareils montés sur des animaux aux serveurs de la ferme. Les lecteurs sont des appareils fixes ou toujours mobiles. S'ils sont fixes et montés à l'extérieur, ils peuvent être alimentés par l'énergie solaire ou éolienne. Les lecteurs sont associés au pâturage ou à la grange ou à une porte où ils se trouvent et attachent leurs identifiants aux données transmises à partir d'appareils montés sur des animaux. Cela permet d'associer les animaux au pâturage ou au paddock où ils se trouvent actuellement, ce qui est nécessaire pour le suivi de l'efficacité des pâturages et facilite la localisation d'un animal particulier dans le cas d'entreprises possédant de nombreuses granges et/ou pâturages (illustré à la Fig.III.14).



Fig.III.14 Emplacements du lecteur RFID et du tag sensor, (Date de la prise photo : 20 janvier 2020).

III.6 Conception du système embarqué et matériel utilisé

III.6.1 Introduction

Après la conception du système RFID, le deuxième but de ce travail est de concevoir un capteur embarqué permettant la localisation des vaches laitières et la classification du comportement des vaches. En effet, le capteur permet d'indiquer combien de temps les vaches ont passé à se nourrir, boire et traire. Lorsque la vache se trouve dans la zone d'alimentation, le système classe son comportement alimentaire. En fait, les vaches sont classées comme étant en phase d'alimentation uniquement si elles sont situées dans la couchette d'alimentation et que leur tête est inclinée vers le bas. Ce permis indique que la vache est présente dans la mangeoire et confirme qu'elle se nourrit réellement.

La principale contribution de notre travail est d'améliorer les performances des systèmes de localisation des vaches basés sur la technologie RFID en intégrant les données de l'unité de mesure inertielle (IMU) aux données RFID. Les données IMU permettent d'affiner, d'ajuster et d'optimiser les données RFID pour fournir une meilleure localisation. De plus, les données IMU peuvent également être utilisées pour surveiller le comportement des vaches pendant la phase d'alimentation. Cette phase d'alimentation est classée en trois classes qui sont la position debout, la position d'alimentation et les transitions entre la position debout et l'alimentation. En effet, les données RFID permettent uniquement de détecter la présence des vaches dans la mangeoire, l'intégration de l'IMU permettra également de classer le comportement de la vache dans la mangeoire, offrant ainsi une plus grande valeur informative à l'éleveur, ce

qui améliorera le processus de surveillance de la santé et du bien-être des vaches.

Les principales contributions de cette conception sont les suivantes :

- L'intégration d'unités de mesure inertielle pour l'optimisation des performances des systèmes de localisation des vaches laitières (RFID) ;
- L'exécution en temps réel du filtre à particules et de la méthode du point estimé (Dead-reckoning) dans un capteur embarqué (basé sur STM32) pour estimer le temps de présence des vaches dans les zones de traite, d'alimentation et d'abreuvement et à chaque porte franchie par l'animal afin d'estimer les vaches trajectoire ;
- L'utilisation de filtres à particules pour réduire le bruit afin d'améliorer considérablement les performances de localisation offertes par la méthode suivie ;
- Après avoir localisé une vache dans une zone d'alimentation, le système permet de classer ses comportements (position debout, position d'alimentation, transitions entre la position debout et l'alimentation), ce qui améliore la précision de l'estimation du temps d'alimentation et du comportement des vaches. Sauvegarde permanente des données de la vache au niveau local dans la base de données, facilitant les transactions de vente et la reconnaissance du propriétaire de la vache en cas de perte ou de vol.

Dans l'estimation de position, moyennant une unité de mesure inertielle intégrant un gyroscope, un accéléromètre et un magnétomètre, les erreurs de gyroscope sont combinées avec celles de l'accéléromètre.

Cependant, puisque le calcul de la position à partir d'un accéléromètre nécessite une double intégration sur l'accélération, une erreur de biais fixe de l'accéléromètre se traduit par une dérive de position croissante de manière quadratique avec le temps. Aussi l'erreur de l'accéléromètre a un impact sur l'erreur d'estimation de position, et les erreurs critiques du système proviennent de l'estimation d'orientation provoquée par le gyroscope. Le magnétomètre est donc utilisé pour corriger la dérive du gyroscope en mesurant la force et la direction du champ magnétique, permettant ainsi la direction nord à trouver. Un paramètre qui peut fausser la mesure de l'orientation est les matériaux ferromagnétiques en interférant avec le magnétomètre principalement dans l'utilisation intérieure. La combinaison d'accéléromètres et de gyroscopes peut donner de meilleurs résultats que l'utilisation de capteurs indépendamment. Dans notre étude, la méthode du point estimé (Dead-reckoning) est choisie afin d'estimer la position des vaches dans le temps. Dans cette méthode, seuls les capteurs intégrés, répartis principalement dans un gyroscope, un accéléromètre et un magnétomètre, représentent les données à fusionner.

III.6.2 La mesure inertielle

La localisation d'un objet à l'intérieur d'un espace, interne ou externe, est un problème en évolution continue qui, au cours des dernières années a connu un développement exponentiel de ses applications et méthodologies utilisées. La disponibilité croissante de capteurs à faible coût a facilité l'approche de cette question, poussant la recherche vers l'innovation des méthodologies de fusion de capteurs. Le fait de pouvoir utiliser des informations provenant de différents capteurs montre la valeur d'une amplitude plus précise, ceci, combiné à la réduction croissante de la taille des capteurs disponibles, a conduit au développement d'applications conçues pour être intégrées dans n'importe quel appareil mobile. Les appareils tels que les accéléromètres ou les gyroscopes font désormais partie du langage courant et ont envahi de manière agressive tous les appareils du marché, trouvant de la place même sur des plates-formes dont l'utilisation jusqu'à il y a quelques années était impensable. Nous pouvons donc clairement voir à quel point il est important de maximiser en parallèle les performances et les potentialités de ces appareils. D'autre part, l'utilisation de plus de capteurs pour la valorisation de toute grandeur physique est en plus complexe du point de vue calcul et théorique. Il n'en résulte pas de difficultés pour leur intégration dans une seule plateforme.

Il suffirait de noter que chaque capteur a une consommation d'énergie qui, autant que nous pourrions l'optimiser, affectera la durée d'un système d'alimentation indépendant embarqué proportionnellement au nombre de capteurs réels. De plus, la possibilité d'obtenir des évaluations précises grâce à des capteurs à faible coût sans l'aide de capteurs plus sophistiqués (et donc plus coûteux) est sans aucun doute attrayante et a donné un grand coup de pouce à l'optimisation des applications dans ce sens. De ce point de vue se trouve le travail développé, et ce qui sera exposé ci-dessous. Grâce à des astuces mathématiques spéciales, nous avons essayé de reconstruire au mieux les informations provenant d'une plate-forme de capteurs inertiels fournie par "ST Microelectronics", en les affinant autant que possible, afin de dériver une estimation de position en utilisant le moins de capteurs possible. Une IMU appliquée à un corps fournit des données de sortie liées aux différentes grandeurs dynamiques mesurées : accélérations linéaires et angulaires, données du magnétomètre, mais aussi température, pression, etc. Le développement de ces grandeurs, joint à la connaissance des coordonnées GPS nous permet de reconstruire le mouvement du corps, avec une meilleure précision par rapport à celle donnée par le GPS unique, même lorsque le repère de celui-ci n'est pas toujours disponible.

III.6.3 Suivi de mouvement inertiel

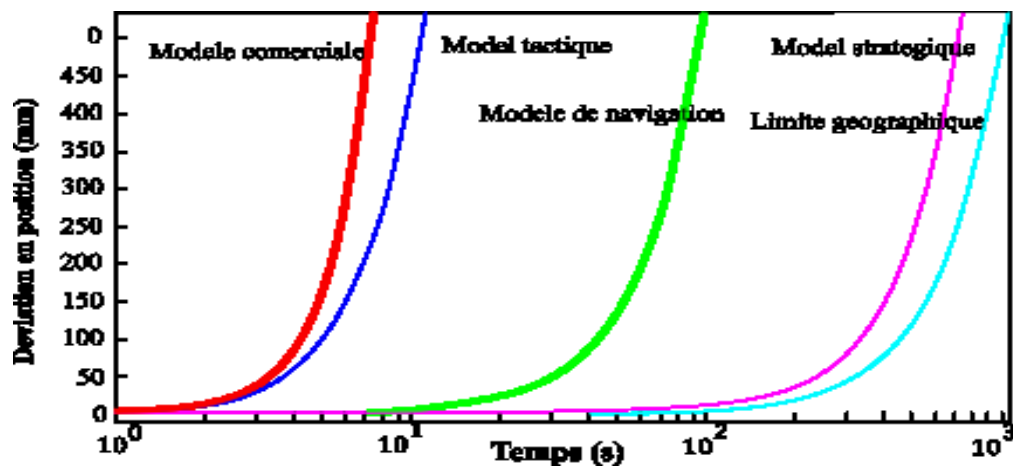
Les réseaux de capteurs sans fil sont un excellent candidat pour étudier la localisation. L'idée d'un réseau de capteurs sans fil est celle d'un ensemble distribué de nœuds dont les ressources sont limitées sous une forme ou une autre et capables de fonctionner pendant de longues périodes sans interférence de l'utilisateur.

Les traceurs inertiels sont d'une importance primordiale dans les applications de suivi de mouvement car ils sont moins coûteux, plus compacts, légers et n'ont pas d'exigences de ligne de vue (LOS) par rapport au GPS. De plus, les traceurs inertiels ont une faible latence et peuvent être mesurés à un taux relativement élevé (des milliers d'échantillons par seconde). Cependant, le plus gros problème avec les capteurs de mesure inertielle est le problème de la dérive. La dérive se produit lorsque des erreurs de mesure, aussi petites soient-elles, s'accumulent d'un point à l'autre. Cela conduit à une différence de plus en plus grande entre l'endroit où le système pense qu'il se trouve et son emplacement réel. L'erreur peut être causée par plusieurs facteurs dans un système, ces facteurs comprennent les erreurs d'étalonnage dans les facteurs d'échelle, les alignements et les linéarités des capteurs. Ceci est généralement dû à la fabrication et ne peut pas être facilement corrigé.

Ainsi, les erreurs de biais constantes augmentent linéairement avec le temps. Lorsqu'on connaît le biais constant, il peut être soustrait de toutes les mesures pour éliminer l'erreur. Le capteur présente aussi un bruit à haute fréquence qui est causé par des événements thermomécaniques. Ce type de bruit se présente sous la forme de «bruit blanc». Le bruit blanc est une quantité aléatoire de bruit qui est ajoutée aux signaux qui a une quantité moyenne égale à l'écart type σ et une moyenne à long terme égale à zéro. Cela peut être mathématiquement exprimé comme un processus à moyenne nulle avec un écart type égal à σ . La polarisation du capteur va évoluer avec le temps en raison du bruit de scintillement. Les fluctuations de biais dues au scintillement sont généralement modélisées comme une marche aléatoire. Par ailleurs, dans l'estimation de position, lorsqu'un gyroscope est inclus, les erreurs du gyroscope sont combinées avec l'erreur de l'accéléromètre. Cependant, comme le calcul de la position à partir d'un accéléromètre nécessite une double intégration sur l'accélération, une erreur de polarisation fixe de l'accéléromètre se traduit par une erreur de dérive de position qui croît de manière quadratique avec le temps. Cependant, bien que l'erreur de l'accéléromètre contribue à l'erreur d'estimation de position, les erreurs critiques du système proviennent de l'estimation d'orientation provoquée par le gyroscope. Sur la Fig.III.15, la simulation montre différents gyroscopes de qualité et leur dérive sur une période de temps. Une erreur dans la mesure de l'orientation de l'inclinaison provoque une erreur dans la composante horizontale de l'accélération. Pour cette raison, c'est le gyroscope, et non l'accéléromètre, qui cause le plus d'erreurs de précision de position dans la navigation. Par conséquent, l'exploration de nouvelles techniques pour réduire la dérive dans les systèmes inertiels est devenue l'objectif principal dans le domaine du suivi de mouvement.

Tab.III.1 Différents modèles de capteurs inertiels et leurs caractéristiques

	Modèle commerciale	Modèle tactique	Modèle de navigation	Modèle stratégique	Limite géophysique
Biais de stabilité du gyroscope	1500°/hr/√hr	15°/hr/√hr	0.015°/hr/√hr	0.015°/hr/√hr	0°/hr/√hr
Biais gyroscopique incertitude initial	150°/hr	1.5°/hr	0.0015°/hr	0.0000015°/hr	0°/hr
Accéléromètre biais de stabilité	1mg/√hr	100μg	10μg/√hr	05.μg/√hr	0μg/√hr
Accéléromètre Biais incertitude initial	0.25mg	10μg	1μg	0.1 μg	0.1μg
Orientation initiale	1sec	1sec	1sec	05. μrad	0.01 μrad

**Fig.III.15** Comparaison des performances de dérive de position des systèmes de navigation inertiels commerciaux.

La réduction des erreurs est un problème toujours recherché, où certaines implémentations dépendent du cas d'utilisation du système lui-même. Dans notre étude, l'utilisation d'hypothèses spécifiques au domaine est utilisée pour caractériser le mouvement de marche générique d'un objet, tout en utilisant également la fusion de capteurs pour tenter d'obtenir une représentation plus précise de l'utilisateur lui-même.

III.6.4 Fusion de capteurs

Plusieurs capteurs dans un système de contrôle peuvent être utilisés pour fournir plus d'informations, de robustesse et des informations complémentaires. Lorsque deux ou plusieurs données sensorielles ou données dérivées des données sensorielles sont combinées, les résultats peuvent être meilleurs que ce qui serait possible si seuls les capteurs individuels étaient utilisés.

Dans un système inertiel, l'état se compose généralement de la position, de la vitesse et de l'orientation de l'objet. Un algorithme de fusion de

capteurs calcule l'état en utilisant des signaux de capteurs inertiels ainsi que des signaux provenant de sources additionnelles telles que des magnétomètres. L'utilisation conjointe de magnétomètres et de gyroscopes est un exemple d'utilisation de la fusion de capteurs qui peut donner de meilleurs résultats que l'utilisation de capteurs indépendamment. Les magnétomètres peuvent être utilisés pour corriger la dérive du gyroscope à l'aide de la fusion de capteurs.

Les magnétomètres mesurent la force et la direction du champ magnétique permettant de trouver la direction nord. Alors que les magnétomètres sont capables de calculer l'orientation, mais il est sensible aux interférences des matériaux ferromagnétiques qui faussent la mesure de l'orientation. Ainsi, les magnétomètres ne peuvent remplacer le gyroscope. Cependant, en combinant à la fois le gyroscope et le magnétomètre, la précision du calcul de l'orientation peut être améliorée grâce à la redondance et corriger la dérive.

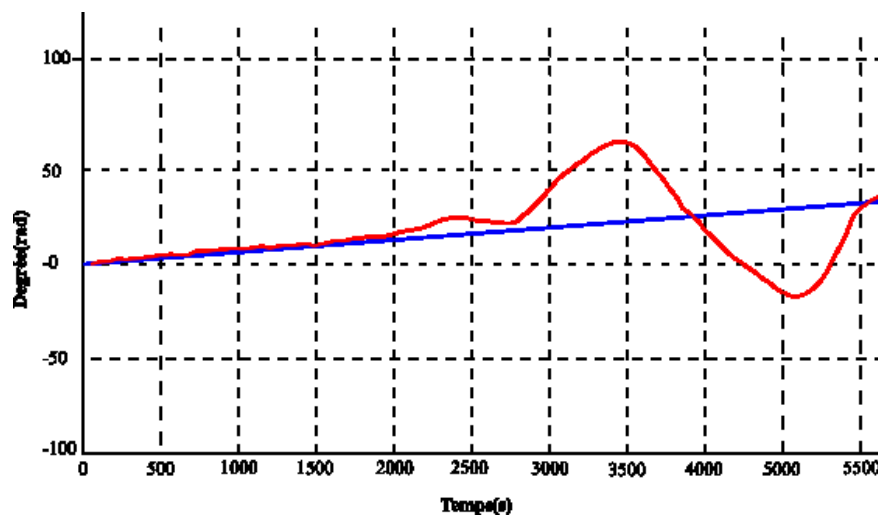


Fig.III.16 Exemple de dérive du gyroscope dans le temps qui se produit dans un système.

Bien que les magnétomètres aident à corriger la dérive du gyroscope, il est également possible d'utiliser un accéléromètre pour corriger la dérive ainsi que pour le tangage et le roulis. Il est important de montrer le problème de dérive dans son intégralité car le calcul du changement de position x , y peut être représenté par le sinus et le cosinus lors du calcul actuel du gyroscope multiplié par le changement de position donné par l'accéléromètre. Une dérive peut amener le changement de position à affecter la position des axes de référence. Plusieurs modèles mathématiques sont actuellement utilisés pour fusionner les données des capteurs pour déterminer l'orientation avec une meilleure précision en fonction du temps. Ces méthodes comprennent le filtre de Kalman, les diverses types du filtre de Kalman, telles que le Kalman étendu, complémentaire, et le filtre de particule pour la fusion des capteurs (illustré à la Fig.III.16).

A noter que dans les problèmes de suivi actuels couramment utilisé pour la localisation des objets, une application de fusion de capteurs

comprend les données de récepteur GPS où les informations du système de positionnement global et du (SNI) système de navigation inertielle sont utilisées. Pour fusionner les données dans un modèle mathématique comme le filtre de Kalman ou le filtre de particules. Dans notre travail, la fusion de capteurs est établie pour effectuer une estimation de position à partir des données issues de la méthode du point estimé à partir d'une référence de position de chaque lecteur RFID et des informations obtenues des capteurs inertiels (INS). En combinant ces modèles mathématiques avec de multiples formes de données, une représentation plus précise de l'estimation de position peut se produire.

III.6.5 Hypothèses spécifiques au domaine d'étude

Des hypothèses spécifiques au domaine sont utilisées dans des applications où des hypothèses spécifiques peuvent être faites sur le mouvement pour réduire l'erreur de position. Par exemple, Lorsqu'un objet passe d'une position stationnaire vers une position de mouvement, la position stationnaire se distingue facilement de la position de mouvement. Cela permet de corriger la dérive et l'erreur de position accumulée pendant la période de temps pendant le mouvement. En mesurant l'accélération due à gravité pendant la phase stationnaire, les erreurs d'inclinaison peuvent également être corrigées. Un filtre de Kalman ou un filtre Particulaire est utilisé pour le suivi inertiel. Le filtre corrige la dérive sur la base de l'hypothèse spécifique au domaine selon laquelle l'accélération du l'objet est limitée et sera en moyenne à zéro pendant une période prolongée. Un model cinétique de mouvement est nécessaire afin de modéliser le filtre et ainsi d'éliminer les biais et les bruits indésirables. En utilisant ce modèle, il est possible de combiner des capteurs inertiels à l'aide d'un filtre de particule pour suivre un objet mouvement.

Nous supposons que l'accélération de l'objet sera toujours orientée vers l'avant, avec de rares situations provoquant un mouvement dans la direction opposée. Cette estimation est ensuite combinée par le filtre avec les valeurs calculé grâce à la méthode du point estimé pour réduire continuellement l'erreur de position des informations issues de "INS". La fusion de capteurs est utilisée pour combiner les systèmes inertiels pour donner une mesure plus précise de la position. Grâce à cela, une solution plus complète est formée et utilisable pour le suivi de mouvement sans l'apport d'un récepteur GPS qui est plus cher et dont le positionnement ne peut être obtenu qu'à l'extérieur (l'air libre). Par contre dans notre travail l'objectif essentiel est de localiser un animal aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur et déduire son comportement.

III.6.6 Modélisation de capteurs inertiels

L'idée de base de l'estimation de l'orientation d'un objet grâce à une unité inertielle est la fusion de 3 capteurs gyroscopes, accéléromètres et magnétomètres. Tous ces capteurs contenus dans un "IMU" fournissent des informations sur son orientation. La vitesse angulaire, mesurée par les gyroscopes, peut être intégrée pour obtenir l'orientation. La dérive

d'intégration causée par le bruit et les biais lents variant dans le temps peut être compensée à l'aide des magnétomètres et des accéléromètres. Un accéléromètre à trois axes et un capteur gyroscopique composent le système. Pour la correction de la dérive sur le gyroscope, un magnétomètre peut être ajouté au système pour améliorer encore les résultats des corrections sur l'orientation.

La Fig.III.17 montre le diagramme du modèle de capteur. Le diagramme décrit chaque signal et les relations entre eux.

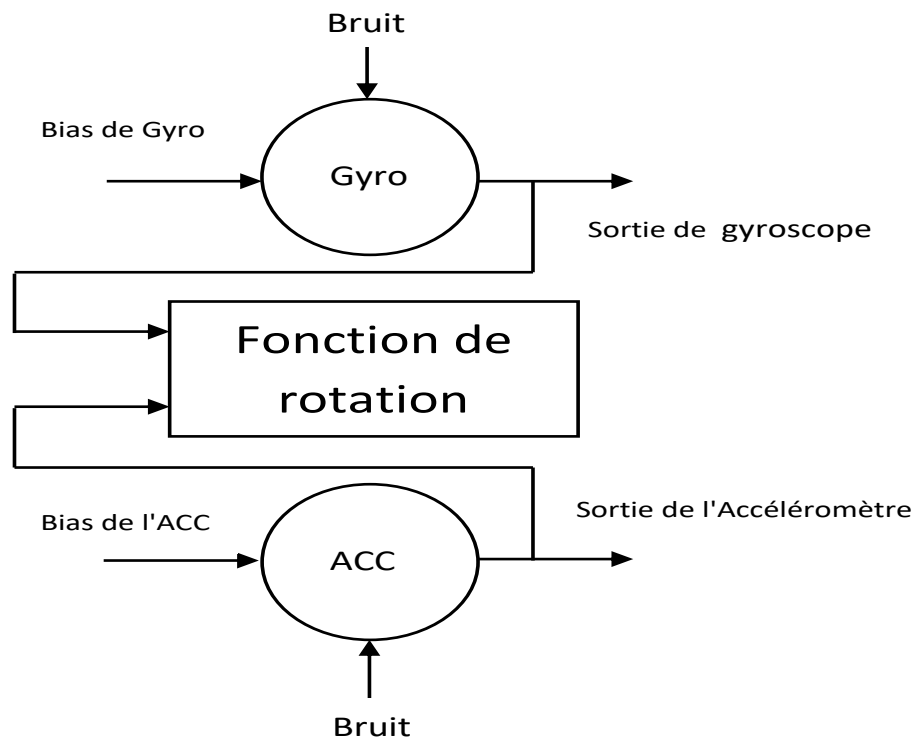


Fig.III.17 Diagramme du modèle de capteur et ses relations.

Le gyroscope et l'accéléromètre sont utilisés conjointement pour calculer la fonction d'orientation de l'objet au fil du temps. Les mesures des accéléromètres et des gyroscopes peuvent être utilisées pour calculer la position et l'orientation d'un objet par rapport à un point de départ connu (dernier lecteur d'étiquette rencontré comme référence) à l'aide de la navigation inertielle. Dans cette configuration telle que l'unité de capteur, les mesures sont résolues dans la trame b, plutôt que dans la trame i. Par conséquent, l'orientation peut être calculée en intégrant la vitesse angulaire.

La position peut être obtenue par double intégration de l'accélération linéaire. Cette accélération est obtenue à partir de la force spécifique externe, après avoir été tournée vers les effets corrigés de la gravité et de Coriolis. Cette procédure est illustrée à la Fig.III.17. Pour de bons résultats d'intégration, les conditions initiales doivent être déterminées avec précision, cependant, c'est un problème difficile en soi. En pratique, la vitesse angulaire et la force spécifique externe sont obtenues à partir des mesures du gyroscope et de l'accéléromètre. Ceux-ci incluent les termes de biais et de bruit qui provoquent des erreurs dans la position et l'orientation calculées.

Cette soi-disant dérive d'intégration est inhérente à toute navigation inertielle. De plus, en utilisant des capteurs inertiels «MEMS», la dérive d'intégration est relativement importante. Par conséquent, les estimations d'orientation et en particulier les estimations de position ne sont exactes et fiables que pendant une courte période de temps.

III.6.7 Méthode de "Dead reckoning"(déduction par l'estimation)

Le "Dead-reckoning" ou (déduction par l'estimation) est le processus de calcul de la position actuelle en utilisant une position préalablement déterminée. Dans les études sur la navigation, il est plus communément appelé intégration de chemin. L'intégration des mesures du gyroscope fournit des informations sur l'orientation du capteur. Après soustraction de la gravité terrestre avec une double intégration de l'accéléromètre, la position du capteur est déduite. Afin de permettre la soustraction de la gravité terrestre, l'orientation du capteur doit être connue. Par conséquent, l'estimation de la position et de l'orientation du capteur est intrinsèquement liée lorsqu'il s'agit de capteurs inertiels. Le processus de "dead reckoning" est résumé sur la Fig.III.18, avec les étapes d'intégration de la vitesse angulaire à la rotation et de l'accélération à la position, la dérive d'intégration est nécessairement introduite.

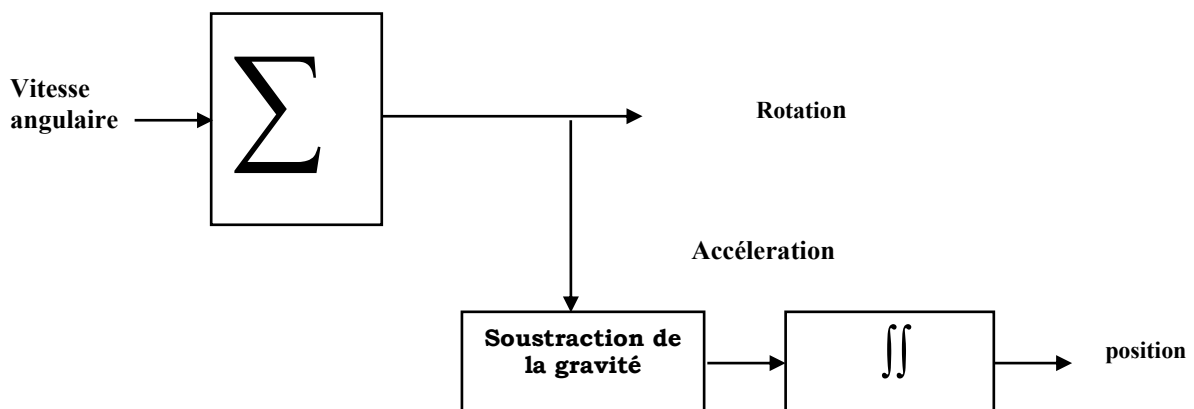


Fig.III.18 Illustration de la méthode de "dead-reckoning", où les mesures de l'accéléromètre et du gyroscope (vitesse angulaire) sont intégrées à la position et à l'orientation.

