

Cet article de la revue **Fourrages**,
est édité par l'Association Française pour la Production Fourragère

Pour toute recherche dans la base de données
et pour vous abonner :

www.afpf-asso.org

Des outils numériques centrés sur le comportement des animaux pour assister la conduite du pâturage sur parcours

J-B. Menassol¹, P-G. Grisot², C. Guinamard², A. Llaría³, M. Jouven¹

RESUME

Les outils numériques centrés sur le comportement des animaux pour piloter la conduite du pâturage constituent une des réponses possibles face aux enjeux locaux et globaux qui conditionnent la durabilité des systèmes d'élevages. Après un panorama des différentes technologies et de leurs usages, nous présenterons le projet CLOChèTE. Ce dernier a été consacré au développement d'un outil combinant GPS et accéléromètre pour l'aide à la décision dans la conduite du pâturage sur parcours. En parallèle d'enquêtes visant à identifier les besoins des utilisateurs, des essais en fermes expérimentales ont été menés pour évaluer la capacité des technologies à répondre à ces besoins. Ces deux étapes ont abouti à la rédaction de cahiers des charges fonctionnel et technique de l'outil. Nous considérons que le succès des futures solutions commerciales dépendra de développements concertés entre acteurs complémentaires.

SUMMARY

Digital tools for assessing animal behaviour and facilitating rangeland grazing operations

The sustainability of livestock systems is shaped by both local and global factors. In this context, it is useful to have digital tools that can assess animal behaviour and thus guide grazing decisions. Here, we first review available technologies and then present the CLOChèTE project. This project aimed to develop a GPS-equipped accelerometer to inform decision-making during rangeland grazing operations. Surveys were conducted to identify user needs. In tandem, research was performed on experimental farms to assess the ability of digital tools to meet these needs. These two steps allowed us to draft functional and technical specifications for the tool. We believe that the success of future commercial solutions will depend on the collaborative investment in development efforts made by complementary stakeholders.

En favorisant l'autonomie alimentaire des systèmes d'élevages, le pâturage est un levier de réduction des coûts de production et d'augmentation de la robustesse de ces systèmes face aux variations de prix des matières premières (Shalloo *et al.*, 2018). Dans leur ensemble, et par les services écosystémiques qu'ils fournissent, par leur capacité à valoriser des zones défavorisées et à entretenir des paysages (D'Ottavio *et al.*, 2018), en favorisant le respect du bien-être des animaux d'élevages (Arnott *et al.*, 2016), les systèmes d'élevage pâturants répondent à des attentes clés des consommateurs (Rodríguez-Ortega *et al.*, 2014). Parmi les élevages pâturants, on retrouve une grande diversité de stratégies d'alimentation, depuis les plus « intensives » (par ex. élevages bovins laitiers utilisant des prairies temporaires avec des niveaux de chargement important et une conduite rationnée du pâturage) jusqu'aux plus « extensives » (par ex. élevages pastoraux mobiles de petits ruminants utilisant des

parcours avec des niveaux de chargement faibles et un gardiennage).

Quelle que soit la stratégie de pâturage, un haut niveau de technicité (connaissances, compétences, savoir-faire) est requis pour mettre en œuvre une conduite adaptative et performante, assurant l'adéquation dynamique entre les ressources alimentaires disponibles au pâturage et les besoins des animaux. En particulier, la connaissance du comportement alimentaire au pâturage (répartition temporelle et spatiale des activités d'ingestion et de rumination, sélectivité vis-à-vis des ressources offertes) est un élément clé car directement relié aux performances animales (Delagarde *et al.*, 2001). Si l'on connaît aujourd'hui assez bien les facteurs de variation du comportement d'ingestion au pâturage, en particulier pour des stratégies « intensives » (Peyraud et Delagarde, 2013), chaque situation d'élevage est cependant unique en termes de combinaison entre ressources végétales, caractéristiques des animaux, de

AUTEURS

1 : SELMET, Univ Montpellier, INRAE, CIRAD, L'Institut Agro – Montpellier SupAgro, Montpellier, France - jean-baptiste.menassol@supagro.fr

2 : Institut de l'Elevage, F-04100 Manosque, France

3 : Univ Bordeaux, ESTIA Institute of Technology, F-64210 Bidart, France

MOTS-CLES : outils numériques, pâturage, parcours

KEY-WORDS : digital tools, grazing, rangeland

REFERENCE DE L'ARTICLE : Menassol J-B., Grisot P-G., Guinamard C., Llaría A., Jouven M., (2021). « Des outils numériques centrés sur le comportement des animaux pour assister la conduite du pâturage sur parcours », *Fourrages*, 245, 41-51

l'environnement et requiert donc des savoirs « locaux ». Ceci est particulièrement vrai pour les stratégies « extensives », où l'hétérogénéité spatiale et temporelle des ressources pâturées est forte et la diversité animale s'exprime pleinement, dans la mesure où seule une partie de ces ressources est réellement prélevée (Etienne *et al.*, 2021). L'acquisition de ces savoirs « locaux » nécessite un suivi régulier du troupeau, et donc beaucoup de temps si le suivi est réalisé *via* des observations directes.

Une des solutions envisagées pour concilier gestion fine du pâturage, efficacité des systèmes et qualité de vie des éleveurs est le développement d'outils numériques au service d'un élevage de précision (Bocquier *et al.*, 2014; Caja *et al.*, 2020). L'élevage de précision repose sur une approche centrée sur l'animal et vise, entre autres objectifs, à alléger la charge de travail représentée par l'observation directe. Sur le court terme, les capteurs peuvent fournir des indicateurs utiles au pilotage de la conduite ; à plus long terme, l'évolution de certains indicateurs dans le temps peut aider à ajuster la stratégie de conduite en fonction des performances globales du système. Si de nombreux outils sont déjà commercialisés au service de l'agriculture et de l'élevage en bâtiment, il n'existe pour l'instant que peu de solutions technologiques pour accompagner les systèmes d'élevages basés sur le pâturage. En particulier, dans les systèmes d'élevages pastoraux, les contraintes spécifiques associées aux surfaces de parcours sont nombreuses : relief accidenté, embroussaillage, isolement géographique, difficulté à implanter des aménagements (clôtures, abris), multi-usages (tourisme, chasse, ...) imposant des périodes et des modalités particulières d'utilisation. Il en découle une charge importante de travail, souvent assurée grâce au bénévolat familial. A cela s'ajoutent une charge mentale et des contraintes matérielles dues à l'augmentation de la pression de prédation par le loup.

Depuis une vingtaine d'années, plusieurs projets de recherche appliquée ont été menés en France et à l'étranger (Europe, Etats-Unis, Australie, ...) (Rutter *et al.*, 1997; Buerkert et Schlecht, 2009; Handcock *et al.*, 2009; Mysterud *et al.*, 2014) pour concevoir et tester des capteurs embarqués sur les herbivores d'élevage et développer des algorithmes permettant d'analyser les données produites, documenter le comportement au pâturage et en déduire des informations utiles pour l'aide à la décision. Les nouvelles technologies sont vues par certains acteurs du pastoralisme comme **le moyen** de « faire entrer le pastoralisme dans l'ère moderne » et attirer les nouvelles générations (atelier mené en 2016 lors de la journée annuelle de l'UMT Pasto). L'utilisation de capteurs embarqués pour localiser les animaux et identifier leurs activités pourrait effectivement contribuer à alléger la charge de travail de l'éleveur et redonner de l'attrait au pastoralisme. En les couplant à des outils d'interprétation, il serait possible de faciliter certaines tâches comme la localisation des animaux en pâturage libre ou après perturbation (prédation, vol,

conditions climatiques, ...) ou encore, une gestion fine du pâturage (associée ou non à des mesures agro-environnementales ou à une démarche qualité).

