

MINISTERE DE L'AGRICULTURE
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE des SCIENCES AGRONOMIQUES de BORDEAUX
AQUITAINE
1, cours du Général de Gaulle – CS 40201 – 33175 GRADIGNAN cedex

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du titre
d'Ingénieur de Bordeaux Sciences Agro

**DEVELOPPEMENT D'UNE TECHNIQUE DE SUIVI DU MURIN DE DAUBENTON
(*MYOTIS DAUBENTONII*, KUHLMANN 1817) POUR L'ETUDE DES DEPLACEMENTS ET
DES ZONES D'ALIMENTATION**

Choix, premiers tests et plan d'échantillonnage

Léglise, Eve

Spécialisation : Gestion des Ressources et de l'Environnement
Etude réalisée à : Groupe Mammalogique Breton
18C, rue du Sabot – 22940 Ploufragan

THE FRENCH MINISTRY OF AGRICULTURE
NATIONAL SCHOOL of AGRICULTURAL SCIENCES and ENGINEERING,
BORDEAUX AQUITAINE
1, cours du Général de Gaulle – CS 40201 – 33175 GRADIGNAN cedex

MASTER THESIS

Submitted in fulfillment of the requirements for the degree of
Agricultural Engineer, Bordeaux Sciences Agro

**DEVELOPMENT OF MONITORING TECHNIQUE FOR DAUBENTON'S BAT
(*MYOTIS DAUBENTONII*, KUHLMANN 1817) TO STUDY ITS MOVEMENTS AND
FORAGING AREAS**

Selection, initial tests and sampling plan

Léglise, Eve

Specialization: Gestion des Ressources et de l'Environnement
Study completed at: Groupe Mammalogique Breton
18C, rue du Sabot – 22940 Ploufragan

DEVELOPPEMENT D'UNE TECHNIQUE DE SUIVI DU MURIN DE DAUBENTON (*MYOTIS DAUBENTONII*, KUHL 1817) POUR L'ETUDE DES DEPLACEMENTS ET DES ZONES D'ALIMENTATION

Choix, premiers tests et plan d'échantillonnage

Léglise, Eve



Photo : Yoan Raoul

Tuteur de stage : Thomas Dubos

Référents école : Brice Giffard et Maya Gonzalez



— 2026 —



Remerciements

Je tenais tout d'abord à remercier mon maître de stage, Thomas Dubos pour son accueil, son écoute, les connaissances qu'il m'a transmises et le temps qu'il m'a accordé tout au long de ce stage. Je garderai également des bons souvenirs des sorties sur le terrain, toujours riches en observations et en discussion. Je n'oublierai pas non plus les nombreux lancers de boulettes de papier dans la poubelle, qui auront été une source d'inspiration...

Je remercie également l'ensemble de l'équipe de GMB, que je n'ai malheureusement pas eu beaucoup l'occasion de côtoyer, mais qui m'a accueillie avec bienveillance. Je tiens tout particulièrement à remercier Meggane Ramos qui m'a accueilli avec Thomas à l'antenne des Côtes d'Armor, m'a invitée chez elle à l'occasion de l'éclipse et des étoiles filantes et m'a initié au bloc. En espérant que nous aurons l'occasion de faire cette fameuse raclette !

Merci également à Ronan Nédélec, pour les hauts et bas liés aux puces GPS, les repas toujours improvisés lorsque je passais récupérer les puces ou les récepteurs, ainsi que les tâches parfois improbables que tu me donnais à réaliser. Je te souhaite toute la réussite possible dans ton projet de création d'entreprise.



Je remercie également Bretagne Vivante, et plus précisément Corentin Le Floch pour les données transmises sur le Grand Murin, qui m'ont été très utiles pour ce mémoire.

Je voudrais également saluer les bénévoles rencontrés lors des camps chauves-souris : Emilie, Enora, Julien, Thomas, Jonathan, Chloé, Gabrielle, Michelle, Dominica, Aïsha, Charmaine, Medhi, ... ainsi que toutes les personnes que j'aurais malencontreusement oubliées. La bienveillance et la passion ressenties au cours de ces quelques semaines m'ont permis de profiter pleinement de ces camps, sans voir le temps passer entourée de personnes aussi passionnées que passionnantes.

Je n'oublie pas non plus le GEOCA et Viv'armor avec qui le GMB partage les locaux. Merci à Nolwenn, Margaux, Alice, Franck, Delphine, Pierrot, Ema, Cécile, Xavier, Olivier et Catherine de m'avoir accueillie parmi vous. Les moments partagés et les kebabs du vendredi ont été à la fois enrichissants, animés et très sympathiques. Merci à Fred de m'avoir fait confiance pour garder son chat : j'espère qu'il s'en est remis.

Je tiens également à remercier mes enseignants référents, Brice Giffart et Maya Gonzalez pour leurs conseils et leur accompagnement tout au long du stage.

Je souhaite remercier toutes les personnes qui sont venues me rendre visite à Saint Briec. J'espère que vous avez apprécié et, en tout cas, votre présence m'a fait très plaisir. Enfin, merci à ma famille et mes amis rencontrés au cours de ces années d'étude, qui ont contribué à rendre cette période agréable. Merci pour votre soutien, votre présence et tous les bons moments partagés.