Cas idéal

Le modèle cinétique d'un objet mobile est le suivant :

$$\dot{x} = v \cos \theta$$

$$\dot{y} = v \sin \theta$$

$$\dot{\theta} = \omega$$

Le vecteur de configuration de sortie contient les coordonnées cartésiennes de l'objet mobile dans le référentiel global (x et y) ainsi que

l'orientation θ ; par ailleurs v and ω sont les vitesses linéaires et angulaires d'entrée du mobile qui sont utilisées pour calculer le vecteur de configuration. Intégrer le système d'équations différentielles ordinaires en continu, le paramètre d'orientation est calculé en premier, puis il est utilisé pour calculer les coordonnées cartésiennes comme dans le système d'intégrations suivant:

$$\theta(t) = \int \omega(t)dt \quad (\text{III. 1})$$

$$x(t) = \int v(t)dt \cos \theta(t)dt \quad (\text{III. 2})$$

$$y(t) = \int v(t)dt \sin \theta(t)dt \quad (\text{III. 3})$$

Malheureusement, l'intégration de ce système en continu est très difficile, voire impossible en raison de la fonction d'orientation $\theta(t)$ qui est à l'intérieur des fonctions trigonométriques. De plus, ce système ne convient pas aux machines numériques qui nécessitent que le système soit discret. Par conséquent, une méthode approximative sera utilisée pour surmonter ce problème.

Cas discret

Cette méthode calcule la configuration suivante $q(t+T)$ vecteur utilisant le vecteur courant $q(t)$ et les vitesses linéaires et angulaires courantes v et ω qui sont des scalaires fixes pendant la période de temps T . La méthode de calcul commence également par l'orientation θ qui est directement calculé par la formule suivante:

$$\Delta(t) = \omega(t)$$

$$\theta(t + T) = \theta(t) + \Delta(t)$$

Ensuite, les coordonnées cartésiennes x et y sont ensuite calculées à l'aide du modèle cinématique, où l'orientation utilisée dans ce calcul est la moyenne des valeurs d'orientation actuelle et suivante:

$$\Delta(t) = v(t)$$

$$x(t + T) = x(t) + \Delta s \cos \left(\theta(t) + \frac{\Delta\theta}{2} \right) \quad (\text{III. 4})$$

$$y(t + T) = y(t) + \Delta s \sin \left(\theta(t) + \frac{\Delta\theta}{2} \right)$$

Cette méthode est très utile pour calculer le prochain vecteur de configuration en raison de sa simplicité et de sa rapidité de calcul. Cependant, cette méthode traite toutes les positions de l'objet comme linéaires, bien que les mouvements réels soient combinés la plupart du temps. Cette méthode accumule les erreurs au fil du temps, ce qui fait que l'objet en mouvement s'écarte de sa position réelle. Par conséquent, il est essentiel de prendre en compte les trajectoires circulaires pour rendre le calcul plus précis.

L'objet se déplace en ligne droite ou tourne autour de lui-même ou en arc de cercle ; car les vitesses linéaire et angulaire sont linéairement dépendantes des vitesses angulaires des roues; et La commande de vitesse angulaire pour les roues du robot est fixée sur une période de temps prédéfinie T . Les vitesses linéaires et angulaires de l'objet peuvent être calculées grâce à cette équation matricielle:

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \frac{r}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1/l & -1/l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_r \\ \omega_l \end{bmatrix} \quad (\text{III. 5})$$

Où r est la hauteur de l'objet, l est la mi-distance entre les deux roues .On peut voir que lorsque les vitesses angulaires des objets droit et gauche, respectivement ω_r et ω_l sont égales, la vitesse angulaire de l'objet mobile ω devient zéro (c'est-à-dire que l'objet se déplace en ligne droite; en avant ou en arrière) et la vitesse linéaire v peut être simplement calculée en multipliant la vitesse angulaire de l'objet par sa hauteur.

Lorsque les vitesses angulaires des deux objets sont différentes, le mouvement n'est plus en ligne droite ; mais plutôt une trajectoire circulaire dont son centre C est situé quelque part dans le référentiel global au mouvement. Le centre du cercle (axe de rotation) est toujours positionné sur la ligne qui passe par la trajectoire de l'objet en mouvement .La position de l'axe peut être sur la position de l'objet (si la vitesse angulaire sur cette est nulle), sinon elle peut être positive ou négative suivant le mouvement de l'objet. Si les deux vitesses angulaires sont égales en grandeur et opposées en signes .dans ce cas, la vitesse linéaire sera nulle et l'objet tourne autour de lui-même. La Fig.III.19 illustre les trois cas possibles de mouvement de l'objet. Les deux premiers cas, (i) et (ii), sont plus simples dans le calcul que le troisième ou le mouvement est combiné (iii).

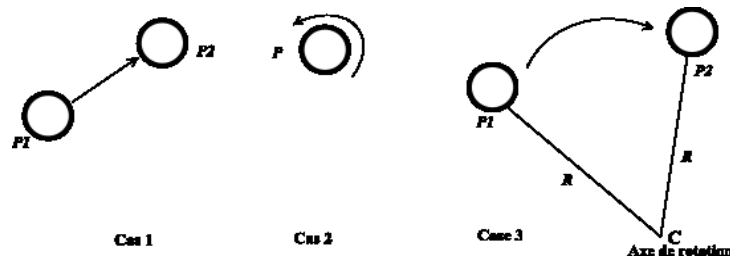


Fig.III.19 Object en mouvements cas possible de modélisation par la technique de "dead-reckoning".

La configuration suivante ou $q(t+T)$ peut être calculé à partir du vecteur de la configuration actuel du $q(t)$, à condition que les valeurs de vitesse angulaire ainsi obtenus ω_r et ω_l sont fixées sur une période de temps T . Le calcul s'effectue dans trois cas :

Cas (i) : $\omega_r = \omega_l$

Dans ce cas, les deux vitesses angulaires sont égales; donc la vitesse angulaire de l'objet est zéro et la référence ne changera pas. La vitesse linéaire v est calculée par l'équation (III.5), puis multiplié par T pour obtenir

la distance parcourue Δ_s qui sera utilisé pour mettre à jour les vecteurs de configuration des positions comme dans les équations ci-dessous (III.6):

$$\begin{aligned}\Delta_s &= v(t) \\ \theta(t+T) &= \theta(t) \\ x(t+T) &= x(t) + \Delta_s \cos \theta(t+T) \\ y(t+T) &= y(t) + \Delta_s \sin \theta(t+T)\end{aligned}\tag{III. 6}$$

Cas (ii) : $\omega_r = -\omega_l$:

Dans ce cas, les deux vitesses angulaires sont égales en amplitude et en sens opposé; donc la vitesse linéaire est nulle et la position cartésienne déduite ne change pas. La vitesse angulaire ω est calculée par l'équation (III.5), puis multiplié par T pour obtenir la phase de rotation ω_θ qui peut être utilisée pour mettre à jour le vecteur de configuration de ce model (Dead reckoning) comme dans les équations ci-dessous:

$$\begin{aligned}\Delta\theta &= \omega T \\ \theta(t+T) &= \theta(t) + \Delta\theta\end{aligned}\tag{III. 7}$$

avec :

$$x(t+T) = x(t)$$

et :

$$y(t+T) = y(t)$$

Cas (iii) : $(\text{abs}(\omega_r) \neq \text{abs}(\omega_l))$

Dans ce cas, ni v ni ω ne sont nulles ; ainsi l'objet se déplacera selon une trajectoire circulaire autour d'un point central situé à une distance R . Pour mettre à jour le vecteur de configuration, la valeur de R doit être calculée en premier, puis les coordonnées du centre de la trajectoire circulaire C de l'objet sont trouvées. Pour prouver que la trajectoire de l'objet est circulaire, la courbure de la trajectoire est calculée géométriquement par cette équation :

$$Curvature = \frac{\Delta\theta}{\Delta s}\tag{III. 8}$$

La courbure est constante sur T car les vitesses linéaire et angulaire sont fixées. Par conséquent, la courbe que prend l'objet est circulaire et il est possible de trouver la longueur du rayon du cercle R en utilisant l'équation ci-dessous :

$$R = \frac{1}{Curvature} = \frac{\Delta s}{\Delta\theta} = \frac{v(t)}{\omega T} = \frac{v}{\omega}\tag{III. 9}$$

Ensuite, les coordonnées du point central $[x_c, y_c]$ peuvent être calculées géométriquement en fonction des vecteurs de configuration actuelles suivantes:

$$x_c = x(t) + R \cos \theta(t) = x(t+T) + R \cos \theta(t+T)\tag{III. 10}$$

$$y_c = y(t) + R \sin \theta(t) = y(t + T) + R \sin \theta(t + T)$$

Enfin, après quelques réarrangements, on peut obtenir les équations permettant de mettre à jour le vecteur de configuration de l'objet en mouvement à travers le troisième cas de son mouvement.

$$R = \frac{v}{\omega}$$

$$\theta(t + T) = \theta(t) + \omega(T) \quad (\text{III.11})$$

$$x(t + T) = x(t) + R(\sin \theta(t + T) - \sin \theta(t))$$

$$y(t + T) = y(t) - R(\cos \theta(t + T) - \cos \theta(t))$$

On peut voir que le système d'équations ci-dessus n'est pas plus complexe que la méthode approximative précédente de l'équation (III.3) et (III.4). Ce système d'équation peut également être déduit du système d'intégration idéal dans l'équation (III.2). Par exemple, la prochaine valeur de coordonnée sur l'axe y peut être obtenue en intégrant par rapport à θ au lieu de t comme suit :

$$y(t + T) = y(t) + \int_t^{t+T} v(t) \sin \theta(t) dt$$

$$y(t + T) = y(t) + \int_t^{t+T} \frac{v(t)}{\omega(t)} \sin \theta(t) \omega(t) dt \quad (\text{III.12})$$

$$y(t + T) = y(t) + R \int_{\theta(t)}^{\theta(t+T)} \sin \theta d\theta$$

$$y(t + T) = y(t) + R[-\cos \theta]_{\theta(t)}^{\theta(t+T)}$$

Le résultat est similaire au résultat obtenu dans l'équation (III.11). La même méthode peut être utilisée dans la prochaine valeur de coordonnée sur l'axe x . Cette méthode est également employée dans le calcul de la position générale de l'objet.

III.6.8 Filtrage de données issues d'une unité inertielle de navigation (INS)

Une INS est essentiellement un calculateur estimant la position d'un objet par rapport à un système connu, sur la base des mesures d'un ensemble de capteurs installés sur l'objet. L'indépendance vis-à-vis des structures externes (par exemple les satellites dans le cas des GPS) assure la continuité du suivi de position. Les capteurs utilisés comme système de navigation inertielle sont des accéléromètres, des détecteurs d'accélération

selon une direction spécifique et des gyroscopes, mesurant la vitesse de rotation.

L'unité de mesure se compose d'une triade d'accéléromètres et d'un de gyroscopes disposés selon un système orthogonal. En intégrant les composants d'accélération et de rotation, la position et la disposition actuelle de l'objet sont calculées. Les systèmes INS nécessitent une connaissance des données telles que la position référence au départ et procèdent en intégrant les équations différentielles de mouvement (équations de navigation). Cependant, cette approche est affectée par une composante d'erreur importante due à la dérive des capteurs, qui, accumulée au fil du temps, conduit à une dégradation globale de l'estimation de position. Pour cette raison, des systèmes de navigation inertielle ont été intégrés à des sources externes, comme le GPS, ou dans notre cas avec le DR (Dead reckoning) grâce à l'utilisation de diverses techniques de fusion de capteurs. Le plus efficace et le plus connu d'entre eux est celui qui intègre ces informations avec les équations de mouvement caractérisées par des données inertielles grâce à l'utilisation d'un filtre à particules.

Le filtre à particules (PF) a été introduit en 1993 comme une approximation numérique du problème de filtre bayésien non linéaire, et il existe aujourd'hui une théorie plutôt mature ainsi qu'un certain nombre d'applications réussies décrites dans la littérature. La partie théorie étudie d'abord le problème du filtrage non linéaire puis décrit l'algorithme général de filtre Monte Carlo en relation avec des solutions classiques basées sur le filtre de particule générique. Les options, les alternatives de conception et les équations et leur intégration à notre système de positionnement sont décrites. Enfin, les deux algorithmes, Monte Carlo et le filtre SIR sont présentés et comparés et les résultats sont modélisés dans la partie expérimentale. Il devrait être évident que les approches classiques basées sur le filtre de Kalman (KF) auraient de mauvaises performances pour notre application bien qu'elles auraient l'avantage de nécessiter une puissance de calcul moindre.

Toutes les applications sont basées sur des données réelles et plusieurs d'entre elles proviennent d'implémentations en temps réel. Un système dynamique peut en terme général être caractérisé par un modèle d'espace d'états avec un état caché à partir duquel des informations partielles sont obtenues par des observations. Pour les applications, le vecteur d'état peut inclure la position, la vitesse et l'accélération d'une plate-forme en mouvement et. Les observations peuvent provenir soit de capteurs internes (le problème de navigation) mesurant le mouvement inertiel, soit de la position absolue par rapport à un point de repère ou de capteurs externes (le problème de suivi) mesurant par exemple la distance et le relèvement par rapport à la cible.

Le problème du filtrage non linéaire est de faire des inférences sur l'état à partir des observations. Dans le cadre de filtre bayésien, cela se fait en calculant ou en approximant la distribution a posteriori pour le vecteur d'état étant donné toutes les observations disponibles à ce moment-là. Cela signifie que la position de la plate-forme est représentée avec une fonction de

densité de probabilité conditionnelle compte tenu des observations. Les approches classiques du filtrage non linéaire bayésien décrites dans la littérature incluent les algorithmes suivants :

- 1) Le filtre de Kalman (KF) calcule la distribution à posteriori exactement pour les systèmes gaussiens linéaires en mettant à jour récursivement les statistiques de dimension finie ;
- 2) Les modèles non linéaires, ou gaussiens, l'algorithme KF peut être appliqué à un modèle linéarisé avec un bruit gaussien avec les mêmes moments du premier et du second ordre. Cette approche est communément appelée le Filtre de Kalman Étendu (EKF). Cela peut bien fonctionner mais sans aucune garantie pour les systèmes légèrement non linéaires où le vrai postérieur est un pic uni-modal et essentiellement symétrique.
- 3) Le filtre de Particule avec toutes ses variantes propage un certain nombre de points dans l'espace d'états à partir desquels une distribution gaussienne est à chaque pas de temps. Le FP est connu pour contenir également le terme quadratique dans les modèles non linéaires, et est souvent plus précis qu'EKF et le filtre de Kalman en quadrature (QKF) sont deux autres variantes de ce principe. Là encore, l'applicabilité de ces filtres est limitée aux distributions postérieures unies modales. Le filtre de particule approxime n'importe quel modèle non linéaire et gaussien ou non et est capable de représenter n'importe quelle distribution postérieure (illustrée à la Fig.III.20).

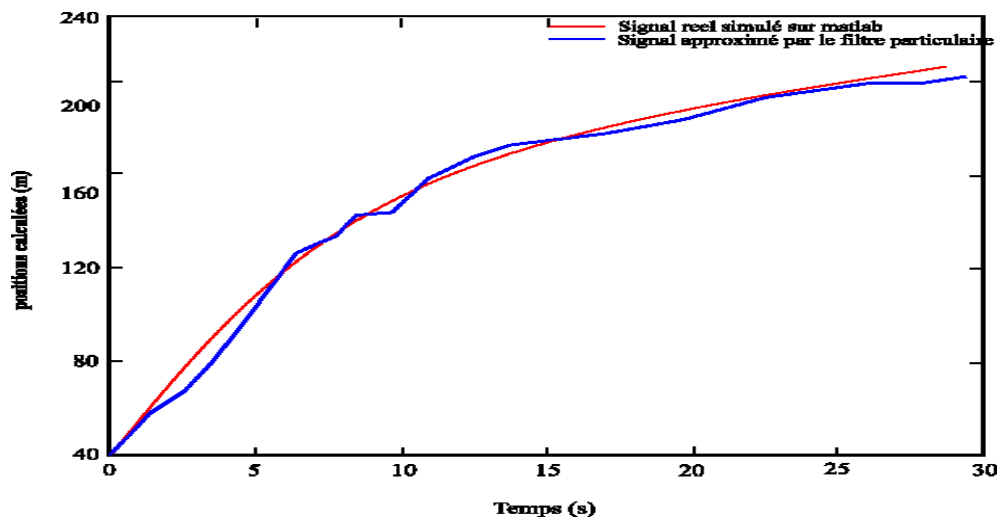


Fig.III.20 Approximations successives obtenues à l'aide de filtre particulaire sur un délai de 30 secondes.

Le filtre à particules (PF) fournit également une approximation numérique du problème de filtrage non linéaire similaire à l'EKF (filtre de Kalman étendu), mais utilise une grille stochastique adaptative qui sélectionne automatiquement les points de grille pertinents dans l'espace d'états, et contrairement à l'EKF, le PF standard a complexité linéaire en nombre de points de grille.

Le positionnement des plates-formes mobiles a été un moteur technique pour les applications en temps réel du PF dans les communautés de traitement du signal et de robotique. Pour cette raison, nous passons un

certain temps à expliquer en détail plusieurs de ces applications et à résumer les expériences d'utilisation du Filtre à particule dans la pratique. Ayant une base de données contenant les coordonnées des points de référence ainsi que le plan de l'environnant où se déplace l'objet en mouvement, l'intégration de ce filtre permet de fournir des conclusions suffisamment précises sur sa trajectoire.

III.6.9 Modélisation théorique de l'intégration des capteurs :

Toute approche de suivi des systèmes de navigation nécessite un de modèle de mouvement, même s'il s'agit d'un mouvement constant. Comme nous n'avons aucune connaissance a priori des forces modifiant le mouvement du système d'objets, nous supposons aucune force (accélérations) et donc des vitesses constantes. Nous avons utilisé le modèle de mouvement des objets est représenté par un vecteur de 5×1 .

$$X_{DR} = (\theta, \omega, x, \dot{x}, \ddot{x}) \quad (III.13)$$

Ou θ est l'orientation définie par rapport à la référence (les angles d'Euler étant Z - Y - X), ω est la vitesse angulaire, $x, \dot{x}, \ddot{x}$ sont la position, la vitesse et l'accélération de mobile. La dynamique du système décrit est donnée par (illustrée à la Fig.III.21) :

$$\begin{bmatrix} \theta_{k+1} \\ \omega_{k+1} \\ x_{k+1} \\ \dot{x}_{k+1} \\ \ddot{x}_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_k + \Delta T \cdot W(\theta) \cdot \omega_k + w_k^1 \\ \omega_k + w_k^2 \\ x_k + \Delta T \cdot \dot{x}_k + \Delta T^2 \cdot \ddot{x}_k + w_k^3 \\ \dot{x}_k + \Delta T \cdot \ddot{x}_k + w_k^4 \\ \ddot{x}_k + w_k^5 \end{bmatrix} \quad (III.14)$$

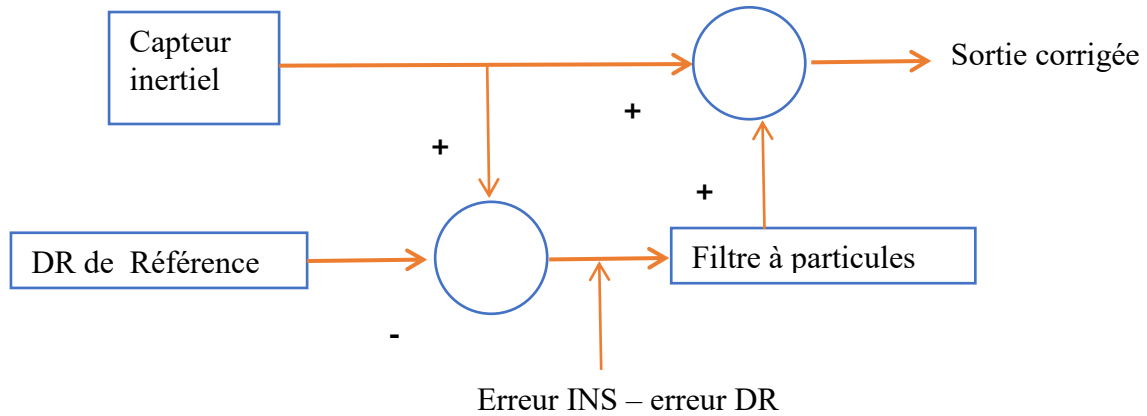


Fig.III.21 Fusion de capteurs avec le filtrage à particules

Avec ΔT est la période d'échantillonnage, $W(\theta)$ est la matrice jacobéenne qui relie l'angle de rotation absolu à la vitesse W_k^i . ω_k est le bruit de distribution aléatoire du système. A chaque instant, la pose déduite de la position en en deux dimensions est donnée par les valeurs du paramètre θ .

III.6.10 Mesures du capteur inertiel

Le capteur inertiel se compose de trois gyroscopes à orientation orthogonale pour détecter les vitesses de rotation angulaires le long de trois axes perpendiculaires et d'un accéléromètre qui produit trois mesures d'accélération sur les trois axes. Les changements d'orientation du système sont mise jour par le capteur inertiel, donc la transformation entre les $\{G\}$ et $\{I\}$ est nécessaire pour relier le mouvement inertiel et la position exacte du mobile. La relation de mouvement de rotation entre les deux coordonnées peut être dérivée par :

$$\omega = R_I^G \cdot \omega_I \quad (\text{III. 15})$$

avec ω_G et ω_I désigne la vitesse angulaire par rapport au cadre de coordonnées de référence et au données coordonnée inertielle, respectivement. Afin de déterminer la matrice de transformation R_I^G . Les accéléromètres produisent trois mesures d'accélération, une pour chaque axe (unités: mm/s²). Les accéléromètres fournissent des mesures d'accélération linéaire dans leur propre cadre de coordonnées $\{I\}$. Cependant, le terme d'accélération dans le vecteur d'état est l'accélération linéaire de $\{C\}$ à $\{W\}$. La fonction reliant le vecteur d'état X et les valeurs d'accélération linéaire sont données par :

$$a_c = \dot{R}_I^G (\ddot{x} + \omega \cdot \frac{d}{dt} (R_C^W(\theta) \cdot P_I^C + g) \quad (\text{III. 16})$$

d'où vient la rotation $\{W\}$ to $\{I\}$ est R_I^G et P_I^C est la position de l'origine $\{I\}$ obtenue par rapport au $\{C\}$ frame et g est la gravité. R_I^G et P_I^C étant déterminés par calibrage du détecteur.

III.6.11 La Fusion de Filtre à particules

Le but du filtrage par fusion est d'estimer les paramètres de pose d'objet à partir des mesures du système de référence et ceux des données de capteurs inertiels. La base de notre algorithme de fusion est un filtre à particules. Dans cette section, nous expliquerons comment utiliser un tel filtre pour estimer la position de l'objet. Le suivi de mouvement peut être considéré comme un système de temps discret non linéaire à cible unique dont le modèle de processus peut être exprimé comme suit:

$$X_{k+1} = f(X_k, w_k) \quad (\text{III. 17})$$

avec X_k désigne le vecteur d'état du système au moment k , comme défini dans l'équation (III.13), $f(X_k, w_k)$ représente le processus déterministe donné par (III.14). Le modèle de mesure est donné par :

$$y_k = h(X_k, n_k) \quad (\text{III. 18})$$

avec n_k représente le bruit des mesures. La fonction non linéaire h relie le vecteur d'état X aux mesures y . Dans notre conception, les mesures d'entrée du filtre de fusion proviennent de trois capteurs différents, à savoir, ceux obtenues par le system de DR de référence, le gyroscope et

accéléromètres, chacun avec sa propre équation de sortie h et une incertitude dans l'espace de sortie.

III.6.12 Pour le gyroscope

Le gyroscope produit trois mesures de vitesse angulaire, une pour chaque axe (unités : rad / s). Cette information ne sera associée qu'au terme de vitesse angulaire dans le vecteur d'état. Le modèle de mesure du gyroscope est alors donné par :

$$y_k^{gyro} = h_{gyro}(X_k) + n_k^{gyro} + H_{gyro} \cdot X_k + n_k^{gyro} \quad (III. 19)$$

mettant en relation le vecteur d'état avec le vecteur de mesure à l'aide d'une matrice d'identité, ainsi :

$$H_{gyro} = [0_{3 \times 3} I_{3 \times 3} 0_{3 \times 3} 0_{3 \times 3} 0_{3 \times 3}] \quad (III. 20)$$

avec $0_{3 \times 3}$ représente la matrice zéro and $I_{3 \times 3}$ la matrice identité.

III.6.13 Pour l'accéléromètre

Les accéléromètres produisent trois mesures d'accélération, une pour chaque axe (unités: mm / s²). Le modèle de mesure de l'accéléromètre est défini par:

$$y_k^{acc} = h_{acc}(X_k) + n_k^{acc} \quad (III. 21)$$

Avec h_{acc} est donné par (4) et n_k^{acc} est le bruit de l'accéléromètre.

III.6.14 Filtrage de particules SIR

Après avoir formulé les modèles de processus et de mesure pour les capteurs inertiels, nous pouvons maintenant donner une itération du filtre à particules SIR :

1) Hypothèses

Soit: N le nombre de particules $p(X_0) = p(X_0 / y_0)$ soit la distribution a priori (pour $k=0$).

2) Initialisation

Pour $k = 0$: initialiser les particules et générer :

$$\{X_0^{(i)}\}_{i=1}^N$$

à partir de la distribution initiale $p(X_0)$ initialiser les poids :

$$\Omega_0^{(i)} = \frac{1}{N}$$

3) Evolution

Prédire de nouvelles particules $X_k^{(i)}$ en utilisant différentes réalisations de bruit et le modèle de processus :

$$X_k^{(i)} = f(X_{k-1}^i, w_k), \quad i = 1, \dots, N \quad (\text{III. 22})$$

4) Pondération

Dans notre application, les bruits de mesure sont considérés comme gaussiens dont les moyennes sont nulles, et dont l'erreur les matrices de covariance sont respectivement R_k^{gyro} , R_k^{acc} et R_k^{DR} . Dans ce cas, les poids sont calculés comme suit :

$$\Omega_k^{(i)} = \frac{\exp\left(-\frac{1}{2} \|y_k - h(X_k^{(i)})\|_{R_k}^2\right)}{\sum_{j=1}^N \exp\left(-\frac{1}{2} \|y_k - h(X_k^{(j)})\|_{R_k}^2\right)} \Omega_{k-1}^{(i)} \quad (\text{III. 23})$$

avec y_k sont les mesures observées à partir de DR et de capteurs inertiels et h est le modèle de mesure, correspondant soit à h_{DR} , h_{Gyro} ou h_{ACC} en fonction de la disponibilité des données de mesure.

