

Du capteur à l'utilisateur : accompagner le développement d'un élevage de précision par l'intégration d'outils numériques en systèmes d'élevage à composante pastorale

MENASSOL J-B. (1), KRISZT T. (1), LURETTE A. (1), GONZALEZ-GARCIA E. (1), LACLEF E. (1), BESCHE G. (1), GUYONNEAU J-D. (1), MONTIER D. (1), BOUQUET P-M. (1), BONNAFÉ G. (2), DOULS S. (2), DURAND C. (2), PARISOT S. (2), DEBUS N. (1)

(1) SELMET, Univ Montpellier, INRAE, CIRAD, L'Institut Agro – Montpellier SupAgro, Montpellier, France

(2) INRAE UE321 La Fage, Roquefort-sur-Soulzon, France

RESUME

Dans les systèmes d'élevages à composante pastorale, le développement d'outils numériques au service d'un élevage de précision est contraint par certaines caractéristiques internes ou environnementales. Le nombre d'entreprises proposant des solutions est ainsi limité avec une offre peu variée tout en étant centrée vers des technologies peu innovantes. Les enjeux sont pourtant importants en termes sociétaux mais également pour améliorer les performances des systèmes de production ou diminuer la pénibilité du travail. Afin d'identifier des pistes de développement, nous proposons des retours d'expériences pratiques déployés le long d'un chemin logique depuis l'adoption du capteur jusqu'aux dernières étapes de maturation d'un outil innovant. Ce chemin est construit autour de trois outils numériques développés au sein de notre laboratoire.

Nos expériences et résultats mettent l'accent sur la nécessité d'un déploiement itératif des outils numériques pour ajuster au mieux leurs performances. Nous identifions également les besoins de développement des infrastructures, essentiellement de communication, comme un point prioritaire et proposons des pistes de développement. Enfin, l'implication de l'ensemble des acteurs dans le processus d'innovation peut être guidée par des outils de modélisation participative visant à faciliter l'acceptabilité des outils numériques développés.

Un enjeu majeur de la numérisation de ces systèmes de production reste la formation de l'ensemble des acteurs pour satisfaire des exigences de compétences techniques et transversales de plus en plus élevées.

From the sensor to the final user: promoting the development of precision livestock farming in pastoral production systems

MENASSOL J-B. (1), KRISZT T. (1), LURETTE A. (1), GONZALEZ-GARCIA E. (1), LACLEF E. (1), BESCHE G. (1), GUYONNEAU J-D. (1), MONTIER D. (1), BOUQUET P-M. (1), BONNAFÉ G. (2), DOULS S. (2), DURAND C. (2), PARISOT S. (2), DEBUS N. (1)

(1) SELMET, Univ Montpellier, INRAE, CIRAD, L'Institut Agro – Montpellier SupAgro, Montpellier, France

SUMMARY

In pastoral livestock systems, the development of digital tools involved in precision livestock farming is constrained by some main features of their production system as well as their environment. Therefore, few companies are able to propose technologies that suit demand in the long-term. However, such tools might significantly contribute to alleviate work hardness and/or improve economic performances. In order to identify solutions, we propose a compilation of feedbacks from practical experiences that follow a logical path from the digital sensor to the final development stages of an innovative tool. This path is built around three digital tools developed in our laboratory.

Our experiences and results highlight the need for iterative deployment of digital tools to finely adjust their performances. We also identify the need of well-designed infrastructures, essentially communication, as a top priority. Finally, the involvement of stakeholders in the innovation process can be achieved by participatory modelling tools in order to improve the acceptability of the digital tools that are developed.

A major challenge in the digitization of these production systems lies in the training of all stakeholders to meet the increasingly high technical and generic skills requirements.

INTRODUCTION

Les outils et principes d'application de l'élevage de précision visent à contribuer au pilotage des systèmes de production notamment par l'identification prédictive et la correction des facteurs influençant les processus biotiques ou abiotiques à l'origine de perturbations physiologiques et comportementales des animaux d'élevage. Ces outils se basent largement sur l'utilisation de technologies numériques, un secteur d'investissement industriel massif. Quels que soient les systèmes considérés, une condition essentielle de réussite des innovations associées à ces technologies tient dans l'existence d'une infrastructure capable de soutenir ces déploiements : depuis l'optimisation des performances techniques des capteurs jusqu'à l'atteinte des objectifs de retour sur investissements.