Table des matières

INTRODUCTION	1
PARTIE 1 : Contexte.....	2
I. Le déclin de la biodiversité : causes et enjeux de conservation.....	2
a. Un déclin de la biodiversité principalement d'origine anthropique.....	2
b. La conservation des espaces par la protection des habitats et de leur connectivité ...	2
II. Etat de connaissances sur le Murin de Daubenton.....	2
a. Les Chiroptères en France	2
i. Des mammifères à l'écologie particulière	2
ii. Des espèces menacées, encadrées par une réglementation importante.....	4
b. Les Chiroptères en Bretagne	5
i. Les espèces retrouvées en Bretagne.....	5
ii. Etat des populations bretonnes.....	5
iii. Deux associations bretonnes assurant le suivi	6
c. Le Murin de Daubenton, une espèce en régression en lien avec son écologie	6
i. Une espèce liée aux zones humides, des territoires en déclin.....	6
ii. Une espèce fortement lucifuge.....	7
III. Techniques de suivi des chauves-souris.....	8
a. Méthodes historiques de suivi des chauves-souris.....	8
i. Suivi des populations par capture, marquage et observation directe	8
ii. Identification des espèces par détection acoustique active	9
iii. Suivi individuel par télémétrie VHF	9
b. Nouvelles technologies appliquées au suivi des chauves-souris	10
i. Technologies de suivi individuel et spatial	10
ii. Technologies de détection et d'identification automatisées.....	11
iii. Technologies d'analyse indirecte de l'écologie	11
IV. Problématique de l'étude	12
a. Programme de conservation du Murin de Daubenton en Bretagne	12
b. Le mémoire comme étude préliminaire au déploiement à l'échelle régionale	13
PARTIE 2 : Du recensement des nouvelles technologies au choix d'une méthode de suivi pour le Murin de Daubenton	14
I. Méthodologie	14
a. Recherche et sélection bibliographique	14
b. Evaluation comparative du GPS et de la télémétrie VHF selon la qualité des données et les contraintes de suivi	14
c. Evaluation de la faisabilité technique du suivi GPS	16
II. Résultats et discussion	16
a. Une clé de décision orientant le choix méthodologique vers le GPS et la télémétrie VHF.....	16
b. Le GPS : davantage de données et un effort de terrain réduit par rapport à la télémétrie VHF.....	18

c. Le développement d'une puce GPS sur mesure comme alternative aux solutions commerciales	21
PARTIE 3 : Du développement, à l'évaluation d'un prototype de GPS adapté au suivi du Murin de Daubenton	23
I. Méthodologie	23
a. Evaluation en conditions réelles sur le Murin de Daubenton	23
i. Cadre réglementaire et habilitation à la capture	23
ii. Capture et équipement des chauves-souris	23
iii. Acquisition et préparation des données GPS	24
iv. Analyse des données GPS.....	24
b. Tests complémentaires sur les performances des puces GPS miniaturisées.....	24
i. Acquisition des données complémentaires	24
ii. Evaluation de la performance d'acquisition des puces	25
iii. Influence de la miniaturisation sur l'erreur de localisation	25
iv. Influence de la qualité géométrique des satellites sur l'erreur de localisation	25
v. Evaluation de la restitution des déplacements et des vitesses.....	26
vi. Détermination d'un seuil de vitesse pour l'identification des phases d'activité	26
II. Résultats et discussion	27
a. Deux Murins de Daubenton équipés, mais une seule puce ayant fourni des données exploitables	27
i. Un trajet vers une zone de chasse en trois phases distinctes.....	27
ii. Des données d'altitude incertaines.....	29
b. Des tests complémentaires pour évaluer les performances des puces miniaturisées	30
i. Aucune différence démontrée entre les puces dans les performances d'acquisition	30
ii. Aucune influence détectée entre les deux puces sur l'erreur de localisation.....	31
iii. Une augmentation de l'erreur de localisation pour les DOP supérieurs à 5	32
iv. Une sous-estimation des distances parcourues malgré des vitesses cohérentes avec les conditions de déplacement	33
v. Un seuil de vitesse permettant d'identifier le transit mais pas l'activité de chasse	34
PARTIE 4 : Du suivi expérimental au déploiement régional : élaboration d'un plan d'échantillonnage.....	37
I. Méthodologie : définition des paramètres du plan d'échantillonnage	37
a. Définition de la configuration du GPS et de la durée de suivi.....	37
b. Définition d'un échantillon représentatif des situations étudiées	37
c. Définition des modalités d'identification des terrains de chasse et corridors.....	38
II. Résultats : proposition d'un plan d'échantillonnage pour le suivi régional.....	38
a. Trois nuits de suivi préconisées pour concilier acquisition des données et autonomie du dispositif.....	38
b. Un échantillon de 108 femelles réparties dans différents contextes et périodes pour couvrir la diversité de la population bretonne.....	39

c. Les données GPS permettant d'identifier les déplacements, terrains de chasse et corridors	40
PARTIE 5 : Discussion générale	43
I. Le GPS : une technologie prometteuse pour le suivi de petites chauves-souris	43
II. La miniaturisation des technologies de suivi : un compromis entre masse, autonomie et qualité des données	43
III. Une preuve de faisabilité encore limitée et plusieurs améliorations nécessaires avant le déploiement à plus large échelle	44
a. Des résultats exploratoires limitant la validité du dispositif	44
b. Des améliorations techniques pour renforcer l'autonomie et les performances	44
IV. Perspectives pour répondre aux hypothèses du déclin du Murin de Daubenton	44
a. Ressource alimentaire et qualité des milieux	45
b. Complémentarité entre GPS et suivi acoustique	45
c. Etude de la fragmentation des habitats	45
Conclusion	45
Bibliographie	46
Annexes	51

Liste des figures

Figure 1 : Tableau représentant l'Enfer, peuplé de chauves-souris	1
Figure 2 : Cycle de vie de la chauve-souris	3
Figure 3 : Pollution lumineuse diffuse en cœur de nuit en Bretagne en 2024	8
Figure 4 : Présentation du matériel de télémétrie VHF, antenne et récepteur (gauche), émetteur VHF (centre et droite)	10
Figure 5 : Pucés GPS équipées sur un Grand Murin (gauche) et un Murin de Daubenton (droite)	10
Figure 6 : Place du mémoire dans le programme de conservation	13
Figure 7 : Clé de décision d'étude des chauves-souris avec les technologies nouvelles	17
Figure 8 : Taux de réussite selon la fréquence d'acquisition pour les données GPS de BV	19
Figure 9 : Les étapes de la formation à la capture	23
Figure 10 : Schéma de deux séquences d'acquisition de données	24
Figure 11 : Trajet du Murin de Daubenton équipé dans la nuit du 30 juin 2026	28
Figure 12 : Hauteur de vol de la chauve-souris	29
Figure 13 : Comparaison du temps de fix moyen et de la proportion de fix longs entre les deux pucés GPS	31
Figure 14 : Distribution des erreurs de localisation selon la puce GPS	32
Figure 15 : Distribution de l'erreur de localisation en fonction du DOP	33
Figure 16 : Influence du seuil de vitesse sur la détection des déplacements	34
Figure 17 : Evolution de la sensibilité et spécificité de la détection du mouvement selon le seuil de vitesse	35

Liste des tableaux

Tableau 1 : Tendances des populations de chauves-souris en Bretagne et en France	5
Tableau 2 : Résumé des configurations des pucés GPS posées sur les chauves-souris	15
Tableau 3 : Qualité et quantité des données GPS selon la fréquence d'acquisition	18
Tableau 4 : Fournisseurs contactés et caractéristiques de leur produit le plus léger	21
Tableau 5 : Principe de la matrice de confusion	26