5) Estimation

Calcule de la sortie du filtre SIR par :

$$\hat{X}_k^N = \sum_{i=1}^N \Omega_k^{(i)} \cdot X_k^{(i)} \quad (\text{III. 24})$$

Augmentant k et passant à l'élément d'équation(III.15). Étant donné que les données du DR sont obtenues à un rythme plus lent que les données du capteur inertiel étant donné que les fonctions de "Dead-reckoning" sont obtenues après un temps de calcul qui n'est pas négligeable et c'est ainsi que le filtre effectuera une estimation de la position de l'objet. Ainsi, nous implémentons un filtre complémentaire comme le montre la Fig.III.22. Il existe deux canaux de pondération des particules partageant un module d'estimation commun : l'un est destiné aux mesures de DR et l'autre est pour les mesures de capteurs inertiels (INS). Le traitement de canal indépendant gère les mesures d'informations incomplètes. Par exemple, lorsqu'aucune mesure DR n'est disponible (par exemple, en raison d'occlusions), le système global maintient le suivi de la pose de l'objet en utilisant uniquement le canal de pondération inertielle et vice versa, lorsque la mesure de DR est disponible, seul le canal de pondération de ce dernier est utilisé pour estimer la position de l'objet pour surmonter les problèmes de dérive des capteurs inertiels dus à un temps d'intégration plus long.

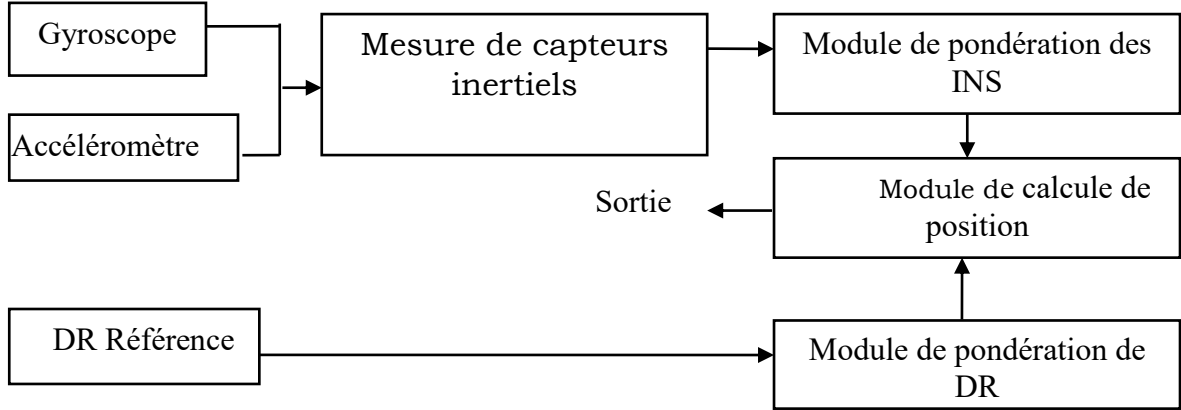


Fig.III.22 Schéma du filtre de fusion de capteur.

III.6.15 Filtre à particules Monte Carlo

Le filtre de Monte Carlo (FMC) peut fournir une solution au problème d'estimation d'état séquentiel. Le FMC se rapproche de l'algorithme de filtre bayésien en utilisant des échantillons aléatoires appelés particules. L'algorithme de MCF se résume comme suit :

$$\hat{X}_0^{(i)} = \mathcal{N}(\bar{X}_t, \bar{P}_t), \hat{w}_0^{(i)} = \frac{1}{N}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (\text{III. 25})$$

➤ **Algorithme Monte Carlo:**

for all $t = 1, 2, \dots$ **do**

-Les estimations des états prédits sont définies comme suit:

$$\hat{w}_t^{(i)} \sim p(\Phi_t), i = 1, 2, \dots, N$$

$$\bar{X}_t^{(i)} = f(\hat{X}_{t-1}^{(i)} + \Phi_t)$$

$$\bar{w}_t^{(i)} = \bar{w}_{t-1}^{(i)}$$

$$\bar{X}_t = \sum_{j=1}^N \bar{w}_t^{(j)} \bar{X}_t^{(j)}$$

-L'estimation des états filtrés:

$$\hat{X}_t^{(i)} = \bar{X}_t^{(i)}$$

$$\hat{w}_t^{(i)} = \bar{w}_t^{(i)} p(Y_t | X_t = \hat{X}_t^{(i)})$$

$$\hat{w}_t^{(i)} = \frac{\hat{w}_t^{(i)}}{\sum_{j=1}^N \hat{w}_t^{(j)}}$$

$$\hat{X}_t = \sum_{j=1}^N \hat{w}_t^{(j)} \hat{X}_t^{(j)}$$

end for

Ici, $\hat{X}_0^{(i)} \sim p(X_0)$ and $\hat{w}_t^{(i)} \sim p(\Phi_t)$ sont les i^{ime} particules tirées au hasard de l'état initial et du système par rapport au bruit, respectivement $p(Y_t | X_t = \bar{X}_t^{(i)})$ est la probabilité spécifiée par l'équation (III.18) et $\bar{X}_t$ et $\hat{X}_t$ sont les estimations d'état prédit et filtré. Elles sont calculées par la somme pondérée des valeurs de particules comme indiqué dans l'algorithme. La procédure de ré échantillonnage est effectuée après l'estimation de l'état filtré sur des particules tirées au hasard à partir de l'état postérieur estimé. Puis

$\{w_t'^{(i)}\}$; $i = 1, 2, 3, \dots ; N$ deviennent tous $1/N$ et l'équation de poids dans l'estimation de l'état filtré peut être simplement exprimée comme suit:

$$\hat{w}_t^{(i)} \propto p(Y_t | X_t = \hat{X}_t^{(i)}) \quad (\text{III. 26})$$

Un tel ré-échantillonnage de particules est également efficace pour éviter le problème d'appauvrissement des particules lorsque la plupart de celles-ci ont les mêmes valeurs si le temps dépasse un certain degré.

➤ **Algorithme de filtre à particules SIR:**

Initialization:

for all m **do**

$$x_0^{[m]} = p(x_0)$$

end for

for all k **do**

Prediction:

for all m **do**

$$x_0^{[m]} = p(x_{k+1} | x_k^{[m]}, r_k)$$

end for

Mise a jours des mesures :

For all m **do:**

$$x_0^{[m]} = p(z_k | x_k^{[m]}) \omega^m$$

end for

Normalisation des poids:

For all m **do**

$$\omega_k^{[m]} = \frac{\omega_k^{[m]}}{\sum_{j=1}^{N_s} \omega_k^{[j]}}$$

Re-échantillonnage

$$N_{eff} < \alpha N_s$$

End for

Cet algorithme a été adapté pour une mise en œuvre sur des systèmes dont l'estimation s'effectue en temps réel. Les résultats montrent que ce système d'estimation assisté par carte (plan de référence géographique du le milieu) est capable de fournir un positionnement précis à l'intérieur ou à l'extérieur pendant de longues périodes.

III.7 Description des capteurs intégrés utilisés

Le système est composé d'un accéléromètre à trois axes et d'un capteur gyroscopique. Pour la correction de la dérive sur le gyroscope, un magnétomètre est ajouté pour améliorer les résultats en utilisation en extérieur. Comme indiqué sur la Fig.III.23 dans notre travail nous avons utilisé le MPU6050 qui combine un gyroscope et un accéléromètre en plus d'un module magnétomètre le HMC5883L. Les données brutes du capteur en sortie sont illustrées à la Fig.III.24. Dans l'estimation de la position, lorsque le gyroscope est inclus, ses erreurs sont combinées avec celles de l'accéléromètre. Cependant, puisque le calcul de la position à partir d'un accéléromètre nécessite une double intégration sur l'accélération. Une erreur de biais fixe de l'accéléromètre se traduit par une dérive de position qui augmente de manière quadratique avec le temps. Cependant, l'erreur de l'accéléromètre impacte l'erreur d'estimation de position, et les erreurs critiques du système proviennent de l'estimation d'orientation provoquée par le gyroscope. Une alternative à l'utilisation de la technique de fusion de capteurs en combinant des magnétomètres et des gyroscopes, ce qui peut donner de meilleurs résultats que l'utilisation de capteurs indépendamment. Des magnétomètres peuvent être utilisés pour corriger la dérive du gyroscope.

Les magnétomètres mesurent la force et la direction du champ magnétique, permettant ainsi de trouver la direction nord. Un paramètre qui peut fausser la mesure de l'orientation est les matériaux ferromagnétiques en interférant avec le magnétomètre. Ainsi, les gyroscopes ne peuvent pas être remplacés par des magnétomètres.

Cependant, lorsque le gyroscope et le magnétomètre sont combinés ensemble, la précision du calcul d'orientation peut être améliorée grâce à la redondance.

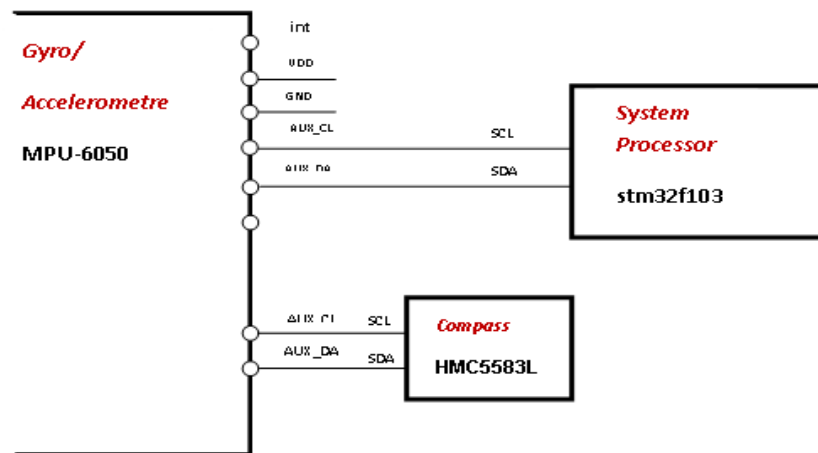


Fig.III.23 MPU-6050 and HMC5883L solution de boussole pour la fusion de capteurs à 9 axes à l'aide de l'interface I2C.

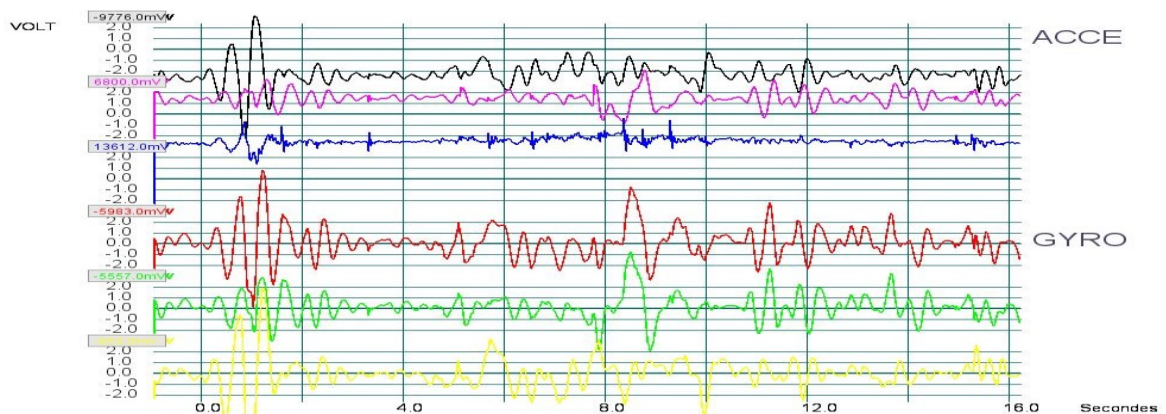


Fig.III.24 Performance de l'accéléromètre et du gyroscope pendant une période de 16 secondes.

III.7.1 Lecture des valeurs du MPU-6050

Le MPU-6050 dispose d'un tampon FIFO (premier entré, premier sorti) et, comme toute micro puce, elle stocke les données dans des registres. Il est vite devenu clair que pour que le microcontrôleur puisse lire les valeurs mesurées par le MPU-6050, celle-ci devaient être extraites directement des registres de données du MPU-6050.

La liste des registres à l'intérieur du MPU-6050 qui stockent des données allant du contrôle I2C, du contrôle utilisateur, de la gestion de l'alimentation et, surtout, des mesures d'accéléromètre et de gyroscope nécessaires.

Une connexion I2C est établie avec le MPU-6050 et le programme devrait demander quatorze registres 8 bits au MPU-6050, en commençant par l'adresse du premier registre de données de l'accéléromètre ACCEL XOUT H, puis remonter le des blocs de données d'un octet en sept entiers de 16 bits, et enfin utiliser les six points de données pertinents: les valeurs d'accéléromètre x, y et z, et les valeurs du gyroscope de roulis, de tangage et de lacet.

III.7.2 Orientation des axes du MPU6050

Le schéma ci-dessous montre l'orientation des axes et la polarité de rotation. Notez que la broche "1" est à l'identifiant (•) sur la Fig.III.25.

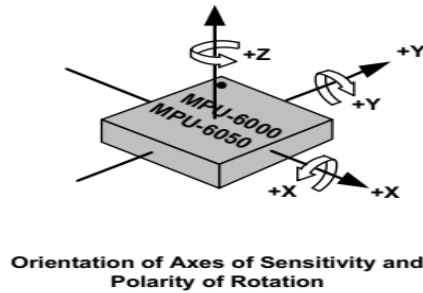


Fig.III.25 Orientation des axes de sensibilité et polarité de rotation.

III.7.3 Ajustement des données brutes du MPU-6050

Le MPU-6050 peut être initialisé pour mesurer l'accélération en Gs à l'une des sensibilités suivantes : $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$, or $\pm 16g$. Le gyroscope peut également être configuré pour mesurer la vitesse angulaire en degrés par seconde à l'une des précisions suivantes : ± 250 , ± 500 , ± 1000 , ± 2000 . le MPU-6050 stocke les sorties de capteur individuelles sous forme d'entiers signés 16 bits. Cela signifie que toutes les valeurs, de l'accéléromètre ou du gyroscope, peuvent être n'importe où sur le domaine $[-32768; 32768]$. Cela signifie que les données doivent être mises à l'échelle pour que les données brutes aient les unités appropriées.

$$Scalar = \frac{|Range|}{2^{16}} \quad (III. 27)$$

La configuration utilisée est : $\pm 2g$ and ± 250 deg/sec

$$S_{Acceleration} = \frac{|4 * 9.8067|}{2^{16}} \quad (III. 28)$$

$$S_{Acceleration} = \frac{|500|}{2^{16}} \quad (III. 29)$$

Note $1g = 98067 \text{ m/s}^2$

Maintenant que les données peuvent être interprétées correctement, le MPU-6050 doit être calibré. Si le capteur était parfaitement orienté sur le sol, alors les valeurs de repos pour l'accélération et la vitesse radiale

devraient être proches de zéro. Cependant, il est extrêmement difficile de placer correctement le capteur et le placement du capteur pourrait décaler lors du transport du capteur. Au lieu de compter sur un placement parfait, le capteur est calibré par un logiciel avant d'être utilisé. Cela se fait en faisant la moyenne de n valeurs des données de l'accéléromètre et du gyroscope, et en l'utilisant pour décaler les valeurs lues à partir du MPU-6050. Par exemple, si Z est une accélération mesurée dans la direction X . Le terme A sera l'accélération après avoir été ajustée comme suit :

$$offset = \sum_{i=0}^n \frac{S_{Acc} * Z_i}{n} \quad (III. 30)$$

$$A = S_{Acc} * (Z - Offset) \quad (III. 31)$$

III.7.4 Lecture précise de l'encodeur à quadrature

Les encodeurs en quadrature renvoient un entier 16 bits non signé, ce qui n'est pas très utile étant donné que les encodeurs peuvent avancer et reculer. Afin de capturer le mouvement dans les directions de sens positifs et négatifs, les valeurs du codeur sont décalées de $-2^{15} - 1$ et en résulte $2^{15} - 1$ étant traité comme le point zéro

$$Encoder Value = Valeur brute - 2^{15} \quad (III. 32)$$

En outre, les entiers ont des valeurs maximales et minimales qu'ils peuvent contenir avant de dépasser ces limites et de se boucler. Une fois que les valeurs de l'encodeur sont supérieures à $2^{15} - 1$ ou inférieures à 0, la valeur débordera ou dépassera respectivement et reviendra à $2^{15} - 1$. Lorsqu'un "wrapping" comme celui-ci se produit, la nouvelle lecture du codeur aura changé d'au moins $2^{15} - 1$ tiques. Pour contrer cela, le programme garde une trace de la quantité de débordements et de sous-débords.

if $Valeur_{courante} - valeur_{précédente} < 2^{13}$

Then Incrémente le compteur " débordement par le haut" par 1

else if $Valeur_{courante} - valeur_{précédente} < 2^{13}$

then Incrémente le compteur " débordement par le bas " par 1

Les compteurs de sous-dépassement et de débordement sont stockés séparément, au lieu d'utiliser une seule variable et de l'augmenter ou de la diminuer d'une unité en fonction du sous-débordement ou du débordement. Ceci est fait parce qu'un compte de dépassement inférieur est à 2^{15} loin de la valeur zéro, mais un débordement est de 1 de moins à 2^{15-1} . Ainsi, stocker des valeurs séparées permet des lectures plus précises :

$$Valeur\ de\ l'encodeur = Overflow * (2^{15} - 1) - underflow * (2^{15}) + valeur_{precédente} \quad (III. 33)$$

III.7.5 Architecture du tag sensor réalisé

Le principe de fonctionnement est simple et efficace. La conception du système RFID consiste en un capteur d'étiquette utilisant un microcontrôleur ARM à faible puissance, un accéléromètre à 3 axes, un gyroscope à 3 axes, un magnétomètre, une unité de stockage non volatile et une puce et une antenne RFID basse fréquence (LF) (illustré à la Fig.III.26).

Des fonctions supplémentaires telles que le conditionnement et l'amplification sont assurées par certains composants discrets (MOSFET de puissance) qui alimente la bobine du lecteur pour l'amélioration de la puissance. Un prototype du système RFID fabriqué sur une carte de circuit imprimé (PCB) double face à l'aide de composants à faible coût et équipé d'une petite pile lithium/ion CR2032 3 V6 / 850mAh connectée à un régulateur de tension linéaire TI TPS78330 3-V LDO avec un courant de repos de 500nA offrant une durée de vie estimée à 8 mois. Des sources d'énergie supplémentaires ou des modules de récupération d'énergie peuvent être facilement interfacés avec l'étiquette RFID en les connectant directement au régulateur LDO. Le cœur du système est un processeur STM32F103 - ARM 32 bits à très faible puissance. La portée de communication RFID peut atteindre 2 mètres. La Fig.III.27 montre le prototype de notre système.

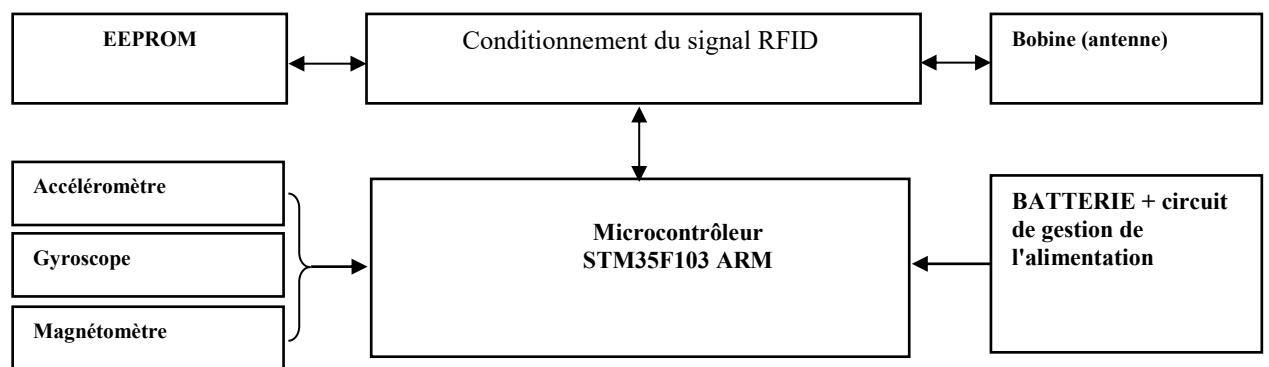


Fig.III.26 Schéma fonctionnel du capteur d'étiquette RFID proposé pour le système de localisation et de surveillance du comportement.

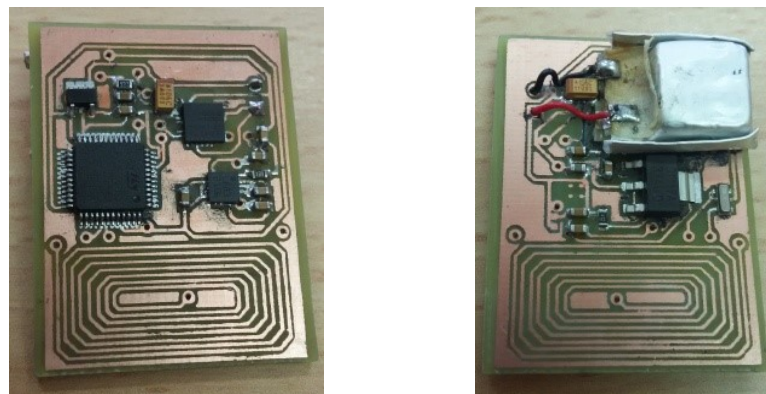


Fig.III.27 Prototype du système vu de haut et d'arrière du circuit du tag sensor utilisé. Dimensions : 3,9 x 2,1 x 0,16 cm3.

Afin d'évaluer la consommation d'énergie et la durée de vie de l'étiquette RFID augmentée par le capteur, le MCU a été programmé pour effectuer une tâche de détection, entrer en mode veille à la fin de la tâche et être réveillé périodiquement par une interruption de minuterie interne.

Un oscilloscope numérique a été utilisé pour suivre la chute de tension à travers une application de détection de courant basée sur un shunt de précision, connectée en série avec l'étiquette RFID augmentée par le capteur. Ensuite, le courant continu traversant l'appareil a été signalé. Il a été constaté que les phases de sommeil du MCU et de l'IMU consomment $I_{repos} = 100 \mu A$, tandis que le pic de courant $I_{actif} = 3,37 \text{ mA}$ se produit pendant les périodes actives du MCU en même temps que la détection IMU.

La durée de vie de la batterie utilisée est d'environ 8 mois lorsque vous travaillez sur un Li-ion 850mAh. Dans notre cas, en exploitant le lecteur RFID, la durée de vie est importante car la partie RFID est alimentée par le lecteur. Le Tableau III.2 montre la consommation électrique des éléments principaux, du MCU et de l'unité de mesure initiale (IMU).

Tab.III.2 Consommation électrique des éléments composant l'unité IMU et MCU du tag sensor.

Component	Current (mA)	Voltage (v)	Puissance (mW)	Rapport cyclique (%)
STM32F103	13	3.0	39	10%
MPU6050	3.9	1.8	7.02	10%
HMC5883	0.1	1.8	0.18	10%
Total	1.54	3.0	4.62	-

La durée de vie L de la batterie embarquée dépend de sa capacité disponible et elle peut être estimée par l'équation suivante :

$$L = \frac{C \times (T_{actif} + T_{repos})}{(I_{actif} \times T_{actif}) + (I_{repos} \times T_{repos})} \quad (III. 34)$$

Où C est la capacité de la batterie de 850 mAh et $(T_{actif}$ and $T_{repos})$ sont les durées de la période (active et de repos).

$$L = \frac{850 \times (0.9 + 0.1)}{(1.54 \times 0.1) + (0.1 \times 0.9)}$$

$$L = 5520 \text{ heures}$$

$$L \sim 8 \text{ mois}$$

III.7.6 Traitement des données et implémentation

➤ Traitement des données par la méthode de dead-reckoning adoptée

Le dead-reckoning est le processus de calcul de la position actuelle en utilisant une position préalablement déterminée [157 ,158 ,159]. Dans les études sur la navigation animale, il est plus communément appelé intégration de chemin. L'intégration des mesures du gyroscope fournit des informations sur l'orientation du capteur. Après soustraction de la gravité terrestre avec une double intégration de l'accéléromètre, la mesure renseigne sur la position du capteur. Afin de permettre la soustraction de la gravité terrestre, l'orientation du capteur doit être connue. Par conséquent, l'estimation de la position et de l'orientation du capteur est intrinsèquement liée lorsqu'il s'agit de capteurs inertiels. Le processus de calcul de la position actuelle est résumé dans la fig.III.18.

Avec les étapes d'intégration de la vitesse angulaire à la rotation et de l'accélération à la position, une dérive d'intégration est nécessairement introduite. En pratique, les mesures inertielles sont également bruyantes et biaisées.

Certains modèles sont utilisés pour décrire les informations sur la dynamique et les mesures disponibles. Ils constituent le fondement des algorithmes d'estimation. Ces modèles sont utilisés en combinaison avec les mesures des capteurs pour avoir des mesures dynamiques (mesures inertielles ... etc.).

Dans le cas de l'estimation de la position de $p(x_{t+1})$ est visée, le capteur est porté par une vache et nous donnerait des informations sur la distance que le capteur peut parcourir à partir du temps t au temps $t + 1$. En incorporant ces informations sur la dynamique du capteur, l'estimation de $p(x_{t+1})$ sera améliorée $p(x_{t+1})$. La connaissance est divisée en temps inconnu- états variables $p(x_{t+1})$ pour x_t for $t = 1$ to N ($x_{1:N}$) et les paramètres constants inconnus θ . Les mesures sont notées x_t for $k = 1$ to K .

