Étude portée par

Parc national du Mercantour

Avec le soutien financier de

PRÉFÈTE DE LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES
Liberté
Égalité
Fraternité

Plan national d'actions loup et activités d'élevage

FONDATION ALPES SAUVAGES
sous l'égide de la Fondation de France

FONDATION PRINCE ALBERT II DE MONACO

PROJET MERCAL

(MERcantour Collier Anti-Loup)

EXPÉRIMENTATION DES COLLIERS EFFAROUCHEURS ANTI–LOUP CAL EN CONTEXTE ALPIN AU PARC NATIONAL DU MERCANTOUR

Rapport de l'étude de faisabilité MERCAL 2025

Février 2026

Réalisée par

Field Data Analytics

Stokastikos Ξ

lapsco
laboratoire de psychologie sociale et cognitive

REMERCIEMENTS

L'équipe du projet MERCAL tient à remercier les membres du Groupement Pastoral de LEPOBECORAS, Thierry Cornillon, Claude Poulet et leur berger Gilles Gauneau, pour leur confiance et leur collaboration, indispensables à la réalisation de ce projet.

Merci au Parc national du Mercantour, et tout particulièrement à Quentin Baudouin et à Marie Canut pour nous avoir fait confiance, et nous avoir permis de réaliser cette étude sur leur territoire, avec l'aide et le soutien de leurs équipes (Michaël Arlandis, Lilou Veret, Colin Kleistendorff, Quentin Jacob, Marine Lemaire, Lucas Laplanche, Marin Malvezin, Julia Brahim, Thierry Gautruche).

Nous tenons également à remercier l'ensemble des personnes (habitants, lieutenants de louveterie, chasseurs) qui ont accepté l'installation des pièges photographiques, et ont contribué, par leurs conseils et leur connaissance du terrain, au bon déroulement du projet.

Un grand merci à Hillary Jean-Joseph pour ses conseils et réflexions sur le protocole d'observation des chiens, en vue de sa mise en œuvre opérationnelle en 2026.

Cette étude n'aurait pu être réalisée sans le soutien financier de la DREAL Auvergne Rhône-Alpes (Plan National d'Actions sur le loup et activités d'élevage 2024-2029), de la Fondation Alpes Sauvages, et de la Fondation Prince Albert II de Monaco.

Citation
Laudic, L., Simon, R. N., Petit, O., 2026. Expérimentation des colliers effaroucheurs anti–loup CAL en contexte alpin au Parc national du Mercantour. 60 pp. Parc national du Mercantour.

Projet MERCAL (MERcantour Collier Anti-Loup)
Expérimentation des colliers effaroucheurs anti–loup CAL
en contexte alpin au Parc national du Mercantour

SYNTHÈSE

L'objectif du projet **MERCAL 2025** était double : 1) évaluer de façon indépendante l'efficacité des CAL - qui combinent aléatoirement ultrasons et signaux lumineux pour effaroucher les loups - dans un contexte de forte pression de prédation et sur un troupeau de plus d'un millier de brebis, et 2) vérifier l'innocuité du dispositif sur le travail des chiens de protection et la cohésion du troupeau.

Nous avons utilisé des pièges photographiques, des indicateurs de prédation, des colliers GPS et des observations comportementales des chiens pour comparer les sites et les groupes expérimentaux et témoins, avant (2020 à 2024) et après (2025) la pose des CAL, afin d'isoler un éventuel effet du dispositif.

Un **défaut technique d'horodatage des déclenchements CAL**, relevant d'un dysfonctionnement matériel, a compromis certaines analyses prévues. Toutefois, nous n'avons observé, après la pose des CAL, **aucune diminution de la fréquence des attaques, ni du nombre total de victimes, ni de la probabilité d'avoir un constat de prédation sur le site d'étude**. Cependant, nous avons constaté **une diminution du nombre de victimes par attaque**. Cette évolution étant également observée sur les alpages témoins, elle ne peut pas être attribuée avec certitude aux CAL.

Nous n'avons **pas observé d'augmentation de la distance moyenne entre les brebis due à la présence des CAL, ni entre les chiens et les brebis équipées du dispositif**. Les observations comportementales indiquent néanmoins une phase courte et transitoire d'adaptation des chiens, marquée par une vigilance accrue, suivie d'une rapide habituation. **Aucun élément à notre disposition ne prouve que les CAL nuisent durablement au travail des chiens de protection ou à la cohésion du troupeau.**

Cette première année correspond à une **étude exploratoire**, menée sur un seul site et une seule saison d'estive. Les analyses visent donc à identifier des tendances, sans permettre à elles seules d'obtenir des conclusions définitives ou généralisables sur l'efficacité des CAL. Une deuxième année d'étude est prévue afin de confirmer les tendances observées.

Étude portée par
Parc national du Mercantour

Avec le soutien financier de
PRÉFÈTE DE LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES
Plan national d'actions loup et activités d'élevage
FONDATION ALPES SAUVAGES
FONDATION PRINCE ALBERT II DE MONACO

Réalisée par
Field Data Analytics
Stokastikos
lapsco
laboratoire de psychologie sociale et cognitive

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION 4
Hypothèses et prédictions 6

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES 8
2.1. Période et sites d'étude 8
2.2. Approche "avant-après-témoin" et dispositif expérimental 11
2.3. Présence et activité du loup 15
2.4. Suivi et indicateurs de prédation 18
2.4.1 Risque Relatif (RR) : Comparaison temporelle 20
2.4.2 Approche ΔBACI : Comparaison spatio-temporelle 20
2.4.3 Modélisation de la probabilité d'un constat de prédation 21
2.5. Analyse des distances 23
2.6. Observations comportementales des chiens de protection 27

3. RÉSULTATS 29
3.1. Présence et activité du loup 29
3.2. Indicateurs de prédation 32
3.2.1. Risque Relatif (RR) : Comparaison temporelle 34
3.2.3. Approche ΔBACI : Comparaison spatio-temporelle 36
3.2.4. Modélisation de la probabilité d'un constat de prédation 37
3.3. Analyses des distances 38
3.3.1. Analyse à l'échelle des cinq mois de l'étude 40
A. Distances moyennes entre les brebis 40
B. Distances moyennes entre les chiens de protection et les brebis 44
3.3.2. Analyse à l'échelle d'une semaine avant et après la pose des CAL 46
3.4. Observation comportementale des chiens de protection 51

4. DISCUSSION 53

5. RÉFÉRENCES 58

INTRODUCTION

Depuis son retour au début des années 1990, le loup (*Canis lupus)* a profondément modifié les dynamiques d'élevage dans les Alpes du Sud. Le département des Alpes-Maritimes est aujourd'hui le plus touché par la prédation sur les troupeaux, en particulier ovins (DREAL AURA, 2026). Face à cette pression de prédation, les éleveurs ont adapté leurs pratiques, en mettant en œuvre les trois principales mesures de protection : chiens de protection, parcs de nuit électrifiés et gardiennage renforcé. Si ces mesures permettent de réduire les risques (Espuno et al., 2004 ; Rigg et al., 2011), elles n'éliminent pas totalement les attaques, notamment en journée, soulignant les limites des dispositifs actuels et la nécessité d'envisager des solutions complémentaires (Meuret et al., 2021; Simon et al., 2025).

Dans ce contexte pastoral et écologique particulièrement sensible, le Parc national du Mercantour a entrepris, en 2025, une **étude de faisabilité portant sur l'utilisation de colliers effaroucheurs anti-loup (CAL)**, un dispositif innovant et non létal. Déclenchés par une accélération soudaine des animaux domestiques qui en sont équipés, ces colliers émettent des combinaisons d'ultrasons et de signaux lumineux, destinés à surprendre le prédateur et à dissuader son attaque. Utilisé notamment en Afrique australe et testé en Amérique du Nord (Cheetah Conservation Fund 2018, Animal Welfare Institute 2020), ce dispositif est présenté comme une solution complémentaire au triptyque de protection classique (Le Dauphiné Libéré 2025).

Des tests réalisés par le fabricant de 2017 à 2021 auraient donné des résultats prometteurs : « sur 5 ans de tests, les lots équipés de colliers, n'ont subi qu'une seule attaque et les lots témoins, non équipé de colliers ont subi plus de 15 attaques avec plus de 20 bêtes de tuées contre une » (CICAL, rapport non daté). Les tests auraient aussi montré que les chiens de protection ne sont pas gênés par la présence et le déclenchement de colliers, ni les animaux domestiques qui le portent (CICAL, rapport non daté).

Les ultrasons peuvent néanmoins susciter une réponse aversive chez les chiens (Blackshaw et al., 1990), alors qu'ils semblent peu gêner les loups (Fedderwitz, 2010), ne suscitant chez ces derniers qu'une augmentation de leur niveau de vigilance, sans pour autant mener à un comportement de fuite (Terrade et al., 2024). L'utilisation seule de combinaisons lumineuses, même à travers des séquences aléatoires, ne dissuade pas non plus pendant très longtemps les loups et autres prédateurs de s'attaquer aux troupeaux domestiques (Khorozyan & Waltert, 2019). Mais la diffusion de combinaisons imprévisibles, car aléatoires, de lumières et d'ultrasons pourrait empêcher toute habituation de la part des prédateurs, et donc éviter une perte d'efficacité de l'outil au

cours du temps (Khorozyan & Waltert 2019 ; Bangs & Shivik, 2001). Dans ce contexte, les CAL - qui combinent aléatoirement lumières et ultrasons - pourraient représenter une solution pour limiter les attaques des loups.

Malgré son potentiel, toutefois, l'efficacité de l'outil pour effaroucher les loups n'a pas été testée de façon indépendante, notamment dans un environnement alpin caractérisé par une forte pression de prédation lupine (foyer de prédation[1]) et par la présence des troupeaux conséquents d'environ un millier d'animaux. Bien que souvent préconisée, peu d'études ont adopté une approche expérimentale pour évaluer l'efficacité des mesures de protection (Treves et al., 2024, Van Eeden et al., 2018). De même, bien que les moutons et les chiens soient capables de voir les signaux lumineux émis par les colliers, si de nuit, et d'entendre les fréquences d'ultrason utilisées par les CAL (Fig. 1), l'innocuité du dispositif pour les animaux domestiques n'a jamais été étudiée de façon indépendante.

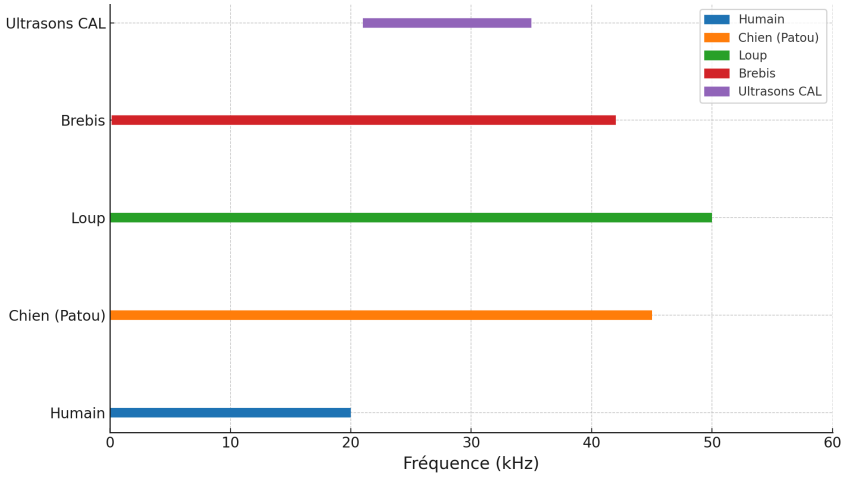


Figure 1. Plages de fréquences audibles par espèce et plage d'émission des CAL (allant de 21khz à 35khz).

Si les signaux visuels et auditifs perturbent les animaux, ils pourraient choisir de s'éloigner des individus équipés de CAL, ce qui pourrait mener à un plus grand éclatement spatial du troupeau. Ceci pourrait à son tour augmenter sa vulnérabilité à la prédation lupine, en favorisant la présence des lots isolés de brebis et en rendant plus difficile le travail de surveillance des chiens de protection et du berger.

[1] Un foyer de prédation est un site géographique de superficie variable où le nombre d'attaques lupines réussies et constatées reste relativement élevé au cours du temps, malgré la mise en place de mesures létales (tirs de destruction de loups) et non-létales de protection des troupeaux (Grente et al., 2020 ; Simon et al., 2025).

Ainsi, dans ce contexte, les objectifs du projet MERCAL sont de :

1) **évaluer l'efficacité des CAL pour diminuer la prédation lupine sur un troupeau ovin de plus d'un millier de brebis, similaire à d'autres dans les Alpes du Sud également exposés à une forte pression de prédation, et**
2) **vérifier que l'outil ne perturbe pas le travail de surveillance du troupeau par les chiens de protection, ni la cohésion du troupeau.**

L'ambition du projet est à terme d'apporter aux acteurs du pastoralisme des éléments robustes et objectifs sur l'efficacité des CAL dans le but de favoriser la coexistence durable entre la faune sauvage et l'élevage extensif.

Hypothèses et prédictions

L'utilisation des CAL pour protéger les troupeaux s'insère dans le cadre de la cognition animale (Greggor et al., 2020), et est basée plus spécifiquement sur le comportement de néophobie (peur du nouveau, de l'inconnu) souvent exprimé par les loups (Amici et al., 2024). Pourtant, dans l'absence de stimuli véritablement douloureux, tous les animaux impliqués (loups, chiens de protection et brebis) pourraient, à plus ou moins long terme, s'habituer et donc réduire leur réponse à la présence et au déclenchement des colliers. Nos hypothèses sont alors les suivantes :

- **H1a : La présence et le déclenchement des CAL diminuent la réussite des attaques de loups et leurs dommages sur les troupeaux.**

Après la mise en place des CAL sur les brebis, on s'attend à une diminution du nombre d'attaques constatées, du nombre total de victimes (brebis tuées ou blessées) et du nombre de victimes par attaque. Ces réductions devraient s'observer tant sur le site d'étude, en comparant les chiffres avant (2020 à 2024) et après (2025) la pose de l'outil, que par rapport à des sites témoins où les brebis n'ont pas été équipées du dispositif (voir la partie Matériels et Méthodes pour plus de détails).

- **H1b : La présence et le déclenchement des CAL diminue la probabilité d'avoir un constat de prédation.**

On s'attend à observer une diminution de la probabilité d'avoir un constat d'attaque sur le site d'étude après la pose des CAL, notamment lorsque la présence lupine sur le site est confirmée par pièges photographiques (voir la partie Matériels et Méthodes pour plus de détails).

- **H2a : La présence et le déclenchement des CAL n'impactent pas le comportement et donc le travail de surveillance du troupeau par les chiens de protection.**

Les prédictions qui en découlent sont que les chiens ne s'éloignent pas des brebis équipées de CAL, et qu'ils ne changent pas leur comportement (de repos, de vigilance, d'exploration, agonistiques) après la mise en place de l'outil.

- **H2b (habituation) : La présence et le déclenchement des CAL impactent temporairement le comportement et donc le travail de surveillance du troupeau par les chiens de protection, mais seulement sur une courte période, avant un retour au niveau d'activité observé dans l'absence de CAL.**

Dans ce cas, on pourrait observer une réponse des chiens (éloignement par rapport aux brebis équipées, changements de comportement) en lien avec la pose des CAL, mais seulement à court terme (sur quelques jours).

- **H3a : La présence et le déclenchement des CAL n'impactent pas la cohésion des brebis.**

Nous nous attendons donc à ce que les brebis ne s'éloignent pas de celles équipées de CAL (pas d'évitement).

- **H3b (habituation) : La présence et le déclenchement des CAL impactent temporairement la cohésion des brebis, mais seulement sur une courte période, avant un retour au niveau d'activité observé dans l'absence de CAL.**

Comme pour les chiens, la prédiction ici est que les brebis s'éloignent des brebis équipées de CAL, mais seulement à court terme (sur quelques jours).

Il est essentiel de garder à l'esprit que cette première année de l'étude MERCAL correspond à une étude exploratoire, menée sur un seul site et une seule saison d'estive. Les analyses visent donc à identifier des tendances, compatibles ou non avec les hypothèses et prédictions, sans permettre à elles seules d'obtenir des conclusions définitives et généralisables sur l'efficacité des CAL.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Période et sites d'étude

Le projet MERCAL se déroule dans les Alpes du sud, au Parc national du Mercantour, et plus précisément à l'alpage de la Valette (Fig. 2) située dans la commune de Belvédère. Ce site s'intègre dans un foyer de prédation situé dans la vallée de la Vésubie (Fig. 2), et est considéré comme caractéristique des élevages ovins des Alpes du Sud, particulièrement exposés à la prédation (Singer et al., 2023), et accueillant un troupeau d'environ un millier de brebis.

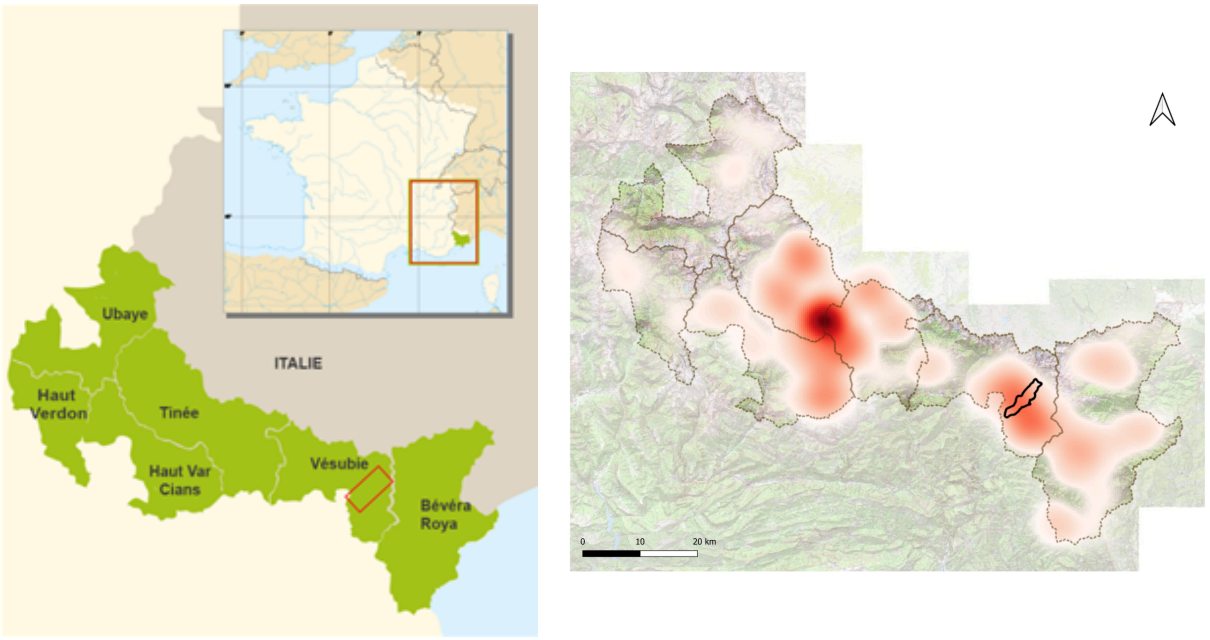


Figure 2. A gauche : Localisation du Parc national du Mercantour et de l'alpage de la Valette. A droite : Carte de chaleur des foyers de prédation du Parc national du Mercantour entre 2010 et 2022. L'alpage de la Valette est délimité en noir.

D'une superficie de 1 093 ha, situé à environ 2 000 m d'altitude, l'alpage de la Valette se compose majoritairement de pâturages naturels (55 %) et de forêts de conifères (29 %) (Corine Land Cover 2018). Deux cabanes pastorales y sont présentes (Fig. 3) pour accueillir les bergers assurant la garde du troupeau.



Figure 3. En haut : Photographie aérienne de l'alpage de la Valette délimité par le tracé blanc, les deux cabanes pastorales étant symbolisées par un icone "maison" (plus au nord de l'alpage, la cabane de Colmars, plus au sud de l'alpage, la cabane de Montjoï). En bas : Photographie prises sur l'alpage.

Le site est exploité depuis 2009 par le Groupement Pastoral (GP) de LEPOBECORAS. Ses membres y font transhumer leurs troupeaux d'ovins tous les ans, entre juin et octobre. En 2025, le troupeau présent sur l'alpage était composé de 1 455 brebis appartenant à 5 éleveurs différents.

La garde quotidienne du troupeau était assurée par la présence d'un berger, ayant plus 30 ans d'expérience dans le métier, et travaillant à la Valette pour sa 4e année. Un éleveur-berger et membre du GP a également assuré la garde du troupeau, notamment au mois d'août, lorsque celui-ci a été scindé en deux lots gardés de part et d'autre de l'alpage. Il est aussi intervenu à différents moments de la saison pour relayer le berger principal lors de ses absences ou lui prêter main-forte en fin de saison, à partir de mi-octobre. La protection du cheptel était également assurée par un groupe de 8 chiens de protection adultes, constitué de 5 Montagne des Pyrénées et 3 Kangals. Parmi ce groupe, 2 Kangals étaient présents pour la première fois sur l'alpage de la Valette.

Deux parcs de nuit (PDN) sont présents sur l'alpage et situés à proximité des cabanes pastorales de Colmars et Montjoï (Fig. 3). Ils se composent de 6 à 7 filets électrifiés simples de 50 m de long et 120 cm de hauteur. Le PDN de Colmars est complètement fermé, tandis que celui du Montjoï est ouvert (dit en "demi-lune") et d'une surface d'environ 400 m^2. L'état des parcs est vérifié au moins une fois par jour.

En 2025, la couchade libre des brebis (dans l'absence totale de clôtures) a également été pratiquée, en fonction des conditions météorologiques, de la possibilité de regrouper le troupeau et du niveau de risque ressenti par le berger.

Malgré l'application du triptyque de protection préconisé par l'état (clôtures, chiens de protection et berger), la superficie conséquente de l'alpage et son environnement vallonné et boisé compliquent la surveillance du troupeau et favorisent probablement les attaques lupines, soupçonnées par ailleurs d'avoir lieu principalement en journée et ciblant des animaux isolés. L'alpage se situe, en outre, en zone d'adhésion du Parc national, où les tirs de défense sont autorisés (à l'instar de la plupart des alpages en France aujourd'hui).

Les alpages voisins de Férisson et de la Maïris (Fig. 4) ont été sélectionnés comme sites témoins pour comparer l'évolution des indicateurs de prédation (nombre de constats de prédation, nombre de victimes, nombre de victimes par attaque) avec celle du site d'étude, avant et après l'installation des CAL (voir la section 2.2 ci-dessous pour la description complète de l'approche méthodologique). La sélection de ces alpages a reposé sur leur proximité géographique avec le site d'étude, leur appartenance au même foyer de prédation (Fig. 2), le type et la taille de leurs troupeaux (ovin viande, respectivement entre 500 et 700 brebis / an à Férisson et entre 1 600 et 2 500 à la Maïris, contre 900 à 1 400 à la Valette), et enfin des mesures de protection comparables (triptyque de protection préconisé par l'état).