Tableau 6 : Caractéristiques des individus capturés et des puces GPS utilisées.....	27
Tableau 7 : Synthèse des principaux résultats du suivi GPS du Murin de Daubenton	29
Tableau 8 : Synthèse des indicateurs de performance des puces utilisés et de la durée des sessions	30
Tableau 9 : Distances de référence et distances GPS selon la fréquence d'acquisition et la puce GPS	33
Tableau 10 : Nombre de gîtes selon le contexte	37
Tableau 11 : Résumé des configurations testées et du temps d'utilisation de la puce.....	38
Tableau 12 : Synthèse des études pertinentes chez le Murin de Daubenton.....	39

Liste des annexes

Annexe i : Liste rouge des Chiroptères de Bretagne (adapté de Simonnet, Dubos (2025))	51
Annexe ii : Récapitulatif des ressources utilisées par technologie	52
Annexe iii : Fiche de la synthèse bibliographique sur la télémétrie VHF	53
Annexe iv : Fiche de la synthèse bibliographique sur les balises GPS miniaturisées	55
Annexe v : Conditions d'application du modèle linéaire mixte du taux de réussite en fonction de la fréquence d'acquisition sur les données GPS de Bretagne Vivante – QQplot des résidus simulés du modèle (haut) et résidus en fonction des valeurs ajustées du modèle (bas)	58
Annexe vi : Comparaison de la quantité et qualité des données récoltées par suivi GPS ou suivi télémétrique.....	59
Annexe vii : Détail du devis obtenu pour l'acquisition de cinq puces picoFix GPS et du matériel associé	60
Annexe viii : Demande de dérogation de capture pour la pose de GPS sur plusieurs murins de Daubenton	61
Annexe ix : Matrice de confusion du mouvement prédit et réel avec un seuil de vitesse de 1.25 km/h	62
Annexe x : Indicateurs tirés des matrices de confusion pour chaque seuil de vitesse	62

Glossaire et liste des abréviations

~ Les noms soulignés renvoient aux entrées correspondantes dans le glossaire ~

Azimut (ici) : Direction du signal en degré, souvent exprimé selon un angle par rapport au Nord
Barotraumatisme : Dégradation des cellules alvéolaires des poumons des chauves-souris à cause d'une variation brutale de pression.

Batterie LiPo : batterie dont la réaction se fait grâce à un électrolyte sous forme de gel, en opposition aux batterie Li-Ion.

BV : Bretagne Vivante

Diapause : arrêt temporaire du développement

Domaine vital : espace qu'un animal occupe régulièrement pour se reposer, se nourrir, se reproduire, ...

Dilution of Precision (DOP) : score de qualité géométrique des satellites. Plus il est élevé, plus les satellites sont proches les uns des autres et ne couvrent qu'une petite partie du ciel.

GMB : Groupe Mammalogique Breton

GNSS : Global Navigation Satellite System ou Système mondial de navigation par satellite, constellation de satellites qui fournissent des signaux depuis l'espace pour transmettre des informations de positionnement et de synchronisation aux récepteurs. Il existe au moins quatre constellations de satellites : Galileo, le système européen ; GPS le système américain ; GLONASS, le système russe et BeiDou, le système chinois.

IPBES : Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques

Liaison radio UHF : communication sans fil utilisant des ondes électromagnétiques entre 300 MHz et 3 GHz

Luminance zénithale : niveau de luminosité du ciel tel qu'on peut l'observer depuis le sol en tous points d'un territoire.

MCP (Polygone convexe minimal) : le plus petit polygone pouvant être tracé autour d'un ensemble de points, dont tous les angles intérieurs sont inférieurs à 180 degrés. Cette méthode est régulièrement utilisée pour délimiter le domaine vital des chauves-souris.

MNHN : Muséum National d'Histoire Naturelle

MNT : Modèle Numérique de Terrain

PNAC : Plan National d'Actions pour les Chiroptères

SEPNB : Société pour l'étude et la protection de la nature en Bretagne

Swarming : regroupement de nombreuses chauves-souris dans des grands espaces ouverts, caractérisé par une importante activité de vol et permettant le brassage génétique pour la reproduction

Télémétrie VHF : technologie utilisant les bandes à très hautes fréquences (spectre radioélectrique) s'étendant de 30 MHz à 300 MHz. C'est la technique traditionnelle pour suivre les chauves-souris à l'aide d'un dispositif équipé sur les animaux qui émet un signal radio capté par un récepteur.

Triangulation : méthode qui permet de déterminer la position d'un point en croisant des azimuts synchrones pris depuis des points dont la position est connue.

INTRODUCTION

“In the end, we will conserve only what we love, we will love only what we understand, and we will understand only what we are taught” Cette phrase, prononcée par Baba Dioum, lors de l’Assemblée Générale de l’IUCN à New Delhi de 1968, souligne le lien entre la connaissance des espèces et leur conservation. Mieux comprendre leur écologie constitue une étape essentielle pour identifier les mesures nécessaires à leur protection.



Figure 1 : Tableau représentant l'Enfer, peuplé de chauves-souris

Source : Simonnet 2015

Les chauves-souris ont longtemps été, et restent encore aujourd’hui, craintes en raison d’une méconnaissance de ces espèces nocturnes, souvent associées une image diabolique et au vampirisme (Figure 1, Simonnet 2015).

Parmi elles, le Murin de Daubenton (*Myotis daubentonii*, Kulh 1817), une chauve-souris inféodée aux milieux humides, reste encore peu étudié en France, alors que les tendances actuelles montrent des signes de déclin de ses populations

(Dupont 2024). Ces observations soulignent la nécessité d’améliorer les connaissances sur son écologie pour mieux comprendre les facteurs susceptibles d’expliquer cette régression et d’orienter les actions de conservation. C’est dans ce contexte qu’un programme de conservation du Murin de Daubenton, porté par le Groupe Mammalogique Breton (GMB), a débuté en Bretagne en 2024. Après une première phase consacrée à l’amélioration des connaissances sur la répartition et la structuration des gîtes, le programme s’intéresse désormais aux déplacements et habitats de chasse de l’espèce pour mieux comprendre les facteurs susceptibles de contribuer à son déclin.