Notons que les temps k auxquelles ces mesures sont obtenues ne correspondent pas nécessairement aux états des instants t . Cela peut être exprimé en termes de distribution de probabilité conditionnelle comme suit :

$$p(x_{1:N}, \theta | y_{1:N}), \quad (\text{III. 35})$$

Où $p(x_{1:N}, \theta | y_{1:N})$, désigne la probabilité conditionnelle d'un $y_{1:N}$ donné. Dans le problème d'estimation de position, nous nous intéressons à l'obtention d'estimations ponctuelles notées $x_{1:N}$ et θ . Il est généralement très pertinent de savoir à quel point ces estimations sont souvent exprimées en termes de covariance. Lorsque la distribution (III.35) est gaussienne, elle est complètement décrite en termes de sa moyenne et de sa covariance. Dans (35), on suppose que toutes les mesures $y_{1:N}$ sont utilisées pour obtenir la distribution postérieure de $y_{1:N}$ et θ qui est appelée lissage. Afin d'obtenir les meilleures estimations, toutes les informations disponibles doivent être utilisées, mais dans l'application actuelle, traiter le filtrage. x_t est estimé en

utilisant toutes les mesures, y compris le temps t . L'application de filtrage peut être exprimée en termes de distribution de probabilité conditionnelle.

$$p(x_t|y_{1:t}), \quad (\text{III.36})$$

Le lissage est maintenant introduit, où les états $x_{1:N}$ et le filtrage sont estimés simultanément, l'état x_{t+1} est estimé à chaque instance de temps. L'état x_{t+1} est considéré comme dépendant de x_t et le résultat dans les mesures est y_{t+1} . Il est conditionnellement indépendant de $x_1:x_{t-1}$ étant donné l'état x_t . En utilisant la règle de Bayes et la propriété de Markov, les distributions conditionnelles (22) et (23) peuvent être décomposées comme suit :

$$p(x_{1:N}, \theta | y_{1:N}) \propto p(\theta) p(x_1 | \theta) \prod_{t=2}^N p(x_t | x_{t-1}, \theta) \prod_{t=1}^N p(y_t | x_t, \theta), \quad (\text{III.37})$$

$$p(x_t | y_{1:t}) \propto p(y_t | x_t) p(x_t | y_{1:t-1}), \quad (\text{III.37})$$

La distribution prédictive $p(x_t | y_{1:t-1})$ peut être calculée en marginalisant l'état précédent x_{t-1} comme suit :

$$p(x_t | y_{1:t-1}) = \int p(x_t | x_{t-1}) p(x_{t-1} | y_{1:t-1}) dx_{t-1}, \quad (\text{III.38})$$

Dans (37), $p(\theta)$ and $p(x_1 | \theta)$ encoder les informations préalables de θ et la connaissance de l'état x_1 est donné par θ , respectivement. La dynamique est modélisée en termes de

$p(x_{t+1} | x_t, \theta)$ et $p(x_{t+1} | x_t)$. La distribution $p(y_t | x_t, \theta)$ et $p(y_t | x_t)$ formaliser les informations données par les mesures sur l'état et les paramètres. La dynamique de l'État s'exprime comme suit:

$$x_t = f(x_{t-1}) + \Phi t; \Phi t \sim p(\Phi_t) \quad (\text{III.39})$$

$$y_t = h(x_t) + \Phi t; \Phi t \sim p(\Phi_t) \quad (\text{III.40})$$

Ici, x_t est le vecteur aléatoire L -dimensionnel appelé état au temps t et c'est la cible d'estimation utilisant la série passée d'observations M dimensionnelles, $\{y_{t-1}\} = \{y_{t-1}, y_{t-2}, \dots, y_1\}$. Le premier terme s'appelle l'estimation de l'état prédit. $x_t = E[x_t | \{y_{t-1}\}]$ et ce dernier s'appelle l'estimation de l'état filtré $\hat{x}_t = E[x_t | \{y_t\}]$.

Leurs erreurs d'approximation sont calculées par $E[(x_t - \hat{x}_t)(x_t - \hat{x}_t)^T | \{y_{t-1}\}]$ Et $E[(x_t - \hat{x}_t)(x_t - \hat{x}_t)^T | \{y_t\}]$ respectivement avec $f(\cdot)$ et $h(\cdot)$ sont des fonctions non linéaires appelées état de transition et état d'observation. Φ_t et Ω_t sont indépendants des bruits blancs suivant des fonctions de densité de probabilité arbitraires et sont appelés respectivement bruit du système et bruit d'observation. Les équations (III.39) et (III.40) sont appelées modèle de système et modèle d'observation, et ces deux équations constituent le modèle d'espace d'états d'intérêt.

➤ Filtre Monte Carlo

Plusieurs modèles mathématiques sont actuellement utilisés pour fusionner les données des capteurs destinés au suivi d'objets. Ces méthodes comprennent le filtre de Kalman, le Kalman étendu, le Kalman non parfumé, le Kalman complémentaire et le filtre à particules [160, 161, 162], [163, 164]. Le filtre à particules a été choisi dans ce travail pour de multiples considérations. L'un d'eux est la détermination de la position avec une grande précision en réduisant la dérive dans le temps.

Comme le montre la Fig.III.28, le PF a besoin de ressources de calcul relativement élevées, c'est pourquoi un PF Monte Carlo est choisi en raison de son algorithme logiciel puissant dans les systèmes embarqués [163, 164]. La solution proposée est basée sur une méthode séquentielle de Monte Carlo, appelée filtrage des particules. Cet algorithme peut être adapté pour une mise en œuvre sur des systèmes fonctionnant en temps réel.

Les résultats montrent que ce système d'estimation par la méthode de "dead-reckoning" assisté par une carte de référence (un plan géographique du terrain où sont positionnées les lecteurs RFID qui donnent les paramètres de réinitialisation nécessaires à la fonction de l'algorithme de DR) est capable de fournir un positionnement intérieur précis pendant de longues périodes. La Fig.III.30 montre la comparaison entre la dérive gyroscopique avec et sans combinaison d'un filtre à particules.

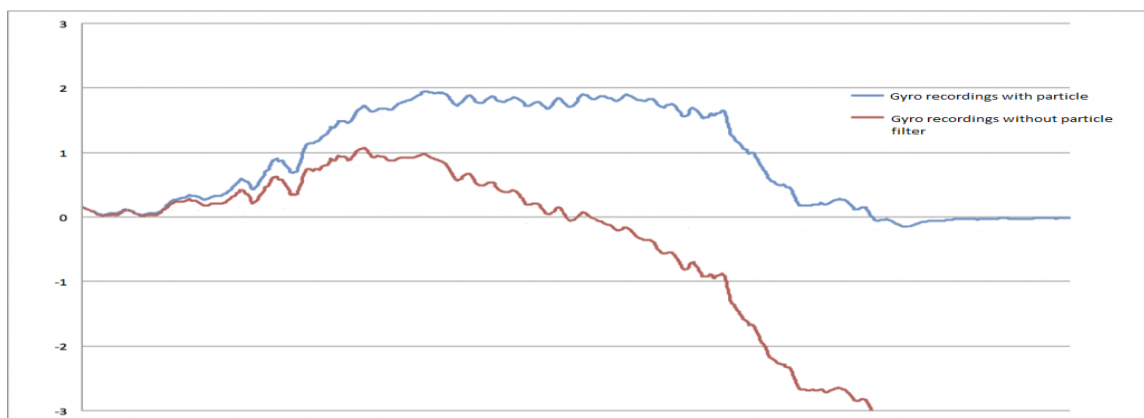


Fig.III.28 Comparaison entre la dérive gyroscopique avec et sans combinaison d'un filtre à particules (voir version en ligne pour les couleurs).

Le filtre de Monte Carlo (MCF) permet de fournir une solution au problème d'estimation d'état séquentiel présente. Le principal atout de l'utilisation du MCF est en plus de fournir l'estimation d'état filtrée, il fournit également l'état prédit.

III.8 Conclusion

Les vaches laitières présentent des altérations de leurs comportements lorsqu'elles sont confrontées à une maladie. Dans ce troisième chapitre, nous avons décrit un système à faible coût et à faible consommation

d'énergie qui permet de localiser les vaches laitières et de surveiller leur comportement alimentaire. Le capteur est composé d'un microcontrôleur ARM à faible puissance basée, d'un accéléromètre 3 axes, d'un gyroscope 3 axes, d'un magnétomètre, d'une mémoire non volatile et d'un module RFID LF. Tous les composants sont implémentés dans une petite carte double-face et placés sur l'oreille des vaches laitières.

Notre travail présente une méthode pour estimer et diriger la position des animaux en utilisant une méthode de navigation basée sur les données collectées par les capteurs portables. L'algorithme de Monte-Carlo est utilisé pour soustraire les mouvements relatifs de l'oreille afin de fournir des positions relativement précises des vaches. Notre algorithme est implémenté dans un microcontrôleur ARM économique et aux ressources limitées. De plus, le comportement alimentaire des vaches est étudié dans une seconde partie où trois classes importantes (alimentation, position debout et transition entre l'alimentation et la position debout) sont séparées grâce à l'utilisation de l'arbre de décision comme modèle de classification et du modèle de mélanges finis pour la détermination des seuils.

L'un des principaux avantages de l'architecture du système développé est la réduction du nombre d'infrastructures sensorielles à utiliser. Pour des raisons de faisabilité, plusieurs tests de validation ont été effectués dans des environnements intérieurs et extérieurs en combinant un capteur monté sur l'oreille avec la méthode de fusion de particules à partir des données des capteurs intégrés à l'étiquette RFID. Nous allons consacrer le chapitre 4 à la présentation des différents résultats que nous avons obtenus pendant les phases de test et de validation. De plus, nous allons comparer nos résultats par rapport à ceux obtenus dans d'autres études scientifiques.

Chapitre IV

Expérimentation et Résultats

IV.1 Introduction

La limite des systèmes de localisation déployés actuellement dans les fermes modernes est qu'ils ne peuvent indiquer que la présence et l'absence de la vache dans la zone d'alimentation. Pour surmonter cette limite, nous avons conçu un capteur embarqué permettant la localisation des vaches laitières et la classification de leurs comportements. Ce capteur se base sur la combinaison des données de l'unité de mesure inertielle (IMU) et des données RFID.

En effet, le capteur RFID/IMU permet d'évaluer le temps passé par les vaches dans la zone d'alimentation, la zone d'abreuvement et la zone de traite. Ensuite, lorsque la vache se trouve dans la zone d'alimentation, le capteur va classer son comportement alimentaire. En fait, les vaches sont classées comme étant en phase d'alimentation uniquement si elles se trouvent dans la mangeoire et que leurs têtes sont inclinées vers le bas. Cela permet d'indiquer la présence de la vache dans la mangeoire et de confirmer qu'elle est effectivement en train de se nourrir. Le deuxième objectif de notre système est d'améliorer les performances des systèmes de localisation des vaches basés sur la technologie RFID en intégrant les données IMU avec celles de la RFID. Durant ce quatrième chapitre nous allons présenter les résultats obtenus lors des différentes étapes d'élaboration, de déploiement, de test et de validation du système embarqué proposé.

IV.2 Déploiement de notre système

Nous avons effectuées les expériences de terrain à la ferme laitière SOFLAIT, située dans la région de Draa Ben Khedda, Tizi-Ouzou. La Fig.IV.1 et Fig.IV.2 montre l'avant du sujet avec les capteurs montés sur le corps de la vache. L'étiquette RFID est attachée à la tête de la vache. Chaque capteur est étroitement enveloppé afin de minimiser les effets de mouvement de la peau. Lorsque les signaux du capteur sont mesurés, chaque capteur subit différents processus en fonction de la position fixée.

La position et le comportement du capteur monté sur la tête sont calculés à l'aide d'un algorithme d'estimation de position qui prend les entrées du système de navigation inertielle (INS) et le résultat est la position estimée. Plus tard, la position estimée de la tête peut être explorée pour

traiter le comportement de la vache en ce qui concerne son alimentation et sa boisson.



Fig.IV.1 Déploiement du matériel au niveau du mangeoire des vaches, (Date de la prise photo : 20 janvier 2020).



Fig.IV.2 Lecteur d'un tag emplacements, (Date de la prise photo : 20 janvier 2020).

IV.3 Classification des comportements

IV.3.1 Collecte de données

Lors de la surveillance du comportement des vaches, la collecte de données est souvent effectuée à l'aide d'accéléromètres attachés à différentes parties du corps de la vache. Ce système basé sur un accéléromètre est attaché à la tête [165], à la patte [166] et au dos [167] des vaches. Cependant, le comportement alimentaire n'a aucun impact sur les pattes ou le dos, mais n'affecte que la tête de l'animal, c'est pourquoi cet endroit est le

plus approprié pour le suivi de l'alimentation. Sur la base de ces confirmations, nous avons choisi d'utiliser la tête (au même emplacement du système de localisation) de l'animal pour collecter des données inertielles pour surveiller le comportement alimentaire.

Afin d'étudier les habitudes des animaux à partir des données collectées par l'étiquette intégrée, le capteur a été programmé pour collecter les données de l'accéléromètre toutes les secondes pendant la période d'alimentation des vaches. Sept des motifs d'étiquettes comme ceux utilisés pour l'expérience de localisation sont attachés à sept vaches pendant qu'une caméra filme la scène d'alimentation. Arcidiacono et coll. [165] ont défini une vache laitière comme état d'alimentation uniquement si la vache met sa tête dans la mangeoire. Nous considérons la même définition lors de l'annotation des données dans les trois classes (debout, alimentation et transition).

Une grande ferme d'élevage et commerciale nous a servi de base de collecte de la quasi-totalité des données. Les figures Fig.IV.3 et Fig.IV.4 montrent que les deux zones d'alimentation des vaches de races différentes (Holstein et Montbéliard) qui se trouvent dans la ferme. La Fig.IV.5 montre le déplacement des vaches entre la zone d'alimentation et la zone de traite. Lorsque la vache est en phase d'alimentation, l'ensemble de ses activités est filmé avec une caméra USB liée à une Raspberry pi 3. Les données vidéo issues de cette opération sont utilisées pendant la phase d'annotation pour connaître le comportement réel des vaches. La Fig.IV.6 illustre le système d'annotation.



Fig.IV.3 La première zone d'alimentation, (Date de la prise photo : 19 janvier 2020).



Fig.IV.4 La deuxième zone d'alimentation, (Date de la prise photo : 22 janvier 2020).



Fig.IV.5 Déplacement des vaches entre la zone de traite et la zone d'alimentation, (Date de la prise photo : 22 janvier 2020).



Fig.IV.6 Le système d'annotation du comportement alimentaire par caméra, (Date de la prise photo : 22 janvier 2020).

Les données des 3 premières vaches (ID1, ID2 et ID3) ont été utilisées pour développer le modèle de classification et les données des quatre (4) autres vaches (ID4, ID5, ID6 et ID7) ont été utilisées pour tester le modèle. Les périodes d'acquisition des données et les proportions d'états debout et d'alimentation sont présentés dans le Tableau IV.1.

Tab.IV.1 Description de l'ensemble de données servant pour la gestion du comportement

ID de la vache	Durée de la vidéo	Durée de l'usage de détecteurs	Durée de l'alimentation	durée de la pose de debout	Comportement obtenu à l'aide de l'ensemble de données
Vache 1	2h30min	2h18min	1h 26 min	52 min	Développement
Vache 2	1h54min	1h46min	58 min	48 min	Développement
Vache 3	3h03min	2h43min	1h 37min	1h 6 min	Développement
Vache 4	1h44min	1h39min	47 min	52 min	Validation
Vache 5	2h25min	2h07min	1h 22 min	45 min	Validation
Vache 6	1h46min	1h41min	1h 02 min	39 min	Validation
Vache 7	3h12min	2h42min	1h 31 min	1h11 min	Validation

IV.3.2 Algorithme et données utilisées pour le traitement du comportement

Après la collecte des données, nous avons choisi d'utiliser les arbres de décision comme modèle de classification. Par rapport à d'autres méthodes de classification telles que les réseaux de neurones et les machines vectorielles de support, l'avantage des arbres de décision est leur simplicité de mise en œuvre dans les capteurs embarqués, leur faible consommation d'énergie et leur faible besoin en mémoire. Cependant, déterminer quels arbres choisir est une étape importante, car ce choix a un impact direct sur les performances de l'arbre. Pour trouver automatiquement le meilleur seuil de séparation des classes debout et d'alimentation, nous avons utilisé les modèles de mélange basés sur Achour et al, [167] où le couplage d'arbres de décision avec des modèles de mélange a permis d'atteindre des taux de classification très élevés avec une énergie élevée d'autonomie. Le modèle de mélange fini de distributions de probabilités est basé sur l'hypothèse que les données sont dérivées d'une source qui contient plusieurs sous-populations appelées composantes. L'ensemble de la population de données est un mélange de toutes ces sous-populations. Une loi de mélange fini p sur un espace X est une loi de probabilités qui s'exprime comme une combinaison linéaire de plusieurs lois de probabilités $p_1, \dots, p_g$ on X . Aussi le coefficient g avec $\pi_1, \dots, \pi_g$ ($\pi_k > 0$ and $\pi_k = 1$) , Le π_k et π_k sont les proportions et les composants du mélange. Pour tous $x_1 \in X$:

$$p(x_1) = \sum_{k=1}^g \pi_k p_k(x_1) \quad (\text{IV. 41})$$

Le modèle de mélange fini permet de définir les seuils d'une seule variable et donc d'effectuer une classification à partir d'une seule variable. Les données d'entraînement seront utilisées pour trouver le meilleur ajustement pour le modèle de mélange. Pour obtenir le nombre de lois normales composant le mélange utilisé pour séparer les classes de repos, d'alimentation et de transition (entre la position debout et l'alimentation). Nous avons représenté sur un même graphe les fonctions de densité de ces activités pour chaque axe de l'accéléromètre. Cette étape permet de définir le nombre de composants que contiendra le modèle de mixage, elle permet également de définir la classe d'appartenance de chaque composant. Une fois l'architecture et les seuils de l'arbre de décision définis, nous intégrerons cet arbre de décision dans le système de localisation.

En conséquence, l'algorithme global permettra à la fois de surveiller le comportement et la localisation. Afin d'assurer le fonctionnement à basse énergie de l'arbre de décision, nous utiliserons deux approches. La première est une approche temporelle, cette approche permet la classification des données. La seconde approche est dirigée par une approche événementielle qui permet la transmission de données. Dans l'approche temporelle, le capteur sera activé sur la base de deux types de signaux d'horloge. Toutes les secondes, les capteurs s'allumeront pour collecter les données (fréquence 1 Hz). Toutes les 10 secondes, le classement se fera à l'aide de l'arbre de décision. Le rôle de l'arbre de décision est de classer l'activité que fait la vache à chaque seconde. Afin d'économiser de l'énergie, nous réduisons la quantité de données à communiquer. Le capteur ne transmet que quatre octets pour quantifier les mouvements de la tête de la vache. Le premier octet contient le nombre de secondes pendant lesquelles la vache a été nourrie. Le deuxième octet contient le nombre de secondes pour la position debout. Le troisième octet indique le nombre de transitions entre les positions debout et d'alimentation et le dernier octet identifie la vache laitière. Dans l'approche événementielle, le récapitulatif contenant les quatre octets est transmis juste après la localisation de la vache à côté du premier terminal situé à la sortie du chargeur.

IV.3.3 Tests Expérimentaux sur le terrain

Dans cette partie, nous décrivons les expériences de terrain que nous avons effectuées à la ferme laitière SOFLAIT, située dans la région de Draa Ben Khedda, Tizi-Ouzou. Le but de ces expériences sur le terrain est de collecter des ensembles de données réelles avec des exigences nécessaires pour concevoir, développer et évaluer notre architecture. Ces expériences comprennent les parties quantitatives et qualitatives.

IV.3.4 Expérience Quantitative

Les expériences quantitatives comprenaient le mouvement du bétail et la surveillance du comportement afin de recueillir les contraintes environnementales réalistes. La période expérimentale à la ferme a duré 3

jours. Les propriétaires de la ferme bovine pouvaient suivre chaque étape des essais sur le terrain, en étant capables de comprendre la procédure. Les résultats recueillis sur la ferme bovine ont permis de déterminer les modèles de comportement, c'est-à-dire qu'il était possible de déterminer l'ordre dans lequel les vaches arrivaient à la salle de traite.

Dans la première expérience sur le terrain, nous avons surveillé deux des vaches situées dans l'une des divisions d'une laiterie moderne destinée à environ 100 animaux. Les vaches pouvaient se déplacer librement dans la zone d'intérêt comme la mangeoire, le réservoir d'eau, les aires de repos et la machine à traire disponibles 24 heures sur 24. Nous avons monté sur les vaches à surveiller notre étiquette RFID. Les lecteurs reçoivent donc les données concernant les identifiants d'étiquette et les coordonnées stockées ainsi que la position.

Les mesures sont automatiquement recueillies chaque fois qu'une vache passait près d'un lecteur.

La collecte des données a commencé à 10h00. Les deux récepteurs Bluetooth ont fonctionné jusqu'à la fin de l'opération, mais lorsque nous les avons éteints, certaines des mesures recueillies ont montré que les vaches se déplaçaient à des vitesses impossibles pour elles, ce qui donne des erreurs de lecture Bluetooth. Parallèlement, nous filmions la partie de la laiterie où étaient gardées les vaches surveillées. Nous avons placé la caméra sur la rampe au-dessus de cette zone. Cet emplacement offrait la vue la plus complète mais certaines parties de la zone étaient obscurcies. Les récepteurs GPS sont utilisés mais uniquement aux fins de nos expériences sur le terrain, leur utilisation n'est pas destinée au système de surveillance de la cible.

Nous avons répété l'expérience précédente avec cinq autres vaches sur et deux caméras situées à deux rampes différentes pour obtenir une vue plus complète de la zone où les vaches surveillées étaient gardées. Nous avons des récepteurs GPS avec de meilleures batteries qu'auparavant et nous enregistrions des données sur la précision des emplacements. La surveillance a commencé à 11 h 10. Les tags ont été supprimés à 17h00. Les récepteurs GPS ont fonctionné jusqu'à 17h24. Nous avons reçu le plan de la laiterie puis capturé les coordonnées des emplacements caractéristiques sur le plan à l'aide d'un récepteur GPS portable, les coordonnées de chaque lecteur RFID sont stockées dans l'unité centrale Raspberry PI, de sorte que l'algorithme les utilise dans le cadre du calcul des variables nécessaires pour que l'algorithme fonctionne. Les coordonnées sont utilisées comme références.

IV.3.5 Expérience qualitative

L'objectif des expériences qualitatives était de rassembler les besoins réalistes des utilisateurs. Ils ont consisté à distribuer un questionnaire anonyme au personnel de la ferme et aux chercheurs travaillant à la ferme. Nous avons reçu quatre questionnaires remplis, par un berger ordinaire, un par le chef de troupeau (directeur de la ferme) et deux par des chercheurs travaillant à la ferme.

À partir du questionnaire réalisé, nous avons appris que la fonctionnalité la plus requise du système est la détection de la grossesse et des maladies animales ou de toute anomalie. Les utilisateurs doivent être informés le plus rapidement possible d'une maladie nouvellement détectée. La grossesse doit être signalée dans les 48 heures suivant la détection. La détection d'une efficacité réduite des pâturages est moins essentielle et moins urgente - elle doit être signalée aux utilisateurs dans les 24 heures suivant la détection. Afin d'informer les utilisateurs sur les maladies animales détectées le plus rapidement possible, les nœuds montés sur les animaux devraient être en mesure de détecter eux-mêmes les maladies animales et d'envoyer ces informations par le lecteur dès qu'elles sont détectées.

Lorsqu'aucun événement particulier n'est détecté, les données des capteurs d'étiquettes doivent être transmises via le réseau au moins toutes les 24 heures pour permettre au serveur son agrégation et la détection des performances réduites des pâturages. Les utilisateurs reconnaissent que l'envoi de notifications sur leurs téléphones portables est très utile et doivent les recevoir à tout moment, pas seulement lorsqu'ils sont localisés avec les animaux. Cela nécessite l'envoi des notifications via le réseau. Les utilisateurs doivent effectuer des requêtes in situ plusieurs fois par jour. Cela signifie que les économies d'énergie sont importantes non seulement pour l'envoi de données aux lecteurs, mais également pour les requêtes.

IV.3.6 Déploiement des dispositifs montés sur les animaux

Les appareils montés sur des animaux proposés dans notre projet comprennent un capteur d'étiquette monté sur la tête et un collier. Les deux sont des systèmes embarqués sur mesure. L'étiquette comprend une batterie, un microcontrôleur efficace énergétiquement, le STM32F103 de STMicroelectronics et un capteur inertiel MPU-6050 pour gyroscope et accéléromètre et GY_271 comme magnétomètre et la partie RFID. Le lecteur, quant à lui, est composé d'une puce de lecteur RFID de 134 kHz, d'un microcontrôleur STM32F103, d'un étage de puissance HF 2W et de l'antenne, et d'une interface sans fil servant à communiquer avec l'unité de traitement locale. Cela peut être effectué en 802.11 (les microcontrôleurs avec des interfaces 802.11b / g sont disponibles soit en Bluetooth ou bien Xbee) ou 802.15.4 (pour les appareils de communication basés sur WIFI). Il peut être possible d'utiliser une interface sans fil pour ces deux objectifs. Des dispositifs (appareils attachés aux animaux sont déployés lors de l'installation du système. Les données de configuration entrées minimales comprennent l'association entre l'identifiant de l'étiquette associée à l'animal et les adresses matérielles des dispositifs montés sur l'animal, comme une étiquette montée sur la tête ou le cou avec un identifiant unique. Les données facultatives incluent les surnoms personnalisés d'un animal ou même ses photos.

L'identifiant d'entreprise est important pour empêcher les étiquettes montées sur les animaux de signaler les mesures au système d'une entreprise agricole voisine. Le sexe de l'animal est nécessaire car il n'a aucun

sens de détecter l'œstrus pour les taureaux et les bouvillons. Ces paramètres peuvent être saisis dans le système lors de l'installation des appareils montés sur les animaux à partir d'un appareil portatif, d'un terminal de ferme ou même via Internet. Dans les deux derniers cas, les données nécessaires sont transmises du serveur de la ferme à l'appareil monté sur animal via un évier. Il est possible qu'un appareil monté sur un animal soit détruit ou volé. Dans ce cas, le dispositif peut être remplacé par un nouveau et le système n'a qu'à être informé de l'association entre l'adresse matérielle du nouveau dispositif et l'identifiant de la marque auriculaire de l'animal. Les données essentielles requises par le dispositif monté sur animal pour détecter les œstrus ou les maladies animales peuvent être téléchargées automatiquement à partir du serveur. De cette façon, la durée affectée au travail de la maintenance est diminuée.