L'objectif de cet article est de présenter les différentes options technologiques existantes ou à l'étude pour documenter le comportement des animaux au pâturage et d'analyser leurs intérêts et leur applicabilité aux conditions pastorales. Après un panorama basé sur la littérature scientifique, nous présenterons les principaux résultats d'un projet récemment achevé qui visait à définir les spécifications fonctionnelles et techniques pour un outil numérique d'aide à la conduite de troupeaux de petits ruminants sur des surfaces pastorales.

1. Des outils pour suivre, comprendre et piloter le comportement des animaux au pâturage

Le comportement animal est sans doute la principale variable d'intérêt pour la gestion des troupeaux au pâturage. Son évolution temporelle renseigne sur les interactions entre l'animal et la ressource pâturée. Le suivi du comportement animal peut produire des critères pour assister la gestion de l'éleveur en vue d'atteindre des performances cibles en termes d'ingestion de fourrages et de productions animales et végétales associées (Kondo, 2011).

Au pâturage, les principaux paramètres d'intérêt pour le suivi sont liés au comportement alimentaire : (i) mouvements et posture des animaux, (ii) localisation des animaux et (iii) activité d'ingestion. Le choix des moyens numériques pour le suivi de ces paramètres est essentiellement conditionné par l'existence d'outils disposant de capteurs produisant une traduction numérique des manifestations associées à ces comportements.

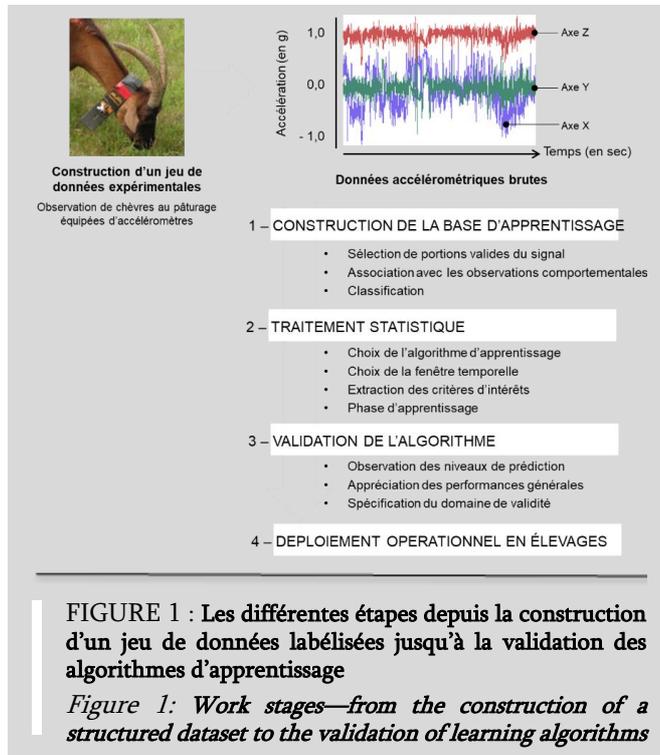
1.1. Documenter les comportements d'ingestion, de rumination et de repos à partir de l'enregistrement des mouvements et de la posture

Le suivi des mouvements et de la posture des animaux permet l'étude des composantes dynamique et statique qui constituent le comportement alimentaire. Chez les animaux d'élevage, les capteurs peuvent être fixés sur l'oreille, le cou, la patte de l'animal ou encore *via* des implants subcutanés ou sous forme de bolus au niveau du réticulo-rumen.

◆ Capteurs de mouvement

Les capteurs principalement impliqués dans ces suivis sont des accéléromètres trois axes qui, en mesurant l'accélération des corps sur lesquels ils sont disposés selon trois directions, permettent de déterminer leur vitesse et sens de déplacement. Les algorithmes appliqués aux données accélérométriques

visent à associer aux valeurs absolues acquises par le capteur, une prédiction du comportement effectif de l'animal. Il s'agit majoritairement d'algorithmes d'apprentissage. Dans un premier temps, un modèle statistique est entraîné sur un jeu de données acquis en conditions expérimentales et associant enregistrements du capteur et observations directes du comportement effectivement réalisé. Le modèle ainsi calibré est ensuite déployé en conditions de suivi de terrain (**Figure 1**).



L'utilisation d'accéléromètres embarqués sur les animaux pâturants permet de suivre en particulier les comportements d'ingestion, de rumination et de repos. Ceux-ci occupent en effet une place prépondérante dans le budget temporel quotidien des ruminants au pâturage (Kilgour, 2012). D'autres comportements comme les déplacements ou l'abreuvement peuvent également représenter un intérêt de suivi selon les modalités d'accès des surfaces pâturées et/ou les objectifs de gestion du pâturage. Ces comportements étant moins exprimés, ils nécessitent des jeux de données d'entraînement plus importants et sont généralement, moins bien prédits.

Des outils numériques mobilisant des accéléromètres sont utilisés en recherche pour l'étude du comportement animal depuis une dizaine d'années et sont au centre d'un certain nombre de solutions commerciales pour l'élevage. Il est à noter que la plupart des outils commerciaux sont mis au point et déployés au sein de systèmes d'élevages où le pâturage n'est pas dominant dans le système d'alimentation ou qui présentent des surfaces de pâturage relativement standardisées, *i.e.* des prairies temporaires. Certains outils peuvent ainsi afficher des performances contrastées lorsqu'ils sont transposés dans des

systèmes où la part du pâturage est plus importante (Pereira *et al.*, 2018).

Plusieurs études scientifiques sont consacrées à la validation d'outils accélémétriques mobilisés dans des systèmes d'élevages avec une composante de pâturage variable. Ces études sont conduites principalement en bovins (voir Robert *et al.*, 2009; Nielsen, 2013; Delagarde et Lambertson, 2015; González *et al.*, 2015; Williams *et al.*, 2016; Riaboff *et al.*, 2020), bien qu'il existe un certain nombre de références chez les ovins (Alvarenga *et al.*, 2016; Giovanetti *et al.*, 2017; Barwick *et al.*, 2020) et les caprins (Moreau *et al.*, 2009; Delagarde et Lambertson, 2015; Sakai *et al.*, 2019). La plupart de ces études affichent des niveaux d'exactitude générale comprise entre 80 et 95 %. Leurs conditions de validation reposent principalement sur des surfaces prairiales, mis à part une étude réalisant une partie de ses suivis sur des surfaces pastorales de montagne (Moreau *et al.*, 2009). Le processus d'intégration de ces algorithmes dans des solutions commerciales dépendra notamment de leur capacité à assurer un traitement en quasi temps réel des données acquises (Barwick *et al.*, 2020).

◆ Intégration au processus de pilotage du pâturage

Les informations issues des outils numériques basés sur des capteurs de mouvement et de posture embarqués sur animaux au pâturage fournissent essentiellement les temps individuels d'ingestion, de rumination et de repos. Ces informations ont vocation à être intégrées en temps réel dans les outils d'aide à la décision associés afin de générer des alertes, ciblant les individus, sur la base de déviations par rapport à des normes établies à l'échelle de l'animal, de l'élevage, de typologies d'élevages et/ou de référentiels de races. Les domaines d'application pour le pilotage du pâturage sont diversifiés et dépendent des objectifs des outils d'aide à la décision déployés. Ainsi, le mouvement et la posture des animaux peuvent constituer des indicateurs fiables de leurs performances de croissance, leur statut sanitaire et reproductif, leur niveau de bien-être et de la qualité de leurs interactions plus générales avec l'environnement (dos Reis *et al.*, 2020).