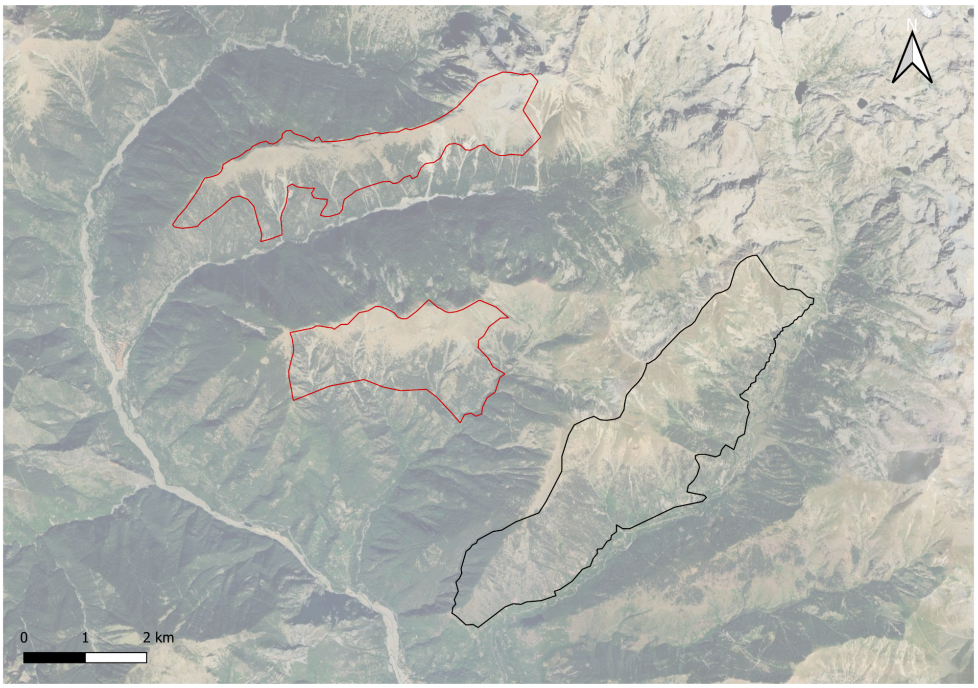


Figure 4. Localisation des alpages témoins en rouge (la Maïris en haut et Férisson au centre) et du site d'étude (en noir).

La période d'étude s'est étendue de juin à octobre de 2020 à 2025, 2020 à 2024 étant la période d'avant la pose des CAL, et 2025 étant la période d'après. Les données antérieures à 2020 ont été exclues de l'étude, car les pratiques pastorales étaient trop différentes pour permettre une comparaison avec la période après-CAL. À cette époque, le troupeau était en effet de taille plus importante (environ 2 000 brebis), il n'y avait pas de berger permanent et le nombre de chiens de protection était plus faible (un ou deux seulement).

2.2. Approche "avant-après-témoin" et dispositif expérimental

Afin de tester les prédictions de nos hypothèses, nous avons utilisé un protocole dit « avant-après-témoin ». Cette approche est la même utilisée classiquement pour étudier, par exemple, l'effet d'un médicament sur une maladie. Au début de l'expérimentation, nous définissions deux groupes de sites ou d'individus, celui dit « expérimental » – dans notre cas, celui dont les individus vont porter le CAL – et celui dit « témoin » – dont les membres ne porteront pas le dispositif. Ce sont les comparaisons entre sites et groupes expérimentaux et témoins lors des deux périodes de l'étude (avant et après la pose des CAL) qui permettent d'isoler un éventuel effet de l'outil de celui, confondant, causé par d'autres facteurs ayant également pu varier entre les deux périodes.

Nous avons déterminé que l'étude porterait sur 10 brebis expérimentales et 10 brebis témoins. Des contraintes de temps, de ressources humaines et de manipulation des animaux nous ont empêché d'avoir un échantillon plus conséquent. Les brebis participant à l'étude ont été sélectionnées par les éleveurs, qui ont privilégié des brebis dites « meneuses », individus suivis spontanément par les autres brebis lors des déplacements du troupeau, et/ou dites « repères », c'est-à-dire portant des marques distinctives les rendant facilement identifiables et repérables par le berger. Les 20 brebis ont été équipées de collier GPS le 16 juin 2025, entre 9h00 et 10h00, soit deux semaines après l'arrivée du premier lot sur l'alpage (Fig. 5). Nous avons programmé les GPS pour prendre une localisation toutes les 5 minutes, mais également toutes les 10 secondes si l'animal se déplaçait à une vitesse égale ou supérieure à 9 km/h. Ce paramétrage a été choisi pour maximiser le nombre de localisations, afin notamment d'essayer de relier les épisodes d'accélération à une possible proximité de loups (déterminée à son tour par la prise d'images par les pièges photographiques disposés sur et autour du site d'étude - voir section 2.3. plus bas).

À des dates différentes, 6 des 8 chiens de protection du troupeau ont également été équipés de GPS (Fig. 5 ; Tab. 1). La durée de suivi de chaque chien a été variable, en raison de contraintes hors de notre contrôle (départ précipité décidé par l'éleveur,

défaillance du GPS, etc.). Toujours est-il qu'au moins 1 chien était équipé de GPS sur 73% de la durée de l'estive.

Tableau 1. Dates de pose et de retrait des colliers GPS sur les six chiens de protection suivis dans le cadre de l'étude MERCAL en 2025.

Identifiant chien	Date de pose	Date de retrait	Nombre de jours
1	15 juillet	13 septembre	60
2	11 juillet	06 novembre	108
3	06 juillet	17 août	42
4	06 juillet	28 juillet	22
5	09 juillet	14 octobre	96
6	15 juillet	29 août	46

Le 13 juillet 2025, à partir de 9h15, les brebis du groupe expérimental ont été recapturées et équipées des CAL (Fig. 5). Le fabricant des CAL recommande de respecter un ratio minimal d'animaux équipés par rapport à la taille du troupeau, à raison d'un CAL pour 15 brebis. Afin de respecter ce ratio, 75 brebis supplémentaires ont été équipées du dispositif CAL/GPS (Fig. 5). Toutefois, l'ajout imprévu d'un lot de brebis sur l'alpage a modifié ce ratio, portant le ratio à un CAL pour 17 animaux. Au total, 85 brebis ont été équipées de colliers CAL/GPS (plus 10 brebis uniquement de colliers GPS - voir plus bas). Nous avons récupéré tous les colliers, GPS et CAL, fin octobre. Le troupeau était présent sur l'alpage du 27 mai au 29 octobre, totalisant une durée de 156 jours, soit 5 mois et 3 jours de pâturage. Sa taille a fluctué au cours de la saison, selon les arrivées et les départs des lots en garde, oscillant entre 250 et 1 455 brebis.

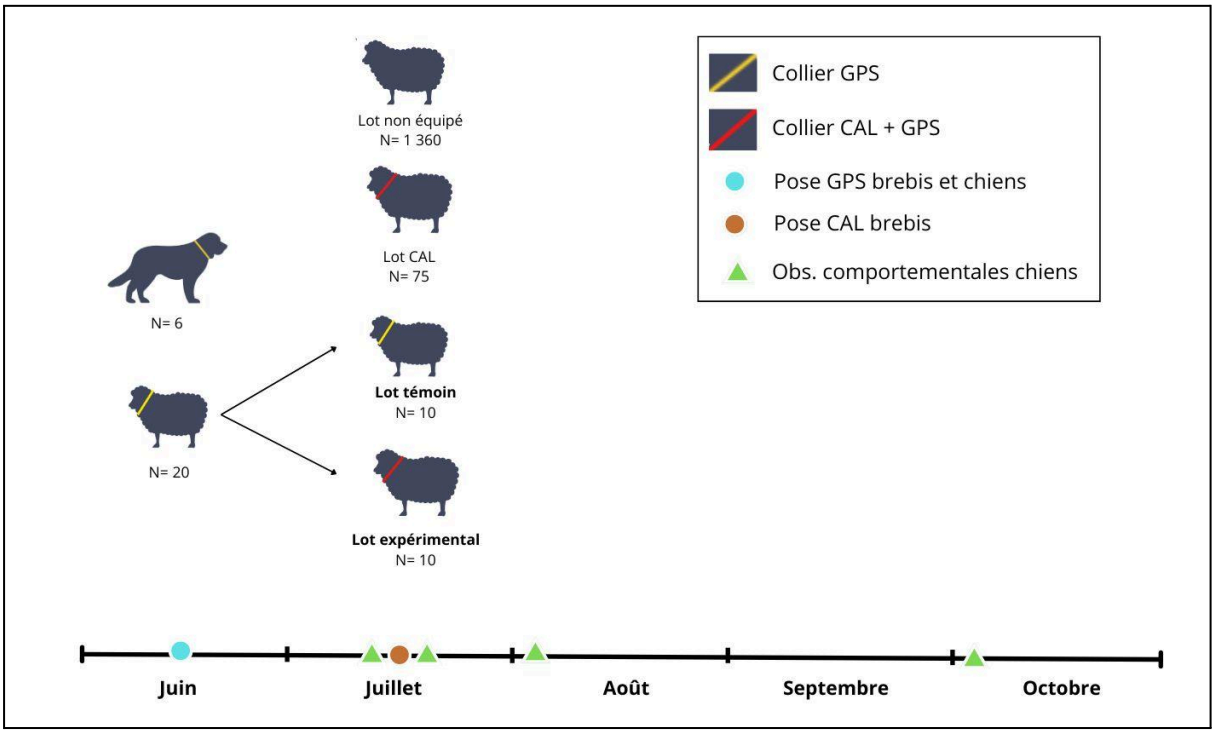


Figure 5. Schéma synthétique du dispositif expérimental de l'étude MERCAL 2025

Le paramétrage des colliers CAL est défini et réalisé par le fournisseur. Il a défini les seuils de déclenchement des ultrasons et signaux lumineux à partir de l'observation empirique des déplacements et du comportement des brebis. La sensibilité de l'accéléromètre était réglée à 18 sur une échelle allant de 0 (très sensible) à 70 (peu sensible). D'après ses explications, le collier se déclenche lorsque le seuil d'accélération est dépassé au moins quatre fois en quatre secondes. Lors de la récupération du matériel fin octobre en fin d'estive, des 85 CAL que nous avions placés sur les brebis, 5 étaient manquants et 5 autres n'ont pas fonctionné (pas de déclenchement lors des tests de déclenchement manuel et aucun horodatage de déclenchement enregistré durant la saison).

Chaque déclenchement d'un CAL devait être enregistré par le collier (horodatage), permettant ainsi de reconstituer l'activité du dispositif au cours du temps. Toutefois, **un défaut relevant du matériel/fabricant a entraîné un décalage important entre les heures enregistrées par l'outil et celles obtenues par des tests faits sur le terrain**. En comparant les heures de déclenchement enregistrées par les CAL (base de données extraite du dispositif) avec les heures connues par déclenchement manuel (en secouant l'outil), nous avons, en effet, observé des écarts majeurs, allant de 3 à 7 heures. Ces écarts ont varié de façon imprévisible au cours du temps pour un même collier, rendant toute correction impossible. **Les données d'horodatage des déclenchements issues des CAL étaient tout simplement**

inexploitables. Ce problème technique, extérieur au protocole mis en œuvre par notre équipe, a compromis une partie des analyses initialement prévues, notamment celles visant à relier précisément les déclenchements des CAL à la présence des loups sur l'alpage (pièges photographiques) ainsi qu'aux événements de prédation constatés.

Face à cet imprévu, majeur, nous avons consacré un temps important à la recherche d'une solution alternative. Nous avons alors essayé d'utiliser l'horodatage des événements d'accélération GPS des brebis comme proxy pour le déclenchement des CAL. En effet, sachant que le déclenchement CAL est censé être causé par un mouvement/accélération de la brebis, nous avons essayé de considérer que les CAL se sont déclenchés à chaque fois que les brebis se sont déplacées à une vitesse égale ou supérieure à 9 km/h, correspondant à un événement d'accélération GPS. Avec en moyenne 3 déclenchements CAL/jour/brebis contre 2,3 événements d'accélération GPS/jour/brebis, nous pouvons attester d'une activité comportementale régulièrement détectée par les 2 dispositifs. Cependant, un test de corrélation de Spearman (Spearman, 1904) n'a mis en évidence aucune relation entre le nombre journalier d'événements d'accélération GPS et de déclenchements des CAL par brebis [rho = −0.035 (sur un échelle allant de −1, parfaite corrélation négative, à +1, parfaite corrélation positive), p = 0.003]. Les événements d'accélération GPS des brebis ne constituent donc pas un bon proxy temporel fin du déclenchement des CAL.

Toujours dans l'objectif de trouver une solution à ce problème, nous avons donc été contraints de travailler, non pas à l'échelle fine de l'horodatage, mais à l'échelle de la journée. Il nous a alors fallu déterminer, à partir de l'ensemble des journées suivies, lesquelles témoignaient d'une activité particulièrement agitée du troupeau, en supposant, si l'on reprend nos hypothèses de départ, que cette agitation pourrait être liée à la présence du loup sur l'alpage. Nous avons donc définie une « journée agitée » comme étant une journée durant laquelle l'activité des brebis et des chiens de protection était anormalement élevée. Pour ce faire, nous avons d'abord estimé l'activité du troupeau à partir des événements d'accélération GPS enregistrés au cours des journées "normales", c'est-à-dire les jours où le loup n'avait pas été détecté sur l'alpage par les pièges photographiques. Nous avons ensuite comparé ce niveau d'activité à celui des journées où le loup a été détecté sur l'alpage (toujours à partir des pièges photographiques). Une analyse de sensibilité nous a permis alors de distinguer l'activité normale du troupeau et des chiens, de ces journées atypiques dites "agitées". Pour le troupeau, nous avons ainsi défini une journée agitée lorsqu'au moins 66 brebis présentaient un événement d'accélération GPS (soit environ 77 % des brebis équipées). Les chiens n'ayant quant à eux pas été équipés de GPS en même temps tout au long de la saison, nous avons exprimé leur activité en proportion du temps actif. Ainsi, une journée a été considérée comme agitée pour les chiens lorsque ceux-ci sont restés

actifs plus de 0,9% de la journée (soit les 10 % des journées les plus actives en conditions normales). Ce seuil correspond à environ 12 minutes d'accélération cumulée au cours de la journée si 1 seul chien est équipé, 25 minutes si 2 chiens, 37 minutes si 3 chiens, etc. Ainsi, l'agitation des brebis et des chiens de protection ont été intégrées aux modèles pour analyser la probabilité journalière d'un constat de prédation (voir la partie 2.4.3 ci-dessous), et pour tester si cette probabilité a différé entre les journées marquées par une forte agitation du troupeau et/ou des chiens et les journées plus calmes.

2.3. Présence et activité du loup

Nous avons utilisé des pièges photographiques (PP) pour estimer la présence et le rythme d'activité des loups sur le site d'étude. Afin d'optimiser la sélection des lieux de pose, nous avons réalisé une prospection des indices de présence (crottes, carcasses de proies…) du prédateur. L'objectif était de placer les PP dans les secteurs utilisés de façon récurrente par les loups, potentiellement repérables par la présence d'indices. Cette prospection s'est faite à la fois par recherche visuelle et par la détection olfactive d'un chien de travail, entraîné pour la détection de fèces fraîches de loup (Fig. 6 et 7). Ce chien de travail est une femelle Labrador de 3 ans, sélectionnée pour son aptitude à la tâche. Elle est formée par une maître-chien de l'entreprise DOG NOSE.



Figure 6. Photos prises durant la prospection d'indices de présence de loups, le chien signalant la présence d'une fèces lupine, et pose d'un piège photographique avec l'aide de bénévoles.



Figure 7. Photos de fèces trouvées lors de la prospection sur le terrain et présentant des caractéristiques typiques du loup (taille, forme, contenu).

La prospection et la pose des PP ont été réalisées en mai 2025, soit un mois avant l'arrivée du troupeau, afin de permettre au prédateur de s'habituer à la présence des PP et de reprendre ses habitudes de déplacement, potentiellement altérées par les odeurs humaine et canine laissées lors de la prospection. Le choix des parcours de prospection s'est appuyé sur plusieurs critères : localisation historique des attaques, tirs de défense, observations antérieures par PP et connaissance du terrain. La prospection s'est déroulée sur 4 journées, entre 8h et 18h, en présence de 7 personnes et 1 chien. Chaque parcours a été prospecté au moins une fois par au minimum 2 personnes et au maximum 4 personnes et le chien de détection. Au total, 41 km ont été parcourus par les observateurs et 66 km par le chien (Fig. 8). Les conditions d'enneigement au mois de mai sur la cime nord de l'alpage (Cime du Montjoï, de la Valette de Prals et de Paranova) ayant limité l'accès à cette zone, leur prospection c'est déroulé au mois du juin, après l'arrivée du troupeau. La prospection canine s'est déroulée en deux temps : des phases de recherche active par le chien, durant lesquelles la maîtresse se concentrait sur le comportement de l'animal, et des phases de recherche passives, pendant lesquelles le chien n'était plus en recherche active, la maîtresse contribuant alors à la recherche visuelle des indices de présence. Le chien signalait la présence d'une crotte en s'immobilisant en position assise, tête orientée vers l'indice (vidéo) (Fig. 6).

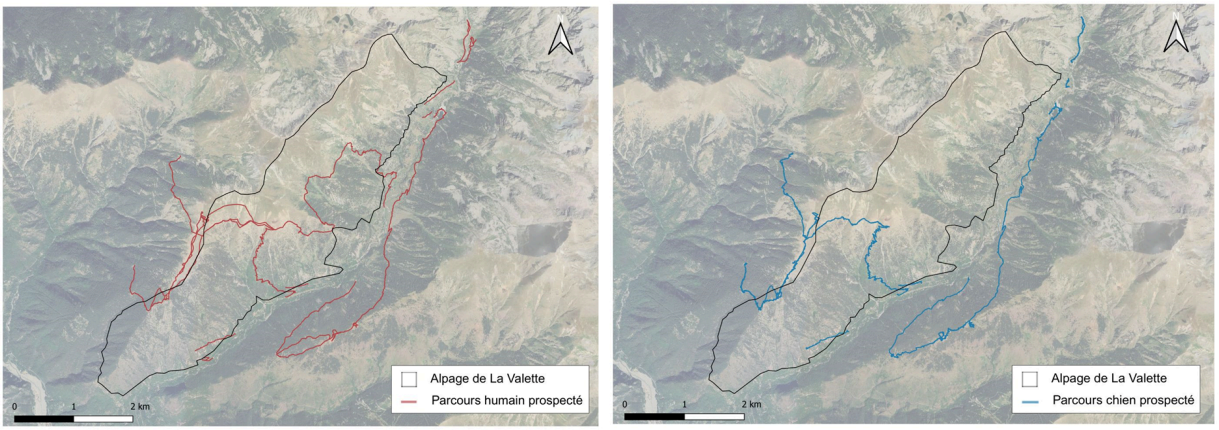


Figure 8. A gauche : Parcours prospecté par les observateurs à la recherche des indices de présence de loups. A droite : Parcours prospecté par le chien.

Le Parc national du Mercantour a mis 24 PP à disposition du projet (modèle Dark Ops DCL NANO - Browning). Pour leur installation, nous avons privilégié des axes de circulation marqués (pistes, chemins, croisements, drailles, principaux accès à l'alpage) et les grandes zones ouvertes ou boisées. Les PP ont principalement été installés sur l'alpage, de préférence fixés à des troncs d'arbres. Dans l'absence de supports, nous avons utilisé des piquets en bois ou des affleurements rocheux comme alternatives, notamment en zone ouverte. Le refus de certains habitants à autoriser l'installation de PP sur leurs parcelles a restreint les possibilités de lieux de pose, en particulier sur la crête nord de l'alpage (Fig. 3 et 8). Les pièges étaient dissimulés autant que possible pour éviter d'être visibles, mais une note informative renseignait sur l'utilité de l'outil en cas de détection par un humain. En conditions idéales, les PP étaient positionnés à environ 1,30 m du sol et inclinés vers le bas, pour que le capteur détecte à hauteur de loup, en limitant autant que possible les déclenchements intempestifs dûs par exemple aux mouvements des hautes herbes lors des journées venteuses.

Les 24 PP étaient actifs 24h/24 de mai à octobre, paramétrés en sensibilité élevée et prenaient une vidéo de 20 s par déclenchement, afin de pouvoir filmer des comportements et potentiellement déterminer des caractéristiques individuelles de loups, l'organisation sociale de la meute, etc. Le relevé mensuel des cartes SD a permis un tri régulier des données, tout en vérifiant le bon état des batteries et, si nécessaire, le réajustement du positionnement des pièges, afin de rester au plus proche de la dynamique spatiale des loups. Le tri des données et l'identification de loups sur les vidéos a reposé sur une double approche : une première évaluation à l'œil humain, suivie d'une vérification avec le logiciel DeepFaune v1.3.0 (OFB & PatriNat) (Rigoudy et al., 2023). Au cours de la saison, 3 PP ont été volés et 1 a été ajouté par un lieutenant de Louveterie.

Nous avons utilisé les données collectées par les 17 PP présents sur l'alpage de la Valette pour estimer la présence et le rythme d'activité du prédateur sur le site d'étude. Les 7 autres PP, installés aux alentours de l'alpage, ont été utilisés pour trouver les voies d'accès des loups au site d'étude, ou ont été volés. Nous avons considéré que les vidéos d'un même individu prises jusqu'à 5 minutes d'intervalle sur un même PP étaient un seul et même événement de détection. Pour chaque PP, nous avons alors enregistré la présence (LOUP = 1) ou l'absence (LOUP = 0) de loup chaque jour. Enfin, pour étudier le rythme d'activité quotidien du loup sur le site d'étude, nous avons compilé et représenté graphiquement les heures de détection enregistrées sur les vidéos (Meredith et al., 2024).

2.4. Suivi et indicateurs de prédation

Nous avons utilisé l'approche "avant-après-témoin" pour évaluer l'effet des CAL sur la réussite des attaques et l'ampleur de leurs dommages (hypothèse H1a). Les analyses ont porté sur 3 indicateurs de prédation que sont (i) le nombre de constats d'attaques, (ii) le nombre de victimes par attaque, et (iii) le nombre total de victimes, calculés avant (2020-2024) et après (2025) la mise en place des CAL sur le site d'étude de la Valette et sur les sites témoins (voir section 2.1. plus haut). La prédiction associée à cette hypothèse est qu'après la mise en place des CAL, ces indicateurs diminuent à la fois sur le site équipé et par rapport aux sites témoins non équipés. Dans un second temps, nous avons testé l'hypothèse H1b selon laquelle la présence des CAL et leurs déclenchements - estimés à partir des journées marquées par une forte agitation du troupeau, d'après les données GPS (voir section 2.2. plus haut) - réduisent la probabilité d'un constat d'attaque. Nous nous attendions à une diminution de celle-ci après la pose des CAL , notamment lorsque la présence du loup sur l'alpage était confirmée par les pièges photographiques.