IV.3.7 Déploiement des lecteurs RFID

Les lecteurs sont des systèmes embarqués personnalisés comprenant un microcontrôleur, une source d'alimentation, une interface sans fil pour communiquer avec des étiquettes de capteur montées sur des animaux et une autre interface de réseau pour communiquer avec les serveurs de la ferme. Il est possible qu'une interface réponde aux deux objectifs. Les lecteurs peuvent être statiques ou mobiles. Les lecteurs mobiles doivent être alimentés par batterie et nécessitent un changement manuel des batteries, ce qui demande beaucoup de travail. Cependant, ils peuvent être pratiques lorsque les animaux sont fréquemment déplacés entre les pâturages. De cette manière, le besoin d'infrastructure fixe ou de déplacement des lecteurs statiques est évité. Les lecteurs statiques peuvent être alimentés par le secteur ou par des cellules solaires, ce qui limite l'intensité du travail de leur maintenance. Les lecteurs statiques peuvent être permanents ou temporaires. Les temporaires ne sont déployées que lorsque le pâturage ou la grange sont en cours d'utilisation, puis déplacées vers un autre pâturage. Les lecteurs temporaires sont bénéfiques pour les pâturages qui sont utilisés temporairement. Ils permettent d'éviter le vol ainsi que la déchirure et l'usure des lecteurs lorsqu'un pâturage n'est pas utilisé.

Ils peuvent également permettre de réduire les coûts en diminuant le nombre d'appareils car ils ne sont nécessaires que sur le sous-ensemble de pâturages actuellement en usage. Les lecteurs permanents sont préférables pour les granges ou les pâturages qui sont constamment utilisés. Le déploiement d'un évier permanent ou temporaire nécessite la saisie dans le système d'une association entre l'adresse matérielle et le pâturage ou la grange où il se trouve. De même que pour les appareils montés sur des animaux, ces informations peuvent être saisies à partir d'un appareil portable, d'un terminal de ferme ou sur Internet. Cette association permet d'évaluer l'efficacité d'un pâturage et d'identifier un pâturage ou une grange où se trouve un animal donné. Dans le cas des évier statiques, ils doivent être déployés de manière optimale dans un endroit offrant la meilleure couverture ou fréquemment visité par tous les animaux. Un endroit avec la meilleure couverture serait le milieu d'une zone occupée par les animaux - par ex. au milieu d'un pâturage ou au milieu d'une partie d'une grange où

sont gardés les animaux. Les lieux les plus fréquemment visités par les animaux sont les réservoirs d'eau et les mangeoires. Il est préférable d'installer les évier à des endroits offrant une couverture moins bonne mais plus sûrs. Ils peuvent être par exemple installés à l'extérieur de la clôture entourant la zone disponible pour les animaux. Il est possible de déployer plus d'un évier par une seule grange ou pâturage. Le nombre plus élevé de puits augmente les coûts de déploiement mais réduit les délais de livraison des données des nœuds montés sur les animaux aux serveurs de la ferme. Il est particulièrement avantageux dans le cas de plus gros. Le nombre plus élevé de puits par pâturage augmente également la fiabilité en fournissant une redondance utile lorsqu'un sous-ensemble des puits déployés est endommagé. Dans ce cas, un évier endommagé doit cesser d'accepter les données des nœuds montés sur des animaux pour permettre à d'autres évier de prendre en charge cette tâche.

IV.3.8 Communication sans fil locale via la liaison Bluetooth

La communication sans fil locale offre une installation facile et bon marché sans avoir besoin de techniciens qualifiés. La probabilité d'une défaillance persistante telle qu'un dommage matériel est faible. Cependant, le matériel est généralement plus cher que dans le cas d'un réseau filaire. Le défi majeur est la portée relativement courte. En particulier, le matériel standard IEEE 802.11b / g offre généralement une portée d'environ 100 m dans un espace ouvert. Cela peut être insuffisant dans les conditions agricoles, mais peut être exploité à l'aide de répéteurs. Les interférences entre différents systèmes utilisant la même technologie sans fil peuvent également être un problème. Par conséquent, la communication sans fil locale est optimale pour les évier montés à l'intérieur ou dans les pâturages situés à une distance limitée des bâtiments de la ferme. Il est particulièrement intéressant lorsque les domaines agricoles occupent une surface compacte limitée.

IV.3.9 Problèmes liés à la calculabilité

Tous les calculs embarqués ont été effectués sur la Raspberry -PI. La Fig.IV.7 montre le temps de calcul en fonction de la taille du modèle pour un cycle du traçage. Le temps de cycle comprend toutes les étapes de la localisation effectuées par l'algorithme de Dead reckoning en plus de filtrage particulière qui est relativement gourmand en ressources de calcul ainsi que tous les calculs effectués durant la phase d'acquisitions et jusqu'à la déduction de l'ensemble des positions antérieurs au passage à proximité du lecteur RFID. Tous ces calculs intensifs se traduit par une latence de traitement et de allant jusqu'à 5s ,ce qui n'est pas mauvais vue que le traitement soit effectué par des unité qui sont relativement de faible ressources telle que la Raspberry -PI ,en effet son usage est justifié par la multitude de celles-ci nécessaire au déploiement à travers toutes une ferme ou un ensemble de fermes adjacentes et qui sont reliés toutes par un réseau Bluetooth et WIFI d'où la nécessite de multiplier le nombre d'unités de

traitement ,et ce qui justifier en conséquent dans ce contexte l'usage des systèmes à faible cout.

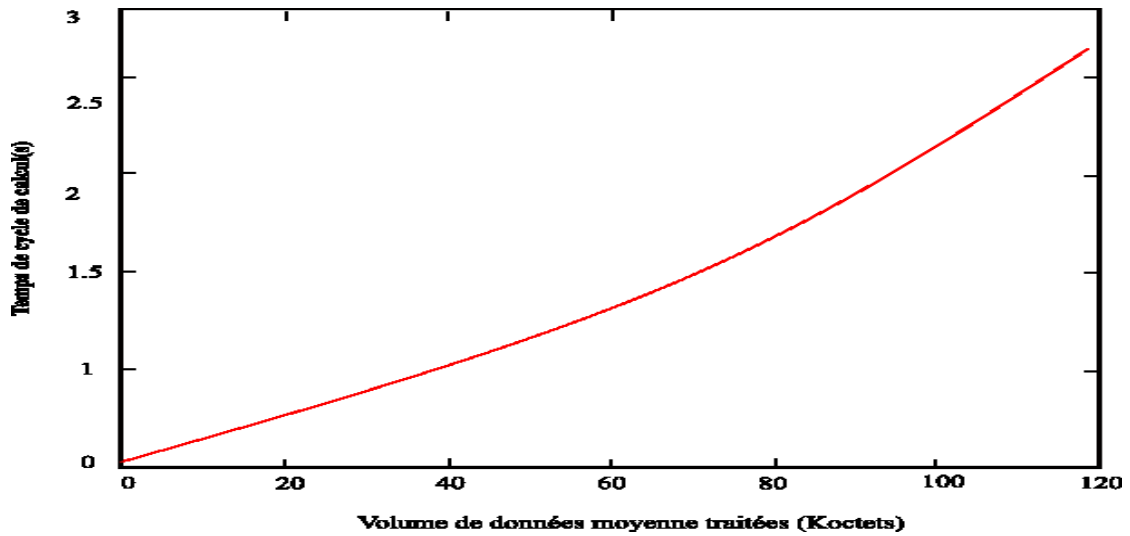


Fig.IV.7 Temps de calcul effectué par la carte basée autours de la carte Raspberry -PI en fonction de volume de données mesuré pendant un temps T.

IV.3.10 Considérations liées à la sécurité

Les considérations de sécurité sont en dehors de l'objectif principal de cette thèse, mais dans cette section, nous présentons un bref aperçu des problèmes de sécurité liés aux systèmes de surveillance du bétail cible afin d'envisager d'éventuels problèmes de sécurité et de proposer un modèle de sécurité rentable pour le système cible. Les principales attaques envisagées contre le système cible sont :

- 1) Accès illégitime aux données collectées ou traitées par le système,
- 2) Usurpation des données collectées et traitées par le système.

Les cibles possibles d'une attaque comprennent :

- Envoi des données des l'étiquettes montées sur les animaux aux serveurs de la ferme,
- Envoi de données depuis les serveurs de la ferme vers les nœuds montés sur les animaux,
- Requêtes in- situ,
- Accès aux données stockées sur le serveur de la ferme et envoi de notifications. Dans les sous-sections suivantes, ces cibles sont examinées plus en détail, y compris les menaces potentielles et les précautions. Ces précautions sont résumées dans le Tableau IV.2.

Tab.IV.2 Précautions de sécurité

Type de communication	Précautions possible	Coût de l'augmentation de la sécurité
Envoi de données de l'étiquette de traçage RFID au lecteur	Crypter les données avec une clé publique	Processus d'installation plus complexe
Envoi de données de lecteur RFID au serveur	Crypter les données avec une clé publique	Besoin d'un collier monté sur un animal plus puissant, une installation plus complexe n'est pas possible pour mettre en cache les données envoyées aux serveurs de la ferme pour répondre aux requêtes In-situ
Envoi de données depuis les serveurs de la ferme vers l'étiquette RFID	Signature des données transmises avec une clé publique	Processus d'installation plus complexe
Requêtes In-situ	Signature de requêtes, signature et chiffrement des réponses à l'aide d'une cryptographie à clé publique. infrastructure à clé publique délivrant un certificat utilisateur.	Besoin d'appareils et d'appareils utilisateur attachés sur les animaux plus puissants, processus d'installation plus complexe.
Accéder aux données stockées sur le serveur de la ferme	SLS ou TLS vérifiant les informations d'identification des utilisateurs	Besoin de serveurs plus puissants
Remise des notifications	Signer les notifications envoyées aux appareils mobiles avec une cryptographie à clé publique, vérifier les numéros de téléphone à partir desquels les messages sont envoyés	Logiciels ou applications mobiles plus complexes utilisés à cette fin

IV.4 Résultats expérimentaux

Nos expériences sur le terrain montrent que les vaches réagissent généralement bien aux tags RFID montés sur la tête des animaux. Ceci est très prometteur pour la faisabilité pratique du système de localisation du bétail.

- Déplacement et vitesse de la marche des vaches surveillées

Dans la Fig.IV.8 basée sur les données des lecteurs, nous pouvons voir que vitesse de la marche des vaches surveillées était différente pour détecter les anomalies connues et qui peuvent nous renseigner sur d'éventuelles signes de maladies, par contre suffisamment similaire pour permettre le suivi de la trajectoire de celle-ci moyennant notre dispositif de suivi. Dans la Fig.IV.8 basée sur les capteurs inertiels et l'algorithme de données à l'estimation de la position basé sur la méthode de Dead reckoning uniquement, nous pouvons voir que dans le même temps, la vitesse de marche générale reste semblable d'une vache à l'autre, ce qui peut être utilisé dans l'algorithme comme prévu. Par ailleurs la figure montre qu'ils se déplacent rarement plus vite que 1m /s. On voit que les vitesses de marche préférées ont une distribution qui diverge après un temps T qui dépend de plusieurs paramètres vus dans les équations dans la partie théorique).

Les données du traçage présentées à la Fig.IV.8 montrent que les vaches sont actives toute la journée et toute la nuit, y compris la marche et la traite. Leur activité de marche a tendance à être moins intensive en deux périodes : 00:06 et 15:18.

Les séquences vidéo et l'analyse des données GPS ne montrent aucun autre modèle de comportement prévisible utile pour la conception de l'algorithme de gestion du comportement. La traite par exemple peut se produire à n'importe quelle période du jour et de la nuit et certains animaux ne montrent pas de préférence constante ou fréquence. Les expériences quantitatives ont été réalisées dans la laiterie mais ce n'est qu'un exemple de scénario de déploiement de notre système. Le système de surveillance cible est également destiné à surveiller les vaches litières déplacées en permanence sur les pâturages, même toute l'année. Ce bétail est une mine d'or pour nous, vu qu'il a permis de tester efficacement notre algorithme de localisation dans le cas de suivi à l'extérieur. Pour mener à bien cette expérience, un récepteur GPS a été intégré à notre tag sensor afin de pouvoir comparer ultérieurement les données issues des deux dispositifs mais aussi de nous permettre de vérifier l'efficacité de notre système d'estimation de la trajectoire et de voir l'effet et l'apport des deux filtres à particules à savoir de monte Carlo et SIR.

IV.5 Discussion

Diverses techniques et suggestions ont été proposées pour la localisation d'animaux. Il est évident qu'une comparaison des différentes

techniques était difficile en raison du manque de normes et de procédures d'essai communément acceptées.

Nous avons développé notre propre environnement expérimental en utilisant 3 tags sensors (étiquettes RFID équipées de capteurs inertiels) 5 lecteurs RFID disposés dans divers endroits courants dans une ferme à savoir une mangeoire, Abreuvoir de vaches, et sur des portes d'entrées sorties des vaches. Etc... Une analyse des apports des deux filtres MCL/SIR a été réalisée dans trois cas différents, à savoir l'erreur sur la position, sur l'orientation, ainsi que l'effet du nombre de particule sur l'incertitude de mouvement et du bruit de mesure. L'enquête sur l'analyse MCL était basée sur les éléments suivants :

- 1) tracer la trajectoire de la position estimée par rapport à la véritable trajectoire de la vache,

- 2) calculer et tracer l'erreur de distance et l'orientation (erreur entre la position réelle de la vache et la position estimée).

- 3) évaluation de la moyenne de l'erreur de distance et de l'erreur d'orientation. Cette expérience évalue la précision et la robustesse de notre méthode de détection et de reconnaissance de comportement.

Nous proposons d'utiliser le cadre de filtre à particules pour le système de fusion de capteurs sur MEMS-IMU. Les filtres à particules MCL ET SIR sont des méthodes de filtres basées sur une représentation de masse ponctuelle (ou «particule») des densités de probabilité, qui peuvent être appliquées à n'importe quel modèle d'espace d'états et qui généralisent les méthodes de filtrage particulières. Nous avons testé notre algorithme pour évaluer ses performances et avons comparé les résultats obtenus par le filtre à particules avec ceux donnés par les seuls capteurs inertiels.

Premièrement, les expériences de recherche basées sur la simulation Matlab. Les données originales d'une étude pilotent basée sur les données de sortie d'inertie de l'unité de mesure inertielle et l'emplacement et la vitesse, qui sont utilisées pour la fusion des données de filtrage des particules. Le premier résultat est pris sur une position unidimensionnelle au-dessus de l'analyse des données d'erreur.

Ensuite, et respectivement, on utilise un filtre à particules séquentiel (SIR) et le filtre à particules Monte Carlo (MCL). Une référence spécifique au filtre à particules au cours de la dernière partie expérimentale. Les résultats expérimentaux disponibles sont présentés à la Fig.IV.8. Les résultats des tests initiaux montrent l'importance de l'augmentation de nombre de particule pour réduire les dérives de position et de vitesse au fil du temps.

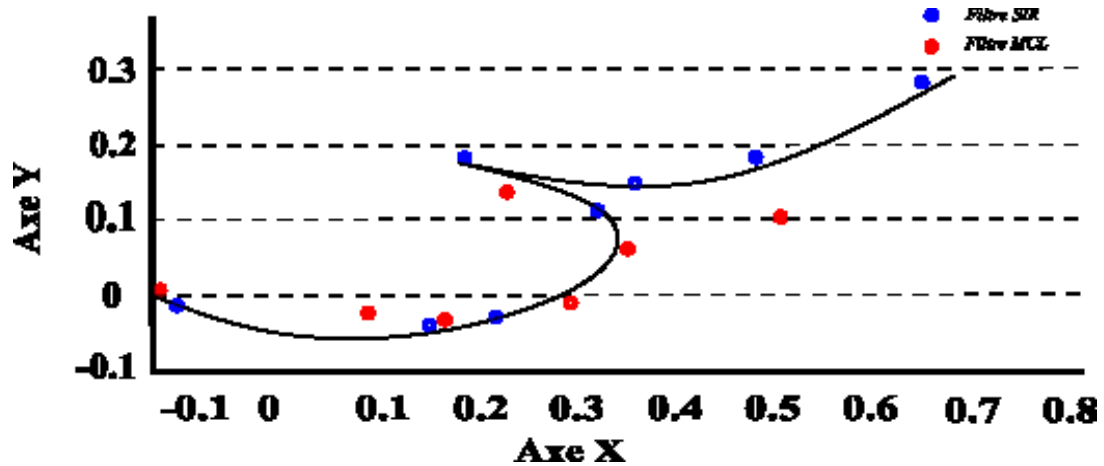


Fig.IV.8 Simulation des erreurs d'orientation avec les deux filtres MCL et SIR

Le suivi des cibles mobiles est réalisé dans des scénarios non linéaires (en fonction des déplacements des vaches), en utilisant les algorithmes discutés en détail dans les sections précédentes. Les tests sont effectués dans à l'intérieur. Les algorithmes sont capables de détecter et de suivre une seule cible. Les objets de suivi dans la simulation étaient un objet et le temps T est varié pour différentes valeurs et les deux cas d'erreur sont évalués et les résultats sont obtenus.

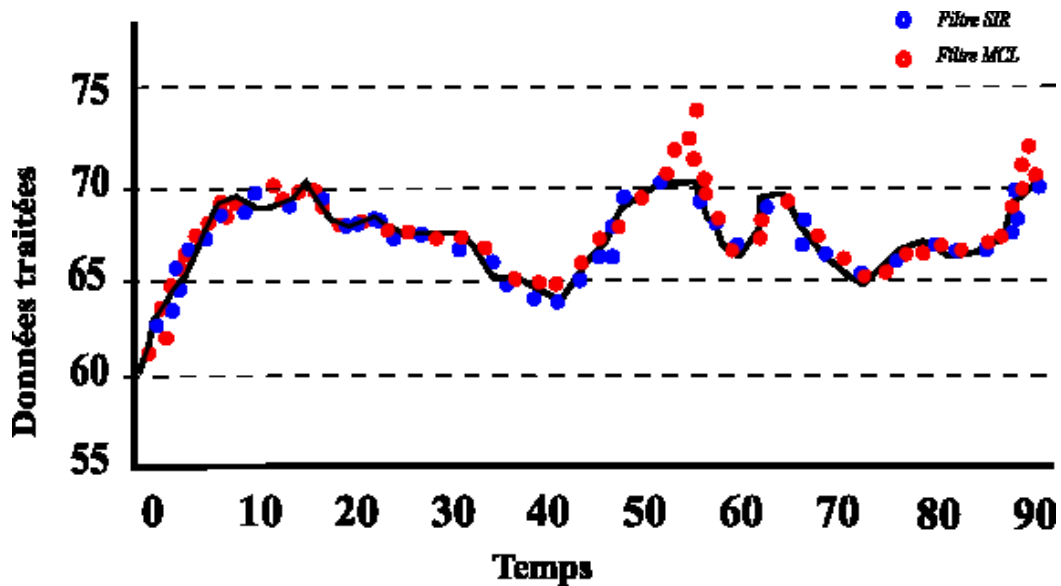


Fig.IV.9 Résultat de fusion des deux filtres particuliers MCL et SIR en termes d'erreur sur la position.

Fig.IV.9 montre la trajectoire idéale continue des mouvements d'une vache (trajectoire en noir). Cette piste peut être réalisée si l'échantillon de temps ΔT s'approche de zéro. Lorsque la forme de la piste s'approche de la forme idéale. Les points rouges représentent la méthode approchée par le filtre MCL (Monte Carlo), tandis que les points bleus représentent le filtre SIR (séquentiel). Les points bleus coïncident sur la piste réelle du mobile comme le montrent les fig.VI.9 et fig.VI.10. Cela signifie que les deux méthodes donnent des résultats presque identiques. Si une comparaison se produit

entre la trajectoire réelle et les méthodes d'approximation citée, on peut voir que les deux méthodes ont un temps d'exécution proche. Bien que la méthode MCL soit plus rapide que la méthode au filtrage SIR, mais cela ne dépasse pas 20% de la vitesse de la méthode MCL. C'est parce que cette dernière méthode a moins de coefficients que la première. Cependant, dans tous les cas, l'erreur diminue lorsque T devient de plus en plus petit. Mais le temps de calcul doit être au plus de 10% de T afin de laisser le temps restant pour les autres processus de déplacement des vaches. Les méthodes de filtrage ont été utilisées pour simuler des vaches se déplaçant dans la cour de la ferme. La simulation a d'abord été réalisée sur Matlab. L'ensemble de l'opération est destiné à effectuer la moindre erreur possible sur les paramètres de filtrage lors du calcul du réel. Toutes les vaches se dirigent ensuite vers cet emplacement jusqu'à ce qu'elles se rassemblent autour de la cible.

➤ *Effet du nombre de particules*

Le nombre de particules est choisi assez grand pour obtenir un bon comportement transitoire en phase de démarrage et pour augmenter la robustesse. Cependant, il a été conclu que dans le mode de fonctionnement normal, le nombre de particules peut être considérablement réduit (typiquement un facteur de dix). Une implémentation en temps réel doit être conçue pour le pire des cas. Cependant, adapter le temps d'échantillonnage T et le nombre de particules N est une option. L'idée est d'utiliser un intervalle d'échantillonnage plus long et plus de particules au départ, et lorsque le Filtre particulaire a convergé vers quelques modes distincts, T et N peuvent être diminués de telle sorte que la complexité $N = T$ soit constante.

Le nombre de particules d'un filtre à particules a toujours été un choix de conception essentiel à la performance globale et à la convergence du filtre. On sait empiriquement qu'un grand nombre de particules signifie généralement une meilleure précision du filtre, et cela est dû à une couverture plus efficace de tout l'espace d'échantillon. Cela est particulièrement vrai lorsqu'il n'y a pas d'informations préalables sur la position du mobile (vache) et qu'une localisation globale est nécessaire. Cependant, lorsque le filtre ne fait que suivre le mobile, comme dans le cas considéré ici, le nombre de particules nécessaires diminue considérablement. En utilisant un nombre ne dépassant pas les 250 d'échantillons permettent de suivre un objet mobile d'une manière satisfaisante Fig.IV.10.

Dans nos simulations, nous avons augmenté le nombre de particules de 100 à 1000 et comparé les erreurs de position à la position réelle.

La borne supérieure du nombre de particules, 1000, correspond au nombre maximum de particules pouvant être traitées entre l'arrivée de 2 mesures, que nous avons considéré comme intervenant toutes les 3 secondes. La borne inférieure, en revanche, correspond au nombre minimum de particules nécessaires pour avoir une convergence cohérente du filtre vers la position réelle. Dans la Fig.IV.10, les trajectoires pour plusieurs simulations d'un filtre SIR sont représentées, où seul le nombre de

particules était varié. Il est clair que le filtre fournit de meilleures estimations de position que les solutions traditionnelles basées sur les seuls mesurent de capteurs inertiels.

Cependant, le filtre est incapable de suivre de près la position réelle de la vache. Les résultats obtenus en termes de RMS de distance à la vraie trajectoire sont représentés sur la Fig.IV.11. Comme prévu, le suivi plus précis de la vraie position se produit lorsque le filtre utilise un plus grand nombre de particules. Cependant, distance RMS moyenne à la vraie trajectoire, il est possible de vérifier que l'augmentation du nombre de particules n'est pas forcément réfléchi sur les performances du filtre.

En comparant le RMS moyen de la position d'erreur entre le filtre utilisant 250 particules et le filtre utilisant 1000 particules, les résultats sont assez similaires. Considérant qu'en choisissant 500 particules, nous économisons la moitié de la puissance de traitement, nous considérons que c'est la meilleure option. Dans cette situation spécifique, échanger la puissance de traitement contre un plus grand nombre de particules n'est pas un compromis particulièrement efficace, car l'augmentation de la précision ne porte pas de résultats plus sensibles. Par conséquent, et pour les simulations ultérieures, nous avons fixé le nombre de particules à 250.

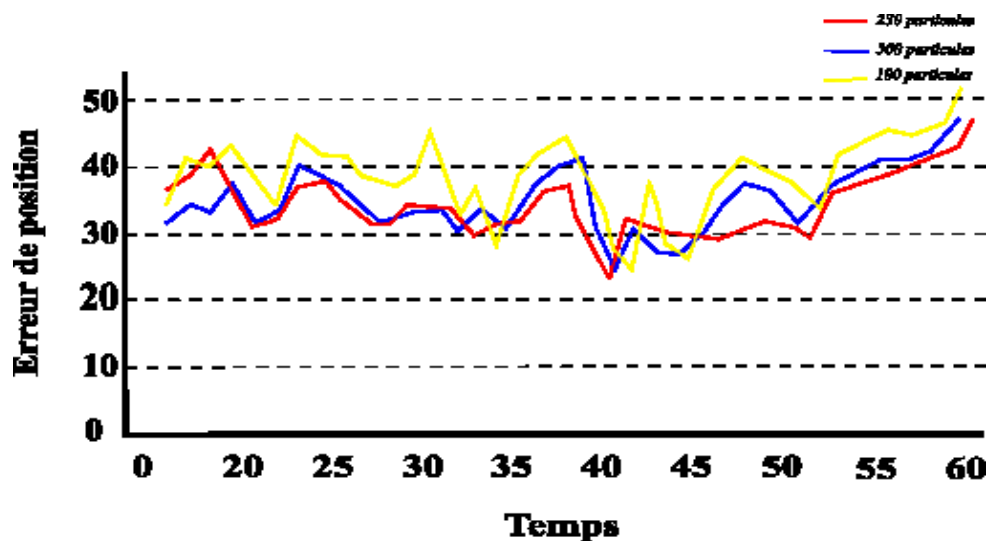


Fig.IV.10 Trajectoires simulées avec différents nombres de particules. Le filtre améliore clairement les estimations de position même lorsque le nombre de particules est petit.

Nos simulations ont confirmé que le niveau de bruit de processus doit être faible pour que le suivi soit réussi. Ceci est particulièrement important si le bruit qui corrompt les lectures du tag sensor est important. Au cours de nos simulations, nous nous sommes rendu compte que le filtre pouvait suivre avec succès la position d'une vache si les perturbations présentes étaient faibles. Cependant, lorsqu'on perturbe les lecteurs avec une marche aléatoire comme du bruit, le bruit du processus doit être à des niveaux plus élevés.