1.2. Situer les animaux et définir leurs principaux comportements à partir de leur localisation

Les capteurs dédiés à la localisation des animaux peuvent être discriminés selon deux catégories principales : ceux qui fournissent une donnée absolue de localisation, ou géolocalisation, et ceux qui fournissent une donnée relative de localisation, par rapport à un autre capteur par exemple (**Tableau 1**). En complément des objectifs de pilotage de l'éleveur, l'environnement d'élevage et les capacités d'investissement économique vont conduire à favoriser l'une ou l'autre catégorie de capteurs.

◆ **Capteurs de géolocalisation**

Les capteurs de géolocalisation sont intégrés au sein d'un système de navigation et de positionnement par satellites, aussi appelé GNSS. Il s'agit de récepteurs capables d'échanger des informations avec une ou plusieurs constellations de satellites pour fournir des coordonnées géographiques horodatées selon trois dimensions (longitude, latitude et hauteur ellipsoïdale) (**Tableau 1**). Le déploiement des GNSS nationaux ou transnationaux (GPS pour les États-Unis d'Amérique, GLONASS pour la Russie, Galileo pour l'Union européenne, BeiDou pour la Chine, QZSS pour le Japon et IRNSS pour l'Inde) est un événement largement contemporain, exception faite du système GPS, opérationnel depuis une vingtaine d'années, et mobilisé dans la plupart des études et solutions commerciales pour le pilotage des animaux au pâturage.

Ces systèmes sont à privilégier pour une utilisation hors bâtiment car la réception satellitaire y est souvent mauvaise. Pour une bonne utilisation extérieure, l'erreur associée à la géolocalisation exacte du module (aussi appelée biais) et la précision du positionnement dépendent de facteurs liés à la génération de capteurs, au nombre de satellites mobilisés par le récepteur pour déterminer ses coordonnées ainsi qu'à leur dispersion spatiale, à des facteurs liés à l'environnement (obstacles à la réception, météo, ...) ou encore au comportement animal (Williams et al., 2012; Jung et al., 2018). Il est

également nécessaire de trouver, en fonction des objectifs de suivi, un compromis entre autonomie énergétique des modules, fréquences d'acquisition et de transmission des données (Menassol et al., 2020). De notre propre expérience, dans des conditions pastorales associant milieux ouverts et espaces où prédomine une strate arbustive, la précision de capteurs GNSS embarqués sur animaux varie de 2 à 10 mètres. Dans ces mêmes conditions, la multiplication des acquisitions de données (7 enregistrements successifs) et l'utilisation de leur médiane permettent d'améliorer fortement la précision, qui est alors de l'ordre du mètre (≈ 1,1 m).

◆ **Localisation relative**

La détermination relative de la localisation des animaux peut s'établir par rapport à un ou plusieurs capteurs fixes (i.e. balise) et/ou mobiles (ex. un autre individu du troupeau) et donner une information de distance catégorielle (typiquement présence ou absence) et/ou continue.

Un réseau local de balises basé sur des capteurs radiofréquences permet d'estimer la distance entre chaque balise (nœuds fixes) et le capteur embarqué sur l'animal (nœud mobile) (**Tableau 1**). Ensuite, par trilatération, il est possible de déterminer la localisation et les circuits de déplacements au pâturage de chaque animal (nœud mobile) relativement à la configuration spatiale des balises et à la portée de communication des signaux radiofréquences (Cardoso et al., 2018). Ce

Méthodes	Localisation absolue	Localisation relative
Principe (schéma)		
Capteurs impliqués	GNSS (Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellites)	Radiofréquences
Informations	Coordonnées géographiques horodatées des animaux équipés	Position des animaux entre eux et par rapport au réseau de balises fixes
Conditions d'application	En extérieur, avec une précision variant selon qualité de la réception et le nombre d'enregistrements successifs utilisés	En extérieur ou en intérieur, dans un espace spécialement aménagé, avec peu ou pas d'obstacles physiques.
Principales fonctionnalités	Positions et circuits de pâturage géoréférencés Clôtures virtuelles	Pilotage des rotations entre parcelles Suivis longue durée et haute fréquence d'un grand nombre d'animaux
Applicabilité sur parcours (principaux avantages / inconvénients)	Déploiement sur tout type de surfaces sans limites de dimensions Solutions commerciales disponibles Dépendance aux protocoles classiques de télétransmission Gestion centralisée et déportée des données et alertes associées	Protocoles de transmission des données dédiés et autonomes Coûts limités de déploiement Nécessité de réaliser un balisage sur des surfaces limitées Développements peu soutenus en agriculture / élevages par des privés

TABLEAU 1 : Analyse comparée des méthodes d'acquisition de la localisation des animaux et de leurs applications
 Table 1 : Comparative analysis of methods for acquiring information on animal locations and method applications

système de localisation a un niveau de performances comparable aux solutions GNSS en milieux ouverts, mais il est fortement sensible à la présence d'obstacles entre paires de capteurs. De plus, son déploiement est fastidieux et nécessairement localisé. Toutefois, la localisation relative comporte plusieurs avantages : (i) s'affranchir des réseaux classiques de transmission, dont le niveau de couverture peut être faible ou hétérogène selon les aires de pâturage, (ii) interconnecter les capteurs pour être capable de générer des alertes localement et (iii) limiter les coûts énergétiques de fonctionnement des outils de suivi (Menassol *et al.*, 2020).

Dès lors que la position d'une balise constitue un point remarquable sur la zone de pâturage, l'établissement d'une communication avec les nœuds mobiles permet de déterminer leur localisation par une approche binaire de type présence / absence sur des zones d'intérêt (Nadimi *et al.*, 2008). Dans ces conditions, dès lors que les identifiants des animaux sont également récoltés, leurs séquences de passage à travers des points fixes offre la possibilité d'une étude de leur comportement au pâturage dans sa dimension sociale (Evans *et al.*, 2018). De plus, des dispositifs associant un lecteur d'identifiant des individus et une porte de tri/pesée permettent de déterminer et contrôler (notamment sur des critères de poids vif) la localisation d'un individu entre différents parcs (Rutter, 2017). Des réseaux de nœuds mobiles pourraient être mobilisés pour l'étude du comportement social des animaux au pâturage par l'étude des proximités interindividuelles, comme démontré récemment sur des bovins allaitants conduits en extérieur mais sans pâturage (Xu *et al.*, 2020).

◆ Intégration au processus de pilotage du pâturage

Le suivi du comportement des animaux au pâturage *via* des outils de localisation a des applications sensiblement similaires à celles présentées précédemment concernant les capteurs de suivi des mouvements et de posture (Williams *et al.*, 2016). Au pâturage, les traitements algorithmiques peuvent rester plus simples pour proposer des visualisations sous forme de cartes d'itinéraires de déplacements ou de fréquentations, compilées à l'échelle de l'individu ou du troupeau sur de plus ou moins longues périodes. Ainsi la localisation des animaux sur les surfaces de pâturage permet d'apprécier l'impact des animaux sur la ressource (Tomkins et O'Reagain, 2007). Cette base seule peut constituer une aide à la décision pour optimiser, selon l'expertise de l'éleveur, la conduite du troupeau au pâturage et l'utilisation des surfaces, par exemple en répartissant judicieusement des points d'attraction (eau, abris, sel, ...) (Ganskopp, 2001). Des dispositifs de localisation relative peuvent également permettre de piloter automatiquement les rotations inter-parcellaires des animaux au pâturage, sur des critères de poids relevés en continu ou plus généralement concernant l'animal et les parcelles.