Dans le secteur agricole la qualité de ces infrastructures reste hétérogène. Ainsi, les systèmes d'élevages de ruminants à composante pastorale peuvent cumuler des contraintes qui

limitent l'implantation et le succès de solutions commerciales. A l'échelle des élevages, la mobilité des animaux et la situation géographique imposent le recours à des solutions embarquées capables de résister aux conditions de l'environnement tout en optimisant l'autonomie d'acquisition, les capacités de stockage et de transmission de données. A l'échelle des territoires, l'hétérogénéité des systèmes de production et des capacités à investir des éleveurs, ainsi que la faible densité du tissu industriel, limitent une offre commerciale adaptée. Les éleveurs sollicitent pourtant des solutions permettant d'améliorer les performances de leurs systèmes de production ou encore d'alléger la charge ainsi que la pénibilité de leur travail (Hostiou *et al.*, 2014).

Face à cette problématique nous proposons des éléments de réponse techniques et scientifiques articulés en trois parties, chacune construite autour d'une solution technologique développée au sein de notre laboratoire ; leur enchaînement illustre un chemin d'accompagnement vers l'intégration de solutions numériques en systèmes d'élevage à composante

pastorale, depuis l'invention du module embarqué sur animal jusqu'à l'innovation commercialisable.

1. DES COMPOSANTS ÉLECTRONIQUES JUSQU'AU DÉPLOIEMENT DE L'OUTIL

Le développement d'une solution technologique dédiée est ici illustré par l'invention, au sein de notre laboratoire, d'un outil de détermination des proximités spatiales entre individus. Sa principale fonction attendue est de fournir une approximation, la plus précise possible, des distances séparant chaque individu au sein d'un troupeau avec des caractéristiques techniques correspondant à nos besoins. Il s'agira *in fine* de déterminer le réseau social des individus, basé sur ces proximités spatiales, pour aborder de façon innovante le rôle de cette organisation à l'échelle du troupeau. Nos principaux domaines d'applications sont l'étude du comportement et l'amélioration de la prise en compte du bien-être animal en élevages à forte composante pastorale.

Un tel niveau de développement se justifie en général par la spécificité des besoins, la disponibilité des technologies associées et l'offre du marché en solutions commerciales adaptées ou adaptables. Sur les secteurs peu concurrentiels, ces paramètres peuvent conduire à des prix par module électronique élevés ainsi qu'une conception non adaptée à un suivi continu de l'animal en extérieur tout en maintenant des performances satisfaisantes. La conception d'une solution opérant de façon optimale doit alors être guidée par un dialogue entre objectifs biologiques, contraintes environnementales et offre technologique. Ce dialogue fait naître, par itérations successives, les principales caractéristiques techniques de l'outil à savoir :

i) **Principaux composants** – l'outil est construit autour d'un capteur radiofréquence (Synapse Wireless RF266PC1 – Alabama, USA) dont le protocole de communication appartient à la famille des *Low Rate Wireless Personal Area Network* (LR WPAN) associé à un nano-ordinateur assurant principalement les fonctions de stockage et transmission des données.

ii) **Architecture** – un réseau autonome d'échanges de signaux radios entre des capteurs dits mobiles (embarqués sur les animaux) dont l'activité est pilotée par un capteur maître (pouvant être fixe ou embarqué).

iii) **Portée** – il faut ici considérer la portée des échanges entre capteurs mobiles (de l'ordre du kilomètre en l'absence d'obstacles) et celle permettant de lier le réseau des capteurs mobiles aux ordres communiqués par le capteur maître (de l'ordre de 5 kilomètres en l'absence d'obstacles via l'adjonction d'une antenne externe).

iv) **Gestion des données** – le stockage des données est privilégié. Un module GPRS sollicite régulièrement le niveau de couverture du réseau pour transmettre l'ensemble des données accumulées depuis la dernière transmission réussie.

v) **Autonomie** – il s'agit d'identifier un compromis entre la durée optimale du suivi, le coût des batteries, leur poids, le nombre de cellules et la possibilité d'interventions sur le terrain pour le remplacement et la recharge des cellules. Notre objectif est d'atteindre une autonomie théorique pour l'outil de 2 mois.

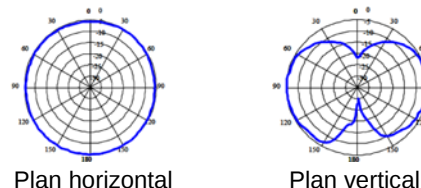
vi) **Déploiement opérationnel** – soit les moyens de préserver l'outil des effets de l'environnement (agressions mécaniques, conditions météorologiques, poussière, ...) tout en satisfaisant à l'architecture prévue (moyens d'embarquement sur l'animal non contraignants, limiter les obstacles à la transmission, ...). Une fois conduite cette réflexion sur les caractéristiques techniques d'un outil, il est nécessaire d'entamer un cycle de conception itératif entre les étapes de i) développement *in silico*, ii) mise au point en conditions contrôlées et iii) déploiement sur le terrain. Nous proposons ci-après trois considérations majeures à intégrer dans ce processus d'évaluation, correction et ajustement du fonctionnement d'un outil numérique.