Cependant, des niveaux élevés de bruit de processus provoquent une diffusion étendue du nuage de particules propagées, ce qui peut avoir des résultats négatifs; si les particules se répandent sur une zone trop large dans l'espace, alors il y en aura trop de particules, il faut donc veiller à éviter cette situation. Peut-être pour cette raison, lorsque le bruit de processus est élevé, la trajectoire estimée a tendance à être beaucoup moins lisse car la position estimée a tendance à rebondir autour de la position réelle.

En comparant une navigation traditionnelle basée sur les seuls détecteurs inertiels ou INS avec une approche de filtre à particules, on peut conclure que cette dernière produit des résultats beaucoup plus précis en termes de suivi d'une position des vaches à des distances n'accédant pas 1m (Distance tag/lecteur RFID). L'erreur de position finale calculée avec les méthodes d'intégration INS traditionnelles était d'environ 6m après 85min de marche, et lors avec l'utilisation d'un filtre à particules, cette erreur diminuait à près de 2.6 mètres. À ce stade, un examen plus approfondi des variables estimées concernant l'attitude de la vache, à savoir le roulis, le tangage et le lacet est nécessaire.

Bien que nous soyons satisfaits des variables d'état estimées concernant les mouvements de roulis et de tangage, il n'en va pas de même avec l'estimation de cap, et cela se produit très probablement parce que le lacet est plus sujet au bruit que les deux autres. Cette incapacité à suivre avec précision le cap s'est produite tout au long des simulations, même si un bruit de processus plus élevé semble améliorer les résultats. Si l'on ne s'intéresse qu'aux corrections de position des niveaux élevés de bruit de processus sont souhaitables, mais si le bruit de processus est trop élevé, cela peut provoquer une sorte de dégénérescence. Pour résoudre ce problème, nous avons appliqué un filtre à particules. L'idée sous-jacente était de pouvoir réduire le bruit du processus tout en conservant une performance de suivi satisfaisante. Nous avons également voulu vérifier si la stratégie de ré-échantillonnage du RPF pouvait contribuer à améliorer la précision de suivi du cap du mobile.

Malgré la popularité de ce type de filtre à particules, les seules améliorations des simulations que nous avons effectuées n'ont été obtenues que lorsque le nombre de particules était petit, mais nous n'avons pas été en mesure de déterminer si cela était causé par la nature intrinsèquement stochastique du processus, ou par le facteur de régularisation introduit. Lorsque l'augmentation du nombre de particules à un nombre permet un suivi précis de la position (autours de 220 particules), les avantages de l'utilisation d'un tel filtre étaient négligeables aux premières expériences.

Ceci est vraisemblablement causé par les niveaux de bruit présents dans le système et doit être élevé comme indiqué précédemment. L'augmentation du nombre de particules améliore les performances globales du filtre, mais seulement jusqu'à un certain point. Nos simulations suggèrent qu'il n'y a aucun intérêt à avoir un très grand ensemble de particules, car cela ne se traduit pas par de meilleures estimations. Il y a un compromis entre la puissance de traitement disponible et la taille de l'ensemble de particules et, dans les conditions de notre étude, nous avons constaté que l'augmentation du nombre de particules au-dessus de 250 n'améliore pas les résultats obtenus. Le bruit de mesure était l'un des

paramètres à l'étude, mais dans ce cas, nous n'avons pas pu observer d'amélioration significative même en le faisant varier sur une large plage de valeurs.

Les expériences ont démontré la faisabilité et la fiabilité du système dans diverses situations. Sinon, nous avons implémenté un filtre à particules SIR pour fusionner les données de référence issues des capteurs inertiels ainsi, pour estimer les poses de l'objet. Nous avons utilisé l'analyse RMSE pour décrire les performances du filtre. Les résultats ont été très satisfaisants par rapport à ceux des techniques classiques de calcul de la position ; ils ont montré que la méthode de fusion utilisant le filtre à particules permet d'obtenir une précision de suivi, une stabilité et une robustesse élevées. Il est possible d'appliquer plus de tris distributions au Filtre et il y a plus d'états d'erreur à étudier dans des situations réelles. Par conséquent, les relations entre le nombre de distributions et les performances des filtres seront étudiés dans les travaux futurs.

Tab.IV.3 RMSE entre le SIR et le filtre de Monte Carlo (MCL)

	FP classique	FP Monte Carlo	FP SIR
RMSE	4.3114	0.8770	1.0256

IV.6 Résultats de localisation sur le terrain

Pour démontrer les performances de l'algorithme proposé, le plan d'étage du bâtiment et la trajectoire de la vache et les mesures de position associées ont été présentés. La performance du filtre à particules a été évaluée lorsque la vache se déplaçait le long de la trajectoire indiquée dans Fig.IV.11. Lorsqu'une vache se déplace dans un bâtiment, sa position, son cap et sa vitesse sont calculés par le système d'estimation basé uniquement sur les données des capteurs inertiels. On suppose que la position initiale est connue avec une certaine erreur correspondant à la méthode de Dead reckoning, mais le Monte Carlo PF améliore l'estimation de la position et fournit un positionnement précis pendant de plus longues périodes. La seule source d'informations supplémentaires nécessaires au filtre à particules est le plan d'étage du bâtiment de la ferme et l'ensemble de l'algorithme de calcul est traité au niveau de l'unité centrale basée sur Raspberry PI.

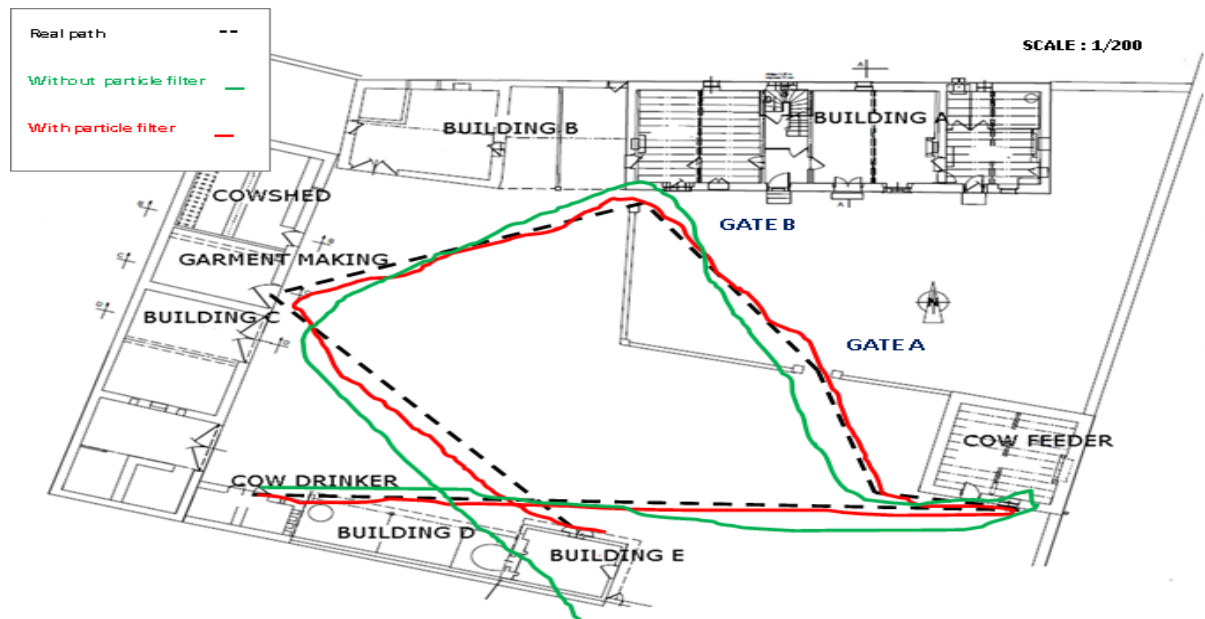


Fig.IV.11 Résultat du déplacement des vaches de l'abreuvoir pour vaches jusqu'à la mangeoire pour vaches jusqu'à la fabrique se terminant au bâtiment E, en stimulant les portes de j et A et B, avec et sans filtre à particules.

La ligne pointillée noire représente la trajectoire réelle. Les lignes pleines représentent la position estimée de la vache avec la méthode de l'estimation de position par dead reckoning. La ligne rouge est réalisée avec l'utilisation du filtre à particules tandis que la ligne verte est dispensée de son utilisation. Le cap initial de la vache est fourni à partir d'un lecteur positionné à la dernière porte que la vache aura franchie, et la trajectoire est mise à jour en fonction des signaux des capteurs mesurés. Le sujet (vache) est dirigé pour marcher le long des lignes de trajectoire réelle et revenir à la position de départ (abreuvoir de vache) après avoir effectué un cercle.

La cartographie fournit deux trajectoires directionnelles distinctes bien que les positions finales soient proches du point de départ.

Dans ce cas, il est possible de déduire la trajectoire correspondant à la position réelle de la vache. Par conséquent, cette étude propose d'intégrer un modèle de filtre à particules avec la méthode de calcul utilisant trois capteurs portables et permettant ainsi au système de localiser précisément le sujet. Le Tableau IV. 4 montre un exemple de calcul de la durée et de la position des vaches dans les zones d'intérêt.

Tab.IV.4 Un exemple de la durée et du comportement des vaches pendant une journée.

Déplacement	Durée	Distance
Abreuvoir de vache	10mn	0m
Mangeoire pour vaches	30mn	18m
Porte A	2s	8m

Porte B	3s	7m
Fabrique	45mn	11m
Bâtiment E	2h	13m
Total	3h25mn5s	45m

D'après les résultats obtenus du tableau, l'erreur moyenne de localisation moyenne a été déterminée par calcul de l'erreur de localisation moyenne de tous capteurs. En fait, cette erreur de localisation moyenne était respectivement 0,351 m, 0,287 m, 0,334 m, 0,296 m, 0,342 m, 0,326 m, et 0,308 m pour les vaches Id01, Id02, Id03, Id04, Id05, Id06 et Id07. La valeur de la localisation moyenne l'erreur pour toutes les vaches était d'environ 0,32 m.

Ces résultats montrent que le filtre et le modèle employé donnent de bons résultats de localisation pour le cas des vaches. Les paramètres pourraient être encore ajustés afin d'obtenir des résultats plus fluides. Cependant, le compromis pour des résultats plus lisses est une précision dynamique moins bonne. Par exemple, les virages brusques seraient filtrés. Le modèle de bruit pourrait également être développé de telle sorte que le niveau de bruit de mesure soit différent pour les différentes parties de la ferme d'élevage (à l'intérieur est à l'extérieur par exemple) ou bien pour le cas où la vache est couchée ou en train de manger.

L'approche du filtre à particules étudiés ici peut être considérée comme satisfaisante. Cependant, si une estimation précise du cap d'une vache est nécessaire, d'autres méthodes doivent l'être investies.

IV.7 Résultats de la surveillance du comportement alimentaire

IV.7.1 Analyse statistique et probabiliste

L'axe des abscisses de l'accéléromètre avec une fréquence d'échantillonnage de 1 Hz a montré la meilleure capacité à séparer les populations de données des positions debout, comme le montre la Fig.IV.12. Cependant, cet axe n'a pas montré la capacité de faire une séparation entre les positions d'alimentation et de transition (entre la position debout et l'alimentation). Une inspection visuelle de la Fig.IV.12 indique la présence de deux populations clairement distinctes, la première population (moins de -250 unités de gravité) représente la position debout, la seconde population (supérieure à -250) combine la position d'alimentation et de transition. Suite à cette inspection, nous utiliserons la classification de la classe debout comme première étape de l'architecture de l'arbre de décision (Fig.IV.15). Les valeurs de seuils pour la séparation de ces activités sont trouvées en utilisant un mélange fini de deux lois normales.

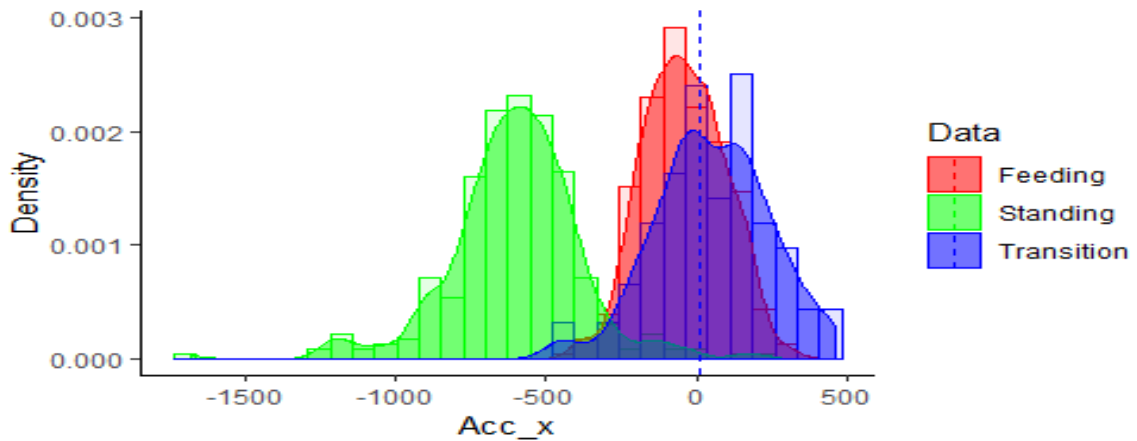


Fig.IV.12 Les trois fonctions de densité des classes de position d'alimentation, de position debout et de transition entre l'alimentation et la position debout en utilisant l'axe des x de l'accéléromètre à une fréquence de 1 Hz.

La séparation des classes d'alimentation et de transition était plus restrictive, le meilleur axe ayant la capacité de faire ce classement est l'axe y de l'accéléromètre. Les valeurs de l'axe y de l'accéléromètre avec une fréquence de 1 Hz montrent une grande partie de la classe de transition des autres classes (debout et en alimentation) comme le montre la Fig.IV.13. Une inspection visuelle de la Fig.IV.13 indique la présence de deux populations clairement distinctes, la première population (moins de 500 unités de gravité) représente les positions debout et d'alimentation.

La deuxième population (supérieure à 500) représente une partie de la population de données de la position de transition.

Suite à cette inspection, nous utiliserons la classification des classes d'alimentation et de transition comme deuxième étape de l'architecture de l'arbre de décision (Fig.IV.15). Les valeurs seuils pour la séparation de ces activités sont trouvées en utilisant un mélange fini de trois lois normales. Les deux premières lois représentent les positions d'alimentation et debout et la dernière loi représente la position de transition.

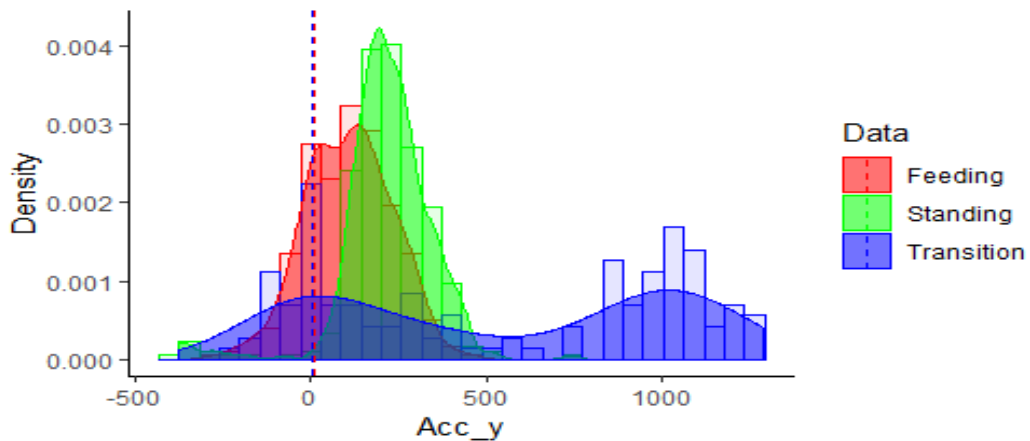


Fig.IV.13 Les trois fonctions de densité des classes d'alimentation, debout et de transition entre la position d'alimentation et la position debout en utilisant l'axe y de l'accéléromètre à une fréquence de 1 Hz.

La Fig.IV.14 montre les fonctions de densité de l'axe z de l'accéléromètre avec une fréquence de 1 Hz. Il est à noter que les populations de données permanentes sont distinctes des populations de données sur l'alimentation et la transition. Le même résultat a été obtenu en visualisant les données de l'axe x de l'accéléromètre (Fig.IV.12).

Cependant, les populations de données de l'axe **X** de l'accéléromètre sont plus éloignées des populations de données de l'axe z de l'accéléromètre. Ce résultat montre qu'il est nécessaire de sélectionner l'axe des x comme axe contenant les données les plus significatives pour la classification des positions debout.

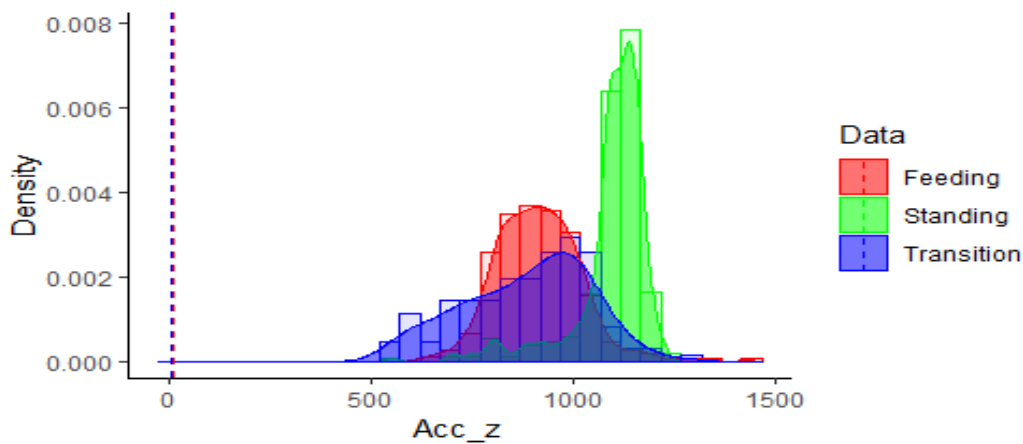


Fig.IV.14 Les trois fonctions de densité des classes d'alimentation, debout et de transition entre la position d'alimentation et la position debout en utilisant l'axe z de l'accéléromètre à une fréquence de 1 Hz.

IV.7.2 Architecture de l'arbre de décision

Les fonctions de densité des classes suivies montrent que les meilleurs axes à utiliser lors de la séparation des populations des données sont les axes X et Y de l'accéléromètre avec une fréquence de 1 Hz.

La classification de la classe debout doit se faire comme première étape de classification dans l'arbre de décision et la classification de la classe manger et transition doit se faire comme deuxième étape. La Fig.IV.15 montre l'architecture de l'arbre de décision.

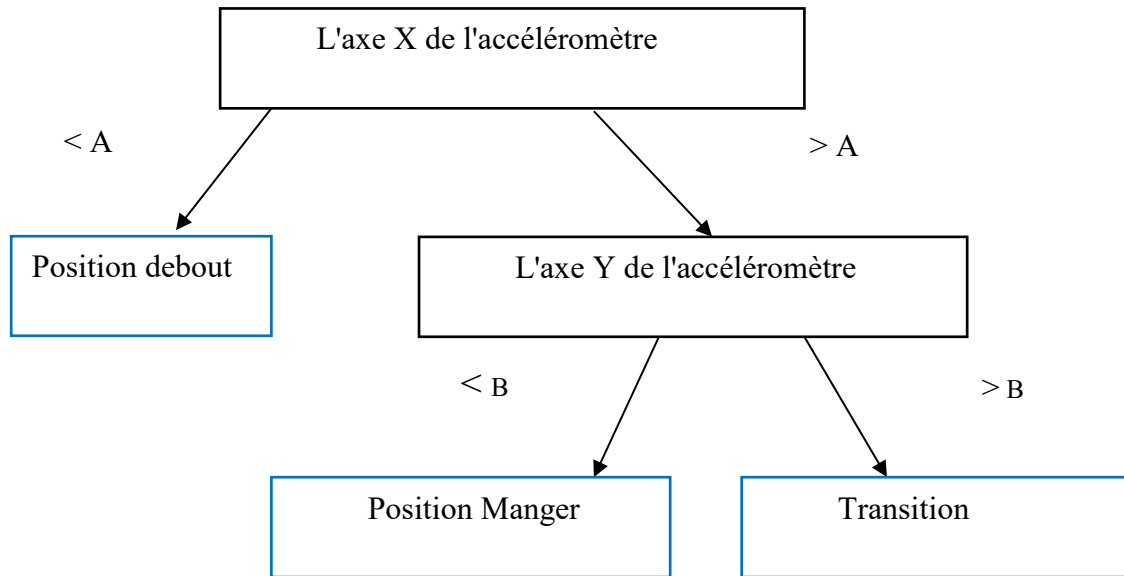


Fig.IV.15 L'algorithme d'architecture des arbres de décision.

IV.7.3 Ajustement du seuil par modèle de mélange uni varié

L'étape précédente nous a permis de créer l'architecture de l'arbre de décision, dans cette étape nous ajusterons les seuils de ces arbres en utilisant les modèles mixtes. L'axe des x a montré la meilleure capacité à séparer la classe «debout» des autres classes. Le modèle de mélange donné sur la Fig.IV.16 est un modèle qui permet la séparation de la classe debout en utilisant deux lois normales.

La population de données de l'axe des x est un mélange de deux sous-populations P1 et P2. P1 représente la position debout et P2 regroupe les positions d'alimentation et de transition. L'intersection entre P1 et P2 permet d'ajuster automatiquement les valeurs de seuil (Fig.VI.13) dans l'arbre de décision.

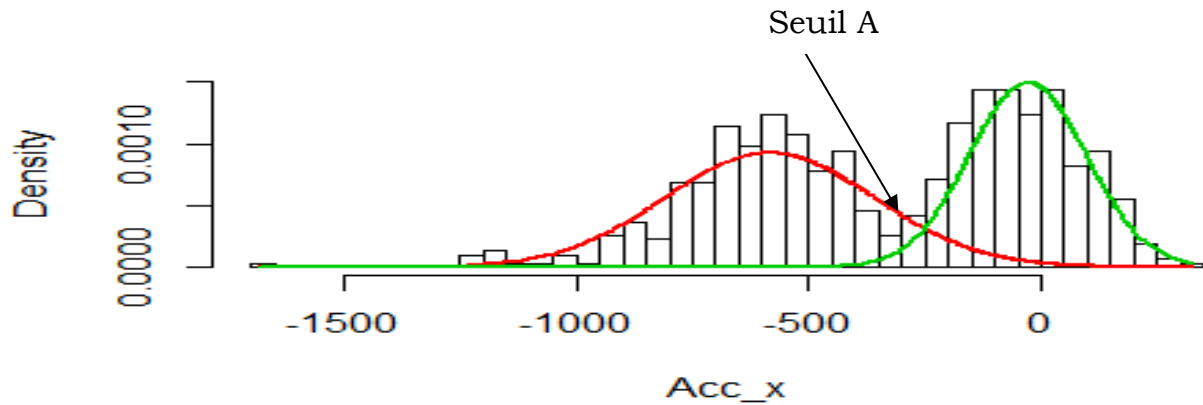


Fig.IV.16 Modèle de mélange de deux lois normales de l'axe des x de l'accéléromètre à la fréquence de 1Hz.

L'axe y a montré la meilleure aptitude à séparer la classe debout des autres classes. Le modèle de mélange donné dans la Fig.IV.17 est un modèle qui permet la séparation de la classe debout à l'aide de trois lois normales.

La population de données de l'axe X est un mélange de trois sous population P1, P2 et P3. P1 et P2 représentent la position mangée et P3 représente la position transition. L'intersection entre P1, P2 et P3 permet d'ajuster automatiquement les valeurs du seuil B dans l'arbre de décision dans la (Fig.IV.15).

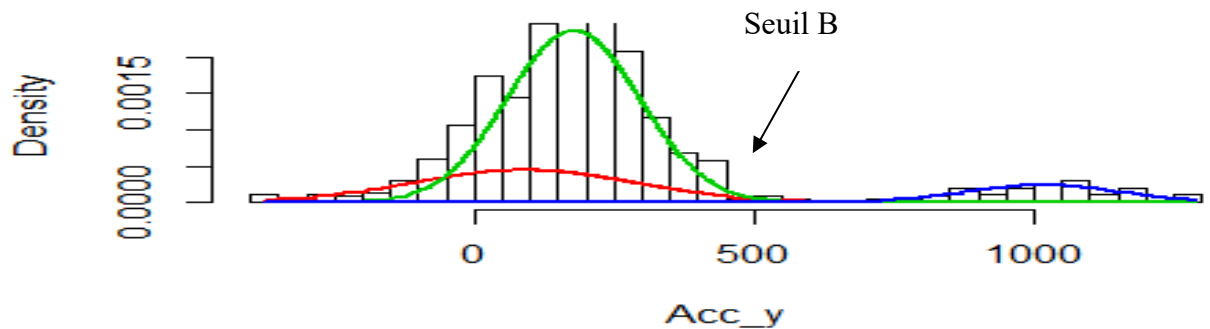


Fig.IV.17 Modèle de mélange de trois lois normales de l'axe y de l'accéléromètre à la fréquence de 1 Hz.

Le Tableau IV.5 de la page suivante montre l'exactitude et l'exactitude de la classification des classes de position debout, d'alimentation et de transition obtenues lors de l'exécution du modèle en utilisant les données des quatre vaches utilisées dans la validation. À noter que la précision et la

classification de la position debout étaient élevées (> 95%) chez toutes les vaches.

Cependant, la position d'alimentation a été très impactée par les transitions et le taux de précision obtenu était compris entre 91,52% et 93,84%. La classification de la classe de transition était précise à 98%, mais sa précision varie entre 82,34% et 86,64%.

Tab.IV.5 Résultats de la classification des classes debout, d'alimentation et de transition.

ID de vache	Debout		Manger		Transition	
	Exactitude	Précision	Exactitude	précision	Exactitude	Précision
4	96.23%	93.25%	92.23%	89.25%	83.52%	98.35%
5	97.52%	94.36%	91.52%	89.06%	86.64%	99.18%
6	95.32%	93.64%	93.49%	91.23%	85.46%	98.64%
7	96.63%	93.26%	93.84%	90.63%	82.34%	98.13%
Moyenne	96.42%	93.62%	92.77%	90.04%	84.49%	98.57

Cependant, la position d'alimentation a été très impactée par les transitions et le taux de précision obtenu se situait entre 91,52% et 93,84%. La classification de la classe de transition était précise à 98 %, mais son exactitude varie entre 82,34 % et 86,64 %.