De façon complémentaire, l'analyse des circuits de déplacements permet d'approcher le comportement réalisé par l'animal à l'aide d'algorithmes d'apprentissage. Ainsi l'horodatage précis associé aux données GNSS permet d'estimer entre plusieurs acquisitions un ensemble de paramètres liés à la vitesse de déplacement (Anderson *et al.*, 2012) et à l'angle de rotation de l'animal (Williams *et al.*, 2016). Des combinaisons plus ou moins complexes de ces paramètres sont mobilisées pour identifier le comportement. La principale limite de cette méthodologie réside dans le nombre limité de comportements discernables puisqu'il s'agit essentiellement de prédire l'activité d'ingestion et la présence ou l'absence de déplacements. Les capteurs de géolocalisation peuvent être combinés avec des accéléromètres afin d'associer aux segments de déplacements un nombre plus conséquent de comportements avec un fort niveau d'exactitude et de précision des modèles prédictifs sous-jacents. Ainsi une étude de suivi du comportement de vaches laitières au pâturage présente une exactitude moyenne maximale de 96 % pour les comportements d'ingestion, de rumination, de repos, de déplacements ainsi qu'une catégorie synthétique regroupant les comportements de toilettes, de grattage, d'abreuvement et miction (Dutta *et al.*, 2015). L'association d'informations sur la position de l'animal et son comportement sont particulièrement utiles pour suivre et conduire le pâturage dans des milieux hétérogènes (Riaboff *et al.*, 2020).

Un domaine d'application est le gardiennage virtuel, dans lequel on peut distinguer les clôtures virtuelles et le gardiennage assisté par drone. Dans le premier cas, il s'agit de définir des zones d'enclos et/ou exclos au pâturage, sans établir de barrières physiques, et de confronter ces zones aux données acquises par les capteurs (Verdon *et al.*, 2020). Dans le second cas, il s'agit de suivre et/ou diriger les déplacements du troupeau par effarouchement des animaux. A l'heure actuelle, les travaux scientifiques associés à ces outils se déroulent dans des conditions de pâturage sur prairies, par exemple pour reproduire des conditions de pâturage au fil. Leur applicabilité en conditions pastorales, notamment du fait du nombre d'obstacles potentiellement plus importants, reste à démontrer.

1.3. Mesurer l'ingestion au pâturage à partir d'analyses comportementales ou de pesées volontaires

Au pâturage la détermination des quantités réellement ingérées par l'animal est une gageure méthodologique et technologique (Coates et Penning, 2000). Les principaux outils numériques mobilisés pour cet objectif proposent des estimations indirectes fondées d'une part sur l'analyse comportementale de l'activité d'ingestion par (i) le suivi des mouvements de la mâchoire ou (ii) l'analyse de l'évolution du poids vif individuel.

◆ Analyse comportementale *via* les mouvements de la mâchoire

La quantité journalière de matière sèche ingérée par un animal au pâturage peut s'évaluer en mobilisant la notion de bouchée, unité élémentaire du processus de pâturage ; c'est alors le produit du nombre de bouchées réalisées par jour et du poids, en matière sèche, de chaque bouchée. Alors que les moyens technologiques actuels ne permettent pas d'estimer de façon satisfaisante le poids de chaque bouchée, les manifestations physiques qui accompagnent l'acte comportemental de réalisation d'une bouchée – c'est-à-dire les mouvements de la mâchoire qui accompagnent la préhension de la ressource et sa mastication – sont accessibles à différents types de capteurs. Les principaux capteurs impliqués dans le suivi des mouvements de la mâchoire au pâturage sont des microphones, des électromyographes, des sondes de pressions ou encore des accéléromètres.

Les outils numériques mobilisant ces capteurs sont conçus et testés pour des conditions d'alimentation simples : ingestion d'un fourrage à l'auge, pâturage de prairies en conditions « intensives ». Leur transfert en conditions pastorales où la ressource est très hétérogène pourrait se heurter à des défis techniques et technologiques conséquents.

◆ Évolution du poids vif individuel

Au moyen d'une fréquence d'échantillonnage importante, le suivi de l'évolution du poids vif individuel des animaux au pâturage peut permettre d'estimer les quantités réellement ingérées. Dans cet objectif, plusieurs outils ont été mis au point chez les bovins (Dickinson *et al.*, 2013) et les ovins (González-García *et al.*, 2018) essentiellement. Il s'agit d'un tapis de pesée connecté, associé à un système d'identification par radiofréquences (RFID). A chaque passage d'un animal, un ensemble de mesures de son poids vif est associé à la lecture d'un tag RFID embarqué sur l'animal. Le caractère plus ou moins mobile et autonome de l'outil permet d'envisager son utilisation dans des conditions de pâturage assez extensives (González-García *et al.*, 2018) (**Figure 2**).

D'autres outils, basés sur de l'imagerie 3D, permettent également d'estimer le poids des animaux sans pesées (chez les ovins voir le projet OtoP-3D piloté par l'Institut de l'Élevage) mais également d'envisager à terme des évaluations de contenus digestifs (Lebreton *et al.*, 2020).

Par rapport aux méthodes standards d'évaluation du poids vif des animaux d'élevages, les performances de ces outils sont excellentes. Une seule étude, réalisée avec des ovins, a permis d'établir une relation linéaire entre l'évolution du poids vif des animaux et les quantités de matière fraîche ingérées. Il s'agissait cependant de conditions d'élevages simplifiées où les animaux étaient nourris dans des auge individuelles

avec du foin. L'extension de ce modèle à l'évaluation des quantités de matière sèche ingérées en conditions de pâturage reste à établir.

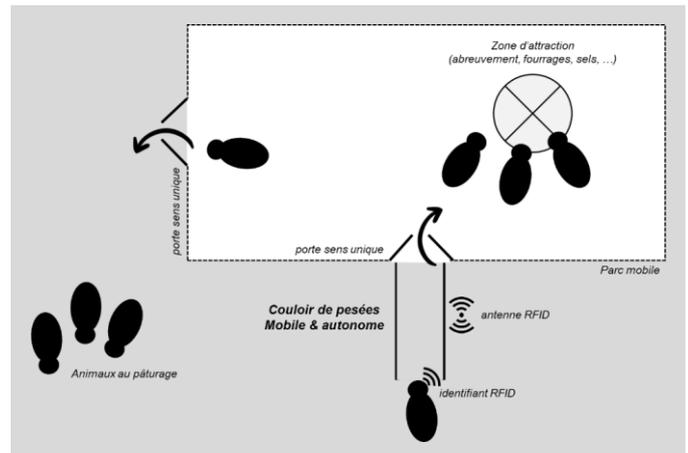


FIGURE 2 : Dispositif de pesée volontaire au pâturage, en conditions non contrôlées. A chaque passage de l'animal à travers le couloir de tri, son identifiant est associé à une série de mesures de son poids vif. Ce dispositif peut également être adapté pour marquer le passage unidirectionnel entre deux parcs de pâturage.