Cependant, l’étude des déplacements et des habitats de chasse nécessite la mise en œuvre d’une méthode de suivi adaptée aux contraintes liées à sa petite taille. Si la télémétrie VHF¹ (suivi à distance d’une chauve-souris équipée d’un émetteur radio) permet un suivi individuel, elle nécessite un effort humain important et limite la quantité de données recueillies. Le développement de nouvelles technologies de suivi ouvre de nouvelles perspectives, mais leur masse, leur autonomie et leurs performances doivent rester compatibles avec les caractéristiques biologiques de l’espèce.

Ce mémoire cherche donc à répondre à la problématique suivante : **Comment mettre en œuvre une méthode de suivi permettant d’étudier les déplacements et les habitats de chasse du Murin de Daubenton, tout en tenant compte des contraintes liées à sa petite taille ?**

Pour y répondre, ce mémoire s’organise en quatre étapes. La première partie présente le contexte de l’étude. Les parties suivantes conduisent progressivement au choix d’une méthode de suivi, à son développement et à son évaluation, puis à la proposition d’un plan d’échantillonnage pour son déploiement à l’échelle régionale.

¹ Les noms soulignés renvoient aux entrées correspondantes dans le glossaire

PARTIE 1 : Contexte

I. Le déclin de la biodiversité : causes et enjeux de conservation

a. Un déclin de la biodiversité principalement d'origine anthropique

La biodiversité est un concept défini par l'article 2 de la Convention sur la diversité biologique (ONU 1992) comme « la variabilité des organismes vivants de toute origine y compris, entre autres, les écosystèmes terrestres, marins et autres écosystèmes aquatiques et les complexes écologiques dont ils font partie ». Cette diversité biologique, ou biodiversité, désigne la variabilité à différentes échelles : diversité intraspécifique, diversité interspécifique et diversité des écosystèmes. Elle ne se résume donc pas au nombre d'espèces présentes dans un milieu mais englobe également leur abondance, leur répartition et les relations qu'elles entretiennent avec leur environnement.

Le déclin de la biodiversité se manifeste par la disparition d'espèces, mais également par la diminution des effectifs des populations, la réduction de leur aire de répartition ou encore la dégradation de leurs habitats. D'après le *Living Planet Index* (WWF 2024), la taille moyenne des populations de vertébrés suivies a régressé de 73 % entre 1970 et 2020, avec une baisse particulièrement importante pour les populations d'espèces d'eau douce, atteignant 85 %. Les cinq principaux facteurs de ce déclin (IPBES 2019) sont tous liés aux activités humaines : le changement d'utilisation des terres et des mers, l'exploitation directe des organismes, le changement climatique, la pollution et les espèces exotiques envahissantes. Le changement d'utilisation des terres correspond à la transformation des milieux naturels par les activités humaines, à travers l'agriculture, l'exploitation forestière, l'urbanisation ou encore le développement des infrastructures. Avec l'exploitation directe des organismes, ces facteurs représentent plus de 50 % de l'impact global des facteurs directs sur la nature. Ainsi, 75% de la surface terrestre a été significativement modifiée par les activités humaines. Ce déclin ne concerne pas uniquement les autres espèces : en altérant le fonctionnement et la résilience des écosystèmes, il menace également les services essentiels qu'ils fournissent aux sociétés.

b. La conservation des espaces par la protection des habitats et de leur connectivité

La conservation de la biodiversité ne peut pas reposer uniquement sur la protection des espèces, elle nécessite également la préservation des habitats nécessaires à leur alimentation, leur reproduction, leur repos et leurs déplacements.

Cette conservation s'articule autour de trois grands axes : la protection des habitats et des espèces existants, la restauration des habitats dégradés, et le maintien ou la restauration de la connectivité écologique entre les habitats. Lors de la Conférence de Montréal sur la biodiversité (ONU 2022), les Etats ont adopté le Cadre mondial de la biodiversité de Kunming-Montréal, qui fixe l'objectif de protéger et de restaurer au moins 30 % des écosystèmes d'ici à 2030. Dans ce contexte, la connaissance de l'utilisation de l'espace par les espèces est indispensable pour assurer leur conservation. L'identification et le suivi de ces habitats constituent ainsi un préalable à la mise en place de mesures de conservation adaptées.

II. Etat de connaissances sur le Murin de Daubenton

a. Les Chiroptères en France

i. Des mammifères à l'écologie particulière

La classification des chauves-souris dans l'ordre du vivant a longtemps été incertaine. Ces quadrupèdes volants n'étaient ni vraiment considérés comme oiseau, ni vraiment terrestre. Ce n'est qu'en 1866, quand Haeckel établit le premier arbre monophylétique (une même origine), que les Chiroptères sont classés en tant que mammifères (Arthur, Lemaire 2009).

Ces animaux volants sont présents dans le monde entier, en excluant les pôles. La répartition n'est pas uniforme : une augmentation de la richesse spécifique est remarquée, plus on est proche de l'équateur. Cette répartition dépend également de la qualité des milieux : les régions désertiques du nord de l'Afrique sont moins riches que les forêts tropicales. Les îles sont également occupées par les Chiroptères, en lien avec leur aptitude au vol. La formation d'espèces endémiques est donc largement établie dans ces secteurs (Arthur, Lemaire 2009; Dietz, Kiefer 2018).

La compétition entre espèces de Chiroptères au sein d'un milieu est très faible, due à la diversité des niches écologiques occupées. En effet, les espèces peuvent être carnivores, insectivores, frugivores, nectarivores... Elles diffèrent également par leur milieu de chasse, leur hauteur de vol, leur stratégie de capture, leur préférence alimentaire et leur période d'activité. En France, on dénombre 36 espèces, dont la plupart sont petites et insectivores (Arthur, Lemaire 2009; Dietz, Kiefer 2018).