1.1. DES DONNÉES CONSTRUCTEUR AUX PERFORMANCES RÉELLES

Tout capteur commercial est accompagné d'une fiche technique spécifiant ses capacités et ses performances. Le principe de fonctionnement de notre outil étant basé sur l'analyse de la qualité de communication entre capteurs, nous devons être particulièrement vigilants aux performances de l'antenne intégrée. Nous nous sommes particulièrement intéressés à son diagramme de rayonnement qui, selon la distance et l'orientation respective des capteurs, peut impacter la qualité de la communication. Les données du constructeur sont présentées dans la **Figure 1(a)**.

Le protocole a consisté à positionner un capteur au centre et 4 capteurs sur le périmètre d'un cercle virtuel, aux extrémités de deux diamètres orthogonaux. Le capteur central était monté sur un moteur pas à pas programmé pour effectuer une rotation de 360° sur son axe pendant trois tours et à raison de 400 pas par tour. À l'initialisation, les antennes des capteurs sont alignées sur les diamètres en se faisant face. Tous les capteurs sont dans un même plan horizontal, à 70 cm du sol. Ce dispositif est répété pour des cercles de rayon 1, 3, 5 et 10 mètres. L'expérimentation a été conduite en extérieur sur terrain dégagé, en cherchant à minimiser les perturbations environnementales. Les résultats de qualité de communication en fonction de l'orientation sont présentés dans la **Figure 1(b)**. L'unité mesurée, la *Received Signal Strength Indication* (RSSI), est une mesure de la puissance de signal reçue (mesurée en dBm) donc corrélée aux distances physiques. Il est à noter que seule la deuxième rotation a été conservée pour limiter les perturbations liées au démarrage et à l'arrêt du moteur pas à pas.

(a)



(b)

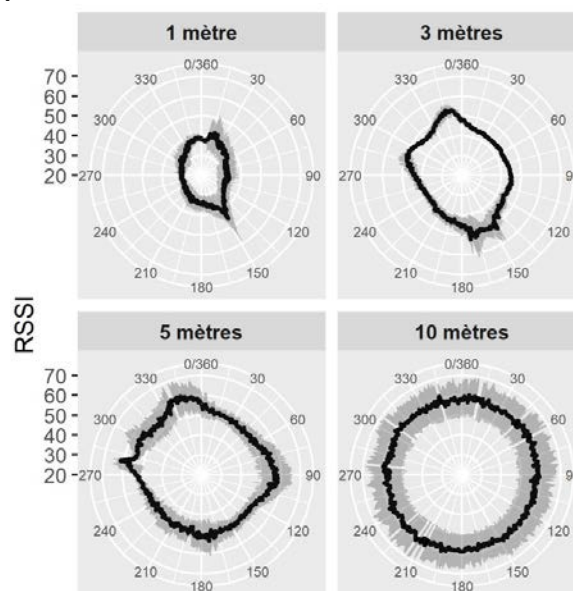


Figure 1 : (a) Données constructeur du diagramme de radiation de l'antenne du capteur selon le plan (b) RSSI (moyenne ± écart-type) pour l'ensemble des capteurs et par pas en fonction des distances testées

Nous constatons que, pour des faibles distances entre 1 et 3 mètres, l'effet du diagramme de rayonnement de l'antenne du capteur est important. Pour une même distance physique, l'orientation respective des antennes des capteurs induit une variation conséquente de la valeur RSSI échangés (RSSI médian à 1m : $33,56 \pm 5,04$ – RSSI médian à 3m : $44,52 \pm 4,27$) qui, au-delà, est négligeable. Ayant réalisé les

expérimentations selon le plan horizontal de l'antenne, nous concluons que les caractéristiques du diagramme de radiation affichées par le constructeur ne sont pas valables dans ces faibles distances d'échanges entre capteurs. En conditions réelles ce phénomène entraîne une diminution inattendue de la précision des proximités entre individus proches, puisque leurs orientations respectives au moment de la communication entre capteurs ne peuvent être déterminées. En pratique il s'agira d'associer aux faibles valeurs de RSSI de plus grands intervalles de confiance et de limiter la précision de l'outil dans ces faibles valeurs.