Les données de prédation proviennent des constats d'attaques officiels réalisés par la Direction Départementale des Territoires et de la Mer des Alpes-Maritimes (DDTM06) et l'Office Français de la Biodiversité (OFB), dans le cadre du dispositif national d'indemnisation des dommages causés aux troupeaux domestiques. Ces données sont fournies par la DDTM06 sur la base d'une convention de mise à disposition des données établie avec le Parc national du Mercantour. Une attaque constatée correspond à une action du prédateur sur le troupeau pouvant être attestée grâce à la présence d'indices, qu'il y ait ou non des victimes (animaux blessés ou tués). Seules les attaques constatées et identifiées par l'expertise technique comme « loup non écarté » ont été prises en compte dans l'étude. Parmi ces attaques constatées, certaines sont caractérisées par la présence d'au moins une brebis tuée ou blessée, tandis que d'autres ont été constatées sans aucune preuve de mortalité ni de blessure.

Ces attaques peuvent correspondre à une tentative de prédation interrompue ou à des brebis disparues sans preuve formelle de mortalité. Bien qu'aucune victime ne soit constatée, l'attaque peut néanmoins avoir généré des effets indirects sur le troupeau, les chiens de protection ou le berger (stress, agitation). Comme nous le verrons plus tard, cette situation assez particulière concerne uniquement quelques événements observés sur les troupeaux témoins. Les informations récupérées des constats sont la date connue ou supposée de l'attaque, le lieu de découverte et le nombre de victimes.

Afin de comparer la prédation entre années et entre sites, malgré des tailles de troupeaux et des durées d'exposition au risque de prédation variables, nous avons réalisé les analyses sur une unité de temps équivalente (nombre de mois complets de juin à octobre) et rapportées à un effectif standardisé (voir ci-dessous). Pour chaque mois et chaque année, l'effectif du troupeau a été estimé par la moyenne mensuelle des effectifs enregistrés lors des constats. Un effectif annuel moyen a ensuite été calculé comme la moyenne des effectifs mensuels.

Le nombre de constats et de victimes ont été standardisés pour 100 animaux :

$$constats_{100,m} = \frac{N\,constats_m}{effectif_m} \times 100$$

$$victimes_{100,m} = \frac{N\,victimes_m}{effectif_m} \times 100$$

À l'échelle annuelle, les indicateurs ont été obtenus en rapportant les totaux annuels à l'effectif annuel moyen du troupeau :

$$constats_{100,annuel} = \frac{\sum N\,constats}{effectif_{annuel\,moyen}} \times 100$$

$$victimes_{100,annuel} = \frac{\sum N\,victimes}{effectif_{annuel\,moyen}} \times 100$$

Ces indicateurs décrivent respectivement la fréquence des attaques et l'impact global de la prédation, indépendamment de la taille du troupeau.

L'intensité moyenne des attaques a été décrite par le nombre de victimes par attaque :

$$\text{Nb de victimes par attaque} = \frac{N\,victimes}{N\,constats}$$

Cet indicateur est indépendant de l'effectif du troupeau et reflète l'intensité moyenne des événements de prédation.

La période 2020–2024 a été synthétisée par une moyenne interannuelle, chaque année contribuant de manière équivalente, afin d'éviter qu'une année durant laquelle les attaques ont été plus fréquentes ou meurtrières ne domine l'indicateur. La comparaison « avant/après » correspond donc à la distribution annuelle des valeurs 2020–2024 comparée à l'année 2025. Au niveau spatial, les sites témoins (Férisson et La Maïris) ont été regroupés en un seul ensemble. Les indicateurs ont été calculés à partir des totaux combinés (constats, victimes et effectifs), ce qui revient à une moyenne pondérée par l'effectif. Cette approche permet de comparer les niveaux de prédation entre sites et périodes, indépendamment des variations d'effectif du troupeau. Les analyses statistiques et graphiques ont été réalisées sous R v4.4.3 (R Core Team, 2025), tandis que les cartes et certains traitements spatiaux ont été réalisées sous QGIS v3.40.4-Bratislava (QGIS Development Team).

2.4.1. Risque Relatif (RR) : Comparaison temporelle

Nous avons estimé le Risque Relatif de dommages ("Relative Risk of damage", RR) afin de comparer l'évolution des indicateurs de prédation entre les périodes avant et après l'installation des CAL sur le site d'étude, en suivant les approches de Eklund *et al.,* (2017) et Khorozyan & Waltert (2019) :

$$RR = \frac{A/N_t}{B/N_c}$$

où *A* est la métrique de dommage (p. ex., nombre de victimes) durant la période d'utilisation des CAL, *B* est la même métrique durant la période sans utilisation de CAL, *Nt* est le nombre de brebis bénéficiant de la protection des CAL (c'est-à-dire, la taille du troupeau lors des périodes d'utilisation des CAL) et *Nc* est le nombre de brebis dans le troupeau avant la pose des CAL. L'outil sera considéré efficace si $RR < 1$ (réduction du risque) et inefficace si $RR > 1$ (augmentation du risque).

2.4.2. Approche ΔBACI : Comparaison spatio-temporelle

Nous avons utilisé une approche de type ΔBACI (différence des différences) afin de comparer l'évolution de la prédation sur le site d'étude à celle sur les sites témoins au cours de la même période. Pour cela, nous avons suivi les approches de Underwood (1992) et Chevalier et al., (2019) :

$$\text{Delta BACI} = (\overline{Impact_{After}} - \overline{Impact_{Before}}) - (\overline{Control_{After}} - \overline{Control_{Before}})$$

où *Impact* est la métrique de dommage (p. ex., nombre de victimes) sur le site d'étude, *Control* est la même métrique sur les sites voisins, *Before* est la période avant l'utilisation du CAL (moyenne entre 2020 et 2024) et *After* est la période après l'utilisation du CAL (2025). L'évolution des indicateurs de prédation est plus favorable sur le site équipé que sur les sites témoins après la mise en place des CAL si ΔBACI < 0, et moins favorable si ΔBACI > 0. Par exemple, si on s'intéresse au nombre de victimes et qu'on obtient un ΔBACI < 0, cela signifie que le nombre de victimes a diminué davantage sur le site équipé que sur les sites témoins après la mise en place des CAL.

Underwood (1997) précise qu'un changement observé sur le site d'étude ne peut être attribué avec certitude au traitement (CAL) que si :

- l'amplitude du changement est plus grande sur le site d'étude que sur les sites témoins (CI-contribution > 0), et
- le site d'étude diffère plus des sites témoins après le traitement qu'avant celui-ci (CI-divergence > 0).

Où :

$$CI_{contribution} = |Impact_{After} - Impact_{Before}| - |Control_{After} - Control_{Before}|$$

$$CI_{divergence} = |Impact_{After} - Control_{After}| - |Impact_{Before} - Control_{Before}|$$

Ainsi, seule la combinaison d'un ΔBACI non nul avec des valeurs positives de CI-contribution et de CI-divergence satisfait les critères d'Underwood pour conclure à une relation causale entre le changement observé de la variable réponse (p. ex., nombre de victimes) et le traitement (CAL).

2.4.3. Modélisation de la probabilité d'un constat de prédation

Nous avons également modélisé la probabilité journalière d'avoir un constat de prédation, en essayant de relier temporellement la présence des CAL et du loup, ainsi que l'agitation des brebis et des chiens de protection, à la réalisation (ou non) d'un constat de prédation au cours de la même journée. La survenue d'un constat de prédation a été modélisée avec la variable *constat*, et analysée en fonction de : (i) la présence du loup confirmée par les pièges photographiques (voir section 3.1.

ci-dessous) et représenté par la variable *présence du loup*, (ii) l'équipement des CAL sur les brebis, représenté par la variable *présence des CAL*, (iii) l'agitation des brebis, définie comme une journée où le troupeau a été particulièrement agité, représentée par la variable *agitation brebis*, et (iv) l'agitation GPS des chiens de protection, définie comme une journée où les chiens ont été particulièrements agités, représentée par la variable *agitation chiens de protection*. Ces 5 variables sont binaires, avec *constat* = 1 si un constat de prédation a été réalisé; *présence du loup* = 1 si le loup a été détecté par les pièges photographiques; *présence des CAL* = 1 si les brebis étaient équipées du dispositif; *agitation brebi*s = 1 si le troupeau était "agité" (voir section 2.2.) ; et *agitation CPT* = 1 si le groupe de chiens était "agitée" (voir aussi section 2.2.). Dans les cas contraires, la valeur de zéro était attribuée aux variables. Enfin, la variable *nombre de jours*, allant de 1 (début de l'étude) à 156 (fin de l'étude), a été intégrée dans l'analyse afin de tester une éventuelle habituation des loups au CAL. Le modèle global a donc la forme suivante :

$$constat \sim présence\ du\ loup + présence\ des\ CAL + agitation\ brebis + agitation\ chiens\ de\ protection$$
$$+ nombre\ de\ jours + interactions\,(nombre\ de\ jours \times covariables)$$

Nous avons ensuite réalisé une régression logistique pénalisée de Firth (Firth, 1993 ; Heinze & Schemper, 2002) pour modéliser la probabilité journalière d'avoir un constat de prédation en fonction de ces différents paramètres. Cette approche correspond à un modèle linéaire généralisé (GLM) binomial utilisant une estimation pénalisée du maximum de vraisemblance ("penalized likelihood"). La régression logistique pénalisée de Firth est adaptée lorsqu'on travaille sur de petits échantillons, et lorsque les évènements étudiés sont rares (classes asymétriques). Cette situation correspond à notre cas car, bien que nous ayons une taille d'échantillon suffisante (156 jours de suivi), nous ne disposons que de 16 jours au cours desquels un constat de prédation a été réalisé (environ 10% des observations), ce qui correspond, au sens statistique, à un événement rare. L'importance des variables explicatives a été évaluée par comparaison des modèles à l'aide de tests du rapport de vraisemblance pénalisée et du critère d'information d'Akaike (AIC) (Burnham & Anderson, 2002). Afin d'assurer une comparaison cohérente, l'ensemble des modèles a été ajusté sur une base identique (n = 114 jours), correspondant aux jours pour lesquels l'ensemble des variables était disponible. Ce sous-échantillonnage est lié à l'absence de suivi GPS sur les chiens de protection en début de saison. Les conclusions restent inchangées lorsque les modèles sans la variable *agitation chiens de protection* sont ajustés sur l'ensemble des jours disponibles (n = 156). Aucun des modèles retenus pour l'analyse ne souffrait de colinéarité entre variables explicatives, phénomène dont la présence peut mener à des faux résultats (Kim, 2019). Toutes les variables dans tous les modèles retenus

avaient, en effet, un facteur d'inflation de variance < 3 (ce facteur est un indicateur de multicolinéarité dont la valeur ne doit pas dépasser 5).

2.5. Analyse des distances

Comme pour les hypothèses H1a et H1b, nous avons utilisé l'approche "avant-après-témoins" pour tester nos hypothèses liées à l'innocuité des CAL pour les animaux domestiques (Fig. 9). Les analyses ont été basées sur les distances entre les brebis expérimentales et les brebis témoins, ainsi qu'entre les chiens de protection et les mêmes brebis. Nous avons calculé ces distances, en temps réel (c'est-à-dire, sans décalage temporel), grâce aux données GPS des 20 brebis expérimentales et témoins, et des 6 chiens de protection. Pour rappel, la prédiction qui découle de nos hypothèses est que les animaux ne s'éloignent pas des brebis équipées de CAL (H2a et H3a), ou qu'ils le font seulement sur une courte période (H2b et H3b). Dans le premier cas, les distances entre les animaux après la pose des CAL (d3 et d4 sur la Fig. 9) devraient être les mêmes que les distances avant la pose de l'outil (d1 et d2 sur la Fig. 9). Dans le second cas, en revanche, les distances après CAL devraient être plus longues que celles d'avant la pose de l'outil, mais sur un court laps de temps seulement (pendant quelques jours), avant de redevenir égales.

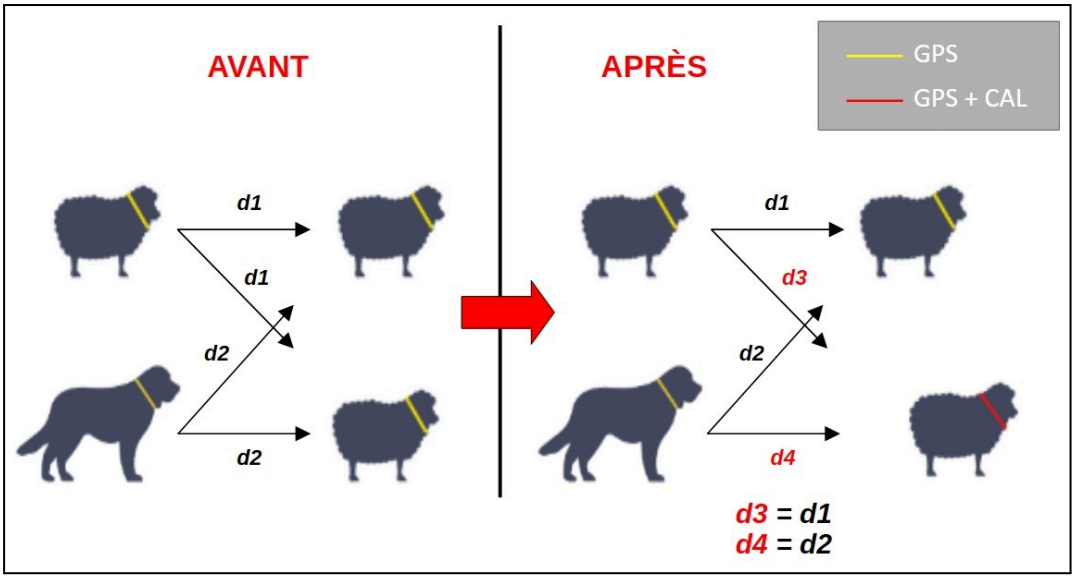


Figure 9. Schéma simplifié illustrant le protocole avant-après-témoin utilisé pour analyser les distances (d) entre chaque brebis témoin (N = 10, équipées de GPS seulement, en jaune), chaque brebis expérimentale (N = 10, équipées de GPS et ensuite de CAL, en rouge) et chaque chien de protection (N = 6) aux lots de brebis témoins et expérimentales, avant (gauche) et après (droite) la pose des CAL sur les brebis expérimentales. Si l'outil n'a pas d'effet sur les distances (d), comme prédit, d3 et d4 devraient être égal à d1 et d2, respectivement.

Dans un premier temps, nous avons inspecté visuellement les localisations GPS sur le logiciel SIG QGIS et enlevé les localisations aberrantes (p. ex., situées à des kilomètres du site d'étude). Nous avons ensuite utilisé les coordonnées géographiques de chaque localisation (latitude et longitude, transformées en mètres selon la projection Lambert 93), ainsi que l'altitude (en mètres au-dessus du niveau de la mer) pour calculer la distance euclidienne parcourue par chaque animal équipé de GPS entre sa localisation au temps *t* et celle au temps *t-1*. Il est nécessaire d'intégrer l'altitude au calcul des distances car, comme dans la mer ou dans l'air, l'espace montagnard est en trois dimensions. L'altitude a été obtenue à partir d'un modèle numérique de terrain de 1 mètre de résolution spatiale (RGE Alti® produit par l'IGN). Nous avons ensuite utilisé le pas de temps entre *t* et *t-1* pour calculer la vitesse de déplacement de chaque animal (distance/temps), et supprimé toutes les localisations associées à une vitesse de déplacement irréaliste pour l'espèce concernée (mouton ou chien). Pour les brebis, nous avons utilisé un seuil de vitesse de 540 m/min (Webber *et al.,* 2015), tandis que pour les chiens, cette valeur a été de 800 m/min (Chopra *et al*., 2024). Les heures associées à chaque localisation ont été arrondies à la minute, et les données redondantes (c'est-à-dire, ayant la même date et heure pour un même individu) ont été éliminées (la première localisation de la séquence étant celle retenue). À la fin de cette étape de pré-analyse, le jeu de données contenait plus de 400 000 localisations GPS des 20 brebis et plus de 80 000 pour les chiens. La précision des GPS a été estimée à partir de deux colliers laissés durant 5jours à une position connue. En considérant l'ensemble des localisations enregistrées (N ≈ 1 000), sans exclusion des valeurs aberrantes, la distance médiane à la position réelle était d'environ 16 mètres. Cette erreur est négligeable par rapport aux distances observées entre les brebis et entre les chiens de protection et les brebis (voir la partie Résultats). Lorsque le matériel a été récupéré en fin d'estive, il manquait 4 GPS, tandis que 8 étaient cassés.

Pour chaque pas de temps et pour chaque brebis ou chien équipé de GPS, nous avons alors calculé deux distances euclidiennes en temps réel : 1) la distance de l'individu à chacune des brebis témoins et puis la moyenne de ces distances, et 2) la distance de l'individu à chacun des brebis expérimentales et puis la moyenne de ces distances. Nous avons donc calculé 6 distances pour chaque période de l'étude, soit 12 au total (Fig. 10). Le nombre de brebis témoins ou expérimentales pris en compte dans le calcul était variable à chaque pas de temps. Mais si toutes les brebis concernées n'avaient pas systématiquement des localisations GPS enregistrées au même moment, c'était bien le cas pour la plupart, notamment grâce à l'arrondi du temps à la minute près.

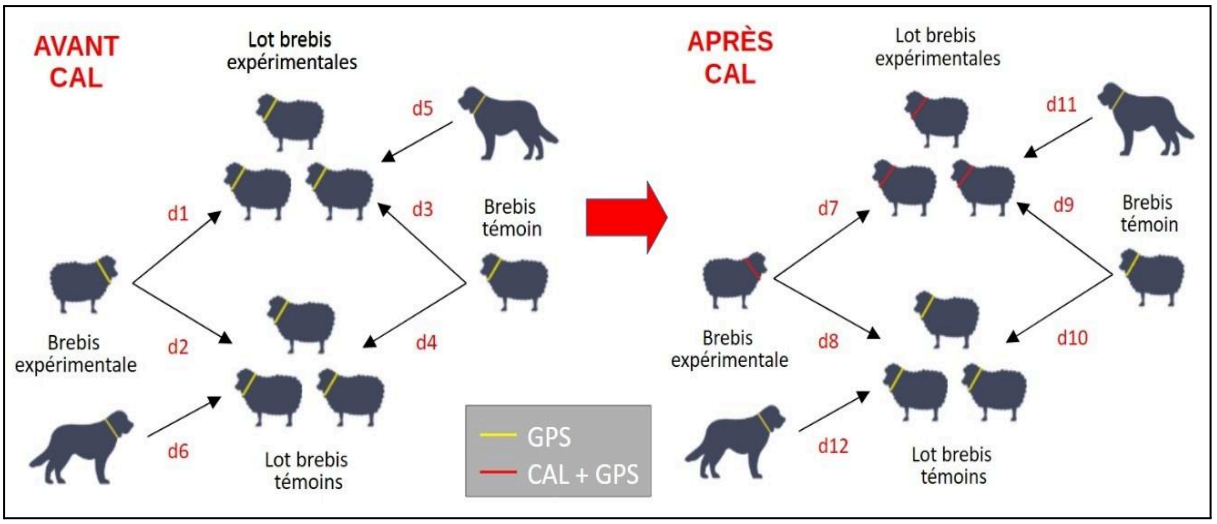


Figure 10. Schéma détaillé illustrant le protocole avant-après-témoin utilisé pour analyser les distances (d) entre chaque brebis témoin (N = 10, équipées de GPS seulement, en jaune), chaque brebis expérimentale (N = 10, équipées de GPS et ensuite de CAL, en rouge) et chaque chien de protection (N = 6) aux lots de brebis témoins et expérimentales, avant (gauche) et après (droite) la pose des CAL sur les brebis expérimentales.

Nous avons construit, sur le logiciel R, des modèles linéaires mixtes généralisés (MLMG) pour tester l'effet des CAL sur les distances entre les animaux. Ce choix se justifie par la distribution asymétrique (non-normale) des distances (avec beaucoup de valeurs faibles et quelques valeurs très élevées, même à l'échelle logarithmique - voir section Résultats ci-dessous), ainsi que l'auto-corrélation des données, due au fait que chaque localisation n'est statistiquement pas indépendante des autres pour un même individu. Les MLMG permettent d'utiliser d'autres distributions que la normale pour modéliser la distribution des distances, et intègrent des effets dits aléatoires qui prennent en compte l'auto-corrélation des données. Ainsi, dans notre cas, nous avons opté pour une distribution Gamma, avec une fonction de lien logarithmique, tandis que la variable INDIVIDU a été ajoutée en tant que variable aléatoire.

L'objectif de l'analyse statistique pour les distances entre les brebis était de chercher un effet de l'interaction entre les variables GROUPE (brebis témoins ou expérimentales) et PÉRIODE (avant et après la pose des CAL) sur la variabilité observée des distances. Ces deux variables sont binaires, avec GROUPE = 0 pour les brebis témoins et GROUPE = 1 pour les brebis expérimentales. De même, PÉRIODE = 0 avant la pose des CAL, et PÉRIODE = 1 après la pose du dispositif. D'après l'hypothèse que les CAL ne perturbent pas les animaux, on s'attendait à ce que l'effet de l'interaction GROUPE × PÉRIODE soit absent, c'est-à-dire, qu'il n'y ait pas de différence de distances moyennes, avant et après la pose des CAL, entre :

1) chaque brebis expérimentale et les autres brebis expérimentales (d1 et d7 dans la Fig. 10),

2) chaque brebis expérimentale et le lot des brebis témoins (d2 et d8 dans la Fig. 10),

3) chaque brebis témoin et le lot de brebis expérimentales (d3 et d9 dans la Fig. 10), et enfin

4) chaque brebis témoins et le lot de brebis témoins (d4 et d10 dans la Fig. 10).

À elle seule, la variable GROUPE ne devrait pas avoir un effet sur les distances, car le simple fait d'avoir été assignée au groupe expérimental ou témoin ne devrait pas impacter les distances *avant* la pose des CAL. De même, la variable PÉRIODE à elle seule ne devrait pas avoir un effet sur les distances aux brebis témoins *après* la pose des CAL.

Dans le cas des chiens, la variable GROUPE n'est pas pertinente, car aucun n'a été équipé de CAL. Toujours est-il que nos prédictions pour les distances entre les chiens et les brebis sont similaires à celles prédites pour les brebis : pas de différence de distances moyennes, avant et après la pose des CAL, entre chaque chien et le lot de brebis expérimentales (d5 et d11 dans la Fig. 10), ni entre chaque chien et le lot des brebis témoins (d6 et d12 dans la Fig. 10).