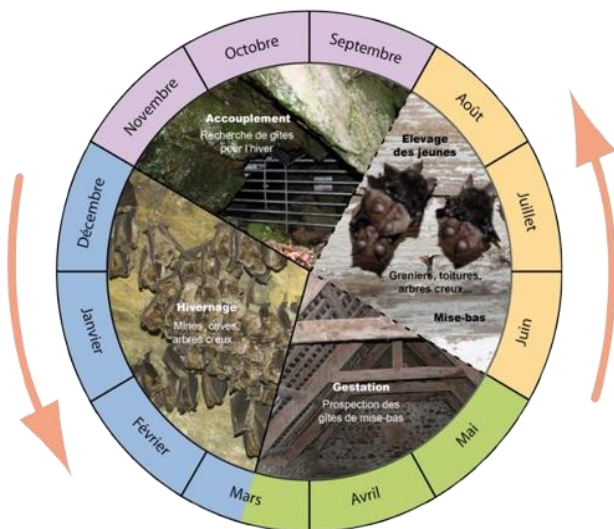


Figure 2 : Cycle de vie de la chauve-souris @GMB

Le cycle de vie des Chiroptères en France (Figure 2) est généralement divisé en 2, en lien avec leur régime alimentaire (Arthur, Lemaire 2009; Simonnet 2015):

- Une phase de torpeur en hiver, retardant la gestation soit par décalage de la fécondation et stockage du sperme du mâle dans l'appareil reproducteur de la femelle, ou par ralentissement du développement embryonnaire après fécondation. Cette torpeur peut se présenter comme une hibernation tout au long de l'hiver ou par de courtes diapauses. Etant vulnérables pendant cette période, les chauves-souris ont tendance à s'isoler dans des cavités d'arbres, des fissures de roches ou de maçonnerie ou des sites souterrains. Elles peuvent migrer sur de longues distances entre leur gîte d'été et d'hiver.

- Une phase active débutant au printemps par la réapparition des insectes. La gestation reprend et le développement embryonnaire se poursuit pendant quelques semaines. La naissance d'un ou, plus rarement, de deux jeunes intervient donc entre mai et juillet. Les sites de mise-bas et d'élevage des jeunes sont généralement différents des sites d'hibernation. Les femelles se regroupent dans des lieux chauds, obscurs et calmes, tandis que les mâles sont généralement plus dispersés. Le cycle se poursuit avec la période d'accouplement en automne, pouvant donner lieu à de vastes regroupements d'individus dans des sites de « swarming » (sites dédiés aux accouplements mêlant mâles et femelles et permettant un brassage génétique pour les espèces peu mobiles).

Pour se repérer dans l'espace, les chauves-souris pratiquent l'écholocalisation. Ce phénomène leur permet de se déplacer la nuit, en analysant l'écho d'un ultrason qu'elles émettent (entre 8 et 120 kHz). Elles détectent et localisent les objets (obstacles et proies) mais peuvent également se représenter leurs formes et textures. La distance à un objet est estimée par le temps de réponse entre le son émis et son écho (Dietz, Kiefer 2018; Simonnet 2015).

Les Chiroptères utilisent ainsi différents habitats adaptés aux différentes phases de leur vie. Elles sont fidèles à leurs gîtes et se retrouvent très souvent d'une année à l'autre au même endroit, ce qui les rend vulnérables au moindre changement dans leur environnement. Ainsi, toutes les espèces de chauve-souris sont protégées en France et en grande partie menacées, comme nous allons le présenter par la suite.

ii. Des espèces menacées, encadrées par une réglementation importante

Les populations de Chiroptères ont régressé à partir du XXème siècle mais depuis les années 1980 et le début des mesures de protection, certaines espèces voient leur population augmenter de nouveau, tandis que pour d'autres, elles continuent à diminuer. En 2024, une synthèse des tendances des populations montre que sur dix-sept espèces étudiées, seules sept espèces ont des populations en augmentation. Deux espèces sont stables, et cinq espèces ne montrent pas de tendance claire. Trois espèces sont montrées en déclin, dont le Murin de Daubenton (*Myotis daubentonii*, Kuhl 1817) (Dupont 2024).

Ces animaux sont menacés par bon nombre d'activités anthropiques (Arthur, Lemaire 2009; Dietz, Kiefer 2018; Simonnet 2015) :

- L'utilisation des **pesticides** constitue une menace directe et indirecte : ils peuvent provoquer l'empoisonnement des individus et des jeunes, entraîner des problèmes de stérilité et réduire les populations d'insectes dont elles se nourrissent.
- La perte et la **fragmentation des habitats**, qu'il s'agisse des gîtes ou des terrains de chasse, sont causées par la destruction d'arbres creux et de bâtiments, les incendies, la disparition des haies, la création de routes et d'infrastructures et le drainage des zones humides. Les pollutions lumineuse et sonore contribuent également à perturber leurs déplacements et l'utilisation de leurs habitats.
- La **destruction** et le **dérangement direct** peuvent être liés aux activités humaines dans les gîtes, en particulier lors de l'hibernation, mais aussi aux infrastructures telles que les éoliennes et les routes, responsables de mortalité par collision, barotraumatisme ou autres perturbations directes.

Pour pallier ces menaces, des programmes de protection et de conservation et des réglementations se sont créés au fil des années (Arthur, Lemaire 2009; Simonnet 2015).

Au niveau mondial, la convention de Bonn classe les chauves-souris comme espèces migratrices sauvages dans un état de conservation défavorable et encourage la coopération entre Etats pour protéger leurs habitats et limiter les menaces. Elle a en particulier conduit à la création de l'accord EUROBATS en Europe, visant à harmoniser les politiques européennes de conservation. A l'échelle européenne, la convention de Berne (1990) et la directive Habitats-Faune-Flore (1992) constituent les principaux cadres réglementaires. Elles assurent la protection des chauves-souris, de leurs gîtes et de leurs habitats, certaines espèces bénéficiant d'une protection stricte ou nécessitant la désignation de zones spéciales de conservation. En France, la protection des chauves-souris repose sur la loi de Protection de la nature de 1976 et sur les arrêtés de 1981 et 2007, qui ont progressivement étendu la protection des individus à leurs sites de reproduction et de repos. Cette réglementation est complétée par plusieurs plans nationaux d'action, dont le dernier, le Plan national d'actions en faveur des Chiroptères (PNAC), s'est achevé en 2025 et a permis de poursuivre les actions de connaissance et de conservation des espèces et de leurs habitats.