Figure 2 : Voluntary weighing system for grazing animals under uncontrolled conditions

◆ Intégration au processus de pilotage du pâturage

Les outils numériques pour le suivi de l'ingestion permettent, lorsque les modèles associés prédisent avec une bonne exactitude les quantités ingérées, d'évaluer l'efficacité nutritionnelle et énergétique des individus au pâturage (Rombach *et al.*, 2019). De plus, le suivi des apports énergétiques au pâturage est une voie d'optimisation des performances de production en permettant d'accorder précisément les besoins des animaux à l'offre alimentaire disponible ; avec des impacts associés sur la gestion de la santé et du bien-être des animaux (Giovanetti *et al.*, 2020). Dans les systèmes pratiquant le pâturage tournant, ces types d'outils pourraient tenir un rôle central dans le pilotage des changements de parcelles (Sheng *et al.*, 2020).

Lorsque les capteurs mobilisés permettent de suivre des variables physiologiques génériques comme le poids vif des animaux, ces informations peuvent être valorisées sans avoir recours à des algorithmes complexes ; par exemple pour gérer la répartition en lots (Brown *et al.*, 2015). Les écarts de poids fréquents et/ou de grande amplitude par rapport à des normes établies, à l'échelle individuelle ou collective, peuvent aider à mieux concevoir le système de pâturage, de supplémentation (Simanungkalit *et al.*, 2020) et/ou justifier des traitements sanitaires adéquats et ciblés. Enfin, une haute fréquence d'acquisition de ces informations, permettrait de générer des systèmes d'alertes précoces permettant de détecter des anomalies de croissance.

En ce qui concerne les systèmes d'élevages pastoraux, la diversité des fourrages ingérés rend difficile la détermination des quantités ingérées à partir du suivi des mouvements de la mâchoire. Le suivi de l'évolution du poids vif individuel peut en revanche représenter un indicateur de premier ordre des performances au pâturage puisqu'il intègre des informations sur l'ingéré (en quantité et qualité), sur les dépenses énergétiques pour l'adaptation à l'environnement d'élevage et sur l'efficacité alimentaire des individus.

2. Quel outil pour aider les éleveurs à gérer le pâturage des petits ruminants sur parcours méditerranéens ou de montagne ?

Les conditions d'élevage et l'environnement propres aux systèmes d'élevages pastoraux soulèvent des défis techniques et technologiques, c'est pourquoi on recense à ce jour très peu d'outils numériques dédiés ou adaptés à ces systèmes (Bocquier et Jouven, 2017). La mobilité des animaux va contraindre le fonctionnement des capteurs (autonomie de stockage et énergétique, communication, intégrité physique). La diversité des types de parcours et des pratiques d'élevages nécessite de recourir à des analyses et indicateurs robustes, valables dans une large gamme de conditions de pâturage. Enfin, le nombre élevé d'individus par troupeau (quelques centaines à quelques milliers de têtes pour les troupeaux ovins), combiné à une logique de production économe, imposera un déploiement limité des capteurs au sein du troupeau (moins de 5 % des animaux équipés).

Le projet CLOChèTE (*Caractérisation du Comportement et Localisation des Ovins et Caprins grâce aux Technologies Embarquées*) a été conduit entre 2017 à 2020, avec pour objectif de définir les spécifications fonctionnelles et techniques d'un outil d'aide à la conduite du pâturage des petits ruminants sur parcours, basé sur des capteurs embarqués (combinaison GPS + accéléromètre). Pour cela, un partenariat a été établi entre l'UMT Pasto, les services pastoraux, des éleveurs et une entreprise spécialisée (AGUILA technologies). Le projet a permis d'évaluer les besoins des utilisateurs à l'aide d'enquêtes et de réunions de groupe. Une évaluation des technologies accéléromètres et GPS sur sites expérimentaux a été menée pour vérifier leur potentiel à répondre aux besoins identifiés des utilisateurs. Ces deux étapes ont abouti à la rédaction d'un cahier des charges fonctionnel et d'un cahier des charges technique de l'outil. En complément, nous avons développé une méthode d'identification des animaux d'intérêt à équiper pour optimiser, par troupeau, le nombre d'animaux à suivre.

2.1. Un outil multifonctions, pour suivre la localisation des animaux et leur comportement

En 2017, des enquêtes ont été réalisées auprès de 24 éleveurs et bergers sur trois zones de l'arc périméditerranéen français correspondant à trois contextes d'élevage très différents : élevages ovins viande (troupeaux de 240 à 1100 brebis) pratiquant le gardiennage sur les Alpes de Haute-Provence et le Var (n = 8), élevages caprins lait (troupeaux de 15 à 90 chèvres) conduisant leurs animaux en lâcher dirigé dans l'Aude (n = 9), élevages ovins laitiers (troupeaux de 170 à 900 brebis) pâturant librement tout l'été en estive en Pyrénées-Atlantiques (n = 7). Ces entretiens semi-directifs avaient pour objectifs de cerner l'intérêt des éleveurs vis-à-vis de capteurs embarqués, de déterminer les besoins auxquels ces équipements pourraient répondre et de définir les caractéristiques techniques souhaitées (autonomie, robustesse, ergonomie...). Les besoins exprimés sont récapitulés dans le **Tableau 2** ; il s'agit principalement de limiter le temps nécessaire à la conduite du pâturage, mais aussi de sécuriser le troupeau et de mieux gérer les végétations. Ces besoins se déclinent différemment selon les contextes d'élevage, mais aussi selon la sensibilité propre à chaque éleveur.euse.

Catégorie de besoins exprimés	Contexte d'élevage (nombre d'éleveurs concernés)		
	Ovins Viande PACA (n=8)	Caprins Lait Aude (n=9)	Ovins Lait Pyrénées (n=7)
Limiter le temps nécessaire à la conduite du troupeau au pâturage	Retrouver le troupeau en cas de faible visibilité (n = 24)		
	Retrouver un troupeau échappé (n = 24)		
	Eviter les mélanges ou scissions de troupeau (n = 16)		
	Arrêter la garde (n = 6)		Arrêter la garde (n = 3) Limiter les déplacements (n = 3)
Sécuriser le troupeau	Retrouver les cadavres (n = 2)		
	Eviter les risques liés au relief ou aux routes (n = 21)		
	Eviter la prédation (loups & chiens errants ; n = 20) Eviter les risques liés au voisinage (champs, vignes ; n = 12)		
Mieux gérer les végétations	Limiter les clôtures et les entretiens mécaniques de la végétation (n = 8)		

TABLEAU 2 : Besoins exprimés par les éleveurs enquêtés dans le cadre du projet CLOChèTE, selon les contextes d'élevage
Table 2 : Needs expressed by farmers during CLOChèTE project surveys