Nous avons créé et ajouté la variable SÉPARÉ aux modèles, pour prendre en compte la période de mi-août à mi-septembre pendant laquelle le troupeau a été scindé en deux. De même, la variable JOUR.NUIT a été ajoutée pour tenir compte du fait que les animaux sont souvent regroupés pendant la nuit. Ces deux variables sont binaires (SÉPARÉ = 1 durant les 30 jours de séparation, = 0 le reste du temps ; JOUR.NUIT = 0 si jour, = 1 si nuit). Nous avons aussi calculé et ajouté aux modèles la variable NB.JOURS, allant de 1 à 136, pour prendre en compte le fait que les distances entre les animaux aient pu varier en raison de facteurs non mesurés, mais qui changent au cours du temps (p. ex., la phénologie de la végétation, l'utilisation des différents quartiers de pâturage, etc.). Enfin, nous avons ajouté aux modèles les variables TEMP (température) et VITESSE (vitesse de déplacement) car ces deux facteurs peuvent influer les distances entre les animaux. Ces deux variables ont été centrées-réduites afin de les mettre sur des échelles comparables. Ainsi, le modèle complet pour les distances entre les brebis, intégrant toutes les variables, était de la forme suivante :

$$log(dist_x) = \beta_0 + \beta_1 GROUPE + \beta_2 PÉRIODE + \beta_3 GROUPE \times PÉRIODE + \beta_4 NB.JOURS + \beta_5 SÉPARÉ + \beta_6 JOUR.NUIT + \beta_7 TEMP + \beta_8 VITESSE + \beta_9 INDIVIDU + \varepsilon,$$

où $dist_x$ est la distance d'intérêt (aux brebis témoins, $dist_t$, ou aux brebis expérimentales, $dist_e$), β_0 est l'ordonnée à l'origine, β_x sont les coefficients associés aux variables ou à l'interaction, et ε est l'erreur (la partie de la variabilité de $dist_x$ qui n'est pas expliquée par les variables du modèle). Rappelons que pour les modèles concernant les chiens, la

variable GROUPE n'est pas pertinente (car aucun chien n'a été équipé de CAL). Les modèles sont donc plus simples, car sans interaction.

Nous avons utilisé une approche descendante pour identifier le modèle qui s'ajustait au mieux aux données : à partir du modèle complet, nous avons enlevé des variables et comparé la qualité relative de l'ajustement avec le critère d'information d'Akaike (AIC). Une différence d'AIC de > 2 entre deux modèles est souvent prise comme un indicateur que le modèle ayant l'AIC le plus faible s'ajuste mieux aux données (Burnham & Anderson 2002). Enfin, afin de tester les hypothèses liées à un possible effet d'habituation (H2b et H3b), nous avons également fait l'analyse en considérant seulement une semaine avant / une semaine après la pose des CAL. Aucun des modèles retenus pour l'analyse ne souffrait de colinéarité entre variables explicatives, toutes les variables dans tous les modèles retenus ayant, en effet, un facteur d'inflation de variance < 3.

2.6. Observations comportementales des chiens de protection

Nous avons utilisé la méthode d'échantillonnage instantané par balayage ("instantaneous scan sampling" - Bateson & Martin, 2021) pour évaluer le comportement de chaque chien de protection (Tab. 2). Les scans ont été réalisés toutes les 30 minutes, entre 8h et 19h, hors période de chaume (repos du troupeau), afin de fournir une vision complète et représentative de leurs comportements quotidiens. Ces comportements ont été classés selon l'un éthogramme propre aux chiens (Tab. 2).

A partir de ces observations, nous avons établi les budgets temps pour le groupe de chiens permettant d'obtenir les pourcentages de temps pour chaque catégorie comportementale selon la formule suivante :

$$Freq\ Comportement\ /\ Total\ scan\ x\ 100$$

L'observation comportementale des chiens de protection s'est déroulée en 4 phases de suivi (Fig. 5), chacune d'une durée de 3 jours, organisées comme suit :

- Phase 1 – Période de contrôle : Observation précédant la pose des CAL ;
- Phase 2 – Réaction immédiate : Observation débutant 3 heures après la pose des CAL ;
- Phase 3 – Habituation intermédiaire : Observation environ deux semaines après l'installation ;
- Phase 4 – Habituation tardive : Observation environ trois mois après l'installation des CAL.

Tableau 2. Éthogramme utilisé durant les observations comportementales.

Catégorie	Sous-catégorie	Comportement	Description
Vigilance / protection	Vigilance	Posture d'alerte	Chien debout, oreilles dressées, muscles tendus, accompagnée ou non de grognements
		Patrouille du périmètre (patrol)	Déplacement actif autour de la zone à protéger (troupeau)
		Relevé fréquent de la tête	Surveillance* fréquente avec relèvement de la tête (dans un intervalle < 20 secondes)
		Observation prolongée à distance	Fixation prolongée sur un stimulus (> 5 secondes), accompagnée ou non de grognements
		Repos (en alerte)	Allongé avec tête relevée, yeux ouverts, oreilles actives
		Inspection olfactive	Reniflement ciblé
	Protection	Aboiement d'alerte	Aboiement rythmé en direction d'un stimulus (minimum 3 répétitions separées de 3 à 5s)
		Course vers l'intrus*	Déplacement rapide vers l'intrus (trot soutenu ou galop) + noter intrus = chien ? loup ? humain ?...
		Interposition*	Se positionne entre troupeau et intrus (humain, animal)
		Marquage olfactif (grattage)	Grattage du sol ou d'objets pour marquer le lieu, quel contexte ?
		Rassemblement du troupeau	Regroupe le troupeau (succès ou échec)
Stress / peur	Stress	Halètement	Respiration rapide (fz et occurence), noter t°c ext et activité précédente
		Tremblements	Secousses musculaires involontaires
		Marche en cercle	Déambulation répétitive sans but et en cercle
		Freeze (immobilité)	Reste figé sans réponse aux appels, noter direction corps/oreilles/tête
		Bâillements	Bâillements fréquents : > 3 par minute (noter activité précédente)
		Léchage de truffe	Sans avoir bu ou manger avant
		Proximité avec le référent	Proximité cte avec la personne référente (environ 1m)
		S'isole, évite le contact	Fuit le contact visuel ou physique, évitement, se cache, noter position corps/oreilles/tête
		Ebrouement	Se secoue fréquemment et sans adéquation avec la situation
	Peur	Fuite / éloignement à stimuli	Évitement ou repli dans un coin suite à un stimuli (noter position corps/oreilles/tête)
		Gémissements	Vocalisation aiguë, courte, pouvant être répétée, plaintive
		Aboiement d'alerte	Aboiement aigue
		Posture recroquevillée	Le chien s'aplatit au sol, tête basse, queue sous le ventre et oreilles en arrière
		Queue rentrée	Queue rentrée entre les pattes
		Sursaut	Réagit brusquement à un stimuli (bruit, lumière)
		Hypervigilance (regard rapide, tournis)	Scan rapide de l'environnement (noter position corps/oreilles/tête)
		Miction involontaire	Miction en contexte de peur (noter position car n'est pas celle d'une miction habituelle)
Exploration / routine	Exploration	Reniflement	Exploration olfactive du sol ou des objets
		Monte sur éléments	Monte sur un support : rocher, tronc, etc
		Écoute statique	Oreilles mobiles sans déplacement (noter position corps/oreilles/tête, tension ou relâché ?)
		Déplacement lent, en zigzag	Exploration non direct (déplacement long non linéaire), trajectoire non répétitive (sinon pacing)
	Routine	Alimentation	Prise de nourriture
		Boit	Léchage ou aspiration d'eau
		Mordillement d'objet	Mastication prolongée d'un objet
		Repos (détendu)	Position couchée, muscles relâchés (noter si yeux ouverts ou fermés, et pos. tête)
		Étirement	Étire les pattes ou le dos
		Auto-toilettage	Léchage du corps ou des membres
		Grattement	Le chien utilse ses membres pour se gratter
		Frottement sur objet	Frottement des flancs contre objets
Comportements sociaux	Affiliatif	Rapprochement*	Approche lente sans signe de tension
		Invitation au jeu*	Posture ou comportement incitant un congénère à interagir de manière ludique (ex. révérence).
		Contact positif*	Contact corporel volontaire (frotte tête ou flanc)
		Lèche visage*	Léchage bref (sans insistance) du museau ou du visage d'un congénère.
	Aggressif	Gronement sourd*	Vocalisation grave, continue, émise en situation de menace ou d'avertissement.
		Aboiement*	Vocalisation brève, sonore.
		Charge avec ou sans contact*	Déplacement rapide vers un individu, parfois suivi d'un impact ou d'une morsure (préciser si chien court)
		Morsure*	Prise brusque avec la mâchoire, dirigée vers un congénère, un humain, une brebis
		Poil hérissé*	Corps tendu, redressement des poils du dos (souvent au niveau du garrot), s'accompagne en général d'un regard fixe sur l'individu ciblé.
		Corps tendu vers l'avant*	Chien immobile, posture corporelle raide, penchée vers l'avant (peut arriver en même temps que "poil hérissé"
		Regard fixe*	Fixation visuelle prolongée d'un individu sans clignement ni détournement.
	Dominant (non aggressif)	Posture haute	Position droite et tonique, tête et queue relevées
		Queue dressée	Queue tenue en hauteur, droite ou courbée
		Monté sociale*	Contact physique appuyé contre un autre chien
		Déplacer un autre chien*	Un dominant s'approche d'un subordonné et le déplace (le subordonné évite)
		Marquage urinaire fréquent	Emission répétée d'urine à des points spécifiques
	Soumission	Oreilles rabattues	Oreilles plaquées vers l'arrière (distinguer un individu menacant et un individu qui a peur)
		Regard évitant*	L'individu détourne le regard quand il est face à un autre individu.
		Se couche sur le côté	Position passive offrant le flanc ou le ventre
		Rapprochement en rampant	Approche lente avec le corps au sol

3. RÉSULTATS

3.1. Présence et activité du loup

Au total, la prospection des indices de présence du loup nous a permis de trouver 38 fèces lupines présentant des caractéristiques typiques (taille, forme, contenu) sur l'alpage et sa périphérie : 1 fèces fraîche, 6 en cours de décomposition et 31 fèces sèches (Fig. 11). De plus, 1 prédation récente et 3 carcasses d'ongulés ont été identifiées sur l'alpage.

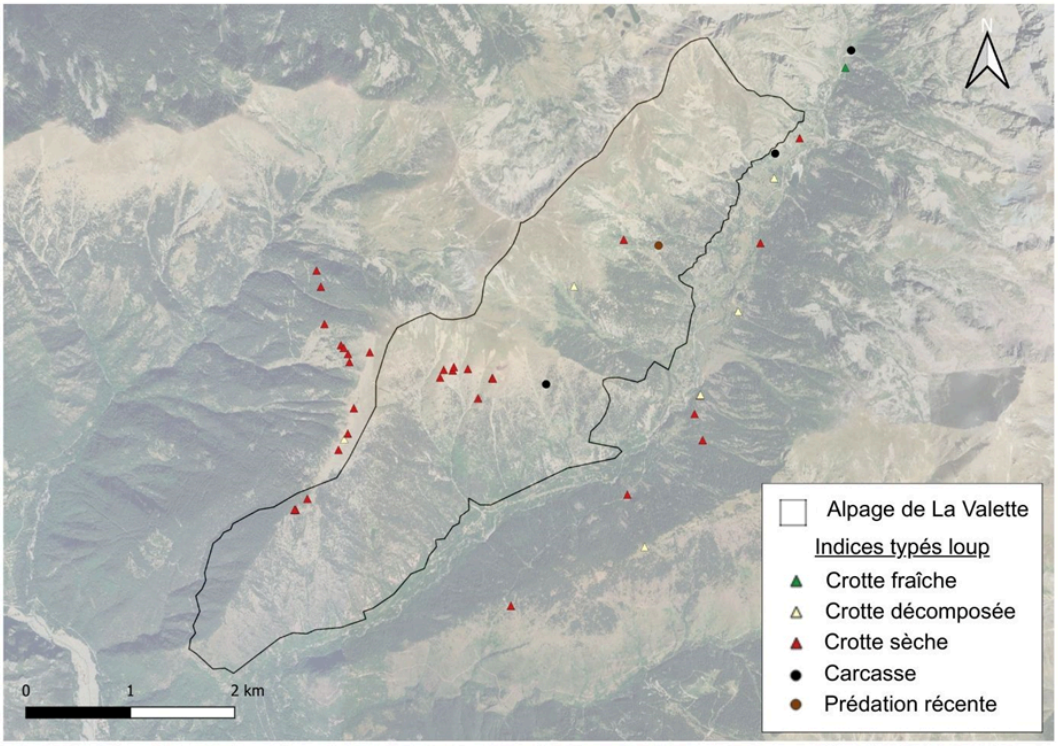


Figure 11. Localisation des 38 fèces présentant des caractéristiques typiques du loup classées par état de fraîcheur, de la prédation fraîche et des trois carcasses.

L'exploitation des données collectées par les pièges photographiques (PP) a permis d'estimer l'effectif minimal de loups et leur rythme d'activité (jour/nuit), et nous a fourni un indicateur de leur fréquence d'utilisation du site d'étude. Au cours des 180 jours de collecte, nous avons réussi à collecter 173 videos "Loup" sur l'alpage, répartis sur 84 jours. Tous les pièges installés ont enregistré du loup, avec une moyenne de 1,12 passage par jour de présence du troupeau et une probabilité de 50 % d'enregistrer au moins un second passage de loup sur un piège photographique au cours d'une même journée. Nous avons recensé en moyenne 11 observations par PP au cours de la durée de l'étude (min : 1 - max : 35) (Fig. 12), et un maximum de 8 passages sur un même piège en une seule journée.

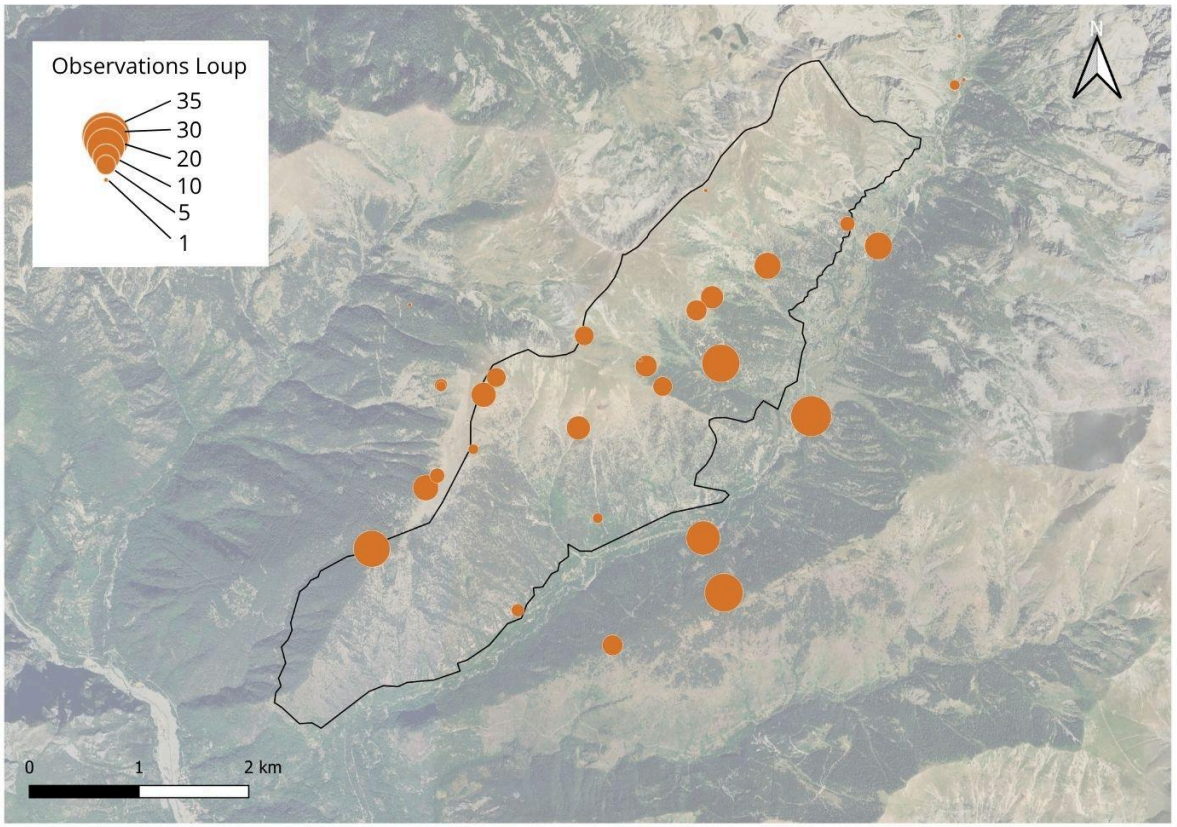


Figure 12. Répartition spatiale des observations de loup sur le site d'étude. Chaque cercle correspond à un piège photographique, la taille du cercle varie en fonction du nombre d'observations de loup collecté par le piège.

La répartition initiale des pièges photographiques sur l'alpage et sa périphérie visait à identifier les principaux axes de déplacement et points d'accès des loups au site d'étude. La concentration des observations sur certains itinéraires (Fig. 12) indique que nous avons maintenant une bonne connaissance de ces voies de passage préférentielles.

Les observations lupines sur PP ont progressivement augmenté au cours du temps sur l'alpage, jusqu'à un maximum de 27 observations en septembre, suivis d'une légère baisse en octobre, bien que leur détection reste importante en cette fin de saison (Fig. 13). Cette dynamique peut s'expliquer par une augmentation de l'effort d'échantillonnage, avec l'ajout et le déplacement de PP sur l'alpage au cours de la saison (voir section 2.3.), mais aussi résulter d'une réelle intensification de la présence du prédateur sur le site d'étude.

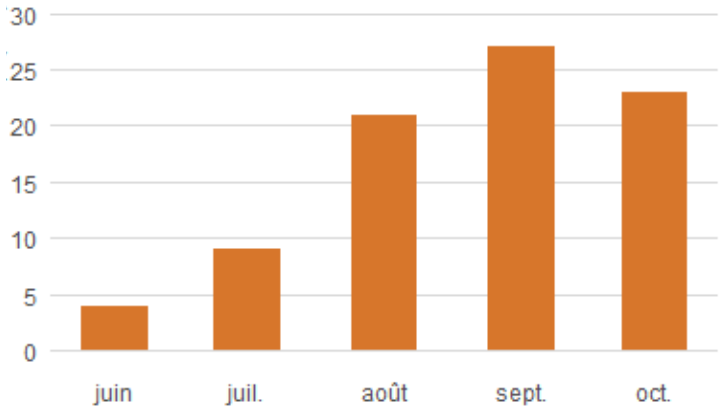


Figure 13. Nombre d'observations (PP) loup par mois sur l'alpage.

Environ 70 % des vidéos capturées ont enregistré 1 seul individu, et 2 individus pour les 30 % restants, avec un maximum de 3 individus observés sur l'alpage à une même occasion. D'après l'étude des correspondances date/heure de ces vidéos et la localisation des PP (extrait vidéo), nous supposons que le site d'étude a été fréquenté par au minimum 4 loups. Nous avons également compilé les heures de détection enregistrées sur les vidéos pour représenter graphiquement la densité d'activité journalière de l'espèce (Fig. 14). On observe que 93% des passages ont été enregistrés de nuit (20h - 7h), avec un pic d'activité observé entre 0h et 3h .

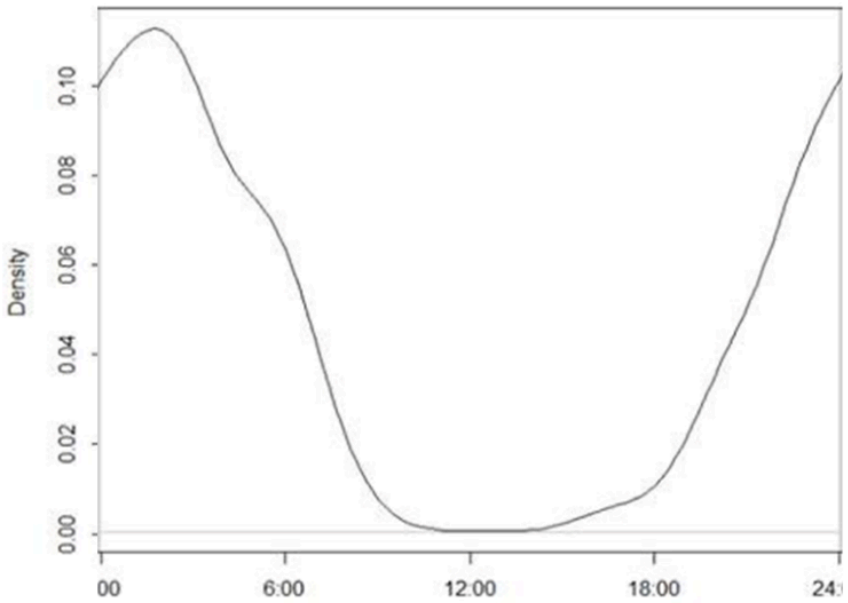


Figure 14 : Rythme d'activité journalier du loup sur l'alpage de la Valette d'après les vidéos obtenus par pièges photographiques.

3.2. Indicateurs de prédation

Entre 2020 et 2024, 38 constats de prédation ont été réalisés sur le site d'étude pour 138 victimes constatées. En 2025, avec les CAL en place, on dénombre 16 constats pour 46 victimes. Sur les alpages témoins, les chiffres équivalents entre 2020-2024 étaient de 50 constats pour 112 victimes sur le troupeau de Férisson, et de 31 constats pour 115 victimes sur le troupeau de la Maïris. En 2025, ces deux troupeaux ont enregistré respectivement 13 constats, pour 15 et 16 victimes. (Tab. 3 et Fig. 15). La lecture de ces chiffres en 2025 doit toutefois être faite avec prudence, car parmi les constats réalisés sur les sites voisins, 4 n'ont pas été instruits au moment de la rédaction de ce rapport (février 2026). Nous savons donc que ces attaques ont eu lieu, mais nous ne connaissons pas le nombre de victimes. Par ailleurs, 3 constats validés ont été associés à zéro victime (voir section 2.4.).

Tableau 3 : Comparaison des indicateurs de prédation (constats, victimes et victimes par attaque) entre le troupeau équipé et les deux troupeaux voisins non équipés (témoins) entre 2020 et 2025, exprimés en valeurs brutes et standardisées pour 100 bêtes. Les chiffres ont été calculés selon la méthodologie détaillée en section 2.4.