Ainsi, la protection des chauves-souris repose aujourd'hui sur un système stable allant des conventions internationales jusqu'aux actions locales. Cependant, de nombreuses espèces restent fragilisées par les activités humaines, ce qui rend indispensable la poursuite des politiques de conservation.

b. Les Chiroptères en Bretagne

i. Les espèces retrouvées en Bretagne

Les premières traces d'études chiroptérologues en Bretagne se trouvent dans la réédition de 1836 du *Voyage dans le Finistère* par Christophe-Paulin de Fréminville, il note ainsi la présence de six espèces de chauves-souris en Bretagne. D'autres études se lanceront à partir du XIXème siècle permettant de découvrir petit à petit toutes les chauves-souris de Bretagne connues à ce jour. Nous pouvons aujourd'hui y recenser 22 espèces appartenant à 3 familles (Simonnet 2015) :

- Les **Rhinolophidés**, comprenant uniquement deux espèces du genre *Rhinolophus*. Leurs oreilles sont mobiles et sans tragus, leur permettant d'émettre des longs cris dans les hautes fréquences.
- Les **Vespertilionidés**, la famille comprenant le plus d'espèces. Elle est composée de sept genres, dont les habitats et les comportements diffèrent, en lien avec des caractères morphologiques différents.
- Les **Minioptéridés**, se composant d'une unique espèce, présente de manière occasionnelle ou marginale. Leur front est bombé et les ailes sont longues.

ii. Etat des populations bretonnes

Comme au niveau national, les espèces bretonnes sont menacées et donc bénéficient des protections issues de la Directive Habitats et de l'arrêté de 2007. Si nous nous intéressons aux tendances des populations en Bretagne (

Tableau 1), parmi les dix espèces, dont le suivi des populations donne des chiffres significatifs, trois montrent un déclin au cours des 20 à 30 dernières années : *Nyctalus noctula*, *Myotis alcathoe* et *Myotis daubentonii*.

Tableau 1 : Tendance des populations de chauves-souris en Bretagne et en France

NS : non significatif. Les tendances nationales ont été calculées sur la période 2006-2023 par Dupont (2024) ou reprises de l'étude de Kerbiriou et al. (2018) (espèces avec un astérisque). Les tendances de Bretagne ont été adaptées de deux études réalisées sur la période 1988-2020 pour *Rhinolophus ferrumequinum*, *Rhinolophus hipposideros*, *Myotis myotis*, *Myotis emarginatus*, *Myotis daubentonii* et

Famille	Nom commun	Nom latin	Tendance des populations en Bretagne	Tendance des populations en France
Rhinolophidés	Grand Rhinolophe *	<i>Rhinolophus ferrumequinum</i>	positive	3,50%
	Petit Rhinolophe *	<i>Rhinolophus hipposideros</i>	positive	6,90%
Vespertilionidés	Vespertilion bicolore	<i>Vespertilio murinus</i>		
	Sérotine commune	<i>Eptesicus serotinus</i>		13,70%
	Noctule de Leisler	<i>Nyctalus leisleri</i>	NS	21,30%
	Noctule commune	<i>Nyctalus noctula</i>	négative	-52,50%
	Pipistrelle commune	<i>Pipistrellus pipistrellus</i>	stable	-23,60%
	Pipistrelle pygmée	<i>Pipistrellus pygmaeus</i>	NS	NS
	Pipistrelle de Nathusius	<i>Pipistrelle nathusii</i>	NS	-29,90%
	Pipistrelle de Kuhl	<i>Pipistrelle kuhlii</i>	NS	NS
	Barbastelle d'Europe	<i>Barbastella barbastellus</i>	positive	41%
	Oreillard roux	<i>Plecotus auritus</i>	NS	NS
	Oreillard gris	<i>Plecotus austriacus</i>	NS	86,80%
	Murin à oreilles échancrées	<i>Myotis emarginatus</i>	positive	29%
	Murin de Natterer	<i>Myotis nattereri</i>	positive	79,90%
	Murin à moustaches	<i>Myotis mystacinus</i>	stable	NS
	Murin d'Alcathoe	<i>Myotis alcathoe</i>	négative	
	Murin de Bechstein *	<i>Myotis bechsteini</i>		NS
	Murin de Daubenton	<i>Myotis daubentonii</i>	négative	-29,20%
	Grand Murin *	<i>Myotis myotis</i>	positive	2,90%
Minioptéridés	Minioptère de Schreibers	<i>Miniopterus schreibersii</i>		-32,90%

Myotis mystacinus (Barbosa, Dubos 2022) et sur la période 2015-2020 pour *Barbastella barbastellus*, *Myotis nattereri*, *Myotis alcathoe*, *Plecotus auritus* et *Pipistrellus pipistrellus* (Le Gall, Dubos 2023).

De par leur protection, elles sont classées sur les listes rouges des espèces protégées, dont la liste rouge des Mammifères de Bretagne, la plus vulnérable étant la Noctule commune, catégorisée en tant qu'espèce en danger d'extinction (Annexe i). En effet, elle est en déclin et menacée par l'installation de parcs éoliens de par sa méthode de chasse (en groupe et en hauteur) et l'intensification de la sylviculture, menant à la diminution des gîtes disponibles. Le murin de Daubenton et le murin de Bechstein sont classés en espèce vulnérable. En effet, les habitats utilisés par le murin de Bechstein sont considérés comme sévèrement fragmentés et leur qualité future est compromise, tandis que la population du murin de Daubenton est en déclin, d'après les comptages hivernaux effectués en Bretagne et les tendances nationales.

iii. Deux associations bretonnes assurant le suivi

En Bretagne, deux associations partagent l'étude et la protection des Chiroptères et de leur milieu. Bretagne Vivante (BV), historiquement SEPNB, s'occupe principalement du Morbihan et de l'Ille-et-Vilaine, tandis que le Groupe Mammalogique Breton (GMB) se charge généralement des Côtes-d'Armor, du Finistère et de la Loire-Atlantique.

BV est, depuis 1959, une association loi 1901 de protection de la nature, gestionnaire de sites protégés en Bretagne historique (la Bretagne administrative et la Loire-Atlantique) et réalise de nombreuses actions d'étude et de conservation de la biodiversité (connaissance, protection, formation, gestion et défense des droits).

Cette étude a été réalisée au sein du GMB, également association loi 1901 de protection de la nature, active en Bretagne historique. Ses actions s'articulent autour de trois groupes (la Loutre et les mammifères semi-aquatiques, les Chiroptères et les micromammifères) et se développent autour de quatre axes :

- Améliorer la **connaissance** des mammifères grâce à des inventaires et au suivi des espèces.
- **Protéger** les espèces en accompagnant les décideurs et en acquérant des sites naturels ou en passant des accords avec les propriétaires.
- **Former** bénévoles, professionnels et étudiants par le biais de programmes adaptés.
- **Sensibiliser** le grand public lors d'évènements et à travers de nombreux supports de communication.