Au cours des enquêtes, ces besoins ont été associés à des fonctions d'un outil embarqué associant GPS et

accéléromètre. Les éleveurs enquêtés connaissaient assez bien la technologie GPS, désormais couramment utilisée par le grand public. Ils ont ainsi facilement identifié des usages possibles en élevage pastoral. En revanche, l'accéléromètre a dû leur être d'abord présenté. Les usages pour cette seconde technologie ont toujours été envisagés dans le cadre d'une association avec le GPS. Au final, les usages envisagés sont, du plus au moins cité : (i) connaître la localisation des animaux, (ii) être alerté en cas de franchissement de limites, (iii) mieux gérer la répartition spatiale de la pression de pâturage, (iv) mieux connaître le comportement des animaux dans le temps et l'espace et (v) alerter en cas de mouvement anormal. Si tous les éleveurs ont identifié plusieurs fonctions possibles, l'importance accordée à chacune dépendent des contextes d'élevage, en particulier des modes de conduite du pâturage et de la pression de prédation. L'ensemble des éleveurs rencontrés a plébiscité les fonctions de localisation ou d'alerte aux limites, car tous avaient été confrontés un jour ou l'autre à des difficultés pour retrouver tout ou partie du troupeau ou à des inquiétudes sur le franchissement de zones cultivées, routes, zones dangereuses. Cependant, seuls les éleveurs ne pratiquant pas le gardiennage ressentaient un besoin d'information sur le comportement spatial des animaux et de leurs circuits de pâturage, pour pouvoir optimiser les aménagements (points d'abreuvement, clôtures, abris) et interventions pastorales (débroussaillages, garde ponctuelle). Dans les zones à forte pression de prédation, la fonction d'alerte était perçue comme potentiellement génératrice de stress tout en étant inadaptée pour éviter les dommages, du fait du délai d'intervention. Quel que soit la conduite du pâturage, l'enregistrement automatisé de la position du troupeau au fil des jours pourrait faciliter le remplissage du carnet de pâturage.

Ces résultats montrent que des capteurs embarqués sur les animaux associant GPS et accéléromètre peuvent accompagner la mise en œuvre

du pâturage sur parcours en répondant à des besoins concrets des éleveurs. L'enjeu majeur pour tous, est de réduire le temps et la pénibilité de leur travail, en limitant le temps de recherche du troupeau, en le sécurisant par rapport à des risques identifiés et éventuellement en améliorant la gestion des végétations « par la dent » de l'animal (évitant ainsi des entretiens mécaniques). En termes pratiques, les éleveurs ont tous été favorables au développement d'applications sur smartphone, et ont exprimé des craintes principalement par rapport au coût de ces technologies, au fonctionnement effectif (problèmes de réseau ou d'autonomie des batteries), ou encore à la fréquence d'alertes inutiles, provoquant un stress supplémentaire.

2.2. Spécifications fonctionnelles et techniques d'un outil adapté au pâturage sur parcours

Suite à la phase d'enquêtes, et parallèlement aux développements technologiques, une première version de cahier des charges fonctionnel répondant aux besoins exprimés a été rédigée. A partir de scénarii d'utilisation concrets, ce cahier des charges a été présenté sur chaque zone d'étude à de petits groupes d'éleveurs et/ou techniciens et discuté afin de l'évaluer et de recueillir des propositions de modifications. L'exercice s'est avéré plus aisé pour les fonctions associées à la géolocalisation, la technologie GPS étant mieux connue et maîtrisée par ces publics que l'accéléromètre. Une fois le cahier des charges fonctionnel finalisé, un cahier des charges technique a été rédigé, prenant notamment en compte les contraintes d'environnement spécifiques des élevages pastoraux.

Ce travail a abouti à la proposition d'un outil d'utilisation relativement simple, avec 3 paramétrages contraints (**tableau 3**), afin de maximiser la prise en main et l'appropriation par les utilisateurs.

Ces 3 paramétrages jouent sur la fréquence d'acquisition des données, afin d'optimiser le rapport

		Paramétrage		
		Mode « complet »	Mode « intermédiaire »	Mode « localisation / calendrier de pâturage »
Fréquence d'acquisition		5 mn	30 mn	4 h
Fonctionnalité	Localisation des animaux	X	X	X (approximatif)
	Alerte aux franchissements de limites	X	-	-
	Circuits de déplacement et activités des animaux	X	X (simplifiés)	-
	Budget temporel accordé à un comportement donné	X	-	-
	Calendrier de pâturage	X	X	X
	Alerte aux mouvements anormaux	-	-	-

TABLEAU 3 : Les trois paramétrages proposés dans le cadre du projet CLOChÈTE pour un outil d'aide à la conduite du pâturage sur parcours (un « X » figure une option disponible du paramétrage, un « - » une option non disponible)

Table 3 : Three parameters proposed by the CLOChÈTE project for guiding rangeland-based grazing operations

information / autonomie de la batterie, ainsi que sur les fonctionnalités offertes en fonction des besoins des utilisateurs. Il est à noter que la fonctionnalité d'alerte pour comportement anormal n'a finalement pas été proposée, car elle est complexe à paramétrer et a suscité un intérêt limité auprès des éleveurs enquêtés. Le mode « complet », avec un enregistrement toutes les 5 minutes de la localisation des animaux permet une connaissance exhaustive des surfaces réellement utilisées (pâturage, repos, chôme) par le troupeau, avec cependant une connaissance très limitée de certaines surfaces simplement explorées. Une localisation toutes les 30 minutes ne semble pas un paramétrage adapté pour activer la fonctionnalité d'alerte aux limites, ni des budgets temps par comportement. Le paramétrage « localisation / calendrier de pâturage », bien que limité dans ses fonctions, est utile dans la mesure où il est très économe en batterie et est donc adapté dans le cas de troupeaux non gardés sur des estives non confrontées à des risques particuliers. L'économie en énergie est appréciable pour l'éleveur qui peut changer ses batteries et donc attraper les animaux porteurs moins fréquemment.

2.3. Choix des animaux à équiper

Les coûts financiers (en lien avec la taille des troupeaux), le potentiel impact environnemental mais également le souhait de limiter la charge que peut représenter l'analyse de multiples jeux de données, conduisent à écarter la perspective d'équiper chaque individu d'un troupeau en modules numériques. Se pose alors la question du choix des animaux à équiper, autrement dit certains individus au sein d'un troupeau seraient-ils d'avantage représentatifs d'un comportement donné ? Pour répondre à cette question et favoriser le déploiement de l'outil en élevages pastoraux, nous avons mis en place une méthode comportementale d'identification des individus les plus représentatifs des déplacements du troupeau.

Cette méthode, développée chez les ovins, s'est basée sur la connaissance de la structure sociale de deux troupeaux conduits sur des surfaces de parcours au sein de domaines expérimentaux : le Domaine du Merle de l'Institut Agro (n = 53 ovins allaitants de race Mérinos d'Arles) et l'Unité Expérimentale de La Fage (n = 20 ovins allaitants de race Romane). Cette structure sociale a été établie grâce à des enregistrements fréquents (f = 5 min), continus et sur de longues durées (≈ 1 à 2 mois), des proximités interindividuelles à l'aide de capteurs radiofréquences (localisation relative des individus). Elle a été ensuite croisée avec des observations du comportement des animaux sur quatre critères : (i) la tendance à l'initiation des déplacements du troupeau (leaders), (ii) l'accès prioritaire à une ressource appétente (dominants), (iii) la propension à explorer une nouvelle zone de pâturage (explorateurs) et enfin (iv) la tendance à se retrouver en tête des déplacements provoqués (familiers).

Nous avons ainsi pu déterminer que les individus les plus centraux du réseau social de chaque groupe, donc les plus représentatifs des déplacements du troupeau car davantage « connectés » à un grand nombre d'individus en termes de distances relatives, étaient les individus explorateurs et leaders. Ils constituent des catégories d'individus à équiper en priorité d'outils de suivis des déplacements et peuvent être aisément repérés à travers des observations en élevage, en particulier au pâturage. Cette rationalisation du choix des animaux à équiper permet d'optimiser le fonctionnement de l'outil en optimisant la fiabilité de l'information traitée.