Groupe	Année	Constats	Victimes	Effectif moy.	Constats /100 bêtes	Victimes /100 bêtes	Victimes /attaque
Troupeau équipé La Valette	2020	8	41	1238	0,65	3,31	5,13
	2021	6	20	1028	0,59	1,96	3,33
	2022	9	24	1011	0,89	2,38	2,67
	2023	8	31	1034	0,76	2,95	3,88
	2024	7	22	757	0,95	3	3,14
	Moy. 2020-2024	7,6	27,6	1014	0,77	2,72	3,63
	2025	16	46	1204	1,47	4,22	2,88
Troupeau voisin Férisson	2020	10	26	603	1,66	4,31	2,60
	2021	8	21	529	1,51	3,97	2,63
	2022	10	19	700	1,43	2,71	1,90
	2023	11	22	630	1,75	3,49	2,00
	2024	11	24	614	1,79	3,91	2,18
	Moy. 2020-2024	10	22,4	615	1,63	3,68	2,26
	2025	13	16	484	2,91	3,58	1,23
Troupeau voisin La Maïris	2020	10	37	1907	0,52	1,94	3,70
	2021	6	16	1520	0,39	1,05	2,67
	2022	10	46	1791	0,56	2,57	4,60
	2023	5	16	1839	0,27	0,87	3,20
	2024	-	-	-	-	-	-
	Moy. 2020-2024	7,8	28,8	1764	0,44	1,61	3,54
	2025	13	15	1439	1,47	1,69	1,15

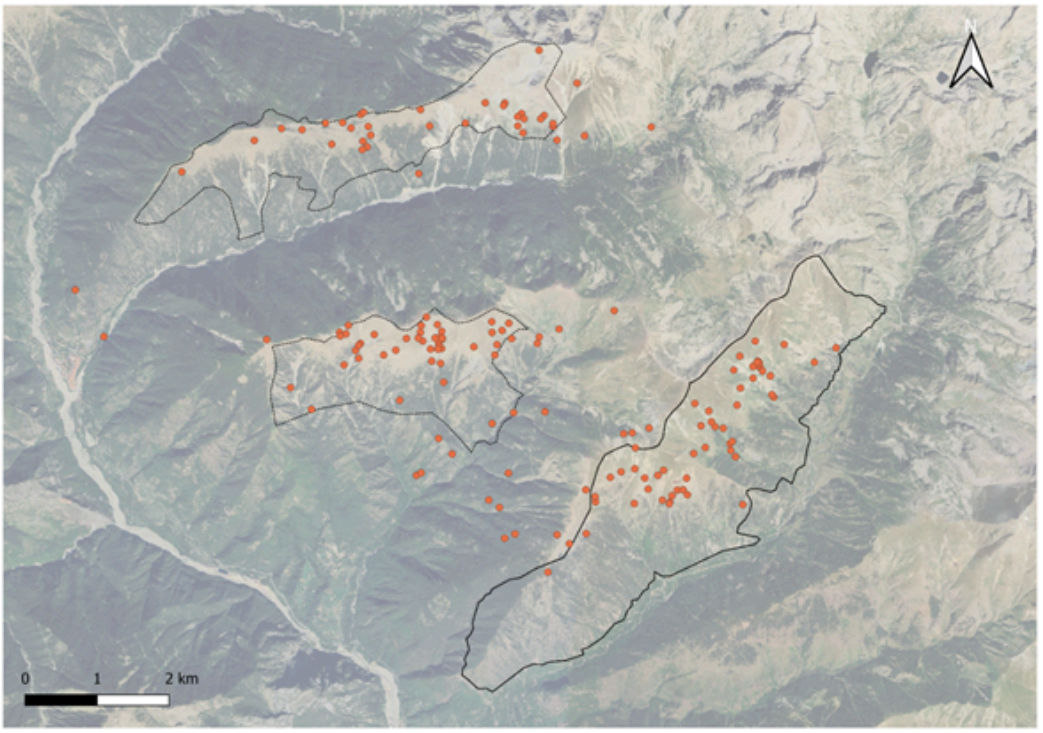


Figure 15. Localisation des alpages témoins en pointillé (la Maïris en haut et Férisson au centre) et du site d'étude (trait plein), et localisation des attaques constatées entre 2020 et 2024 (points oranges).

Les résultats du suivi de la prédation sur les troupeaux sont présentés à durée d'exposition et taille de troupeau standardisées (approche détaillée dans la partie section 2.4). La pression de prédation n'ayant pas pu être mesurée de manière homogène entre les périodes et les sites, elle est supposée comparable dans l'interprétation des résultats.

En 2025, le *nombre de constats* mensuels pour 100 brebis a été supérieur à la moyenne historique tout au long de la saison, avec trois fois plus d'attaques aux mois de juin et d'octobre 2025 qu'en moyenne sur 2020–2024 (Fig. 16). L'augmentation du *nombre de victimes* pour 100 brebis est elle aussi principalement portée par les mois de juin et d'octobre. À l'inverse, le *nombre de victimes par attaque* est inférieur à la moyenne historique tout au long de la saison, à l'exception du mois d'août (Fig. 16). Pour résumer, la saison 2025 montre une prédation surtout concentrée en juin et en octobre, avec des attaques moins destructrices, à l'exception du mois d'août.

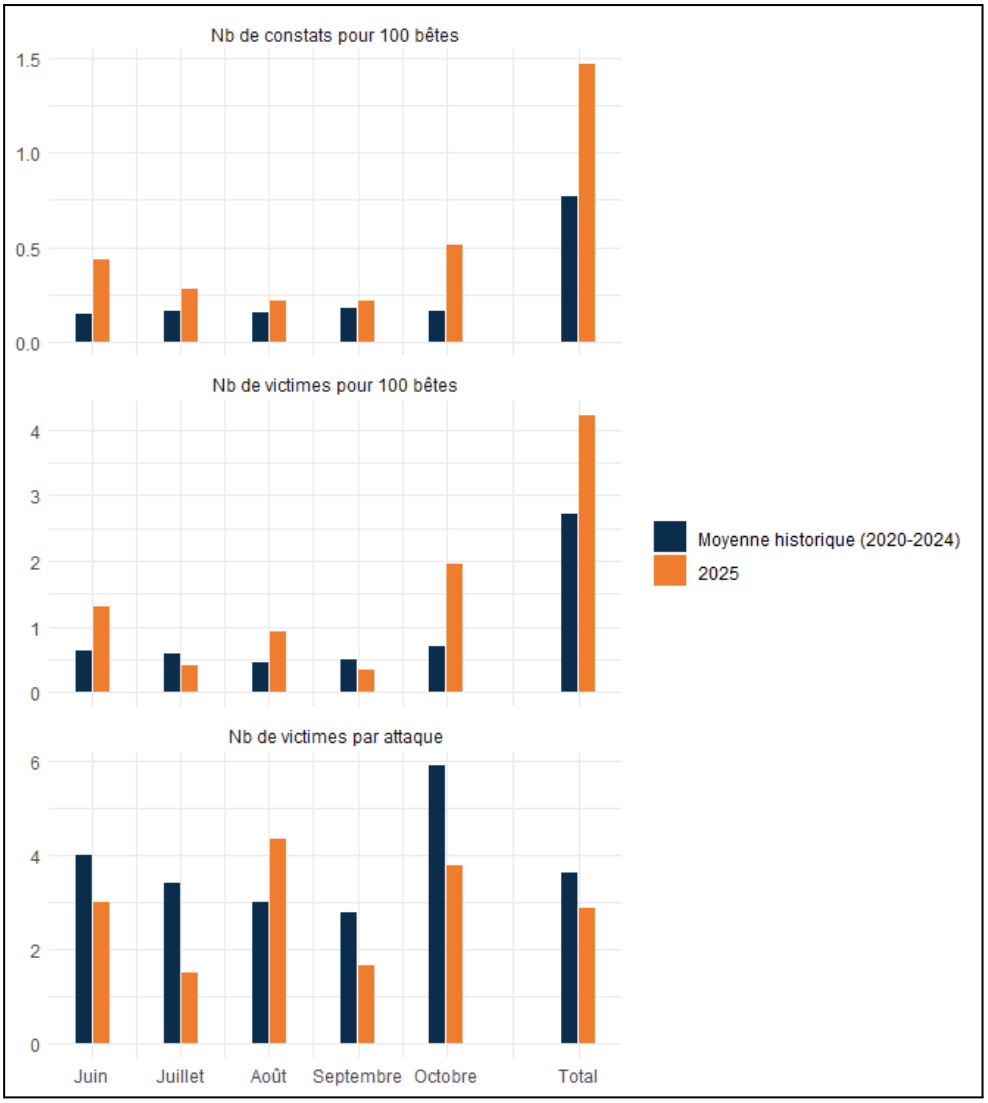


Figure 16 : Comparaison mensuelle de la moyenne historique (2020-2024) avec 2025 (CAL) sur le site d'étude, du nombre de constats et de victimes pour 100 bêtes, et du nombre de victimes par attaque (de haut en bas).

3.2.1. Risque Relatif (RR) : Comparaison temporelle

Nous avons estimé le Risque Relatif (RR) afin de comparer l'évolution des indicateurs de prédation entre les périodes avant et après l'installation des CAL sur le site d'étude (voir section 2.4.1). Ainsi, avant la mise en place des CAL, le *nombre de constats* rapporté à 100 brebis se situait entre 0,6 et 0,95 constats/100 bêtes, avec une médiane proche de 0,75 (Fig. 17). Après la pose de l'équipement, la valeur observée atteint ≈ 1,5 constats/100 bêtes, ce qui correspond à un doublement du taux d'attaques (RR attaques ≈ 2,05). De même, pour la période d'avant les CAL, le *nombre de victimes* a varié entre ≈ 2,0 et 3,3 victimes/100 bêtes, avec une médiane proche de 3 victimes/100 bêtes, tandis qu'après la mise en place de l'outil, la valeur observée atteint ≈ 4,2

victimes/100 bêtes. L'augmentation observée correspond à une augmentation d'environ 16 brebis sur la saison, soit une hausse d'environ 40 % par rapport aux valeurs typiques avant équipement. L'analyse en risque relatif confirme cette tendance (RR victimes ≈ 1,72), indiquant une augmentation moyenne d'environ 70 % sur l'ensemble des observations. En revanche, le *nombre de victimes par attaque* a diminué. Avant équipement, les attaques provoquaient en moyenne ≈ 3,2 à 3,9 victimes par attaque (médiane ≈ 3,3). Après équipement, cette valeur descend à ≈ 2,9 victimes par attaque. Les attaques sont donc moins meurtrières individuellement (RR victimes/attaque ≈ 0,75).

Le message à retenir est que, par rapport à la moyenne 2020–2024, le risque d'attaque a été multiplié par 2 et le taux de pertes par 1,7 en 2025, tandis que le nombre de victimes par attaque a diminué d'environ 25 %. En 2025, les attaques ont donc été plus nombreuses, mais en moyenne moins destructrices que la référence historique.

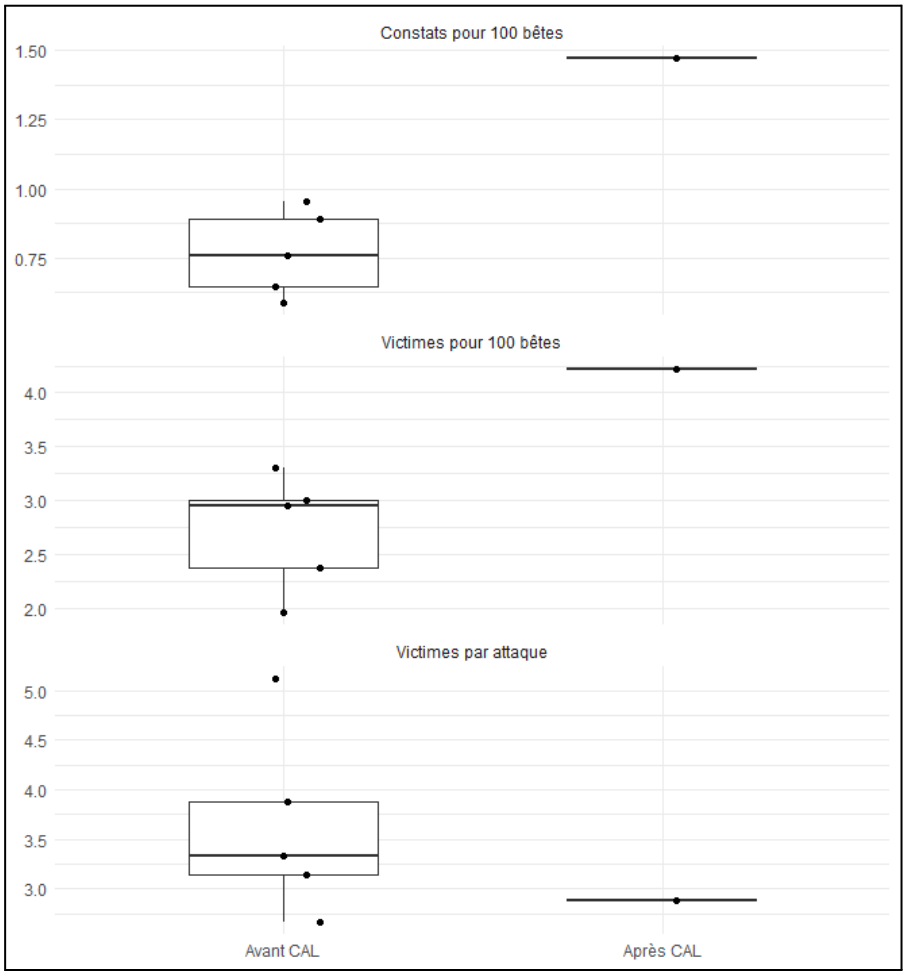


Figure 17. Comparaison avant (2020-2024) / après (2025) la mise en place des CAL sur le site d'étude, du nombre de constats et de victimes pour 100 bêtes, et du nombre de victimes par attaque (de haut en bas).

3.2.3. Approche ΔBACI : Comparaison spatio-temporelle

Nous avons utilisé l'approche ΔBACI pour comparer l'évolution de la prédation sur le site d'étude à celle sur les sites témoins au cours de la même période (voir section 2.4.2). Le *nombre de constats* rapporté à 100 brebis a été systématiquement plus faible pour la Valette, avec environ deux fois moins d'événements que sur les sites témoins (Fig. 18). En 2025, l'évolution est toutefois restée du même ordre de grandeur entre les sites, avec un ΔBACI très proche de zéro et légèrement négatif (≈ −0,11), indiquant un à deux constats de moins sur le site d'étude en comparaison aux sites témoins. Avant équipement, le *nombre de victimes* pour 100 brebis était systématiquement plus faible à la Valette, mais la tendance s'inverse en 2025 (ΔBACI ≈ +3,09, soit ~ 3 victimes supplémentaires pour 100 brebis), indiquant cette fois-ci une augmentation des pertes plus importante sur le site équipé par rapport aux sites témoins. Malgré ce ΔBACI positif, les indices CI-contribution (≈ −0,07) et CI-divergence (≈ −0,73) négatifs suggèrent cependant une dynamique commune dans les différents sites (expérimental et témoins) plutôt qu'un effet des CAL (pour plus de détaille se référer à la section 2.4.2). Le *nombre moyen de victimes par attaque* a été légèrement plus élevé sur le site équipé en 2025 (ΔBACI ≈ +0,77), indiquant que chaque événement de prédation implique en moyenne près d'une brebis supplémentaire.

Cependant, le départ anticipé et inattendu de l'un des deux troupeaux témoins en octobre (alpage de Férisson) a pu entraîner un report de prédation sur l'alpage de la Valette en fin de saison. Afin d'évaluer son influence, nous avons recalculé les ΔBACI en excluant octobre pour l'ensemble des sites et des années. Ainsi, sur la période juin–septembre, le ΔBACI devient plus négatif pour le nombre de constats (≈ −0,51 contre −0,11 avec octobre), indiquant moins de constats sur le site équipé que sur les sites voisins. Les indicateurs liés aux pertes (victimes et victimes par attaque) restent légèrement positifs mais fortement atténués (≈ +0,61 et +0.42 contre +3,09 et +0,77 avec octobre).

Pour résumer, le site équipé a présenté environ deux fois moins de constats que les sites voisins, mais une hausse apparente des pertes en 2025, liée à la fin de saison. L'écart observé provient surtout d'un report de prédation ; sans octobre, les différences s'atténuent fortement, suggérant une dynamique commune aux sites plutôt qu'un effet des CAL.

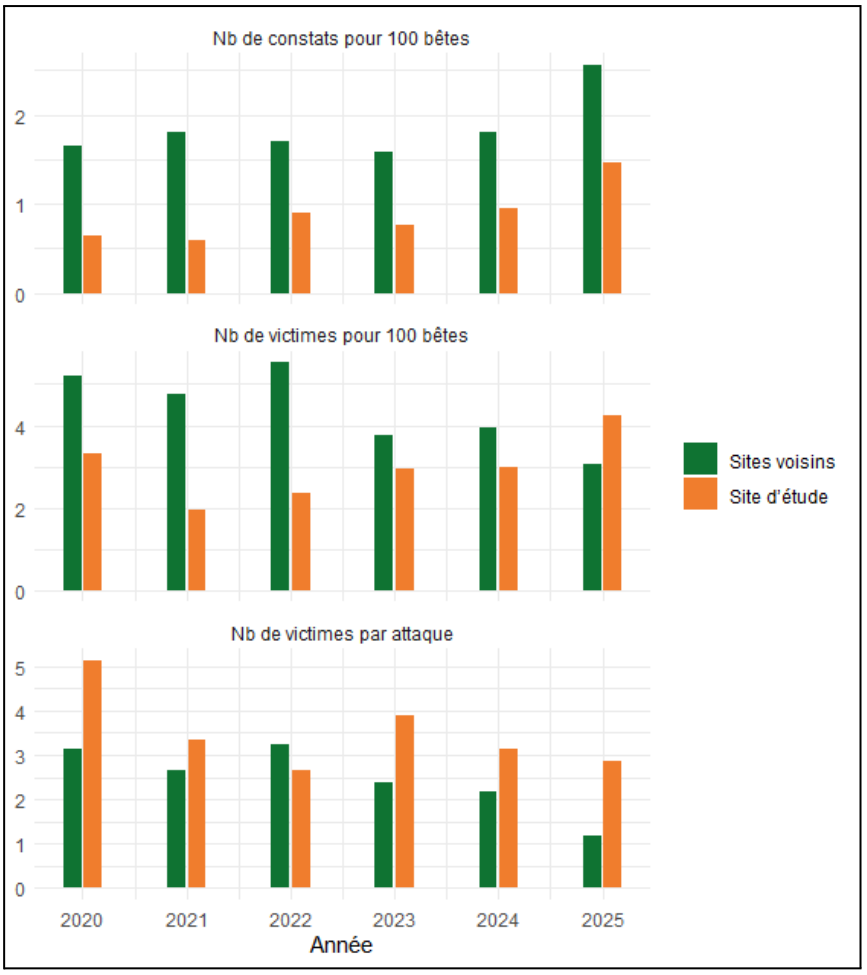


Figure 18. Comparaison annuelle des sites voisins avec le site d'étude, du nombre de constats et de victimes pour 100 bêtes, et du nombre de victimes par attaque (de haut en bas).

3.2.4. Modélisation de la probabilité d'un constat de prédation

La comparaison des modèles que nous avons construits pour estimer la probabilité journalière d'avoir un constat de prédation, en reliant temporellement la présence des CAL et du loup, n'a mis en évidence aucune amélioration de l'ajustement aux données avec l'ajout des covariables, par rapport au modèle nul (Tab. 4). Et cela, tant en intégrant la présence des CAL et du loup (χ^2 = 0,49 ; p = 0,783) que les variables d'agitation (brebis et chiens) et de temps (χ^2 = 4,37 ; p = 0,497). La probabilité journalière d'avoir un constat d'attaque en 2025 n'est donc expliquée par aucune des variables testées. La rareté des événements et l'incertitude temporelle associée aux constats limitent probablement la capacité du modèle à détecter des effets à l'échelle journalière.

Tableau 4 : Comparaison des modèles expliquant la probabilité journalière de constat d'attaque.

Modèle	Variables	n	ddl	LRT χ^2	p	ΔAIC
M(0)	nul	114	0	0	1	0
M(CAL)	CAL	114	1	0,32	0,57	2,32
M(temps)	Temps	114	1	1,13	0,287	3,13
M(loup)	Présence du loup	114	1	0,45	0,501	2,45
M(loup+CAL)	Présence du loup + CAL	114	2	0,49	0,783	4,49
M(loup+CAL+TPX)	+ activité Brebis	114	3	2,96	0,397	8,96
M(loup+CAL+TPX+CPT)	+ activité CPT	114	4	4,43	0,351	12,43
M(complet)	+ temps	114	5	4,37	0,497	14,37

3.3. Analyses des distances

Les distributions empiriques issues des données GPS montrent que les distances moyennes entre les brebis ont beaucoup varié au cours de l'expérimentation, avec des pics d'augmentation très visibles (Fig. 19). La plupart du temps, chaque brebis équipée de GPS était à moins de 100 mètres en moyenne de ces congénères également équipées de GPS, que cela soit avant ou après la pose des CAL. On observe néanmoins une forte augmentation des distances entre les brebis (tout groupe confondu) *après* la pose du dispositif, notamment lors de la période allant d'environ mi-août à mi-septembre (Fig. 19). Ce patron a aussi été observé pour les chiens (Fig. 20). Puisque cette augmentation des distances est toutefois de même ampleur, tant pour les brebis expérimentales que pour les brebis témoins et les chiens, il est clair que sa cause n'est pas la pose des CAL, mais un autre facteur quelconque ayant affecté équitablement tous les animaux. Comme décrit ci-dessus, il s'avère, en effet, que le troupeau a été scindé en deux pendant ces quelques 30 jours, ce qui explique l'augmentation des distances moyennes. Cet événement illustre l'utilité d'avoir un lot de brebis témoins dans l'étude ; sans cela, on aurait pu s'interroger, à tort, si cette augmentation des distances entre mi-août et mi-septembre n'était pas due, au moins en partie, aux CAL.