En effet, le capteur fonctionne en deux modes (réveil et veille). En mode veille, tous les composants sont temporairement mis en mode veille pour préserver leur énergie. En mode de réveil, le capteur effectue les différentes étapes d'acquisition, de calcul et de transmission. En effet, le capteur fonctionne en trois types d'intervalles de tiques. Les deux intervalles, premier et deuxième permettent l'exécution de la méthode de localisation, le troisième permet la classification du comportement d'alimentation. En effet, toutes les secondes (Timer1), le capteur acquiert des données IMU et RFID.

Ensuite toutes les 10s (Timer2), la méthode de localisation est exécutée. Après cela, si la vache se trouve dans la zone d'alimentation, une troisième minuterie est activée, cette minuterie permet exécuter la méthode de classification du comportement d'alimentation des vaches laitières. Une fois que l'algorithme de localisation détecte que la vache quitte la zone d'alimentation, une synthèse qui se compose de l'ID de la vache et de trois index qui spécifient le temps d'alimentation, le temps de repos et le nombre de transitions est transmise.

L'avantage de cette architecture est qu'elle assure un calcul distribué et réduit la transmission des données de comportement d'alimentation. Par conséquent, les données ne sont transmises que lorsque l'événement vache quittant la zone d'alimentation est détecté.

L'organigramme du logiciel de capteur sans fil basé sur une architecture déclenchée dans le temps est illustré à la Fig.IV.18.

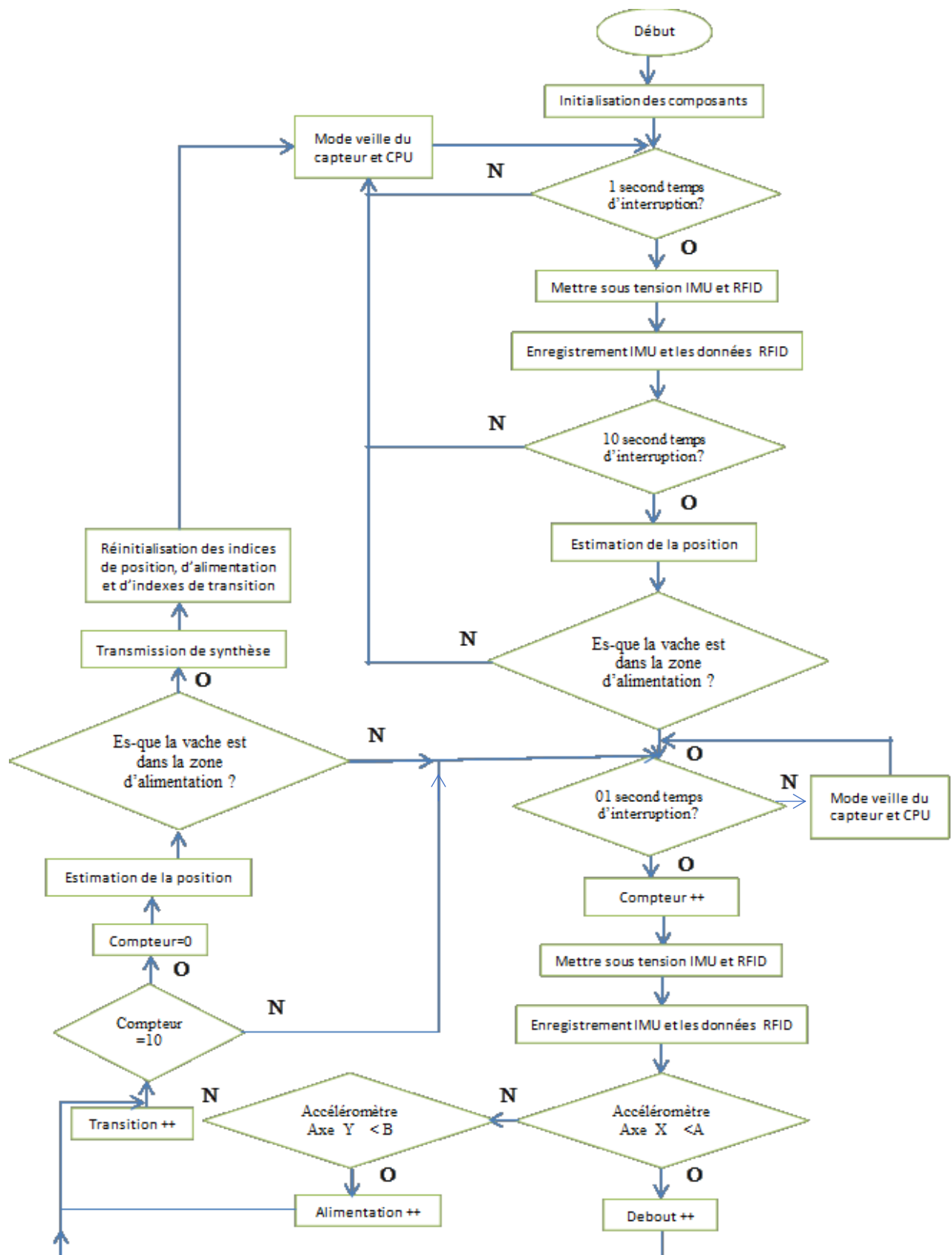


Fig.IV.18 Organigramme du logiciel de capteur sans fil basé sur une architecture déclenchée dans le temps.

IV.8 Comparaison des résultats

Cette section présente une comparaison des performances obtenues pour la localisation et le suivi du comportement alimentaire avec celles obtenues à partir d'autres travaux de recherche,

La première fonctionnalité réalisée par le modèle proposé est la localisation des vaches. Wolfger et al. [168] ont conçu un système de localisation de fréquence et ils ont obtenu une erreur moyenne de 1,22 m. Dans notre travail, nous avons utilisé la même fréquence (LF) comme Wolfger et al. [168]. Cependant, les données de localisation ont été ajustées à l'aide des données d'erreur de localisation faible (0,32 m). Hindermann et al. [169], Porto et al. (2014) [170] et Ren et al. [171] ont utilisé ultra- systèmes à large bande (UWB). De bons résultats de localisation ont été obtenus. Cependant, par rapport au système UWB, l'utilisation de la RFID passive présente plusieurs avantages tels que coût, couverture étendue, forte capacité anti-interférence, et mise en œuvre facile [172].

De plus, Les systèmes de localisation UWB ne sont pas en mesure d'indiquer le temps d'alimentation des vaches, mais seulement si les vaches sont présentes dans la zone d'alimentation [173]. La combinaison des données IMU et RFID permet d'obtenir de meilleurs résultats de localisation tout en permettant la classification du comportement des vaches dans la zone d'alimentation, d'après les résultats de nos travaux et ceux d'autres travaux pour la classification de l'alimentation comportement des vaches laitières. Achour et al. [173] ont utilisé une caméra placée dans la zone d'alimentation pour identifier et surveiller le comportement alimentaire des vaches.

Malgré le taux élevé de surveillance du comportement alimentaire, l'identification des vaches atteint une précision de 97,06% qui est encore inférieure aux performances d'identification du système RFID. Arcidiacono et al. [165], Benaissa et al. [174] ont attaché un accéléromètre au cou des vaches pour classer leurs comportements alimentaires. Les performances obtenues sont légèrement supérieures à celles de notre étude. L'explication en est que par rapport à l'oreille, le cou est un endroit moins impacté par les mouvements de la vache. Cependant, la fixation des capteurs au cou nécessite l'utilisation d'un collier, ce qui est stressant. Aussi, par rapport au cou, l'oreille permet l'intégration de plusieurs capteurs pour mesurer d'autres paramètres tels que la température de l'oreille [175] et la rumination [176].

IV.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons testé les performances de notre système de la surveillance du comportement et la traçabilité des vaches laitières. Les résultats obtenus ont montré que :

- L'algorithme proposé a atteint des taux élevés de classification et de localisation.
- En ce qui concerne la localisation, les résultats ont montré que l'erreur est faible (l'erreur moyenne de localisation était d'environ 0,32 m).
- Les erreurs accumulées sont limitées dans le temps grâce à la mise à jour automatique des anciens états chaque fois que l'animal est proche du lecteur.
- En ce qui concerne la détection du comportement alimentaire. Des taux de précession et d'exactitude élevés ont été obtenus.
- La précision et la classification de la position debout étaient élevées (> 95 %) chez toutes les vaches. Cependant, l'alimentation a été très impactée par les transitions et le taux de précision obtenu était compris entre 91,52% et 93,84%. La classification de la classe de transition était précise à 98%, cependant son exactitude varie entre 82,34% et 86,64%.
- L'utilisation de la méthode veille/réveil permet d'élargir la durée de vie du système.
- Avec une batterie de 850 mAh, la durée de vie du capteur embarqué est d'environ 8 mois.

Conclusion générale et perspectives

La localisation et le suivi des comportements alimentaires des vaches laitières permettent une détection précoce des événements reproductifs et sanitaires. Cependant, les observations manuelles prennent du temps et demandent beaucoup de travail. Pour cela, les systèmes de localisation et de monitoring automatisé prennent de l'ampleur et sont sans cesse déployés dans l'élevage moderne. Les systèmes de localisation permettent d'indiquer la position des vaches à un instant. Cela permet d'extraire plusieurs variables comportementales telles que : la marche, le temps passé dans les différentes zones (repos, traite, ...). Cependant, ces systèmes sont limités par le fait qu'ils n'indiquent pas le comportement réel des vaches mais seulement la zone dans laquelle elles sont présentes. Pour surmonter cette limitation, dans cette thèse nous avons conçu un système de localisation qui peut à la fois localiser les vaches et indiquer leur comportement actuel.

Dans ce travail, nous avons conçu un système RFID passif à faible coût et à consommation d'énergie efficace avec IMU intégré en utilisant un microcontrôleur ARM à faible puissance basée sur ST, un accéléromètre à 3 axes, un gyroscope à 3 axes, un magnétomètre, un stockage non volatil et un mode RFID LF fonctions implémentées dans une petite planche double-face et placées sur le front d'une vache.

Ce travail présente une méthode pour estimer et diriger les positions des animaux en utilisant une méthode de calcul du position basé sur les données collectées à partir des capteurs portables. L'algorithme Monte- Carlo et les filtres à particules SIR sont utilisés pour soustraire les mouvements relatifs de la tête afin de fournir des positions de vache relativement précises. Le processus est rendu hors ligne à l'intérieur du tag sensor avec l'utilisation de la puce ARM MCU à ressources limitées et rentables. De plus, le comportement alimentaire des vaches est étudié dans une deuxième partie où trois classes importantes (alimentation, position debout et transition entre alimentation et position debout) sont séparées avec succès grâce à l'utilisation des arbres de décision comme modèle de classification avec le modèle de mélange uni varié pour la détermination des seuils. La méthode a permis d'atteindre des taux de classification très élevés avec une autonomie énergétique élevée.

L'un des avantages majeurs de notre architecture système est la réduction du nombre d'infrastructures sensorielles avec lesquelles travailler. À des fins de traçabilité, plusieurs tests de validation ont été menés dans des environnements intérieurs et extérieurs combinant un capteur monté sur la tête avec la méthode de fusion de particules et d'estimation de la position de l'animale. Les résultats ont montré que l'erreur est faible jusqu'à 2 m sur 200 m de marche et que les erreurs accumulées sont limitées dans le temps

grâce à la mise à jour automatique des anciens états à chaque fois que l'animal est près du lecteur. Le comportement alimentaire des vaches a été détecté avec une exactitude élevée ($> 95\%$) chez toutes les vaches.

Le comportement et la traçabilité des animaux d'élevage étaient notre priorité. Nous pensons donc que les données collectées sont suffisantes pour qu'un vétérinaire fasse un diagnostic préalable de l'animal, ainsi cela permettra de décider si un diagnostic complet est nécessaire ou non lorsqu'un comportement inhabituel est repéré après les avoir comparés à une base de données dédiée pour cet objectif, qui est continuellement mise à jour à partir des données du capteur sur site et envoyée sur le réseau.

En guise de perspectives, nous envisageons :

- Tester les performances du système sur un plus grand nombre de vaches et dans plusieurs fermes (types d'élevages).
- Améliorer notre algorithme afin de détecter ces différents comportements car plusieurs autres comportements peuvent impacter la tête de la vache tels que les chevauchements, les transitions entre les positions debout et couché.
- Concevoir une plateforme permettant un accès plus facile et une interprétation des données issues du système.
- Concevoir des systèmes prédictifs qui se basent sur les données issues du système pour fournir des alertes liées à la détection de troubles sanitaires ou reproductifs.

Bibliographie

- [1] Smith, P., 2013. Delivering food security without increasing pressure on land. *Global Food Security*, 2(1), pp.18-23..
- [2] Cox, S., 2003. Precision livestock farming. Wageningen: Wageningen Academic Publishers..
- [3] Norton, T. and Berckmans, D., 2017. Developing precision livestock farming tools for precision dairy farming. *Animal Frontiers*, 7(1), pp.18-23..
- [4] Hughes barry. 1976. « behaviour as an index of welfare », proceedings of the 5th european poultry conference, malte, 5-11 septembre 1976, world poultry science association : 1005-1018..
- [5] Lokhorst, C. and Berckmans, D., 2011. Precision livestock farming '11. Prague: Czech Centre for Science and Society..
- [6] Fogsgaard, K., Røntved, C., Sørensen, P. and Herskin, M., 2012. Sickness behavior in dairy cows during *Escherichia coli* mastitis. *Journal of Dairy Science*, 95(2), pp.630-638..
- [7] Fogsgaard, K., Bennedsgaard, T. and Herskin, M., 2015. Behavioral changes in freestall-housed dairy cows with naturally occurring clinical mastitis. *Journal of Dairy Science*, 98(3), pp.1730-1738..
- [8] Thorup, V., Munksgaard, L., Robert, P., Erhard, H., Thomsen, P. and Friggens, N., 2015. Lameness detection via leg-mounted, accelerometers on dairy cows on four commercial farms. *Animal*, 9(10), pp.1704-1712..
- [9] Russel l j.b., hino t., 1985. regulation of lactate production in streptococcus bovis: a spiraling effect that contributes to rumen acidosis. *j. dairy sci.*, 68, 1712-1721..
- [10] Riaboff, L., Poggi, S., Madouasse, A., Couvreur, S., Aubin, S., Bédère, N., Goumand, E., Chauvin, A. and Plantier, G., 2020. Development of a methodological framework for a robust prediction of the main behaviours of dairy cows, using a combination of machine learning algorithms on accelerometer data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 169, p.105179..
- [11] Vazquez-Diosdado, J.A., Paul, V., Ellis, K.A., Coates, D., Loomba, R., Kaler, J., 2019. A combined offline and online algorithm for, real-time and long-term classification of sheep behaviour: Novel approach for precision livestock farming. *Sensors* 19 (14)..
- [12] Suparwito, H., Wong, K.W., Xie, H., Rai, S., Thomas, D., 2019. A Hierarchical Classification Method Used to Classify, Livestock Behaviour from Sensor Data. *Lecture Notes in Computer Science*, 11909 LNAI, pp. 204–215..
- [13] Achour, B., Belkadi, M., Aoudjit, R., Laghrouche, M., 2019. Unsupervised automated monitoring of dairy cows' behavior based on Inertial Measurement Unit attached to their back. *Comput. Electron. Agric.* 167..
- [14] Achour, B., Belkadi, M., Aoudjit, R. et al. Classification of dairy cows' behavior by energy-efficient sensor. *J Reliable Intell Environ* (2021)..
- [15] ZHOU, B. and KIM, Y., 2017. A RFT Based Regular Position Correction Algorithm for Pedestrian Dead Reckoning Navigation System. *DEStech Transactions on Engineering and Technology Research*..
- [16] Shaopeng Liu, Gao, R., John, D., Staudenmayer, J. and Freedson, P., 2012. Multisensor Data Fusion for Physical Activity Assessment. *IEEE Transactions*

- on Biomedical Engineering, 59(3), pp.687-696..
- [17] H. Wang, H. Lenz, A. Szabo, J. Bamberger and U. D. Hanebeck, "WLAN-Based Pedestrian Tracking Using Particle Filters and Low-Cost MEMS Sensors," 2007 4th Workshop on Positioning, Navigation and Communication, 2007, pp. 1-7, doi: 10.1109/WPNC.2007.353604..
 - [18] M. A. T. Figueiredo and A. K. Jain, "Unsupervised learning of finite mixture models," in IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 24, no. 3, pp. 381-396, March 2002, doi: 10.1109/34.990138..
 - [19] X. Long, B. Yin and R. M. Aarts, "Single-accelerometer-based daily physical activity classification," 2009 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2009, pp. 6107-6110, doi: 10.1109/IEMBS.2009.5334925..
 - [20] Fawc, 1979. farm animal welfare council. press statement., <http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20121007104210/http://www.fawc.org.uk/pdf/fivefreedoms1979.pdf> (consulté le 13/06/2018)..
 - [21] Bateson p., martin p., 1985. the influence of experimentally manipulating a component of weaning on the development, of play in domestic cats. *anim. behav.*, 33, 511-518..
 - [22] Eastwood, c., d. chapman, and m. paine. 2004. precision dairy farming-taking the microscope to dairy farm management..
 - [23] Smith I.G., Lehr H., 2011. The Bright Animal Book multidisciplinary approach to acceptable and practical precision livestock farming, for SMEs in Europe and worldwide. Bright Animal European Framework 7 Project, 208 p.
 - [24] Mmichel, t muriel et H nathalie, élevage et paturage de precision : l'animal sous surveillance électronique., *courrier de l'environnement de l'inra*, 2013. 63:13-24, 08.)..
 - [25] T. f. mottram, h. r. whay, s. g. Vass et b. l. nielsen., apparatus for animal health monitor- ing , us patent, 2001..
 - [26] Ueda y., Akiyama f., Asakuma s., Wtanabe n., 2011. technical note: the use of a physical activity monitor to, estimate the eating time of cows in pasture. *j. dairy sci.*, 94, 3498-3503..
 - [27] Song x., leroy t., vranken e., maertens w., sonck b., berckmans d., 2008. automatic detection of lameness in dairy cattle-visionbased, trackway analysis in cow's locomotion. *comp. electron. agricult.*, 64, 39-44..
 - [28] Bewley j., peacock a.m., Lewis o., boyce r.e., roberts r.e., coffey m.p., kenyon s.j., schutz m.m., 2008., potential for estimation of body condition scores in dairy cattle from digital images. *j. dairy sci.*, 91, 3439-3453..
 - [29] Bocquier et al 2014, *agricultural systems* ,volume 126, april 2014, pages 25-37, whole-farm nitrogen cycling and intensification of crop-livestock systems, in the highlands of madagascar: an application of network analysis author links open overlay panel .
 - [30] Bewley, j. m., m. d. Boehlje, a. w. gray, h. hogeveen, s. j. kenyon, s. d. eicher, and m. a. s. russell, m.m. 2010a. assessing the potential value, for an automated dairy dattle body condition scoring system through stochastic simulation. *agricultural finance review* .
 - [31] Fleuret m. & Marlet a., 2014. de la salle de traite au robot. quels impacts ? *terra*, 449, 23-29..
 - [32] Perrot, c., Chatellier, v., 2009. evolution structurelle et économique des exploitations laitières du nord de l'union, européenne de 1990 à 2005 : des trajectoires contrastées. *fourrages*, 197, 25-46..

- [33] Dedieu b ,Hostiou n., Fagon j., 2012. simplification des conduits d'élevage : analyse transversale des pratiques mises en œuvre dans les filières, herbivores et granivores. in : numéro spécial, travail en élevage. hostiou n.,,, baumont r. (eds). inra prod. anim., 25, 127-140..
- [34] Berckmans d 2004. automatic on-line monitoring of animals by precision livestock farming. proceedings of the isah conference on animal production, in europe: the way forward in a changing world. october 11–13, saint-malo, france, vol. 1 pp. 27–31, in international society for animal hygiene.
- [35] Bewley j.m., Russell r.a., 2010. reasons for slow adoption rates of precision dairy farming technologies: evidence from a producer survey., in: proc. first north am. conf. precis. dairy manag., toronto, canada, 30-31. available at <http://www.precisiondairy2010.com/proceedings/s1bewley2.pdf> .
- [36] Berckmans d. precision livestock farming technologies for welfare management in intensive livestock systems. rev. sci. tech. 33, 189-196. 2014..
- [37] Florence kling eveillard, automatisation et relation homme animal, 6ème séminaire sur les enjeux de l'élevage pour les doctorants de l'inra, 2017..
- [38] Aerts j.m., Wathes c.m., Berckmans d., 2003. dynamic data-based modelling of heat production and growth of broiler chickens, : development of an integrated management system. biosyst eng., 84, 257-266..
- [39] Thèse pour obtenir le grade de docteur vétérinaire diplôme d'état présentée et soutenue publiquement devant l'Université Paul-Sabatier de Toulouse par ALEGRE Benjamin, Directeur de thèse : Mme Nicole Hagen-picard
- [40] Wathes c., 2007. precision livestock farming for animal health, welfare and production. in :animal health, animal welfare, and biosecurity. aland a. (eds). xiiith int. cong. anim. hygiene, tartu, estonia, 397-404..
- [41] Rutten, c.j., velthuis, a.g.j, steeneweld, w., hogeveen, h., 2013b. j. dairy sci. 96 :1928–1952..
- [42] Agathe hoffmann, ameliorer le bien-être animal grâce aux methodes en elevage de precision lagathe hoffmann, encadré par 2 jean-baptiste menassol, 2018 letudiante systèmes d'élevage, 2enseignant-chercheur au sein de l'umr selmet, montpellier supagro.
- [43] Jago j., eastwood c., Kerrish k., Yule i., 2013. precision dairy farming in australasia: adoption, risks and opportunities. anim. prod. sci., 53, 907-916.
- [44] *Julia bessin (travaux réalisés pour la confédération paysanne)*, la biodiversité animale à la ferme : pratiques et points de vue d'éleveur-ses sur la gestion des troupeaux.
- [45] Meuret m., Tichit m., Hostiou n., 2013. élevage et pâturage « de précision » : l'animal sous surveillance électronique. courrier de l'environnement, 63, 13-24..
- [46] Camos valérie, Cézilly Frank, sylvestre jean-pierre, *homme et animal, la question des frontières*. éditions quæ, « update sciences & technologies », 2009, URL : <https://www.cairn.info/--.htm>, la relation homme-animal se construit quotidiennement dans les interactions entre l'éleveur et ses animaux
- [47] Hemsworth p.h., Barnett j.l., treacy d.,madgwick p., 1990. the heritability of the trait fear of humans and the association between this trait and subsequent reproductive performance of gilts. appl. anim. behav. sci, 25, 85-95.

- [48] Hemsworth p.h., Coleman g.j., Barnett j.l. jones r.b., 1994a. behavioural responses to humans and the productivity of commercial broiler chickens. *appl. anim. behav. sci.*, 41, 101-114.
- [49] Boivin x., le neindre p., boissy a., Lensink b.j., Trillat g., Veissier i. (2003). eleveur et grands herbivores : une relation à entretenir. *inra productions animales*, 16: 101-115.
- [50] Cornou c., 2009. automation systems for farm animals: potential impacts on the human-animal relationship and on animal welfare. *anthrozoös*, 22, 213-220..
- [51] Boivin x., bensoussan s., l'hotellier n., bignon l., brives h., brulé a., godet j., grannec m.l., hausberger m., kling-eveillard f., tallet c., courboulay v., 2012. hommes et animaux d'élevage au travail : vers une approche, pluridisciplinaire des pratiques relationnelles. in : numéro spécial, travail en élevage. hostiou n., dedieu b., baumont r. (éds). *inra prod. anim.*, 25, 159-168..
- [52] Kling-eveillard f., Hostiou n., 2017. the effects of plf on human animal relationship on farm. in: 8th, ecplf. nantes, france, 9p..
- [53] Disenhaus c., Allain c., courties r., quiniou y., bareille n., 2016. discrepancy between expected and actual benefits of automatic heat detectors in commercial dairy farms. in: *eaap 67th ann. meet.*, belfast uk..
- [54] Lai x., Liu q., Wei x., Wang w., zhou g., han g., 2013. a survey of body sensor networks. *sensors*, 13, 5406-5447..
- [55] Aqeel-ur-rehman., Abbasi a.z., Islam n., Shaikh z.a., 2014. a review of wireless sensors and networks' applications in agriculture. *comp. stand. interf.*, 36, 263-270..
- [56] Abhijit s., Nitaigour m., kiseon k., 2013. a review on application of technology systems, standards and interfaces for agriculture and food sector. *comp. stand. interf.*, 35, 355-364.
- [57] Ropert-coudert y., kato a., grémillet d., crenner f., 2012. bio-logging: recording the ecophysiology and behavior of animals moving freely in their environment. in: *sensors for ecology: towards integrated knowledge of ecosystems*, le galliard j.f., guarini j.m., gaill f. (eds). *editions cnrs*, paris, isbn : 978- 2-9541683-0-2 chapitre 1, 17-41..
- [58] Andriamandroso a.l.h., lebeau f., Bindelle j., 2014. accurate monitoring of the rumination behaviour of cattle using imu signals from a mobile device. 2014. in: *proc. eur. grassland fed.*, aberystwyth university, 7 - 11 september 2014 (soumis)..
- [59] Banhazi t.m., Black j.l., 2009. precision livestock farming: a suite of electronic systems to ensure the application of best practice management on livestock farms. *austral. j. multidisciplinary eng.*, 7, 1-14..
- [60] Delaval france. station d'alimentation fsc40 et fsc400 delaval. sur internet : <http://www.delavalfrance.fr/-/product-information1/feeding/products/distribution/feeding-stations/delaval-feed-stations-fsc40-and-fsc400/>, date de dernière consultation : 26/11/2017..
- [61] Meen g.h., Schellekens m.a., Slegers m.h.m., leenders n.l.g, van erp-van der kooij e., noldus l.p.j.j., 2015. sound analysis in dairy cattle vocalisation as a potential welfare monitor. *computers and electronics in agriculture*, 118, 111-115..