Les cahiers des charges, principes de fonctionnement des outils et algorithmes associés développés dans le cadre du projet CLOChêTE seront repris dans un futur projet qui aura pour objectif principal le déploiement opérationnel de l'outil.

Conclusion

Dans le flux toujours croissant des progrès technologiques visant à créer des plateformes d'aide à la décision capables de combiner des informations hétérogènes pour apporter une assistance locale précise, les contraintes propres aux systèmes d'élevages basés sur le pâturage « extensif » constituent un goulot d'étranglement qui freine ces déploiements. Plusieurs travaux récents suggèrent cependant qu'il est tout à fait possible d'envisager, dans les années à venir, des outils d'aide à la décision adaptés au pastoralisme, en particulier en mobilisant des capteurs de mouvement et de localisation embarqués sur les animaux. La diversité des conditions de pâturage et des contraintes associées nécessite toutefois de proposer une palette de fonctions, et différents paramétrages. De plus, les indicateurs produits visent à enrichir les informations accessibles à l'éleveur, pour que celui-ci puisse prendre la décision correspondant au meilleur compromis acceptable pour lui, à ce moment-là. Une automatisation des décisions de conduite n'est pas envisageable, car la diversité des enjeux associés au pastoralisme ne permet pas de dégager une fonction d'optimisation unique.

Finalement, les freins au déploiement d'outils numériques dans les élevages pastoraux peuvent être perçus comme une opportunité de poser les fondations d'une transition numérique vertueuse, au service de l'expertise des éleveurs et répondant à leurs besoins. Nous considérons que le succès des futures solutions commerciales dépendra de développements concertés entre acteurs complémentaires, depuis la recherche jusqu'aux utilisateurs en passant par les entreprises concevant des outils commercialisables. Ce modèle collaboratif semble indispensable aujourd'hui pour pouvoir proposer rapidement des solutions technologiques permettant d'accompagner la nécessaire adaptation des pratiques de pâturage au contexte actuel, globalement contraignant notamment pour le pastoralisme.

Remerciements

Le projet CLOChÈTE piloté par l'Institut de l'Élevage avec comme partenaires Aguilà Technologies, l'ESTIA, l'Institut Agro – Montpellier SupAgro, la ferme expérimentale de Carmejane, le Cerpam, la Chambre d'agriculture 64 et la Chambre régionale d'agriculture Occitanie, était financé sur fonds Casdar.

Les auteurs remercient les membres des groupes de travail qui ont participé aux enquêtes menées dans le cadre du projet. Les équipes des domaines expérimentaux ayant participé au projet à savoir la ferme expérimentale de Carmejane, l'Unité Expérimentale de La Fage et le domaine du Merle, sont également remerciées pour leur investissement et les excellents soins apportés aux animaux. Pour leurs conseils et suggestions, deux relecteurs anonymes sont également sincèrement remerciés. Les auteurs sont également reconnaissants envers les animateurs de l'UMT Pasto, en particulier Marie-Odile Nozières-Petit, pour leur soutien.

Article accepté pour publication le 08 mars 2021

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alvarenga F.A.P., Borges I., Palković L., Rodina J., Oddy V.H. et Dobos R.C., (2016). "Using a three-axis accelerometer to identify and classify sheep behaviour at pasture.", *Applied Animal Behaviour Science* 181: 91-99.
- Anderson D. M., Winters C., Estell R.E., Fredrickson E.L., Doniec M., Detweiler C., Rus D., James D. et Nolen B., (2012). "Characterising the spatial and temporal activities of free-ranging cows from GPS data.", *The Rangeland Journal* 34(2): 149-161.
- Arnott G., Ferris C.P. et O'Connell N.E., (2016). "Review: welfare of dairy cows in continuously housed and pasture-based production systems.", *animal* 11(2): 261-273.
- Barwick J., Lamb D. W., Dobos R., Welch M., Schneider D. and Trotter M., (2020). "Identifying Sheep Activity from Tri-Axial Acceleration Signals Using a Moving Window Classification Model.", *Remote Sensing* 12(4): 646.
- Bocquier F., Debus N., Lurette A., Maton C., Viudes G., Moulin C.-H. and Joven M., (2014). "Élevage de précision en systèmes d'élevage peu intensifiés.", *INRA Prod. Anim.*, 27(2): 101-112.
- Bocquier F. et Joven M. (2017). "Quelle place pour l'élevage de précision dans le contexte du bassin méditerranéen ?", *Watch Letter - Lettre de veille du CIHEAM* (38): 8.
- Brown D. J., Savage D. B., Hinch G. N. et Hatcher S., (2015). "Monitoring liveweight in sheep is a valuable management strategy: a review of available technologies.", *Animal Production Science* 55(4): 427-436.
- Buerkert A. et Schlecht E., (2009). "Performance of three GPS collars to monitor goats' grazing itineraries on mountain pastures.", *Computers and Electronics in Agriculture* 65(1): 85-92.
- Caja G., Castro-Costa A., Salama A. A. K., Oliver J., Baratta M., Ferrer C. et Knight C. H., (2020). "Sensing solutions for improving the performance, health and wellbeing of small ruminants.", *Journal of Dairy Research* 87(S1): 34-46.
- Cardoso A., Pereira J., Nóbrega L., Gonçalves P., Pedreiras P. and Silva V., (2018). "SheepIT: Activity and Localization Monitoring.", *INForum 2018 - Simpósio de Informática*. Coimbra.
- Coates D. and Penning P., (2000). "Measuring animal performance.", IN: Field and laboratory methods for grassland and animal production research. Eds. t'Mannetje, L. & Jones, RM, *CABI Publishing*, New York, USA.
- D'Ottavio P., Francioni M., Trozzo L., Sedić E., Budimir K., Avanzolini P., Trombetta M. F., Porqueddu C., Santilocchi R. and Toderi M., (2018). "Trends and approaches in the analysis of ecosystem services provided by grazing systems: A review.", *Grass and Forage Science* 73(1): 15-25.
- Delagarde R. et Lamberton P., (2015). "Daily grazing time of dairy cows is recorded accurately using the Lifecorder Plus device.", *Applied Animal Behaviour Science* 165: 25-32.
- Delagarde R., Prache S., D'hour P. and Petit M., (2001). "Ingestion de l'herbe par les ruminants au pâturage.", *Fourrages* (166): 189-212.
- Dickinson R. A., Morton J. M., Beggs D. S., Anderson G. A., Pyman M. F., Mansell P. D. and Blackwood C. B., (2013). "An automated walk-over weighing system as a tool for measuring liveweight change in lactating dairy cows.", *Journal of Dairy Science* 96 (7): 4477-4486.
- Dos Reis B. R., Fuka D. R., Easton Z. M. and White R. R., (2020). "An open-source research tool to study triaxial inertial sensors for monitoring selected behaviors in sheep.", *Translational Animal Science* 4(4).
- Dutta R., Smith D., Rawnsley R., Bishop-Hurley G., Hills J., Timms G. and Henry D., (2015). "Dynamic cattle behavioural classification using supervised ensemble classifiers.", *Computers and Electronics in Agriculture* 111: 18-28.
- Ganskopp D., (2001). "Manipulating cattle distribution with salt and water in large arid-land pastures: a GPS/GIS assessment.", *Applied Animal Behaviour Science* 73(4): 251-262.
- Giovanetti V., Cossu R., Molle G., Acciaro M., Mameli M., Cabiddu A., Serra M. G., Manca C., Rattu S. P. G., Decandia M. and Dimauro C., (2020). "Prediction of bite number and herbage intake by an accelerometer-based system in dairy sheep exposed to different forages during short-term grazing tests.", *Computers and Electronics in Agriculture* 175: 105582.
- Giovanetti V., Decandia M., Molle G., Acciaro M., Mameli M., Cabiddu A., Cossu R., Serra M. G., Manca C., Rattu S. P. G. and Dimauro C., (2017). "Automatic classification system for grazing, ruminating and resting behaviour of dairy sheep using a tri-axial accelerometer.", *Livestock Science* 196: 42-48.
- González-García E., Alhamada M., Pradel J., Douls S., Parisot S., Bocquier F., Menassol J. B., Llach I. and González L. A., (2018). "A mobile and automated walk-over-weighing system for a close and remote monitoring of liveweight in sheep.", *Computers and Electronics in Agriculture* 153: 226-238.
- González L. A., Bishop-Hurley G. J., Handcock R. N. and Crossman C., (2015). "Behavioral classification of data from collars containing motion sensors in grazing cattle.", *Computers and Electronics in Agriculture* 110: 91-102.
- Handcock R. N., Swain D. L., Bishop-Hurley G. J., Patison K. P., Wark T., Valencia P., Corke P. and O'Neill C. J., (2009). "Monitoring Animal Behaviour and Environmental Interactions Using Wireless Sensor Networks, GPS Collars and Satellite Remote Sensing", *Sensors (Basel)* 9(5): 3586-3603.
- Jung T. S., Hegel T. M., Bentzen T. W., Egli K., Jessup L., Kienzler M., Kuba K., Kukka P. M., Russell K., Sutor M. P. and Tatsumi K., (2018). "Accuracy and performance of low-feature GPS collars deployed on bison <i>Bison bison</i> and caribou <i>Rangifer tarandus</i>.", *Wildlife Biology* 2018(1).
- Kilgour R. J., (2012). "In pursuit of "normal": A review of the behaviour of cattle at pasture.", *Applied Animal Behaviour Science* 138(1): 1-11.
- Kondo S., (2011). "Recent progress in the study of behavior and management in grazing cattle.", *Animal Science Journal* 82(1): 26-35.
- Lebreton A., Le Cozler Y., Guilloux M. and Faverdin P., (2020). "Estimating variations of ruminal contents using 3D images of the abdomen.", *25èmes Rencontres Recherches Ruminants (3R)*. Paris, France: 60.
- Menassol J.-B., Kriszt T., Lurette A., Gonzalez-Garcia E., Laclef E., Besche G., Guyonneau J.-D., Montier D., Bouquet P.-M., Bonnafé G., Douls S., Durand C., Parisot S. and Debus N., (2020). "From the sensor to the final user: promoting the development of precision livestock farming in pastoral production systems.", *25èmes Rencontres Recherches Ruminants (3R)*. Paris, France: 28-32.
- Moreau M., Siebert S., Buerkert A. and Schlecht E., (2009). "Use of a tri-axial accelerometer for automated recording and classification of goats' grazing behaviour.", *Applied Animal Behaviour Science* 119(3): 158-170.
- Mysterud A., Rekdal Y., Loe L. E., Angeloff M., Mørbæk R., Holand Ø. and Strand G.-H., (2014). "Evaluation of Landscape-Level Grazing Capacity for Domestic Sheep in Alpine Rangelands.", *Rangeland Ecology & Management* 67(2): 132-144.
- Nielsen P. P., (2013). "Automatic registration of grazing behaviour in dairy cows using 3D activity loggers.", *Applied Animal Behaviour Science* 148(3): 179-184.
- Pereira G. M., Heins B. J. and Endres M. I., (2018). "Technical note: Validation of an ear-tag accelerometer sensor to determine rumination, eating, and activity behaviors of grazing dairy cattle.", *Journal of Dairy Science* 101(3): 2492-2495.
- Peyraud J. L. and Delagarde R., (2013). "Managing variations in dairy cow nutrient supply under grazing.", *Animal* 7: 57-67.
- Riaboff L., Couvreur S., Madouasse A., Roig-Pons M., Aubin S., Massabie P., Chauvin A., Bédère N. and Plantier G., (2020). "Use of Predicted Behavior from Accelerometer Data Combined with GPS Data to Explore the