1.2 PRINCIPES GÉNÉRAUX DE PROGRAMMATION

Une fois les performances de l'outil calibrées en conditions environnementales contrôlées, il s'agit d'optimiser son fonctionnement pour satisfaire aux objectifs de suivi. La voie à privilégier passe par la conception d'un programme exploitant au mieux ses caractéristiques techniques, éventuellement via un langage de programmation bas-niveau.

Dans notre cas, le choix du capteur embarqué a été guidé par l'objectif biologique d'obtenir un suivi fréquent des proximités à un instant donné entre un grand nombre d'animaux. Sa transcription technologique consiste à établir des communications synchronisées entre un grand nombre de capteurs tout en évitant les phénomènes de saturation de réseau et en étant le plus économe possible en énergie. Il s'agit donc d'une combinaison entre i) un protocole de communication capable de former un réseau maillé synchrone entre capteurs qui soit peu énergivore et ii) une configuration matérielle capable de supporter des cycles réguliers comportant de courts moments de transmission et des moments de veille électrique profonde d'une durée paramétrable. En contrepartie des faibles coûts énergétiques associés aux transmissions, la portée de communication des dispositifs reste limitée. Le programme développé visait à tirer avantageusement partie du fonctionnement du protocole LR WPAN. Nous proposons ci-après une déclinaison de ses principales procédures.

Le nœud maître était chargé de coordonner le cycle d'activité des nœuds mobiles via l'envoi d'un signal de balise contenant les ordres de transitions entre périodes de transmission et périodes de veille électrique. Si la redondance des communications entre capteurs assure une fiabilité de transmission, elle était toutefois limitée pour éviter de congestionner le réseau. En vue d'atteindre les nœuds mobiles les plus éloignés, et parer ainsi à la limitation de la portée de transmission, chaque nœud mobile pouvait constituer un relais de transmission du signal de balise vers ses voisins les plus proches. En cas de rupture de contact, un nœud isolé était programmé pour rentrer de façon autonome dans un nouveau cycle d'activité impliquant des périodes de veille prolongées suivies de courtes périodes d'interrogation du réseau. Afin de limiter les risques de collision, les transmissions de données de communications entre capteurs étaient réparties de façon discrète et aléatoire sur une fenêtre temporelle limitée. N'importe quel nœud mobile en liaison directe avec le nœud maître pouvait prendre en charge la transmission des données du réseau entier vers ce dernier. Ainsi le nœud maître assurait un rôle de centralisation du stockage de ces données, évitant l'adjonction d'un support physique de mémoire aux nœuds mobiles.

Les performances du programme sur le comportement de l'outil ont pu être appréciées à l'aide d'un énergiemètre. Cet outil a permis la réalisation, en laboratoire, de tests de consommation des nœuds mobiles lors de leur cycle d'activité. Pour ce test 10 nœuds mobiles étaient présents sur le réseau, dont un relié à l'énergiemètre, à des distances du nœud maître allant de 1 à 10 mètres. Le signal de balise contrôlait des périodes de transmission de 10 secondes pour des périodes de veille électrique de 20 secondes. En moyenne, sur un échantillon de 10 cycles, le collier consommait $24,25 \pm 11,70$ mA (min : 2,51 mA – max : 61,61 mA) pendant sa

période de transmission contre moins de 102 μ A (limite de détection de notre outil) lors de sa phase de veille électrique. Les résultats de ce test nous a permis d'ajuster le dimensionnement des batteries pour atteindre les objectifs d'autonomie souhaités (2 mois avec une fréquence de transmission $f = 5$ minutes). Il s'agissait d'un dimensionnement optimisé pour les nœuds mobiles, afin de limiter le poids embarqué sur l'animal, soit une batterie de 9,6 Wh (3,2 V nominaux et 3000 mAh théoriques). La batterie du nœud maître était volontairement surdimensionnée pour permettre plusieurs cycles de suivi, soit une batterie de 295,5 Wh (12,6 V nominaux et 23,45 Ah théoriques).

1.3 COMPORTEMENT DE L'OUTIL SUR LE TERRAIN

Depuis l'étape *in silico* en passant par les tests en conditions contrôlées, l'étape ultime de déploiement opérationnel de l'outil sur le terrain peut, à son tour, mettre en évidence des écarts importants entre performances théoriques / calculées et performances réalisées. Les systèmes d'élevage à composante pastorale offrent en effet des contraintes importantes pour l'intégrité des capteurs, d'autant plus lorsqu'ils sont embarqués, mais également pour l'outil numérique dans son ensemble : faible ou hétérogène couverture des réseaux classiques de transmission, déplacements animaux au sein de grands troupeaux et sur de longues distances ne facilitant pas les interventions de maintenance, ...