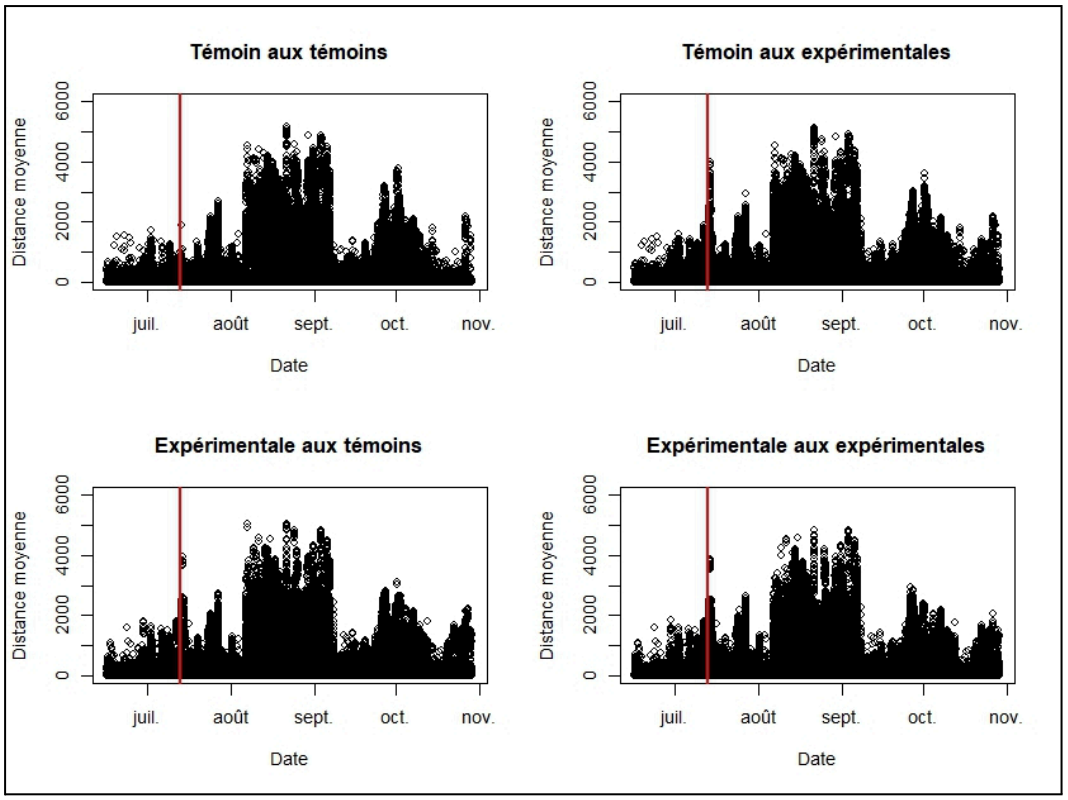


Figure 19. Distances moyennes de chaque brebis (témoins ou expérimentale) aux autres brebis (témoins ou expérimentales) au cours du temps et avant/après la pose des CAL. La droite rouge indique le moment de la pose du dispositif.

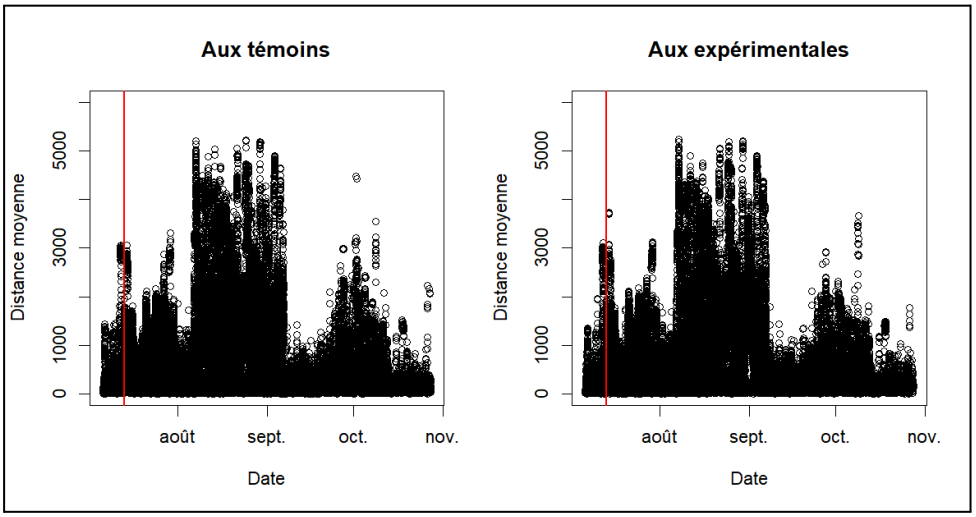


Figure 20. Distances moyennes de chaque chien de protection aux brebis témoins et expérimentales au cours du temps et avant/après la pose des CAL. La droite rouge indique le moment de la pose du dispositif.

3.3.1. Analyse à l'échelle des cinq mois de l'étude

A. Distances moyennes entre les brebis

Dans tous les cas, le modèle complet a été celui qui s'ajustait au mieux, et de très loin, aux données (Tab. 5). Plusieurs variables ont eu l'effet attendu : la variable GROUPE n'a pas eu d'effet (*p* largement supérieur à 0,05), tandis que les distances moyennes ont augmenté lorsque le troupeau était scindé en deux (coefficient positif pour SÉPARÉ), et ont diminué de nuit (coefficient négatif pour JOUR.NUIT) (Tab. 6). Une augmentation de la température a réduit les distances entre les brebis, alors qu'une augmentation de la vitesse de déplacement l'a augmenté. Le passage du temps (NB.JOURS) a aussi était corrélé à une augmentation des distances moyennes entre les individus (Tab. 6).

Les modèles montrent, cependant, que les distances entre brebis ont augmenté après la pose des CAL (PÉRIODE = 1), sans que cela soit lié ni au passage du temps (car cet effet est déjà pris en compte par NB.JOURS), ni aux CAL eux-mêmes (car l'effet est aussi présent pour les distances entre les seules brebis témoins). En outre, contrairement à nos prédictions, un effet de l'interaction GROUPE × PÉRIODE, bien que relativement faible, a été mis en évidence par les modèles (Tab. 6). On observe qu'après la pose des CAL, toutes les brebis s'éloignent des brebis témoins (coefficient positif pour PÉRIODE), mais les brebis expérimentales s'éloignent moins des brebis témoins que les brebis témoins s'éloignent entre elles (coefficient négatif et de valeur nettement plus faible pour GROUPE × PÉRIODE – Tab. 6). En revanche, si toutes les brebis s'éloignent des brebis expérimentales après la pose des CAL (coefficient positif pour PÉRIODE), les brebis expérimentales le font davantage entre elles que par rapport aux brebis témoins (coefficient positif et de valeur plus faible pour GROUPE × PÉRIODE – Tab. 6).

Tableau 5. Modèles linéaires mixtes généralisés construits pour tester l'effet des CAL sur les distances moyennes entre brebis (témoins et expérimentales) et entre chiens de protection et brebis.

Animal	Distance moyenne	Modèle	ΔAIC
Chaque brebis GPS	Aux brebis témoins	**Complet (GROUPE + PÉRIODE + GROUPE×PÉRIODE + NB.JOURS + JOUR.NUIT + SÉPARÉ + TEMP + VITESSE + INDIVIDU)**	**0**
		PÉRIODE + JOUR.NUIT + SÉPARÉ + TEMP + VITESSE + INDIVIDU	1495
		GROUPE + PÉRIODE + GROUPE×PÉRIODE + JOUR.NUIT + SÉPARÉ + TEMP + VITESSE + INDIVIDU	1496
		NB.JOURS + JOUR.NUIT + SÉPARÉ + TEMP + VITESSE + INDIVIDU	6157
		Nul (sans variables)	19 591
Chaque brebis GPS	Aux brebis expérimentales	**Complet (GROUPE + PÉRIODE + GROUPE×PÉRIODE + NB.JOURS + JOUR.NUIT + SÉPARÉ + TEMP + VITESSE + INDIVIDU)**	**0**
		GROUPE + PÉRIODE + GROUPE×PÉRIODE + JOUR.NUIT + SÉPARÉ + TEMP + VITESSE + INDIVIDU	295
		PÉRIODE + JOUR.NUIT + SÉPARÉ + TEMP + VITESSE + INDIVIDU	364
		NB.JOURS + JOUR.NUIT + SÉPARÉ + TEMP + VITESSE + INDIVIDU	7 060
		Nul (sans variables)	15 096
Chaque chiens GPS	Aux brebis témoins	**Complet (PÉRIODE + NB.JOURS + JOUR.NUIT + SÉPARÉ + TEMP + VITESSE + INDIVIDU)**	**0**
		NB.JOURS + JOUR.NUIT + SÉPARÉ + TEMP + VITESSE + INDIVIDU	429
		PÉRIODE + JOUR.NUIT + SÉPARÉ + TEMP + VITESSE + INDIVIDU	1 194
		Nul (sans variables)	1 414
Chaque chiens GPS	Aux brebis expérimentales	**Complet (PÉRIODE + NB.JOURS + JOUR.NUIT + SÉPARÉ + TEMP + VITESSE + INDIVIDU)**	**0**
		NB.JOURS + JOUR.NUIT + SÉPARÉ + TEMP + VITESSE + INDIVIDU	472
		PÉRIODE + JOUR.NUIT + SÉPARÉ + TEMP + VITESSE + INDIVIDU	2 068
		Nul (sans variables)	2 258

Tableau 6. Coefficients, erreurs standard et *p-value* pour les variables fixes des modèles linéaires mixtes généralisés utilisés pour tester l'effet des CAL sur les distances entre brebis témoins et expérimentales.

	Distance moyenne aux brebis témoins			Distance moyenne aux brebis expérimentales		
Variable	**β**	**Erreur standard**	***p***	**β**	**Erreur standard**	***p***
Ordonnée à l'origine	4,73	0,09	< 0,001	4,87	0,11	< 0,001
GROUPE	− 0,03	0,12	0,78	− 0,08	0,15	0,58
PÉRIODE	0,48	0,009	< 0,001	0,47	0,01	< 0,001
NB.JOURS	0,003	$0{,}9 \times 10^{-4}$	< 0,001	0,001	$0{,}9 \times 10^{-4}$	< 0,001
SÉPARÉ	1,59	0,006	< 0,001	1,23	0,006	< 0,001
TEMP	− 0,22	0,003	< 0,001	− 0,22	0,003	< 0,001
VITESSE	0,29	0,003	< 0,001	0,37	0,003	< 0,001
JOUR.NUIT	− 0,44	0,005	< 0,001	− 0,38	0,006	< 0,001
GROUPE × PÉRIODE	− 0,03	0,01	0,007	0,06	0,01	< 0,001

Pourtant, l'analyse visuelle des résidus et des valeurs prédites a relevé que nos modèles sont peu capables d'expliquer les distances les plus longues observées dans le jeu des données (Fig. 21). En effet, l'estimation de la qualité d'ajustement des modèles (par r^2 ajusté) a montré qu'aucun n'était capable d'expliquer plus de 31 % de la variabilité des distances observées (Tab. 7). Cela veut dire que d'autres facteurs, non pris en compte dans l'étude, expliquent au moins 69 % de la variabilité dans nos données. Notons par ailleurs que la variable INDIVIDU, en tant qu'effet aléatoire, a très peu contribué à expliquer la variabilité des distances (Tab. 7). Ce résultat n'est peut-être pas très surprenant compte tenu de la nature grégaire des brebis (Manenti *et al.* 2026) et des chiens qui les protègent. Quoi qu'il en soit, rappelons que l'objectif de l'analyse n'était pas de bâtir un modèle capable de bien modéliser les distances entre les animaux, mais plutôt de tester l'effet des CAL sur ces distances.

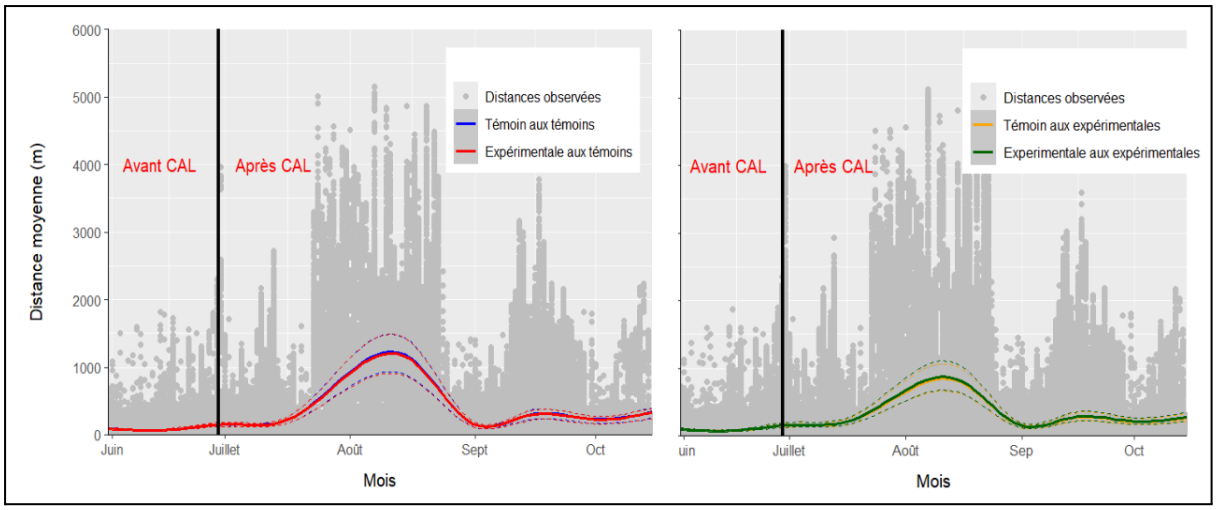


Figure 21. Valeurs prédites par les modèles statistiques (courbes pleines superposées) utilisés pour tester l'effet des CAL sur les distances moyennes entre brebis. À droite : distances moyennes au lot de brebis témoins. À gauche : distances moyennes au lot de brebis expérimentales. En gris : les distances empiriques issues des colliers GPS (c'est-à-dire, les données brutes). Les courbes en tirets représentent les intervalles de confiance à 95 %.

Tableau 7. Qualité de l'ajustement des modèles utilisés pour tester l'effet des CAL sur les distances moyennes entre brebis et entre brebis et chiens de protection.

Modèle	r^2 ajusté (effets fixes)	r^2 ajusté (effet aléatoire)	r^2 ajusté total
Chaque brebis aux brebis témoins	0,25	0	0,25
Chaque brebis aux brebis expérimentales	0,25	0,05	0,31
Chaque chien aux brebis témoins	0,21	0,02	0,23
Chaque chien aux brebis expérimentales	0,25	0,04	0,29

Lorsque les courbes reliant les valeurs prédites par les deux modèles sont analysées ensemble, on observe que les distances au lot de brebis témoins sont souvent supérieures aux distances au lot de brebis expérimentales, après la pose des CAL (Fig. 22). Ce résultat nous a surpris : on s'attendait soit à ce qu'il n'y ait pas de différence entre les distances, soit à ce que les distances au lot de brebis témoins soient inférieures à celles au lot de brebis expérimentales (dans le cas de l'hypothèse alternative que les CAL perturbent les brebis et les mènent à s'éloigner des brebis équipées du dispositif). Le résultat ne semble pourtant pas dû à une erreur, mais bien à la réalité biologique sous-jacente : un test statistique de Wilcoxon-Mann-Whitney –

indépendant des MLMG que nous avons construits, et approprié pour la distribution asymétrique de nos données (Wilcoxon 1945, Mann & Whitney 1947) – montre que les distances au lot de brebis témoins ont effectivement été supérieures aux distances au lot de brebis expérimentales après la pose des CAL ($W = 1{,}47 \times 10^{10}$, $p < 0{,}001$). En effet, la médiane des distances moyennes de chaque brebis témoin aux autres brebis témoins était de 100 m, alors que la médiane des distances moyennes de chaque brebis expérimentale aux autres brebis expérimentales n'était que de 88 m. Tant les MLMG que le test de Wilcoxon-Mann-Whitney nous indiquent que cette différence n'est pas due au hasard.

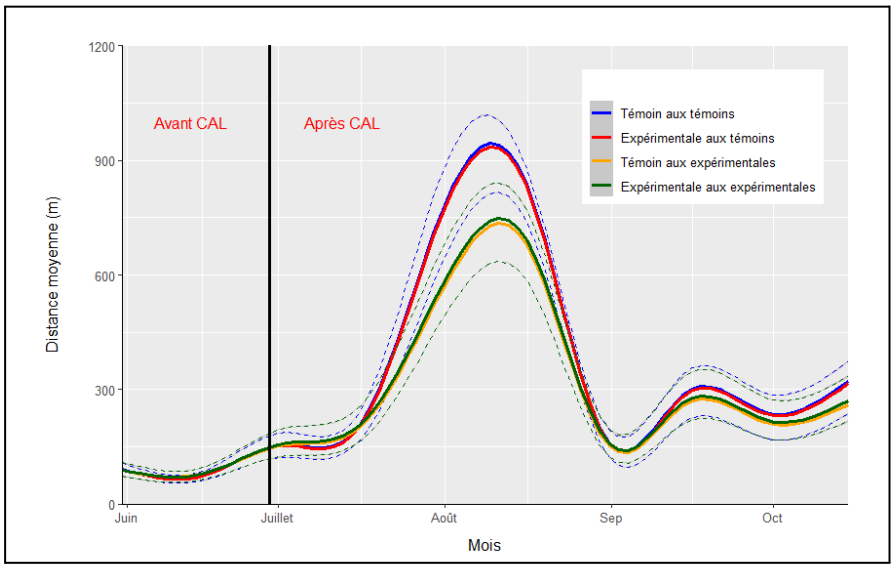


Figure 22. Valeurs prédites par les modèles statistiques (courbes pleines) utilisés pour tester l'effet des CAL sur les distances moyennes entre brebis témoins et expérimentales. Les courbes en tirets représentent les intervalles de confiance à 95 % (celles pour les courbes rouge et orange sont absentes pour améliorer la lisibilité du graphique).

B. Distances moyennes entre les chiens de protection et les brebis

Pour les modèles concernant les chiens de protection, plusieurs variables ont eu des effets similaires à ceux mis en évidence pour les distances entre les brebis. Ainsi, l'augmentation de la température et la nuit ont fait diminuer les distances entre les chiens et les brebis, tandis que l'augmentation de la vitesse de déplacement a eu l'effet contraire (Tab. 8). La période durant laquelle le troupeau a été scindé apparaît aussi, évidemment, comme un facteur qui augmente les distances moyennes entre chiens et brebis. Après la pose des CAL, les chiens de protection semblent s'éloigner des brebis, qu'elles soient expérimentales ou témoins (coefficient positif pour PÉRIODE – Tab. 8). Cet effet correspond toutefois au début de la saison, période durant laquelle les chiens étaient déjà relativement éloignés du troupeau. À l'échelle de la saison entière,

cependant, on observe au contraire un rapprochement des chiens vers les brebis (coefficient négatif pour NB.JOURS – Tab. 8), suggérant un gradient temporel : chiens éloignés en début de saison, plus éloignés encore juste après la pose des CAL, puis progressivement plus proches en fin de saison.

Tableau 8. Coefficients, erreurs standard et *p-value* pour les variables fixes des modèles linéaires mixtes généralisés utilisés pour tester l'effet des CAL sur les distances entre chiens de protection et brebis.

	Distance moyenne aux brebis témoins				Distance moyenne aux brebis expérimentales		
Variable	**β**	**Erreur standard**	***p***		**β**	**Erreur standard**	***p***
Ordonnée à l'origine	5,84	0,09	< 0,001		5,83	0,11	< 0,001
PÉRIODE	0,43	0,02	< 0,001		0,45	0,02	< 0,001
NB.JOURS	− 0,006	0,0002	< 0,001		− 0,008	0,0002	< 0,001
SÉPARÉ	1,32	0,01	< 0,001		1,28	0,01	< 0,001
TEMP	− 0,15	0,005	< 0,001		− 0,14	0,006	< 0,001
VITESSE	0,09	0,004	< 0,001		0,14	0,004	< 0,001
JOUR.NUIT	− 0,04	0,009	< 0,001		− 0,02	0,009	< 0,001

Alors que la qualité de l'ajustement des modèles pour les chiens est similaire à celle obtenue pour les brebis entre elles (Tab. 7), l'analyse visuelle des valeurs prédites semblent montrer une absence de différences de distances entre chiens et brebis témoins, et entre chiens et brebis expérimentales, avant et après la pose des CAL (Fig. 23). Pourtant, la médiane des distances moyennes des chiens aux brebis témoins après la pose du dispositif (293 m) est supérieure à celle observée pour les distances moyennes des chiens aux brebis expérimentales (278 m). Le test de Wilcoxon-Mann-Whitney indique que cette différence n'est pas due au hasard ($W = 2{,}0 \times 10^9$, $p < 0{,}001$). Quoi qu'il en soit, comme pour les distances entre les brebis, bien que nous ne soyons pas en mesure d'expliquer pourquoi les chiens seraient restés plus proches des brebis expérimentales que des brebis témoins, l'essentiel est de constater qu'à l'échelle des 5 mois de l'étude, nous n'avons pas détecté une augmentation de la distance entre les chiens de protection et les brebis équipées de CAL après la pose du dispositif.

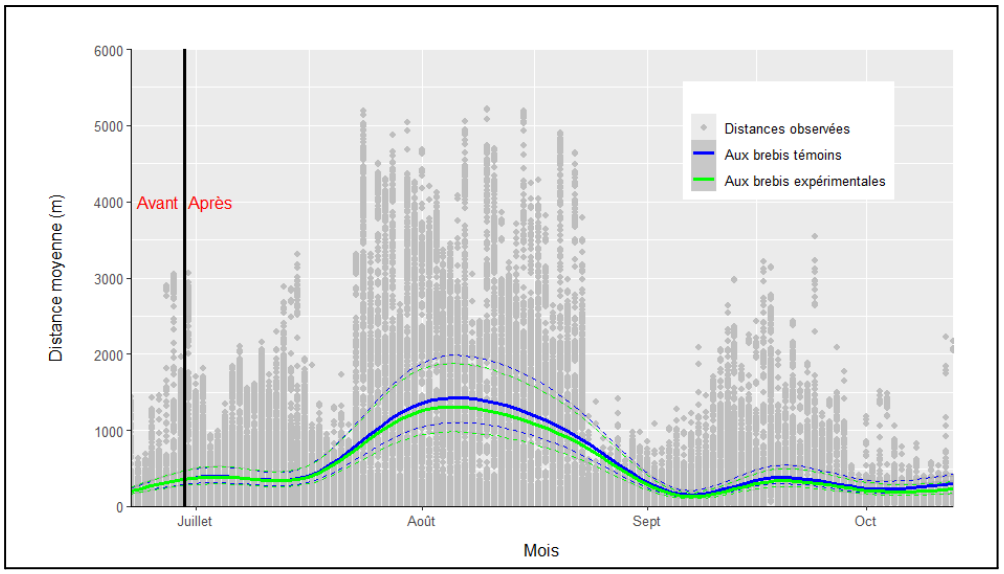


Figure 23. Valeurs prédites par les modèles statistiques (courbes pleines) utilisés pour tester l'effet des CAL sur les distances moyennes entre chiens de protection et brebis témoins et expérimentales. Les courbes en tirets représentent les intervalles de confiance à 95 %. En gris : les distances empiriques issues des colliers GPS (c'est-à-dire, les données brutes).