Le GMB porte ainsi un programme d'étude et de conservation des Chiroptères en Bretagne en lien avec le PNAC de 2016-2025. Un programme est consacré au Murin de Daubenton, dans le but d'améliorer les connaissances et de mieux protéger cette espèce, au regard des inquiétudes sur son évolution présentée précédemment. Cette espèce a une écologie particulière, qui pourrait expliquer son déclin. Une présentation de son écologie est donc réalisée dans la partie suivante.

c. Le Murin de Daubenton, une espèce en régression en lien avec son écologie

i. Une espèce liée aux zones humides, des territoires en déclin

Le Murin de Daubenton est inféodé aux zones humides. Elles constituent des habitats essentiels pour cette espèce, car elles offrent à la fois des conditions favorables à l'hibernation, à l'alimentation et aux déplacements. Les gîtes d'hibernation de prédilection de cette espèce présentent des conditions d'humidité importantes, en lien avec une perte de poids plus lente à plus fort taux d'humidité. Les gîtes d'été sont arboricoles ou anthropiques (cavités dans la maçonnerie de ponts ou de murs, plus rarement des greniers), ils se trouvent à proximité des terrains de chasse, dans des zones forestières ou proches de milieux humides, de cours d'eau ou de plans d'eau. Cette espèce est fidèle à une même zone en été. Elle a tendance à changer de gîte tous les deux à cinq jours selon la période mais reste dans le même secteur (entre 10 et 2 500 m) (Biteau, Dubos 2024).

Pour rejoindre leur terrain de chasse, ces murins se déplacent le long de repères arborés linéaires tels que les haies, les lisières de forêts et les ripisylves. Ils chassent principalement au-dessus de l'eau ou à proximité immédiate des milieux humides, où ils capturent des insectes aquatiques. Leur régime alimentaire est composé majoritairement de Chironomes, et de Trichoptères mais également de Nématocères, de Brachycères, de Tipulidés et de Lépidoptères. La présence et la qualité des zones humides influencent donc directement la disponibilité de ces proies (Biteau, Dubos 2024). Or, depuis les années 1970, les zones humides régressent (-35 % entre 1970 et 2015) et leur qualité se dégrade avec pour cause : le changement climatique, l'intensification de l'agriculture, l'érosion, l'eutrophisation des cours d'eau et la pollution thermique et chimique (Secrétariat de la Convention de Ramsar 2018). La présence de polluants dans ces milieux est de plus en plus fréquente et engendre des conséquences sur les espèces dépendantes de ces milieux, telles que les insectes aquatiques. Peu d'études sur les effets de la pollution sur les insectes aquatiques ont été réalisées. Prud'Homme (2015) a démontré une augmentation de la mortalité de *Aedes aegypti* (Diptère) à court terme en présence de benzo[a]pyrène, et une accélération du développement chez les descendants en présence d'ibuprofène. La présence de microplastiques, provenant de PVC, peut également engendrer une mortalité plus importante sur le *Gammarus fossarum* (Amphipode) (Barthelemy 2025). Les autres menaces pesant sur les insectes aquatiques sont l'altération du courant, la fragmentation des habitats et les invasions biologiques. Les Trichoptères, ont un taux de disparition entre 6 et 37 % sur 278 espèces recensées à partir des années 1890 dans le Minnesota. Leur écologie particulière (temps de développement d'une génération important, longue durée de vie, tolérance faible à la pollution) les rend particulièrement vulnérables aux perturbations anthropiques (Berlkessa, Boutraa 2025; Sanchez-Bayo, Wyckhuys 2019). Les plus touchés sont les décomposeurs et les prédateurs. Pour ce qui est des Diptères, très peu de données sur l'état de leur population sont disponibles.

ii. Une espèce fortement lucifuge

Le Murin de Daubenton craint fortement la lumière. En effet, il recherche des gîtes sombres tels que des grottes, bunkers, mines, ... pour les gîtes d'hibernation, mais également des cavités d'arbres sombres et des ponts en été. Il se déplace et chasse après que le soleil soit couché (entre 0 et 3 heures après le coucher du soleil), sans profiter du pic d'activité des insectes du crépuscule. Il évite probablement les conditions lumineuses la nuit pour échapper à ses prédateurs (Biteau, Dubos 2024). Cette espèce est donc menacée par la pollution lumineuse grandissante due à l'urbanisation.

En 2020, la pollution lumineuse perturbait 85% du territoire français (luminance zénithale supérieure à 21.5 mag/arcsec²). Cependant, des progrès ont été démontrés, diminuant ce chiffre en 2023 à 72 % (OFB 2025).

La Figure 3 nous montre la pollution lumineuse diffuse au milieu de la nuit en Bretagne. Les nombreuses villes (Rennes, Brest, Saint Briec, ...) sont toutes entourées d'un halo lumineux plus ou moins étendu en fonction de la taille de la ville. Une zone au centre est moins lumineuse que le reste de la région, cette zone regroupe une partie du Parc Naturel Régional d'Armorique et une zone plus rurale.

Pollution lumineuse en cœur de nuit de Bretagne (2024)