- [62] Mcsweeney d., Foley c., Halton p., Umstatter c., o'brien b., 2015. proof of concept for the feasibility of the "virtual fence" technology for application in intensive grazing systems. conference paper, 7 p..
- [63] Allain c., Raynal j., Beck c., delagarde r., Brocard v., 2015. utilisation du lifecorder+® pour évaluer le temps d'ingestion des vaches laitières au pâturage. renc. rech. ruminants, 22..
- [64] Thorup v.m., munksgaard l., robert p-e., erhard h.w., thomsen p.t., friggens n.c., 2015. lameness detection via leg-mounted accelerometers on dairy cows on four commercial farms. animal, 9, 10, 1704-1712..
- [65] Bogin e., ziv g., 1973. enzymes and minerals in normal and mastitic milk. cornell vet, 63, 666-676..
- [66] Bareille n., videoq l., Daviere j.b., Johan m., godin s., leyrat-bousquet e., lemonnier j.p., lamy j.m., chanvallon a., 2014. détection des troubles de santé des vaches laitières par la mesure de leur température ruminale. renc. rech. ruminants, 21..
- [67] Russel l j.b., hino t., 1985. regulation of lactate production in streptococcus bovis: a spiraling effect that contributes to rumen acidosis. j. dairy sci., 68, 1712-1721..
- [68] Ddlaval france. camera bcs delaval – mesure automatique de l'état corporel de vos vaches laitières. sur internet: <http://www.delavalfrance.fr/-/product-information1/management/systems/delaval-body-condition-scoring-bcs/>, date de dernière consultation : 26/11/2017..
- [69] Ali Ismail Awad, From classical methods to animal biometrics: A review on cattle identification and tracking, Computers and Electronics in Agriculture, Volume 123, 2016.
- [70] Awad, A., & Hassaballah, M. (2019). Bag-of-Visual-Words for Cattle Identification from Muzzle Print Images. Applied Sciences, 9(22), 4914.
- [71] Wenying Li, Zengtao Ji, Lin Wang, Chuanheng Sun, Xinting Yang, Automatic individual identification of Holstein dairy cows using tailhead images, Computers and Electronics in Agriculture, Volume 142, Part B, 2017.
- [72] Y. Lu, X. He, Y. Wen, P.S. Wang A new cow identification system based on iris analysis and recognition Int. J. Biomet., 6 (1) (2014), pp. 18-32..
- [73] L. Ruiz-Garcia, L. Lunadei The role of RFID in agriculture: applications, limitations and challenges Comp. Electron. Agricult., 79 (1) (2011), pp. 42-50.
- [74] S. Carné, G. Caja, J.J. Ghirardi, A.A.K. Salama, Long-term performance of visual and electronic identification devices in dairy goats, Journal of Dairy Science, Volume 92, Issue 4, 2009.
- [75] Eradus w.j., jansen m.b., 1999. animal identification and monitoring. comp. electron. agric., 24, 91-98..
- [76] Caja j., Ghirardi j.j., Hernandez-jover m., bocquier f., 2006. utilisation des bolus électroniques pour la traçabilité des ruminants : état de la technique, mise en place et évaluation en ovins et bovins. renc. rech. rum., 13, 163-166..
- [77] Mercier l., Marguin l., Gauthier j.m., 2006. atouts, contraintes et perspectives de l'identification électronique en élevage ovin. renc. rech. rum., 13, 151-154..
- [78] Duroy s., Holtz j., Bavary b., Mercier l., Marguin l., 2009. conditions préalables à l'utilisation à grande échelle de l'identification électronique des bovins et des petits ruminants. renc. rech. rum., 16, 200..
- [79] Bareille, N., Beaudeau, F., Billon, S., Robert, A., & Faverdin, P. (2003). Effects of health disorders on feed intake and milk production in dairy cows. Journal of Livestock Production Science,.

- [80] S. Benaissa, F.A.M. Tuytens, D. Plets, J. Trogh, L. Martens, L. Vandaele, W. Joseph, B. Sonck, Calving and estrus detection in dairy cattle using a combination of indoor localization and accelerometer sensors, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 168, 2020.
- [81] C. Arcidiacono, S.M.C. Porto, M. Mancino, G. Cascone, Development of a threshold-based classifier for real-time recognition of cow feeding and standing behavioural activities from accelerometer data, *Computers and Electronics in Agriculture*, V134, 2017.
- [82] B. Robert, B.J. White, D.G. Renter, R.L. Larson Evaluation of three-dimensional accelerometers to monitor and classify behavior patterns in cattle *Comput. Electron. Agric.*, 67 (1–2) (2009), pp. 80-84.
- [83] Brahim Achour, Malika Belkadi, Rachida Aoudjit, Mourad Laghrouche, Unsupervised automated monitoring of dairy cowsâ€™ behavior based on Inertial Measurement Unit attached to their back, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 167, 2019.
- [84] González, L. A., Tolkamp, B. J., Coffey, M. P., Ferret, A., & Kyriazakis, I. (2008). Changes in Feeding Behavior as Possible Indicators for the Automatic Monitoring of Health Disorders in Dairy Cows. *Journal of Dairy Science*, 91(3), 1017–1028..
- [85] Bareille, N., Beaudeau, F., Billon, S., Robert, A., & Faverdin, P. (2003). Effects of health disorders on feed intake and milk production in dairy cows. *Journal of Livestock Production Science*, 83(1), 619 53–62..
- [86] Fogsgaard, K. K., Røntved, C.M., Sørensen, P., & Herskin, M. S. (2012). Sickness behavior in dairy cows during *Escherichia coli* mastitis. *Journal of Dairy Science*, 95(2), 630-638..
- [87] Thorup, V. M., Nielsen, B. L., Robert, P.-E., Giger-Reverdin, S., Konka, J., Michie, C., & Friggens, N. C. (2016). Lameness Affects Cow Feeding But Not Rumination Behavior as Characterized from Sensor Data. *Journal of Frontiers in Veterinary Science*,.
- [88] Fogsgaard, K. K., Bennedsgaard, T. W., & Herskin, M. S. (2015). Behavioral changes in freestall housed dairy cows with naturally occurring clinical mastitis. *Journal of Dairy Science*, 98(3), 650 1730–1738..
- [89] S. Benaissa, F.A.M. Tuytens, D. Plets, J. Trogh, L. Martens, L. Vandaele, W. Joseph, B. Sonck, Calving and estrus detection in dairy cattle using a combination of indoor localization and accelerometer sensors,, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 168, 2020.
- [90] S.M.C. Porto, C. Arcidiacono, A. Giummarra, U. Anguzza, G. Cascone, Localisation and identification performances of a real-time location, system based on ultra wide band technology for monitoring and tracking dairy cow behaviour in a semi-open free-stall barn, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 108, 2014..
- [91] Anderson, D., Winters, C., Estell, R., Fredrickson, E., Doniec, M., Detweiler, C., Rus, D., James, D. and Nolen, B., 2012., Characterising the spatial and temporal activities of free-ranging cows from GPS data. *The Rangeland Journal*, 34(2), p.149..
- [92] Bloch, V. and Pastell, M., 2020. Monitoring of Cow Location in a Barn by an Open-Source, Low-Cost, Low-Energy Bluetooth Tag System. *Sensors*, 20(14), p.3841..
- [93] J. Feng, Z. Fu, Z. Wang, M. Xu, X. Zhang Development and evaluation on a RFID-based traceability system for cattle/beef quality safety in China *Food Control*, 31 (2013), pp. 314-325.

- [94] Wolfger, B., Jones, B., Orsel, K. and Bewley, J., 2017. Technical note: Evaluation of an ear-attached real-time location monitoring system. *Journal of Dairy Science*, 100(3), pp.2219-2224..
- [95] Adrion, F., Keller, M., Bozzolini, G. and Umstätter, C., 2020. Setup, Test and Validation of a UHF RFID System for Monitoring Feeding Behaviour of Dairy Cows. *Sensors*, 20(24), p.7035..
- [96] Hindermann, P., Nüesch, S., Früh, D., Rüst, A. and Gygax, L., 2020. High precision real-time location estimates in a real-life barn, environment using a commercial ultra wideband chip. *Computers and Electronics in Agriculture*, 170, p.105250..
- [97] Douglas D. Shane, Brad J. White, Robert L. Larson, David E. Amrine, Jeremy L. Kramer, Probabilities of cattle participating in eating and drinking behavior when located at feeding and watering locations by a real time location system,, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 127, 2016.
- [98] A. Helwatkar, D. Riordan, and J. Walsh., “Sensor technology for animal health monitoring,” 2014..
- [99] A. Awasthi, A. Awasthi, D. Riordan, and J. Walsh, “Non-invasive sensor technology for the development of a dairy cattle health monitoring system school of science.,” Octobre 2016..
- [100] W. Legg, K. Abbas, D. Alfaro, B. Dosov, and N. Fraser, Un rapport du Groupe d'experts de haut niveau sur la sécurité alimentaire et la nutrition le développement agricole durable au service de la sécurité alimentaire et de la nutrition:, quels roles pour l'élevage? Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2016..
- [101] M. Saint-Dizier and S. Chastant-Maillard, “Methods and on-farm devices to predict calving time in cattle,” *The Veterinary Journal*, 2015..
- [102] “Détection des vêlages , fiche santé viande bovine,” Décembre 2013..
- [103] Thèse pour obtenir le grade de docteur veterinaire , développement d'un nouvel outil d'aide a la surveillance des vêlages, new deal ®,annee 2016 these: 2015 –tou 3 – 4017.
- [104] J. Roelofs, F. Lopez-Gatiusc, R. Hunterd, F. van Eerdenburge, and C. Hanzenf, “When is a cow in estrus? clinical and practical aspects,” February 2010..
- [105] Jonsson, R. Ingi, Blanke, Mogens, Poulsen, N. Kjolstad, Hojsgaard, and Soren, Detection of Oestrus and Lameness in Dairy Cows. PhD thesis, Technical University of Denmark, 2011..
- [106] R. Firk, E. Stamer,W. Junge, and J. Krieter, “Automation of oestrus detection in dairy cows: a review,” 2001..
- [107] “Détection automatisée des chaleurs en élevage bovin laitier quel outil choisir,” Institut de l'élevage, 2012..
- [108] A. Chanvallon, S. Coyral-Castel, J. Gatien, J.-M. Lamy, D. Ribaud, C. Allain, P. Clément, and P. S. b, “Comparison of three devices for the automated detection of estrus in dairy cows,” *ScienceDirect*, 2014..
- [109] S. TAS, DEMIR, A. URKMEZ, and S. INAL, “A fuzzy rule-based system for predicting the live weight of holstein cows whose body dimensions were determined by image analysis,” 2011..
- [110] S. Tasdemira, A. Urkmezb, and S. Inalc, “Determination of body measurements on the holstein cows using digital image analysis and estimation of live weight with regression analysis,” 2011..
- [111] S. OZKAYA, “The prediction of live weight from body measurements on female holstein calves by digital image analysis,” 2012..

- [112] Dolecheck, K.A., Heersche, G., Bewley, J.M., 2013. Investment analysis of automated estrus detection technologies., Presented at the Proceedings of the precision dairy conference and expo., University of Minnesota, Mayo Civic Center, Rochester, Minnesota, pp. 103–104..
- [113] Rutten et al. Overview of published sensor systems for detection of oestrus and lameness in dairy cows.Proceedings of the 6th European Conference on Precision Livestock Farming.2013.
- [114] guide, 2008 ,fédération internationale de laiterie © 2008, fédération internationale de laiterie isbn 978-9-290980-41-4 modalités et conditions générales d'utilisation de cette publication électronique, Http://www.lactodata.info/docs/lib/fil_guide_pour_le_bien-etre_animal_2008.pdf .
- [115] Dawkins, m.s., 2017. animal welfare and efficient farming: is conflict inevitable? anim. prod. sci. 57, 201. <https://doi.org/10.1071/an15383>..
- [116] John mcinerney 2004, animal welfare, economics and policy, discussion paper for the department of the environment and rural affairs, londres [bien-être animal, économie et politique,, document de réflexion pour le département de l'environnement et des affaires rurales], 68 p..
- [117] Agathe hoffmann, ameliorer le bien-être animal grâce aux methodes en elevage de precision lagathe hoffmann, encadré par 2 jean-baptiste menassol, 2018 letudiante systèmes d'élevage, 2enseignant-chercheur au sein de l'umr selmet, montpellier supagro.
- [118] M. c. meunier-salaun, m. n. vantrimponte, a. raab, r. dantzer. effect of floor area restriction upon performance, behavior and physiology of growing-finishing pigs. journal of animal science,, volume 64, issue 5, may 1987, pages 1371–1377, <https://doi.org/10.2527/jas1987.6451371x>.
- [119] Bareille n., Roussel p., 2011. guide d'intervention pour la maîtrise des boiteries en troupeaux de vaches laitières. umt maîtrise de la santé des troupeaux bovins. 111 p..
- [120] Watts j.m., Stookey j.m., 2000. vocal behaviour in cattle : the animal's commentary on its biological processes and welfare. appl. anim. behav. sci., 67, 15-33..
- [121] Hörning b., 2001. the assessment of housing conditions of dairy cows in littered loose housing systems using three scoring methods. acta agriculturae scandinavica, section a. anim. sci., 51, 30, 42-47..
- [122] Boivin x., bensoussan s., l'hotellier n., bignon l., brives h., brule a., godet j., grannec m-l., hausberger m., kling-eveillard f., tallet c., courboulay v, 2012. hommes et animaux d'élevage au travail :, vers une approche pluridisciplinaire des pratiques relationnelles. inra prod. anim., 25(2), 159-168..
- [123] Hemsworth p.h., Coleman g.j., Barnett j.l., 1994. improving the attitude and behaviour of stockpersons toward pigs and the consequences on the behaviour and reproductive performance of commercial pigs. appl. anim. behav. sci., 39, 349- 362..
- [124] Mounaix b., brule a., boivin x., 2007. les facteurs de variation de la relation homme-animal en élevage bovin. renc. rech. ruminants, 14..
- [125] Allain c., chanvallon a., clément p., guatteo r., bareille n. 2014. elevage de précision : périmètre, applications et perspectives en élevage bovin. rencontres recherches ruminants. 21, 8p..
- [126] Veissier i., Botreau r., Perny p., 2010. evaluation multicritère appliquée au bien-être des animaux en ferme ou à l'abattoir : difficultés et solutions du

- projet welfare quality®. inra prod. anim., 23(3), 269-284..
- [127] Un nouvel outil pour mesurer le bien-être des bovins (consoglobe.com).
- [128] Un outil d'évaluation du bien être animal (lacooperationagricole.coop).
- [129] An easy-to-use tool to evaluate cattle welfare on-farm: boviwell pissot m. (1), nocture n. (1), rozier s. (1) (1) moy park beef orléans.
- [130] Fawc, 1979. farm animal welfare council. press statement. <http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20121007104210/http://www.fawc.org.uk/pdf/fivefreedoms1979.pdf> (consulté le 13/06/2018)..
- [131] González, L., Tolkamp, B., Coffey, M., Ferret, A. and Kyriazakis, I., 2008. Changes in Feeding Behavior as Possible, Indicators for the Automatic Monitoring of Health Disorders in Dairy Cows. *Journal of Dairy Science*, 91(3), pp.1017-1028..
- [132] Pahl, C., Hartung, E., Mahlkow-Nerge, K. and Haeussermann, A., 2015. Feeding characteristics and rumination time of dairy cows around estrus. *Journal of Dairy Science*, 98(1), pp.148-154..
- [133] H.M. Miedema, M.S. Cockram, C.M. Dwyer, A.I. Macrae Changes in the behavior of dairy cows during the 24 h before normal, calving compared with behavior during late pregnancy *Appl. Anim. Behav. Sci.*, 132 (2011), pp. 8-14.
- [134] Schirmann, K., Chapinal, N., Weary, D., Vickers, L. and von Keyserlingk, M., 2013. Short communication: Rumination and feeding, behavior before and after calving in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 96(11), pp.7088-7092..
- [135] Jawad, H., Nordin, R., Gharghan, S., Jawad, A. and Ismail, M., 2017. Energy-Efficient Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture: A Review. *Sensors*, 17(8), p.1781..
- [136] Veissier Isabelle, Florence kling-eveillard, marie-madeleine mialon, mathieu silberberg, alice de boyer des roches, claudia terlouw, dorothée ledoux, bruno meunier, nathalie hostiou. élevage de précision et bien-être en élevage, : la révolution numérique de l'agriculture permettra-t-elle de prendre en compte les besoins des animaux et des éleveurs ?vol. 32 no 2 (2019): volume 32 numéro 2 : numéro spécial. de grands défis et des solutions pour l'élevage 281-290..
- [137] Wathes c.m., Buller h., maggs h., campbell m.l., 2013. livestock production in the uk in the 21st century: a perfect storm averted? *animals*, 3, 574-583..
- [138] Bateson p., Martin p., 1985. the influence of experimentally manipulating a component of weaning on the development of play in domestic cats. *anim. behav.*, 33, 511-518..
- [139] Arcidiacono , c., porto, s.m.c., mancino, m. and cascone, g.(2017) 'development of a threshold-based classifier for realtime recognition of cow feeding and standing behavioural, activities from accelerometer data', *computers and electronics in agriculture*, vol. 134. .
- [140] Andriamasinoro l.h.a., bindelle j., mercatoris b. & lebeau f., 2016. a review on the use of sensors to monitor cattle jaw movements and behavior when grazing. *biotechnol. agron. soc. environ.*, 20, 273- 286..
- [141] Thorup, v.m., nielsen, b.l., robert, p-e., giger-reverdin, s.,konka, j., michie, c. and friggens, n.c. (2016) 'lameness affects cow feeding but not rumination behavior as characterized from sensor data', *journal of frontiers in veterinary science*, vol. 3. author please supply page range..
- [142] Fogsgaard, k.k., bennedsgaard, t.w. and herskin, m.s. (2015) 'behavioral changes in freestall housed dairy cows with naturally occurring clinical mastitis', *journal of dairy science*, vol. 98, no. 3, pp.650 1730-1738..

- [143] Andreas Buerkert; Eva Schlecht , Maëg Moreau; Stefan Siebert; Use of a tri-axial accelerometer for automated recording and classification of goats' grazing behavior., *Applied Animal Behaviour Science* ;Volume 119, Issues 3–4, July 2009, Pages 158-170 .
- [144] James Douglas Armstrong, Abraham Acevedo Arozena , Rasneer Sonia Bains , Heather Cater , Agis Chartsias , Patrick Nolan , Duncan Sneddon³, Rowland Sillito , Sara Wells,, Tracking of Individual Mice in a Social Setting Using Video Tracking Combined with RFID tags .
- [145] Meunier B., Pradel P., Sloth K.H., Cirié C., Delval E., Mialon M.M., Veissier I., 2018. Image analysis to refine measurements of dairy cow behaviour from a real-time location system. *Biosyst. Eng.*, 173, 32-44..
- [146] Williams, l., fox, d., bishop-hurley, g. and swain, d. (2019) 'use of radio frequency identification (rfid) technology to record grazing beef cattle water point use', *computers and electronics in agriculture*, vol. 156, pp.193–202..
- [147] Awad, a. (2016) 'from classical methods to animal biometrics: a review on cattle identification and tracking', *computers and electronics in agriculture*, vol. 123. author please supply page range..
- [148] Awad, a. and Hassaballah, m. (2019) 'bag-of-visual-words for cattle identification from muzzle print images', *applied sciences*, 9(22) (4914)..
- [149] Li, w., ji, z., Wang, l., sun, c. and Yang, x. (2017) 'automatic individual identification of holstein dairy cows using tailhead images', *computers and electronics in agriculture*, vol. 142, part b..
- [150] Luis Ruiz-Garcia, Loredana Lunadei, The role of RFID in agriculture: Applications, limitations and challenges, October 2011, *Computers and Electronics in Agriculture* 79(1):42-50, DOI:10.1016/j.compag.2011.08.010 , ;Project: agri-product quality and safety control.
- [151] S. Carné, T. A. Gipson, M. Rovai, R. C. Merkel, G. Caja, *Journal of Animal Science*, Volume 87, Issue 7, July 2009, Pages 2419–2427, <https://doi.org/10.2527/jas.2008-1670>; 01 July 2009..
- [152] Feng, J., Fu, Z., Wang, Z., Xu, M. and Zhang, X. (2013) 'Development and evaluation on a RFID-based traceability system for cattle/beef quality safety in China', *Food Control*, Vol. 31, pp.314–325..
- [153] Todd, b., phillips, m., schultz, s.m., hawkins, a.r. and jensen, b.d. (2009) 'low-cost rfid threshold shock sensors', *ieee sensors journal*, vol. 9, no. 4, pp.464–469..
- [154] Saab, S.S. and Nakad, Z., S., 2011, "A Standalone RFID Indoor Positioning System Using Passive Tags", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 58, pp. 1961-1970..
- [155] Deak, g., curran, k. and condell, j. (2012) 'a survey of active and passive indoor localisation systems', *computer communications*, vol. 35, no. 16, pp.1939–1954..
- [156] Amendola, s., lodato, r., Manzari, s., occhiuzzi, c. and marrocco, g. (2014) 'rfid technology for iot-based personal healthcare in smart spaces', *ieee internet things j.*, vol. 1, no. 2, pp.144–152..
- [157] Idjeri, B., Laghrouche, M. and Boussey, J. (2017) 'Wind measurement based on MEMS micro-anemometer with high accuracy using ANN technique', *IEEE Sensors Journal*, Vol. 17, No. 13, pp.4181–4188..
- [158] Wonho, K. and Han, Y. (2015) 'SmartPDR: smartphone-based pedestrian dead reckoning for indoor localization', *IEEE Sensors Journal*, Vol. 15, No. 5, pp.2906–2916..
- [159] Wang, B., Boyuan Liu, W.X., Yu, B., Jia, R. and Gan, X. (2018) 'Pedestrian

- dead reckoning based on motion mode recognition using a smartphone', *Sensors*, Vol. 18, No. 6, pp.1811..
- [160] Wu, Y., Zhu, H., Du, Q. and Tang, S. (2019) 'A pedestrian dead-reckoning system for walking and marking time mixed movement using an SHSs scheme and a foot-mounted IMU', *IEEE Sensors*, Vol. 19, No. 5, pp.1661–1671..
- [161] Tøgersen, F.A., Skjøth, F., Munksgaard, L. and Højsgaard, S.(2010) 'Wireless indoor tracking network based on Kalman filters with an application to monitoring dairy cows', *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 72,pp 119-126.
- [162] Huang, T., Hao, J., Chen, Z.D., Wen, G., Li, J. and Zhao, H.(2018) 'An indoor FMCW localization system with the application of the extended Kalman filter', *Proc. IEEE MTT-S Int. Wireless Symp. (IWS)*, May, Chengdu, China, pp.1–4..
- [163] Jiang, X., Chen, Y., Liu, J., Liu, D., Gu, Y. and Chen, Z. (2015) 'Real-time and accurate indoor localization with fusion model of Wi-Fi fingerprint and motion particle filter', *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2015, pp.1–13..
- [164] Correa, A., Barcelo, M., Morell, A. and Vicario, J.L. (2014) 'Enhanced inertial-aided indoor tracking system for wireless sensor networks: a review', *IEEE Sensors Journal*, Vol. 14, No. 9, pp.2921–2929..
- [165] Arcidiacono , c., porto, s.m.c., mancino, m. and cascone, g.(2017) 'development of a threshold-based classifier for realtime recognition of cow feeding and standing behavioural activities from accelerometer data',, *computers and electronics in agriculture*, vol. 134. .
- [166] Robert, b., white, b.j., renter, d.g. and larson, r.l. (2009) 'evaluation of three-dimensional accelerometers to monitor and classify behavior patterns in cattle', *computers and electronics in agriculture*, vol. 67, nos. 1–2, pp.80–84..
- [167] Achour, b., Belkadi, m., Aoudjit, r. and Laghrouche, m. (2019) 'unsupervised automated monitoring of dairy cows' behavior based on inertial measurement unit attached to their back',*computers and electronics in agriculture*, vol. 167,pp.105068..
- [168] Wolfger, b., Jones, b., Orsel, k. and Bewley, j. (2017) 'technical note: evaluation of an ear-attached real-time location monitoring system', *journal of dairy science*, vol. 100, no. 3, pp.2219–2224..
- [169] Hindermann, p., nüesch, s., Früh, d., Rüst, a. and gygax, l.(2020) 'high precision real-time location estimates in a reallife barn environment using a commercial ultra wideband chip', *computers and electronics in agriculture*, vol. 170,pp.105250..
- [170] Porto, s., Arcidiacono, c., Giummarra, a., anguzza, u. and cascone, g. (2014) 'localisation and identification performances of a real-time location system based on ultra wide band technology, for monitoring and tracking dairy cow behaviour in a semi-open free-stall barn', *computers and electronics in agriculture*, vol. 108, pp.221–229..
- [171] Ren, k., Karlsson, j., Liuska, m., Hartikainen, m., Hansen, i. and jørgensen, g. (2020) 'a sensor-fusion-system for tracking sheep location and behaviour', *international journal of distributed sensor networks*, vol. 16, no. 5..
- [172] Huang, s., Guo, y., Zha, s., Wang, f. and Fang, w. (2017) 'a real-time location system based on rfid and uwb for digital manufacturing workshop', *procedia cirp*, vol. 63,pp.132–137..
- [173] Achour, b., Belkadi, m., Filali, i., Laghrouche, m. and Lahdir, m.(2020) 'image analysis for individual identification and feeding behaviour monitoring of dairy cows based on convolutional neural networks (cnn)', *biosystems engineering*, vol. 198, pp.31–49.

- [174] Benaïssa, S., Tuytens, F.A.M., Plets, D., De Pessemier, T. and Trogh, J., et al. (2017) 'on the use of on-cow accelerometers for the classification of behaviours in dairy barns', *Journal of Research in Veterinary Science*, vol. 125, pp.425–433, <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2017.10.005>..
- [175] Rutten, C., Kamphuis, C., Hogeveen, H., Huijps, K., Nielen, M. and Steeneveld, W. (2017) 'sensor data on cow activity, rumination, and ear temperature improve prediction of the start of calving in dairy cows', *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 132, pp.108–118..
- [176] Bikker, J., Van Laar, H., Rump, P., Doorenbos, J., Van Meurs, K., Griffioen, G. and Dijkstra, J. (2014) 'technical note: evaluation of an ear-attached movement sensor to record cow feeding behavior and activity', *Journal of Dairy Science*, vol. 97, no. 5, pp.2974–2979..
- [177] THESE pour obtenir le grade de docteur vétérinaire diplôme d'état présentée et soutenue publiquement devant l'Université Paul-Sabatier de Toulouse par ALEGRE Benjamin, Directeur de thèse : Mme Nicole Hagen-picard