Le moyen d'embarquement des capteurs sur l'animal n'est pas un élément à négliger, avec pour objectif qu'il s'adapte au comportement de l'animal sans le perturber. Les matières doivent être neutres pour l'animal et la régulation de ses fonctions physiologiques mais également pour les technologies embarquées (perturbations magnétiques, ...). Le moyen d'embarquement doit respecter la physiologie de l'animal et ne pas le mettre en danger en cas de chocs ou autre accident voire lors des manipulations. Le design global doit faciliter la mise en place, le fonctionnement, les interventions de maintenance et la réutilisation des dispositifs. Enfin, la robustesse de l'ensemble doit maintenir des conditions de fonctionnement optimales à moyen / long terme face aux agressions physiques animales et environnementales. En cas de perte totale sur le terrain, les risques de pollution environnementale ne doivent pas être négligés ; des couleurs vives peuvent faciliter la récupération et limiter ce problème.

Pour illustrer nos propos, nous pouvons faire appel aux notes de maintenance d'un de nos premiers déploiements à grande échelle : 49 ovins ont été suivis pendant 1 mois avec une fréquence de transmission $f = 5$ minutes en conditions de plein air intégral et sans interventions humaines. Les capteurs étaient embarqués via des colliers fabriqués au sein de notre laboratoire. Lors de la récupération des colliers nous avons constaté que 3 boîtiers avaient des défauts d'étanchéité, que 2 boîtiers de capteurs étaient décrochés et qu'un boîtier avait complètement disparu. Nous avons également comptabilisé 6 colliers avec des câbles débranchés ou arrachés, en règle général sous l'action directe et volontaire des animaux suivis. Concernant l'état des batteries des nœuds mobiles 94 % (46 sur 49) présentaient une tension nominale (i.e. $> 3,2$ V), les batteries des 3 autres colliers affichaient des valeurs extrêmes marquant une décharge totale (i.e. entre 0 et 1,5 V). Cela peut notamment s'expliquer par le fait qu'initialement, des nœuds mobiles hors de portée pouvaient être laissés sans instruction de mise en veille électrique, drainant ainsi rapidement leur batterie. La batterie du nœud maître avait de son côté perdu 85 % de sa capacité, une chute relativement importante par rapport à nos calculs qui a conduit à son redimensionnement. Déployer des outils sur le terrain fait apparaître des besoins de vérifications voire maintenance assez importants qui peuvent parfois pénaliser leurs performances, notamment les gains de temps bruts affichés pour certaines solutions commerciales. Cette étape de déploiement fait partie intégrante du cycle itératif de conception d'un outil numérique permettant d'atteindre un haut niveau de fidélité biologique et technique.

2. CONNECTER LES OUTILS NUMÉRIQUES À L'INTERNET

La transmission de données à distance ouvre la voie à l'exploitation des données acquises par les capteurs de terrain sans perturber l'environnement d'élevage tout en limitant les opérations humaines. Avec l'augmentation de la fréquence des transmissions, les suivis peuvent se faire à des intervalles de temps adaptés aux signaux étudiés jusqu'à notamment alimenter des systèmes de veille et d'alertes en temps réel (comportements anormaux, localisations hors-zone, ...). Toutefois, dans la plupart des systèmes d'élevages à composante pastorale, la nature des suivis et de l'environnement imposent de fortes contraintes techniques sur les systèmes de transmission. Une solution consiste alors à identifier des systèmes constituant le meilleur compromis entre 3 de leurs composantes principales : i) la consommation énergétique, ii) la portée et iii) le débit. Dans l'essentiel de nos cas d'études, les objectifs de longue autonomie de suivi et la réalité physique du terrain nous conduisent à privilégier ces deux premiers points. En ce qui concerne le débit des transmissions, pour que cette composante puisse être pénalisée, le choix de l'information à capter et sa traduction numérique doivent s'opérer sous l'égide des concepts de frugalité et parcimonie. En effet, afin d'emprunter des réseaux de transmission bas-débit, il faut viser à l'essentiel des informations communiquées avec une taille de fichiers minimale.