3.3.2. Analyse à l'échelle d'une semaine avant et après la pose des CAL

Les résultats obtenus à l'échelle des cinq mois de l'étude n'ont pas montré une augmentation des distances moyennes entre les brebis, ni entre les chiens de protection et les brebis, après la pose des CAL. Pourtant, les distributions des distances au cours du temps (Fig. 19 et Fig. 20) montrent la présence d'un pic dans les quelque 24 heures après la pose des CAL entre les brebis témoins et les brebis expérimentales, mais pas entre les brebis témoins entre elles (Fig. 24). Cette observation nous a amenés à refaire l'analyse, mais en nous concentrant seulement sur la période allant d'une semaine avant à une semaine après la pose du dispositif. Ceci revient finalement à tester les hypothèses de l'habituation (H2b et H3b), c'est-à-dire, de la présence d'un effet perturbateur des CAL sur une courte durée.

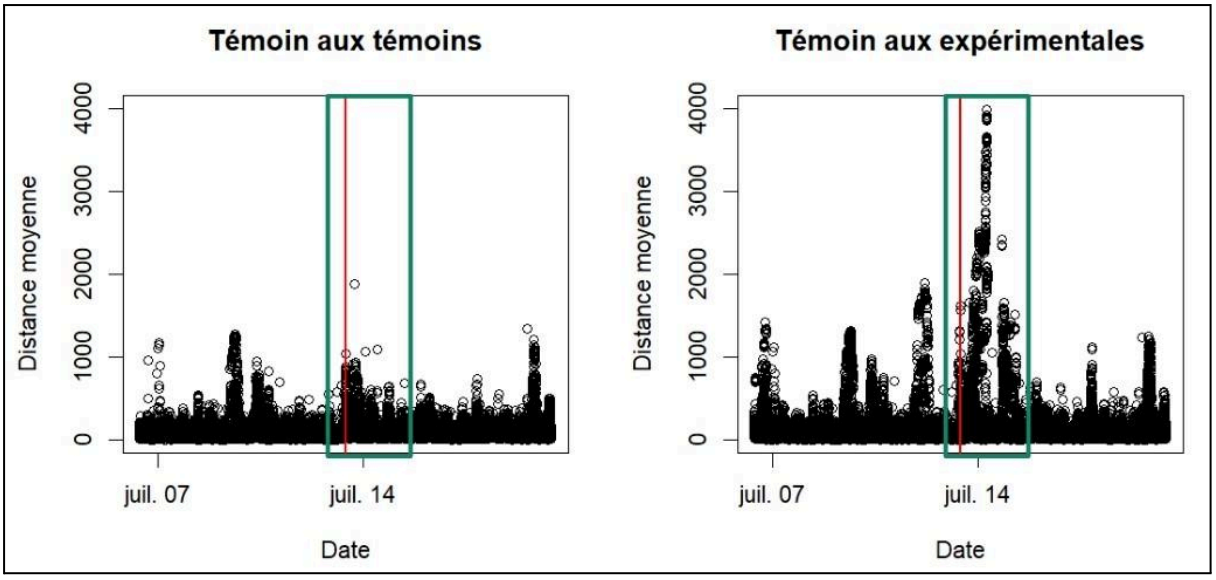


Figure 24. Distances moyennes de chaque brebis témoin aux autres brebis témoins (à gauche) et aux brebis expérimentales (à droite) une semaine avant et une semaine après la pose des CAL. La droite rouge indique le moment de la pose du dispositif. On constate une augmentation des distances après la pose du dispositif dans le graphique à droite qui est absente du graphique à gauche (rectangles verts).

Les variables SÉPARÉ et NB.JOURS n'ont pas été incluses dans les nouveaux modèles, la première n'étant pas pertinente car relative à une période au-delà de celle retenue pour l'analyse, la deuxième étant fortement corrélée à la variable PÉRIODE et donc redondante. Toujours est-il que les modèles complets, comptant toutes les variables, se sont nettement mieux ajustés aux données que les modèles avec moins de variables (Tab. 9).

Comme précédemment, les modèles à l'échelle d'une semaine montrent une augmentation des distances moyennes entre les brebis lorsque la vitesse de déplacement s'accroît, mais une diminution lorsque la température augmente et durant la nuit (Tab. 10). Si la variable GROUPE, à elle toute seule, n'a toujours pas montré d'effet – comme attendu –, les distances moyennes entre les brebis ont augmenté durant la semaine d'après la pose des CAL (Tab. 10 – coefficients positifs pour la variable PÉRIODE). C'était également le cas pour les chiens, qui se sont éloignés de toutes les brebis, témoins et expérimentales, après la pose du dispositif (Tab. 11 – coefficients positifs pour la variable PÉRIODE). Les modèles ont néanmoins révélé que, par rapport aux brebis témoins, les brebis expérimentales sont restées plus éloignées, tant du lot des brebis témoins qu'entre elles, après la pose des CAL (Tab. 10 – coefficients positifs pour l'interaction GROUPE × PÉRIODE).

Tableau 9. Modèles linéaires mixtes généralisés construits pour tester l'effet des CAL sur les distances moyennes entre brebis (témoins et expérimentales) et entre chiens de protection et brebis, une semaine avant et une semaine après la pose de l'outil.

Animal	Distance moyenne	Modèle	ΔAIC
Chaque brebis GPS	Aux brebis témoins	**Complet (GROUPE + PÉRIODE + GROUPE×PÉRIODE + JOUR.NUIT + TEMP + VITESSE + INDIVIDU)**	**0**
		PÉRIODE + JOUR.NUIT + TEMP + VITESSE + INDIVIDU	24
		Nul (sans variables)	340
Chaque brebis GPS	Aux brebis expérimentales	**Complet (GROUPE + PÉRIODE + GROUPE×PÉRIODE + JOUR.NUIT + TEMP + VITESSE + INDIVIDU)**	**0**
		PÉRIODE + JOUR.NUIT + TEMP + VITESSE + INDIVIDU	80
		Nul (sans variables)	1 984
Chaque chiens GPS	Aux brebis témoins	**Complet (PÉRIODE + JOUR.NUIT + TEMP + VITESSE + INDIVIDU)**	**0**
		Nul (sans variables)	1 414
Chaque chiens GPS	Aux brebis expérimentales	**Complet (PÉRIODE + JOUR.NUIT + TEMP + VITESSE + INDIVIDU)**	**0**
		Nul (sans variables)	429

Tableau 10. Coefficients, erreurs standard et *p-value* pour les variables fixes des modèles linéaires mixtes généralisés utilisés pour tester l'effet des CAL sur les distances entre brebis témoins et expérimentales à l'échelle d'une semaine avant et une semaine après la pose de l'outil.

	Distance moyenne aux brebis témoins			Distance moyenne aux brebis expérimentales		
Variable	**β**	**Erreur standard**	***p***	**β**	**Erreur standard**	***p***
Ordonnée à l'origine	4,9	0,19	< 0,001	5,1	0,23	< 0,001
GROUPE	0,41	0,26	0,12	0,08	0,33	0,82
PÉRIODE	0,11	0,02	< 0,001	0,34	0,02	< 0,001
TEMP	− 0,19	0,009	< 0,001	− 0,36	0,01	< 0,001
VITESSE	0,43	0,008	< 0,001	0,43	0,01	< 0,001
JOUR.NUIT	− 0,69	0,02	< 0,001	− 0,41	0,02	< 0,001
GROUPE × PÉRIODE	0,08	0,02	0,007	0,17	0,03	< 0,001

Tableau 11. Coefficients, erreurs standard et *p-value* pour les variables fixes des modèles linéaires mixtes généralisés utilisés pour tester l'effet des CAL sur les distances entre chiens de protection et brebis à l'échelle d'une semaine avant et une semaine après la pose de l'outil.

	Distance moyenne aux brebis témoins			Distance moyenne aux brebis expérimentales		
Variable	**β**	**Erreur standard**	***p***	**β**	**Erreur standard**	***p***
Ordonnée à l'origine	5,8	0,15	< 0,001	5,6	0,18	< 0,001
PÉRIODE	0,39	0,03	< 0,001	0,49	0,03	< 0,001
TEMP	− 0,31	0,02	< 0,001	− 0,31	0,02	< 0,001
VITESSE	− 0,06	0,01	< 0,001	0,03	0,01	0,02
JOUR.NUIT	− 0,03	0,02	0,27	0,07	0,03	0,004

Pourtant, l'analyse visuelle des résidus et des valeurs prédites a relevé que tous les modèles, tant pour les brebis que pour les chiens, sont très peu capables d'expliquer les distances observées à l'échelle d'une semaine avant/après la pose des CAL (Fig. 25 et Fig. 26), la qualité de l'ajustement des modèles étant très faible (Tab. 12).

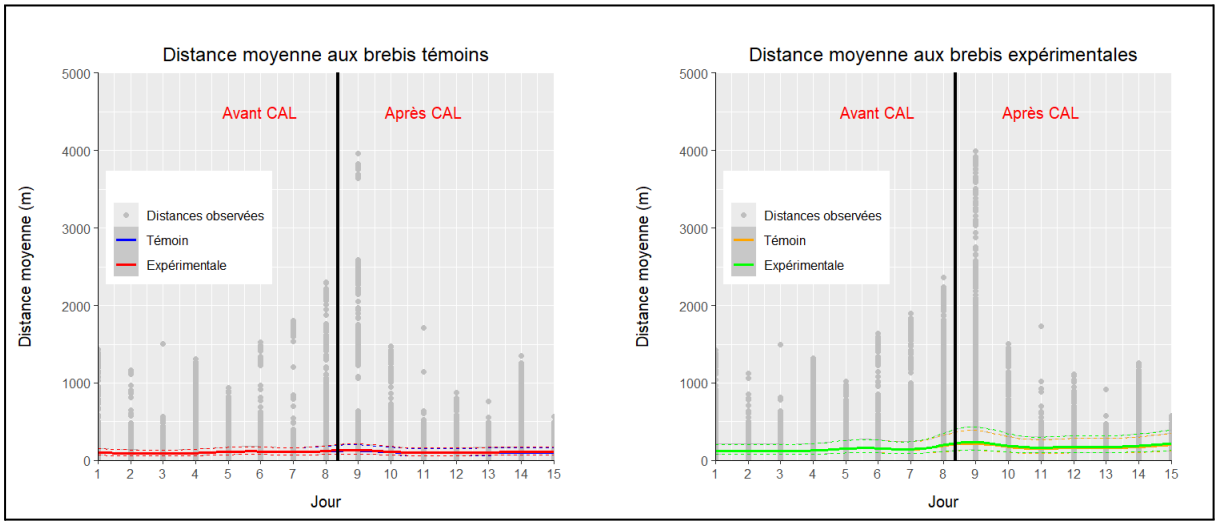


Figure 25. Valeurs prédites par les modèles statistiques (courbes pleines superposées) utilisés pour tester l'effet des CAL sur les distances moyennes entre brebis à l'échelle d'une semaine avant et une semaine après la pose du dispositif. À droite : distances moyennes au lot de brebis témoins. À gauche : distances moyennes au lot de brebis expérimentales. Les courbes se chevauchent fortement, illustrant le peu de différence entre les distances prédites par les modèles. En gris : les distances empiriques issues des colliers GPS (c'est-à-dire, les données brutes). Les courbes en tirets représentent les intervalles de confiance à 95 %.

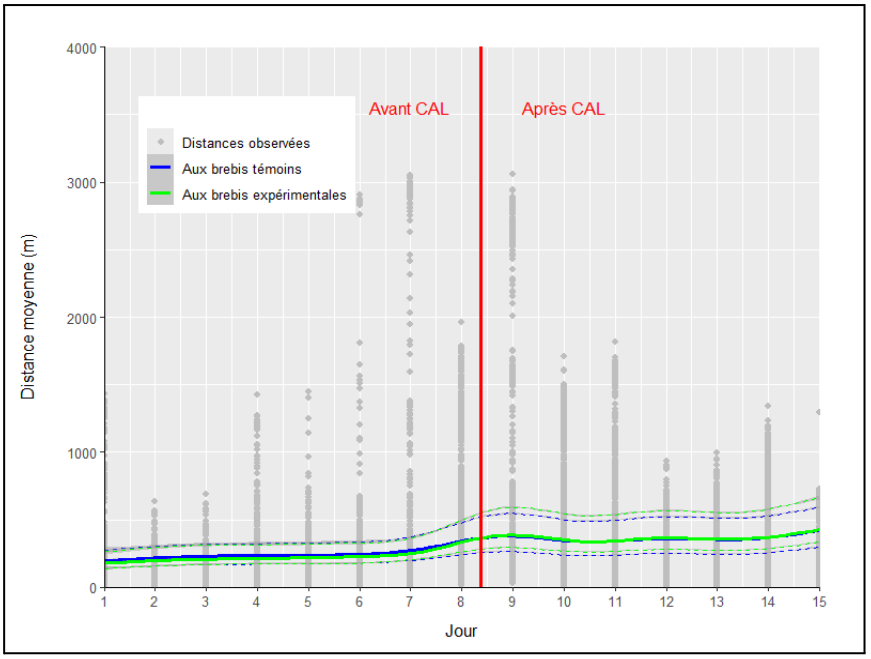


Figure 26. Valeurs prédites par les modèles statistiques (courbes pleines) utilisés pour tester l'effet des CAL sur les distances moyennes entre chiens de protection et brebis témoins et expérimentales à l'échelle d'une semaine avant et une semaine après la pose du dispositif. Les courbes en tirets représentent les intervalles de confiance à 95 %. En gris : les distances empiriques issues des colliers GPS (c'est-à-dire, les données brutes).

Il s'avère, par ailleurs, que les brebis expérimentales étaient plus éloignées les unes des autres (médiane = 63 m) que les brebis témoins entre elles (médiane = 58 m) pendant la semaine d'*avant* la pose des CAL. Le test de Wilcoxon-Mann-Whitney a confirmé que cette différence n'était pas due au hasard ($W = 6{,}8 \times 10^7$, $p < 0{,}001$). Dans les 7 jours suivants la pose du dispositif, bien que les distances aient toutes augmentées (médianes = 70 m et 83 m, respectivement), ce patron est resté le même ($W = 7{,}3 \times 10^7$, $p < 0{,}001$). En revanche, à l'échelle des cinq mois de l'étude, nous avons constaté le contraire : ce sont bien les brebis expérimentales qui sont restées plus proches entre elles, par rapport aux brebis témoins (voir section 3.3.1 plus haut). Il est donc possible que cette différence soit due à un effet perturbateur des CAL sur le comportement des brebis expérimentales. Mais puisque les brebis témoins n'ont pas été recapturées lors de la pose du dispositif – seulement les expérimentales –, il est aussi possible, voire probable, que l'élément perturbateur qui explique ce dérangement de courte durée chez les brebis expérimentales ait été la recapture elle-même, et pas les CAL. Enfin, concernant les chiens, des tests de Wilcoxon-Mann-Whitney n'ont montré aucune différence de distances, ni aux brebis expérimentales, ni aux brebis témoins, ni une semaine *avant* la pose des CAL (médianes = 143 m et 152 m, respectivement ; $W = 5{,}4 \times 10^6$, $p < 0{,}32$), ni une semaine *après* (médianes = 92,5 m et 93 m, respectivement ; $W = 6{,}5 \times 10^7$, $p < 0{,}65$).

Tableau 12. Qualité de l'ajustement des modèles utilisés pour tester l'effet des CAL sur les distances moyennes entre brebis et entre brebis et chiens de protection, une semaine avant et une semaine après la pose du dispositif.

Modèle	r^2 ajusté (effets fixes)	r^2 ajusté (effet aléatoire)	r^2 ajusté total
Chaque brebis aux brebis témoins	0,03	0,06	0,09
Chaque brebis aux brebis expérimentales	0,03	0,02	0,05
Chaque chien aux brebis témoins	0,07	0,04	0,11
Chaque chien aux brebis expérimentales	0,07	0,03	0,1

Pris dans leur ensemble, les conclusions qui découlent de ces résultats sont similaires à celles déjà évoquées plus haut pour analyse à l'échelle des cinq moins de l'étude : bien que nous ne soyons pas en mesure de bien expliquer les distances moyennes entre les brebis, ni entre les chiens de protection et les brebis, nous n'avons aucune preuve robuste que l'utilisation des CAL augmentent les distances moyennes entre les animaux à court terme.

3.4. Observation comportementale des chiens de protection

Entre 6 et 8 chiens ont été observés lors des sessions comportementales, pour environ 400 comportements enregistrés au total. Les observations comportementales des chiens de protection ont été analysées de manière descriptive. Le nombre d'observations recueillies, ainsi que la variabilité des chiens et secteurs suivis n'ont pas permis de réaliser des analyses statistiques plus approfondies.

Les observations empiriques montrent une modification de la structure comportementale des chiens immédiatement après la pose des CAL (Fig. 27). En effet, par rapport à la situation initiale (T0), la période correspondant aux 3 jours suivant immédiatement (3h après) l'équipement des brebis (T1) se caractérise par une forte augmentation de la vigilance et l'apparition de comportements agonistiques, accompagnées d'une diminution des comportements de routine (intégrant le repos). Deux semaines après la pose (T2), la structure comportementale évolue de nouveau, avec une augmentation marquée des comportements d'exploration tandis que la vigilance diminue par rapport à T1. Enfin, trois mois après la pose (T3), la répartition des comportements se rapproche de la situation initiale, dominée par les activités de routine et de vigilance.

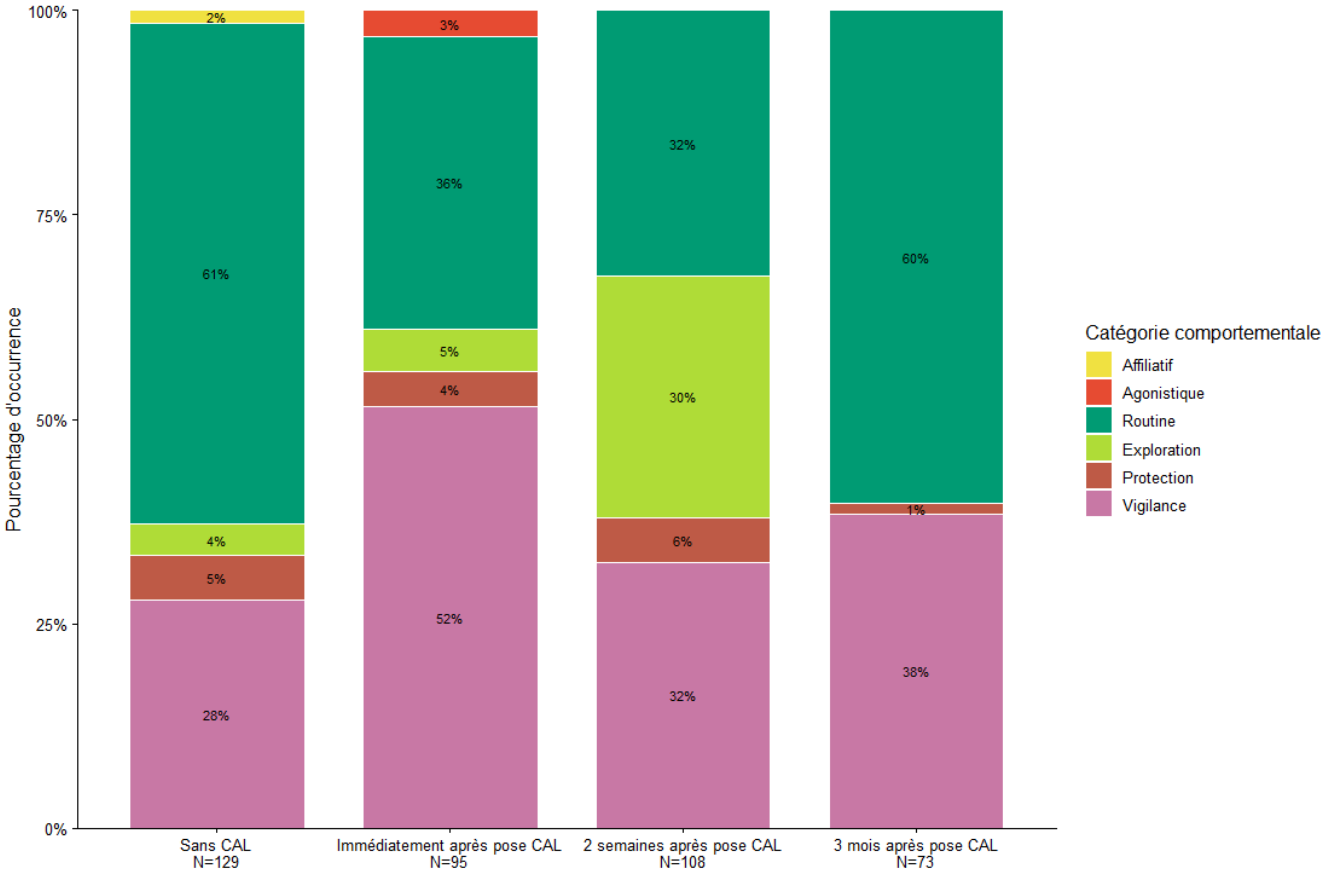


Figure 27 : Histogramme des budgets de temps d'activités des chiens de protection.

4. DISCUSSION

L'objectif du projet MERCAL est d'évaluer l'efficacité des colliers effaroucheurs anti-loup (CAL) dans un contexte pastoral alpin soumis à une forte pression de prédation, ainsi que leur innocuité sur les chiens de protection et le troupeau. Les travaux réalisés en 2025 et décrits dans ce rapport constituent une étude de faisabilité visant à tester les protocoles et à confronter les hypothèses de travail aux observations de terrain. Une deuxième année d'étude est prévue afin de confirmer les tendances observées.

Le suivi par pièges photographiques a mis en évidence une fréquentation régulière de l'alpage par au minimum 4 loups, avec en moyenne plus d'un passage quotidien (extrait vidéo). **Le troupeau n'a donc pas été confronté à des visites occasionnelles, mais bien à une utilisation répétée du site par le prédateur.** La prédominance d'activité nocturne, combinée à une possible survenue des attaques en journée, suggère que le risque de prédation dépend davantage des conditions d'exposition du troupeau que du rythme d'activité du loup, avec une alternance de situations : des déplacements de loups majoritairement nocturnes, et de possibles attaques opportunistes diurnes, lorsque le troupeau est en déplacement et potentiellement plus exposé.

L'hypothèse H1a postulait que la présence et le déclenchement des CAL diminuent la réussite des attaques et leurs dommages sur les troupeaux. Pourtant, nos résultats ne montrent pas de diminution du nombre d'attaques ni du nombre total de victimes après équipement. Leur évolution a même augmenté en 2025, bien qu'elle reste du même ordre de grandeur que celle observée sur les sites témoins (alpages voisins sans CAL), ce qui suggère une variation annuelle de la pression de prédation à une large échelle spatiale, plutôt qu'un effet propre au dispositif. En revanche, le nombre moyen de victimes par attaque a diminué en 2025. **Les attaques apparaissent donc plus nombreuses mais moins destructrices.**

Nous ne faisons que spéculer ici, mais la diminution du nombre de victimes par attaque s'accorde à l'hypothèse que les CAL mènent les loups à s'attaquer davantage aux individus isolés qu'à l'ensemble du troupeau. Les éleveurs-bergers locaux distinguent en effet ces deux situations, selon le nombre d'animaux impliqués. Dans le cas d'une attaque sur un lot isolé, l'efficacité supposée des CAL peut être réduite, car le nombre de colliers présents peut être insuffisant (voire nul) pour produire un effet dissuasif, d'autant plus s'ils ne se déclenchent pas simultanément (communication personnelle du fabricant des CAL). Une autre hypothèse est que les CAL n'empêchent pas la survenue de l'attaque, mais qu'ils en écourtent la durée, via l'émission des ultrasons et des signaux lumineux qui pourrait perturber le déroulement de l'attaque.