- Relationship between Dairy Cow Behavior and Pasture Characteristics.", *Sensors* 20(17): 4741.
- 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* 67(1): 80-84.
- Rodríguez-Ortega T., Oteros-Rozas E., Ripoll-Bosch R., Tichit M., Martín-López B. and Bernués A., (2014). "Applying the ecosystem services framework to pasture-based livestock farming systems in Europe.", *Animal* 8(8): 1361-1372.
- Rombach M., Südekum K. H., Münger A. and Schori F., (2019). "Herbage dry matter intake estimation of grazing dairy cows based on animal, behavioral, environmental, and feed variables.", *Journal of Dairy Science* 102(4): 2985-2999.
- Rutter S. M., Beresford N. A. and Roberts G., (1997). "Use of GPS to identify the grazing areas of hill sheep.", *Computers and Electronics in Agriculture* 17(2): 177-188.
- Sakai K., Oishi K., Miwa M., Kumagai H. and Hirooka H., (2019). "Behavior classification of goats using 9-axis multi sensors: The effect of imbalanced datasets on classification performance.", *Computers and Electronics in Agriculture* 166: 105027.
- Shalloo L., O' Donovan M., Leso L., Werner J., Ruelle E., Geoghegan A., Delaby L. and O'Leary N., (2018). "Review: Grass-based dairy systems, data and precision technologies.", *animal* 12(s2): s262-s271.
- Sheng H., Zhang S., Zuo L., Duan G., Zhang H., Okinda C., Shen M., Chen K., Lu M. and Norton T., (2020). "Construction of sheep forage intake estimation models based on sound analysis.", *Biosystems Engineering* 192: 144-158.
- Simanungkalit G., Hegarty R. S., Cowley F. C. and McPhee M. J., (2020). "Evaluation of remote monitoring units for estimating body weight and supplement intake of grazing cattle.", *Animal* 14: s332-s340.
- Tomkins N. and O'Reagain P., (2007). "Global positioning systems indicate landscape preferences of cattle in the subtropical savannas.", *The Rangeland Journal* 29(2): 217-222.
- Verdon M., Lee C., Marini D. and Rawnsley R., (2020). "Pre-Exposure to an Electrical Stimulus Primes Associative Pairing of Audio and Electrical Stimuli for Dairy Heifers in a Virtual Fencing Feed Attractant Trial.", *Animals* 10(2): 217.
- Williams D. M., Dechen Quinn A. and Porter W. F., (2012). "Impact of Habitat-Specific GPS Positional Error on Detection of Movement Scales by First-Passage Time Analysis.", *PLOS ONE* 7(11): e48439.
- Williams M. L., Mac Parthaláin N., Brewer P., James W. P. J. and Rose M. T., (2016). "A novel behavioral model of the pasture-based dairy cow from GPS data using data mining and machine learning techniques.", *Journal of Dairy Science* 99(3): 2063-2075.
- Xu H., Li S., Lee C., Ni W., Abbott D., Johnson M., Lea J. M., Yuan J. and Campbell D. L. M., (2020). "Analysis of Cattle Social Transitional Behaviour: Attraction and Repulsion.", *Sensors* 20(18): 5340.