Ces principes ont dirigé un pan entier de l'Internet des Objets (IoT) – soit l'intégration au réseau Internet des données issues de systèmes électroniques en vue d'accélérer et optimiser leur intégration et visualisation – en basant leur infrastructure sur des protocoles de télécommunication à faible consommation énergétique, bas-débit et longue portée (LPWAN). Ces protocoles constituent une alternative prometteuse, permettant de dépasser les faibles performances des réseaux classiques, en intégrant des réseaux de télécommunication locaux et autonomes au réseau internet global. Leur déploiement en élevages à forte composante pastorale doit donc non seulement intégrer une réflexion i) sur les modalités de transmission des données et l'architecture du réseau, mais également ii) sur l'intégration, le traitement et la visualisation de données pouvant être issues d'une diversité de capteurs via une diversité de protocoles de télécommunication.

Ayant pour objectif d'illustrer cette réflexion, nous articulons cette partie autour du déploiement d'un module GPS embarqué pour le suivi des déplacements animaux. Afin de connecter ce module au réseau global, nous avons posé les bases d'une couche générique de module de transmission et d'intégration des données issues de capteurs fixes ou embarqués. Pour son développement nous avons particulièrement étudié les possibilités de connectivité offertes par un module LoRa utilisant le réseau LoRaWAN (un LPWAN) et les capacités d'intégration / visualisation d'une plateforme modulaire accessible via une application web dédiée.

2.1 DÉPLOIEMENT D'UN RÉSEAU LoRaWAN

En plus d'offrir un accès aux principales caractéristiques des LPWAN, la technologie LoRa et le protocole de communication associé facilitent leur déploiement à grande échelle en proposant de faibles coûts d'implantation, une interopérabilité via leur standardisation et une communauté d'utilisateurs active proposant divers outils de support. Les principales contraintes résident d'une part i) dans la capacité d'émission des données qui s'effectue par paquets, limités en nombre et en taille (242 octets maximum) et d'autre part ii) dans l'asymétrie du protocole entre messages montants (depuis les capteurs) et descendants (depuis l'utilisateur) qui a un impact sur la validation des transmissions et peut entraîner des pertes de paquets par collisions notamment. Afin de pallier à ces contraintes nous avons implémenté une méthode de retransmission espacée des données où les paquets à

transmettre sont conservés temporairement pour être renvoyés plusieurs fois dans l'heure suivante, optimisant ainsi les chances de transmissions réussies.

Le domaine expérimental INRAE de La Fage (12) constituait un site idéal pour nos premiers tests de déploiement. En effet, nous avons pu constater sur place que le niveau de couverture des réseaux mobiles classiques est très limitant pour nos objets connectés. De plus ce site bénéficie d'un bâtiment implanté au sein des parcelles de pâturage, relié au réseau électrique domestique ainsi qu'à internet ; il s'agissait d'un lieu de choix pour l'implantation de notre passerelle LoRaWAN (IMST iC880A – Kamp-Lintfort, Allemagne). Enfin la topographie contrastée du site (collines et vallons, plateaux caractéristiques des Causses du Larzac) permettait de tester la sensibilité du réseau aux effets des reliefs.

Le test de couverture du réseau a été conduit en programmant le module GPS pour établir des contacts réguliers ($f = 1$ min) de transmission de données vers la passerelle le long d'un tracé (ligne pointillée) à vitesse de marche (cf. **Figure 2**). Les résultats de ce test indiquent que les communications avec la passerelle ont pu s'établir jusqu'à 1,2 km de distance (points noirs – distance maximale testée de 1,5 km). En revanche, la couverture réseau apparaît très sensible aux effets du relief, les zones encaissées ou séparées d'un point altimétrique plus élevé par rapport à la passerelle n'étant pas couvertes (points blancs).

La piste principale à envisager pour contrebalancer ces effets serait de conduire une étude plus approfondie sur la configuration spatiale d'un réseau de passerelles, en raisonnant leur positionnement et leur puissance en fonction du terrain (incluant les points de convergence des animaux mais également des données altimétriques). Cela impliquerait d'autonomiser le fonctionnement électrique de passerelles relais par exemple avec l'adjonction de panneaux solaires. Il ne s'agit pas là d'adaptations simples à mettre en œuvre ce qui constitue un frein majeur au déploiement de ce genre de réseaux dans des contextes d'élevages comparables à nos conditions.