Cependant, une interruption de l'attaque pourrait aussi advenir d'autres facteurs indépendants du dispositif, tels qu'une intervention rapide des chiens de protection, la dispersion du troupeau, les conditions de visibilité, etc.

Nos résultats sont aussi compatibles avec l'hypothèse, très spéculative, que les loups cherchent une quantité plus ou moins stable de viande d'animaux domestiques au cours de la saison (car ces proies sont facilement repérables, constituant ainsi une source de nourriture relativement prévisible), afin de compléter leur régime alimentaire basé très souvent et majoritairement sur les proies sauvages (Newson *et al*., 2016; Berzins & Laudic, 2025). Le prédateur aurait donc augmenté le nombre d'attaques sur le troupeau et le nombre total de victimes afin de compenser les pertes alimentaires dues à moins de victimes par attaque. Quoi qu'il en soit, il est essentiel de noter que nos résultats montrent que l'augmentation du nombre d'attaques et la diminution du nombre de victimes par attaque ne peut pas être attribuée directement aux CAL, car une évolution comparable de l'indicateur a été observée sur les sites témoins.

Le mois d'août a fait cependant figure d'exception, avec des attaques plus meurtrières qu'au cours des autres mois, et correspondant à la période pendant laquelle le troupeau était scindé en deux, avec une répartition des chiens entre les deux lots inégale et variable dans le temps. Cette situation a probablement réduit la capacité d'intervention des chiens de protection et souligne le rôle déterminant de l'organisation du troupeau et du triptyque de protection dans le déroulement des attaques et les dommages associées.

Les conditions de fin de saison ont par ailleurs fortement impacté les indicateurs de prédation sur le site d'étude. En effet, un événement atypique a ponctué la saison 2025 : le départ anticipé (début octobre) d'un troupeau voisin, ayant vraisemblablement entraîné un report de prédation sur l'alpage de la Valette. Lorsque ce mois est exclu des calculs, les différences entre sites d'étude et témoins s'atténuent fortement, indiquant ainsi que l'écart observé provient davantage d'une redistribution spatiale du risque de prédation que d'un effet des CAL. La comparaison entre sites doit toutefois être interprétée avec prudence : certains constats officiellement validés sur les sites témoins sont associés à zéro victime, pouvant correspondre à des tentatives de prédation interrompues, non létales, ou à des brebis disparues sans preuve de mortalité, dont les indices permettent d'attester l'attaque malgré l'absence de mortalité constatée. De plus, tous les constats réalisés sur les sites témoins n'ont pas encore été instruits, apportant une incertitude supplémentaire sur le nombre réel de victimes, susceptible d'influencer les indicateurs de dommages causés aux troupeaux.

L'hypothèse H1b postulait que la présence et le déclenchement des CAL diminuent la probabilité d'avoir un constat de prédation. Pour tester cette hypothèse,

nous avions initialement prévu d'associer l'heure de déclenchement des colliers à celle du passage de loups à proximité du troupeau (obtenue par piégeage photographique) et l'absence (ou présence) de constat de prédation. Toutefois, **un défaut technique dans l'enregistrement de l'heure à laquelle les CAL se déclenchent, relevant du matériel et indépendant du protocole mis en œuvre par notre équipe, nous a contraints à adapter certaines analyses.** Elles ont donc été menées à l'échelle de la journée, en considérant un indicateur d'agitation calculé à partir de leurs colliers GPS, plutôt que les heures précises de déclenchements. Ainsi construit, le modèle statistique n'a mis en évidence aucun effet des CAL, de la présence du loup ou des autres variables étudiées sur la probabilité d'avoir un constat de prédation. Cela peut s'expliquer par l'échelle d'analyse : un dispositif d'effarouchement agirait surtout pendant l'attaque elle-même, événement difficile à détecter avec des données agrégées par jour. Cette limite est renforcée par l'imprécision des dates et heures des constats de prédation. Par ailleurs, l'absence d'effet pourrait aussi venir de passages de loups non détectés ou de facteurs non pris en compte (conditions météorologiques, conditions de pâturage, dispersion du troupeau).

Ainsi, les hypothèses H1a et H1b n'ont pas été vérifiées : à ce stade, nous n'avons observé aucune diminution de la fréquence des attaques ni du nombre total de victimes, et la présence des CAL ne diminue pas la probabilité d'un constat de prédation. Cependant, la diminution du nombre de victimes par attaque soulève l'hypothèse d'attaques plus courtes, compatibles avec l'effet attendu d'un dispositif d'effarouchement, mais cette évolution étant également observée ailleurs, elle ne peut pas être attribuée avec certitude aux CAL dans l'état actuel de nos connaissances.

Il n'empêche que les éleveurs et bergers locaux ont exprimé le sentiment d'une saison moins problématique qu'attendu, au regard de la forte pression de prédation ressentie. Bien que cela ne constitue pas un indicateur d'efficacité, il souligne un effet possible du projet lui-même : la présence d'un suivi scientifique et la recherche active de solutions peuvent modifier la perception du risque et le vécu de la prédation (Volski *et al.*, 2021). Cet aspect, rarement quantifié, participe néanmoins à l'acceptabilité des dispositifs de protection.

L'hypothèse H2a postulait l'absence d'impact des CAL sur le comportement et donc le travail des chiens de protection à l'échelle des 5 mois de l'étude, tandis que l'hypothèse H2b (habituation) ne prévoyait une augmentation des distances que sur quelques jours. **Nous n'avons pas observé une augmentation de la distance entre les chiens et les brebis équipées des CAL**, ni à l'échelle des cinq mois de l'étude (H2a), ni à l'échelle d'une semaine avant et après la pose du l'outil (H2b). En revanche, les observations comportementales des chiens de protection montrent une augmentation

immédiate de la vigilance et des comportements agonistiques dans les 3 jours suivants la pose des CAL, suivie d'un retour progressif vers l'état initial. Cette dynamique pourrait correspondre à une phase transitoire d'adaptation, compatible avec l'hypothèse d'une habituation (H2b) rapide des chiens à l'ultrason et signaux lumineux émis par les CAL. Bien que ces observations n'ont pas fait l'objet d'analyses statistiques approfondies, elles ont fourni de précieuses informations pour optimiser le protocole d'observation en vue de la saison 2026. Pris dans leur ensemble, ces résultats montrent que **le fonctionnement du groupe de chiens ne semble pas avoir été perturbé durablement par les CAL**, sauf potentiellement lors d'un court laps de temps durant lequel les chiens auraient pu se trouver davantage sur leurs gardes.

Nos résultats ont montré aussi qu'à l'échelle des 5 mois l'étude, la médiane des distances moyennes des chiens de protection aux brebis témoins après la pose des CAL a été supérieure à celle observée vis-à-vis des brebis expérimentales. Ce résultat est inattendu : on prévoyait soit l'absence d'un tel effet (H2a), soit l'exact contraire, au moins sur quelques jours (H2b). Dans l'absence d'une explication définitive, nous considérons que ce résultat peut être dû tant à la faible taille de l'échantillon (6 chiens) et donc au hasard, qu'à la possibilité que les chiens aient préféré rester proches des brebis qu'ils connaissaient mieux (car ayant été élevés ensemble, même si on pourrait s'attendre aussi à ce que cet effet s'estompe rapidement). De même, en ce qui concerne les observations comportementales, l'échantillonnage reste limité et hétérogène (nombre réduit de jours par période d'observation, secteurs et conditions d'observation différents, etc.). Les résultats décrivent donc des tendances plutôt qu'un effet quantifié de façon robuste. Mais dans tous les cas, comme déjà évoqué plus haut, **rien ne nous empêche de conclure que les CAL ont eu peu ou pas d'effet sur le comportement des chiens de protection.**

L'hypothèse H3 postulait quant à elle à l'absence d'impact des CAL sur la cohésion du troupeau. Comme pour les chiens, **nos résultats n'ont montré aucune augmentation de la distance moyenne entre les brebis due aux CAL**, ni à l'échelle des 5 mois de l'étude (H3a), ni durant une semaine avant et après la pose du dispositif (H3b). En revanche, à l'échelle des 5 mois de l'étude, nous avons observé que les brebis témoins sont restées plus éloignées entre elles que les brebis expérimentales les unes des autres, après la pose des CAL. Tandis qu'à l'échelle d'une semaine avant la pose de l'outil, c'était exactement le contraire. Là encore, il s'agit de résultats a priori imprévisibles et contre-intuitifs. Avec les éléments à notre disposition, il est difficile d'en trouver une explication. Nous n'avons pas d'informations sur le degré de familiarité des brebis entre elles et d'autres facteurs sociaux qui peuvent influer sur les déplacements et les distances inter-individuelles chez les moutons (Arnold & Pahl 1974, Manenti *et al.* 2026), et donc éclairer nos résultats. Comme pour les chiens, il est aussi possible que la faible taille de l'échantillon (N = 10 brebis pour chaque groupe) et une sélection

non-aléatoire des brebis puissent expliquer, au moins en partie, ce résultat. Il n'empêche que, toujours comme pour les chiens, **nous n'avons pas d'éléments qui prouvent que les CAL nuisent à la cohésion du troupeau.**

Il est toutefois important de garder à l'esprit que l'interprétation de nos résultats doit rester prudente en raison de nombreuses limites de l'étude, et que nous rappelons ici: (i) nous n'avons travaillé que sur une seule saison et un seul troupeau, de sorte que nos résultats ne sont pas généralisables ; (ii) nous n'avons pas pu mesurer la variabilité interannuelle de la pression de prédation, avec une possible redistribution spatiale du risque ; (iii) la datation des constats de prédation est généralement incertaine ; (iv) l'instruction de certains constats de prédation sur les sites voisins n'a pas été finalisé au même de la rédaction de ce rapport (février 2026) ; (iv) l'horodatage des déclenchements des CAL a été inexploitable dû à un défaut de fabrication ; et (v) nous n'avons pas pu intégrer plusieurs variables contextuelles (dispersion du troupeau, conditions météorologiques, visibilité) aux analyses. Dans ce contexte, **nos résultats doivent être considérés comme des indicateurs de tendances, et non comme une démonstration définitive de l'efficacité des CAL et de leur innocuité pour les animaux domestiques.**

Malgré ces limites, l'étude pilote de 2025 a permis d'adapter le protocole aux contraintes du terrain et d'identifier des actions déterminantes pour la suite : i) recentrer l'installation des pièges photographiques uniquement sur l'alpage, ii) augmenter la taille des échantillons, iii) sélectionner les brebis des groupes témoin et expérimental de façon aléatoire, iv) standardiser le suivi comportemental des chiens et du troupeau, v) intégrer des données sur le réseau social des brebis et des chiens (qui est plus proche de qui) et sur le bien-être émotionnel et corporel des brebis, et enfin vi) horodater les déclenchements des CAL. Pour la saison 2026, un suivi renforcé est prévu, avec la présence régulière (quasi quotidienne) d'un observateur sur l'alpage afin d'améliorer le suivi comportemental des chiens de protection et des brebis, ainsi que le suivi du bien-être des brebis. La poursuite du projet permettra notamment de tester une hypothèse supplémentaire, celle d'une possible habituation du prédateur au dispositif, associée à des analyses génétiques pour s'assurer qu'il s'agit bien des mêmes loups présents sur les deux années, et de confirmer les tendances mises en évidence en 2025 sur l'intensité des attaques et la dynamique spatiale entre brebis et chiens de protection-brebis.

5. RÉFÉRENCES

Amici, F., Meacci, S., Caray, E., Oña, L., Liebal, K. & Ciucci, P. 2024. A first exploratory comparison of the behaviour of wolves (*Canis lupus*) and wolf-dog hybrids in captivity. Animal Cognition 27, 9. https://doi.org/10.1007/s10071-024-01849-7

Animal Welfare Institute. "BarkLight Collars on Guard Dogs Could Help Protect Livestock". Publié en 2020.https://awionline.org/awi-quarterly/winter-2020/barklight-collars-guard-dogs-could-help-protect-livestock

Arnold, G. W. & Pahl, L. I. 1974. Some aspects of social behaviour in sheep. Animal Behaviour 22 : 592-600. https://doi.org/10.1016/S0003-3472(74)80004-7

Bangs, E. & Shivik, J. 2001. Managing wolf conflict with livestock in the Northwestern United States. Carnivore Damage Prevention News No.3. https://cdpnews.net/wp-content/uploads/2023/12/3_1_Bangs-et-Shivik.pdf

Bateson, M., & Martin, P. 2021. Measuring Behaviour: An Introductory Guide. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781108776462

Blackshaw, J. K., Cook, G. E., , Harding, P., Day, C., Bates, W., Rose, J. & Bramham, D. 1990. Aversive responses of dogs to ultrasonic, sonic and flashing light units. Applied Animal Behaviour Science, 25 : 1-8. https://doi.org/10.1016/0168-1591(90)90064-K

Brent, L. J., Chang, S. W., Gariépy, J., & Platt, M. L. 2014. The neuroethology of friendship. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1316*(1), 1-17. https://doi.org/10.1111/nyas.12315

Burnham, K. P., & Anderson, D. R. (2002). Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach. 2nd Edition, Springer-Verlag, New York. http://dx.doi.org/10.1007/b97636

Cheetah Conservation Fund. E-Shepherd Collar Update – Kavango West. Publié le 1er juin 2018. https://cheetah.org/ccf-blog/conservation/e-shepherd-collar-update-kavango-west/

Chevalier, M., Russell, J. C. & Knape, J. 2019. *New measures for evaluation of environmental perturbations using Before–After–Control–Impact analyses.* Ecological Applications 29(2) : e01838. https://doi.org/10.1002/eap.1838

Chopra K, Enticott G, Codling EA. Where did my dog go? A pilot study exploring the movement ecology of farm dogs. Front Vet Sci. 2024 Jan 8;10:1325609. doi: 10.3389/fvets.2023.1325609.

CICAL. Le collier anti-loup, Des tests très prometteurs - Synthèse des résultats des tests de 2017 à 2023. Rapport non daté.

Collins, T.; Stockman, C.A.; Barnes, A.L.; Miller, D.W.; Wickham, S.L.; Fleming, P.A. 2018. Qualitative Behavioural Assessment as a Method to Identify Potential Stressors during Commercial Sheep Transport. *Animals* 2018, *8*, 209. https://doi.org/10.3390/ani8110209

Dauphin Libéré, Le. Collier anti-loup : une arme innovante pour les éleveurs contre la prédation. Publié le 09 juin 2025. https://www.ledauphine.com/videos/collier-anti-loup-une-arme-innovante-pour-les-eleveurs-contre-la-predation-30qkp0q

Dobson, A. J., & Barnett, A. (2008). An Introduction to Generalized Linear Models. CRC Press. 10.1201/9780367807849

Eklund, A., López-Bao, J.V., Tourani, M., Chapron, G., & Jens, F. 2017. Limited evidence on the effectiveness of interventions to reduce livestock predation by large carnivores. Scientific Reports 7, 1-9. https://doi.org/10.1038/s41598-017-02323-w

Espuno, N., Lequette, B., Poulle, M.-L., Migot, P. & Lebreton, J.-D. 2004. Heterogeneous response to preventive sheep husbandry during wolf recolonization of the French Alps. Wildlife Society Bulletin 32 : 1195-1208. https://doi.org/10.2193/0091-7648(2004)032[1195:HRTPSH]2.0.CO;2

Fedderwitz, F. 2010. Protecting dogs against attacks by wolves (*Canis lupus*), with comparison to African wild dogs (*Lycaon pictus*) and dholes (*Cuon alpinus*). MSc. thesis, Linköpings University, Sweden. https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-56817

Firth, D. (1993). Bias reduction of maximum likelihood estimates. Biometrika, 80, 27-38. https://doi.org/10.1093/biomet/80.1.27

Grente, O., Duchamp, C., Bauduin, S., Opitz, T., Chamaillé-Jammes, S., Drouet-Hoguet, N., Gimenez, O.. Tirs dérogatoires de loups en France : état des connaissances et des enjeux pour la gestion des attaques aux troupeaux.. Faune Sauvage, 2020. 10.13140/RG.2.2.14302.92483

Greggor, A. L., Berger-Tal, O. & Blumstein, D. T. 2020. The Rules of Attraction: The Necessary Role of Animal Cognition in Explaining Conservation Failures and Successes. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics 51 : 483-503. https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-011720-103212

Heinze, G., & Schemper, M. (2002). A solution to the problem of separation in logistic regression. Statistics in Medicine, 21, 2409-2419. doi: 10.1002/sim.1047

Jablonski, N. G. 2021. Social and affective touch in primates and its role in the evolution of social cohesion. *Neuroscience*, *464*, 117-125. https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2020.11.024

Khorozyan, I. & Waltert, M. 2019. A framework of most effective practices in protecting human assets from predators. Human Dimensions of Wildlife 24, 380-394. https://doi.org/10.1080/10871209.2019.1619883

Khorozyan, I. & Walteret, M. 2019. How long do anti-predator interventions remain effective? Patterns, thresholds and uncertainty. Royal Society Open Science 6, 190826, https://doi.org/10.1098/rsos.190826

Kim, J.H. (2019) Multicollinearity and Misleading Statistical Results. *Korean Journal of Anesthesiology*, 72, 558-569. https://doi.org/10.4097/kja.19087

Mann, H. B. & Whitney, D. R. 1947. On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other. The Annals of Mathematical Statistics 18 : 50-60. https://doi.org/10.1214/aoms/1177730491

Manenti, I., Toschi, P., Miretti, S. & Miranda-de-la-Lama, G. C. 2026. *Principles of sheep behaviour: An overview from a welfare perspective.* Small Ruminant Research 255 : 107687. https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2025.107687

Meuret, M., Moulin, C.-H., Bonne, O., Garde, L. Nozières-Petit, M.-O. & Lescureux, N. 2021. Missing shots: has the possibility of shooting wolves been lacking for 20 years in France's livestock protection measures? The Rangeland Journal 42 : 401-413. https://doi.org/10.1071/RJ20046

Meredith, M., Ridout, M. & Campbell, L. A. 2024. *overlap: Estimates of Coefficient of Overlapping for Animal Activity Patterns.* R package version 0.3.9. https://CRAN.R-project.org/package=overlap

Ministère de la Transition écologique, de la Biodiversité et du Climat. 2026. *Bilans de dommages sur les troupeaux causés par le loup.* Plan national d'actions sur le loup et les activités d'élevage [site web]. https://pna-loup.developpement-durable.gouv.fr/bilans-de-dommages-a12.html

Newson, T. M., et al. 2016. *Food habits of the world's grey wolves.* Mammal Review 46(4) : 255-269. https://doi.org/10.1111/mam.12067

Berzins, R & Laudic, L. 2025. Régime alimentaire du loup dans le Parc National du Mercantour. 45pp. Parc National du Mercantour.

Rigg. R., Finďo, S., Wechselberger, M., Gorman, M., Sillero-Zubiri, C. & Macdonald, D. 2011. Mitigating carnivore–livestock conflict in Europe: lessons from Slovakia. Oryx 45 : 272-280. https://doi.org/10.1017/S0030605310000074

Rigoudy, N., Dussert, G., Benyoub, A. *et al.* 2023. The DeepFaune initiative: a collaborative effort towards the automatic identification of European fauna in camera trap images. Eur J Wildl Res 69, 113. https://doi.org/10.1007/s10344-023-01742-7

Simon, R. N., Calenge, C., Drouet-Hoguet, N., Jean, N. & Quenette, P.-Y. 2025. *Modelling the predation sequence of wolves hunting sheep: Implications for evaluating the effectiveness of preventive methods.* Global Ecology and Conservation 62 : e03685. https://doi.org/10.1016/j.gecco.2025.e03685

Singer, L., Wietlisbach, X., Hickisch, R., Schoell, E. M., Leuenberger, C., Van den Broek, A., Désalme, M., Driesen, K., Lyly, M., Marucco, F., Kutal, M., Pagon, N., Papp, C. R., Milioni, P., Uzdras, R., Zihmanis, I., Zimmermann, F., Marsden, K., Hackländer, K., López-Bao, J. V. & Wegmann, D. 2023. *The spatial distribution and temporal trends of livestock damages caused by wolves in Europe.* Biological Conservation 282 : 110039. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2023.110039

Spearman, C. (1904). General Intelligence, Objectively Determined and Measured. The American Journal of Psychology, 15, 201-292. https://doi.org/10.2307/1412107

Terrade, A., Prosnier, L., Vion, C., Locatelli, Y., Mathevon, N. & Reby, D. 2024. High-frequency hearing sensitivity does not systematically imply aversion to ultrasounds in large terrestrial mammals, Bioacoustics 33 : 448-459. https://doi.org/10.1080/09524622.2024.2377552

Treves, A., Fergus, A. R., Hermanstorfer, S. J., Louchouarn, N. X., Ohrens, O. & Pineda-Guerrero, A. 2024. Pineda-Guerrero, A. 2024. Gold-standard experiments to deter predators from attacking farm animals. Animal Frontiers 14 : 40-52. https://doi.org/10.1093/af/vfad072

Underwood, A. J. 1992. Beyond BACI: The Detection of Environmental Impacts on Populations in the Real, but Variable, World. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 161 : 145-178. https://doi.org/10.1016/0022-0981(92)90094-Q

Van Eeden, L. M., Eklund, A., Miller, J. R. B., López-Bao, J. V. *et al*.,. 2018. Carnivore conservation needs evidence-based livestock protection. PLoS 16, e2005577. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2005577

Volski L, McInturff A, Gaynor KM, Yovovich V and Brashares JS (2021) Social Effectiveness and Human-Wildlife Conflict: Linking the Ecological Effectiveness and Social Acceptability of Livestock Protection Tools. Front. Conserv. Sci. 2:682210. https://doi.org/10.3389/fcosc.2021.682210

Webber, B. L., Weber, K. T., Clark, P. E., Moffet, C. A., Ames, D. P., Taylor, J. B., Johnson, D. E. & Kie, J. G. 2015. *Movements of Domestic Sheep in the Presence of Livestock Guardian Dogs.* Sheep & Goat Research Journal 30 : 18–23. https://doi.org/10.2136/ssgj2015.30.0030

Wilcoxon, F. 1945. Individual Comparisons by Ranking Methods. Biometrics Bulletin 1 : 80-83. https://doi.org/10.2307/3001968