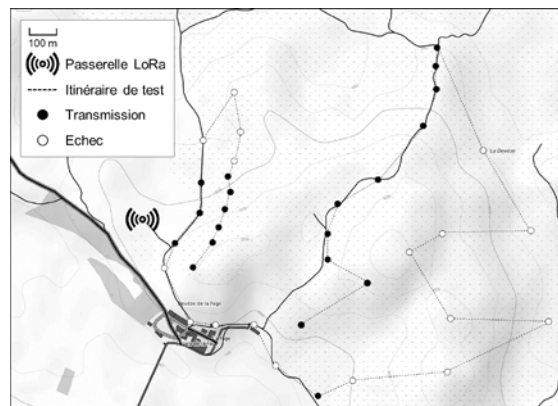


Figure 2 : Résultats du test de couverture du réseau LoRaWAN sur le domaine de La Fage (voir texte)

2.2 DÉVELOPPEMENT D'UNE PLATEFORME MODULAIRE

Le déploiement d'outils numériques doit inciter à réfléchir en amont sur les modalités d'intégration et combinaison des données issues d'une même famille et entre familles d'outils. En ce sens nous avons développé une plateforme web assurant le stockage, le traitement et la visualisation des données transmises et dont le caractère intégratif est favorisé par une conception modulaire : <https://clochete.supagro.inra.fr/> (Utilisateur & mot de passe : 3R2020).

Cette plateforme est basée sur un système de persistance des données NoSQL dite « sans schéma » capable d'accepter des données structurées ou non structurées. La plateforme intègre un outil de suivi des capteurs enregistrés ainsi qu'un fonctionnement cloisonné permettant un accès et une visualisation des données selon deux entrées, l'expérimentation (une liste de capteurs pour une période donnée) et l'utilisateur (liste d'expérimentations). D'un point de

vue de l'interface graphique, la navigation principale s'effectue par des volets qui correspondent à des outils. Cette conception est une première étape indispensable pour permettre l'interopérabilité des différents outils déployés sur un même site ; un point fréquemment mis en défaut par les utilisateurs à l'heure actuelle. Son caractère modulaire est un atout pour répondre à la diversité des besoins des utilisateurs qui peuvent choisir de suivre un animal ou un groupe d'animaux, sur différents sites et périodes, avec une sélection cohérente de données issues d'un ou plusieurs capteurs. En cela son rôle est crucial puisqu'elle parachève la fonctionnalité des outils numériques en reliant l'utilisateur aux différents capteurs.

3. LE (LONG) CHEMIN VERS L'INNOVATION

De l'invention d'un outil numérique à son adoption par les utilisateurs finaux, le chemin de l'innovation technologique implique un ensemble d'acteurs de compétences et intérêts différents. Autour d'un outil donné, ces compétences doivent être reconnus, complémentaires et les intérêts converger pour faciliter son acceptation. Cette dimension de l'innovation sera ici illustrée à travers le détecteur automatisé des chaleurs. Il s'agit d'un outil au centre d'une solution numérique destinée à constituer une alternative aux traitements hormonaux chez les petits ruminants.

Ainsi qu'illustré dans la **Figure 3**, le chemin de développement de cet outil a été ponctué par de nombreuses améliorations techniques soutenues par une variété de projets. Ce long temps de développement ne peut pas être uniquement expliqué par l'optimisation des performances techniques de l'outil, telle que présentée dans les deux parties précédentes. D'autres facteurs sont ainsi à prendre en compte comme l'acceptabilité de la solution par les utilisateurs finaux ou encore des événements conjoncturels pouvant moduler l'investissement des partenaires privés.

Dans notre exemple, l'acceptabilité de la solution a été fortement impactée par les contraintes liées à sa mise en œuvre et son utilisation pratique, mais également par la perception d'impacts négatifs liés à son adoption sur l'organisation du travail (Lurette *et al.*, 2016). Du côté des partenaires privés, leur engagement dans le projet s'est montré dépendant d'un ensemble de facteurs dont la combinaison a des effets difficilement prévisibles : évolution des attentes sociétales, changements législatifs, variation des politiques de sites et des orientations budgétaires visant à répondre aux besoins des filières. En l'état actuel du projet, nos efforts s'orientent principalement vers les utilisateurs finaux et l'amélioration de l'acceptabilité de la solution via deux voies principales.

Il s'agit tout d'abord d'améliorer la praticité d'usage de l'outil. Grâce à des améliorations portées sur la connectivité, les opérations manuelles sont limitées à leur strict minimum. De plus, les données générées sont automatiquement mises à disposition des utilisateurs sous forme d'indicateurs synthétiques via une application web dédiée présentant une interface graphique ergonomique. Ces améliorations sont validées de façon itérative par un groupe d'utilisateurs finaux et seront plus largement partagées au cours d'ateliers de terrain visant à obtenir de plus larges retours.

Concernant les modifications de pratiques qui sont associées à l'introduction de cet outil, la méthodologie privilégiée est celle de la modélisation. Cet outil permet notamment d'anticiper, via des simulations, l'impact de l'introduction de l'outil sur les différentes composantes du système d'élevage (biotechnique, économique, environnementale). Ces résultats permettent i) d'initier des réflexions avec les acteurs, ii) de faire émerger les éventuels points de tension et ainsi identifier les besoins d'accompagnement et iii) de confronter différents acteurs des filières concernées. L'élaboration conjointe de scénarios peut faire émerger des consensus et une appropriation facilitée des outils et de leurs modalités d'introduction.

Les modalités d'implication des utilisateurs finaux dans le processus d'innovation nous apparaissent comme étant centrale à sa réussite. Il s'agit notamment de s'accorder sur les performances globales attendues, associées à l'utilisation de l'outil. Quant à l'implication des partenaires privés, elle reste relative à leur capacité et/ou volonté d'adhésion au projet d'innovation.

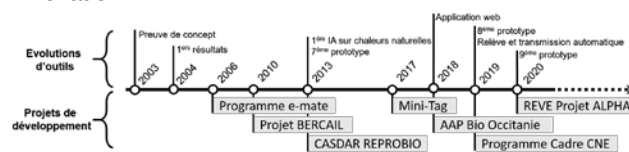


Figure 3 : Historique de développement du détecteur automatisé des chevauchements.

SYNTHESE & CONCLUSION

Actuellement, la qualité des infrastructures, les possibilités d'investissements et l'offre commerciale justifient la prise en charge par le secteur institutionnel du déploiement d'outils numériques au service des systèmes d'élevages à composante pastorale. A l'échelle des capteurs, un long et fastidieux cycle itératif de conception initiale doit être mis en œuvre pour ajuster les performances aux conditions d'utilisation et objectifs de suivi. Cette étape est indispensable pour permettre une bonne estimation des performances attendues dans une grande variété d'environnements et anticiper les futurs besoins de maintenance. En parallèle, les moyens d'intégration et visualisation des données doivent être mis en œuvre de façon complémentaire. Sur ce point, les systèmes d'élevages à composante pastorale se caractérisent par une difficulté d'accès aux protocoles classiques de transmission. Les alternatives se situent alors dans des protocoles bas-débit et longue portée, qui ont l'avantage d'être économes notamment en énergie, ou dans des systèmes de transmission par satellite, moins contraints par la qualité de couverture. Concernant les innovations technologiques, l'implication des utilisateurs finaux reste tardive dans le cycle de développement mais essentielle. Elle alimente de nouvelles itérations et permet de favoriser l'acceptabilité des outils. Elle est d'autant plus importante dans les systèmes d'élevages à composante pastorale où la diversité des environnements et pratiques doit être appréhendée pour satisfaire les besoins, essentiellement via la multifonctionnalité des outils. Plusieurs éléments peuvent contribuer à ce caractère : la fiabilité et la pertinence biologique des données issues des capteurs, la modularité des bases de données favorisant l'interopérabilité des capteurs et l'intégration d'un ensemble évolutif d'algorithmes performants.

Les freins techniques, technologiques et humains que nous avons mis en avant appellent à des solutions concertées pour que chaque acteur puisse s'entendre sur les objectifs visés et y contribuer. A l'heure actuelle où existe une forte tension sur les métiers de l'agriculture et de l'élevage, les outils numériques et leurs utilisations associées peuvent être orientés pour servir des objectifs de performances économiques contre des objectifs de productivité volumique (Forget *et al.*, 2019). En ce sens, les systèmes d'élevage à composante pastorale disposent de nombreux atouts en termes de niveaux d'intrants, d'autonomie, etc. Ces freins peuvent être considérés comme une opportunité pour poser les fondations d'une transition numérique vertueuse, au service de l'expertise des éleveurs.

Financements : CI PHASE INRAE, CASDAR CLOChÈTE, REVE Région Occitanie

Forget V., Hérault B., Depeyrot J.-N., Mahé M., Midler E., Hugonnet M., Beaujeu R., 2019 Centre d'études et de prospective n°145
Hostiou N., Allain C., Chauvat S., Turlot A., Pineau C., Fagon J., 2014 INRA Prod. Anim., 27 (2), 113-122
Lurette A., Fréret S., Chanvallon A., Experton C., Frappa B., Gatien J., Dartois S., Martineau C., Le Danvic C., Ribaud D., Fatet A., Pellicer-Rubio M., 2016 INRA Prod. Anim., 29 (3), 163-184