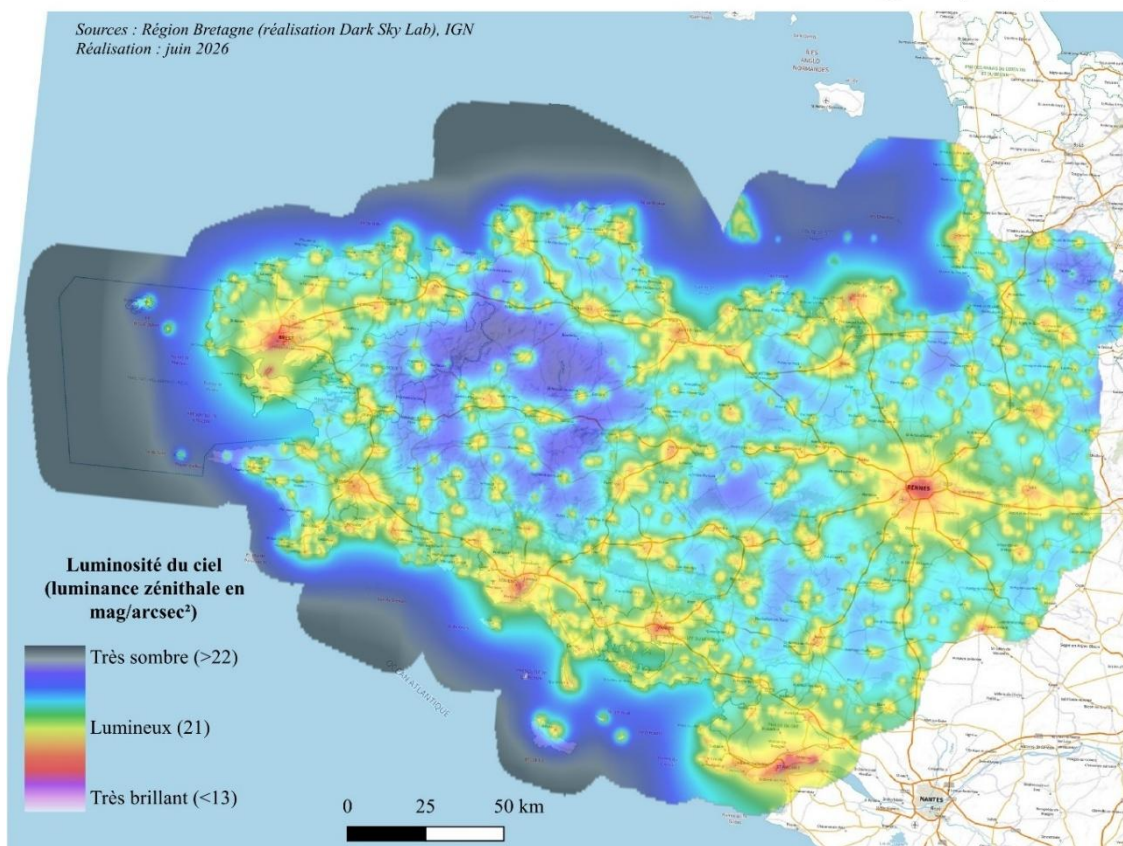


Figure 3 : Pollution lumineuse diffuse en cœur de nuit en Bretagne en 2024

III. Techniques de suivi des chauves-souris

a. Méthodes historiques de suivi des chauves-souris

Avant le développement récent des nouvelles technologies, le suivi des chauves-souris reposait principalement sur des méthodes nécessitant une intervention humaine directe, telles que la capture-marquage-recapture, l'écoute acoustique active ou la télémétrie VHF. Ces approches ont permis d'acquérir des connaissances fondamentales sur l'écologie des espèces mais présentent certaines limites liées à leur caractère invasif, aux moyens humains nécessaires et à la qualité de données pouvant être collectées.

i. Suivi des populations par capture, marquage et observation directe

La technique de capture-marquage-recapture a été utilisée au début des suivis de chauves-souris pour étudier la dynamique des populations, les mouvements des individus, la structure sociale des populations et les épidémies. Différentes techniques peuvent être utilisées (Marmet, Leuchtmann 2014) :

- Le **baguage** consiste à poser une bague individuelle sur l'avant-bras de la chauve-souris, dont l'identification nécessite généralement une recapture de l'animal. Cette méthode a notamment permis d'étudier les déplacements et la dynamique des populations mais présente des limites liées à la nécessité de recapter les individus et aux risques de stress ou de blessures associés à la manipulation. Elle n'est donc pas recommandée comme méthode de premier choix. Lorsque d'autres techniques permettent d'atteindre les objectifs de l'étude, celles-ci doivent être privilégiées.
- Le **tatouage** constitue également une méthode de marquage individuel, offrant un nombre élevé de codes possibles et une bonne persistance dans le temps. Toutefois, comme pour le baguage, l'identification nécessite une recapture des individus et la lisibilité du marquage peut diminuer avec les années.
- La pose de **transpondeurs** consiste à insérer une puce magnétique sous la peau. La lecture ne nécessite pas obligatoirement une recapture de l'animal, des lecteurs automatiques,

installés à l'entrée des gîtes par exemple, peuvent permettre une récupération des données efficace. Le transpondeur ne nécessite pas de batterie donc aucun problème d'autonomie ne se pose. Cependant, le dispositif peut tomber ou migrer sous la peau ; les manipulateurs doivent passer une formation pour la pose de cette puce ; le lecteur n'a pas une portée très grande donc l'acquisition des données se fait uniquement si la bête équipée passe proche du lecteur et le coût peut s'avérer élevé.

Le **comptage visuel**, toujours utilisé dans les études récentes, permet de récolter des informations sur la dynamique des populations. Les comptages sont souvent effectués à deux périodes : une en hiver dans les gîtes d'hibernation pour appréhender l'effectif des adultes, femelles et mâles confondus, et une entre la fin du printemps et l'automne, à la sortie ou dans les gîtes estivaux pour déterminer l'effectif des femelles en colonie mais aussi le nombre de nouveau-nés. Cette technique reste très efficace, mais lorsqu'elle est réalisée à l'intérieur des gîtes, elle peut être invasive et perturber les individus, notamment en période d'hibernation.

ii. Identification des espèces par détection acoustique active

La **détection acoustique active** se base sur l'écoute et l'analyse des ultrasons émis par les chauves-souris. Cette détection se fait sur le terrain pendant la période d'activité des chauves-souris – d'avril à octobre – avec des appareils permettant de rendre audible les ultrasons (Salaün 2023). L'écoute se déroule généralement en début de nuit par point d'écoute d'une durée standardisée de 10 à 30 minutes. Les fréquences et les sonorités des ultrasons émis varient en fonction de l'espèce et permettent ainsi de différencier des groupes ou d'identifier des espèces facilement reconnaissables. Les appareils peuvent également permettre de ralentir l'audio pour mieux écouter et reconnaître l'espèce ou le genre. Avec ces données, le comportement – chasse, transit ou cris sociaux – peut également être relevé. Cette technique est également utilisée pour caractériser l'utilisation des habitats de chasse en prospectant à différents moments de la nuit (au crépuscule et à l'aube pour découvrir les terrains de chasse, de transit et les gîtes, et au milieu de nuit pour étudier les terrains de chasse).

iii. Suivi individuel par télémétrie VHF

La **télémétrie VHF** ou radiopistage repose sur l'émission d'un signal électromagnétique. Ce signal est émis à une fréquence spécifique par un émetteur fixé temporairement sur la chauve-souris (Figure 4). Un récepteur et une antenne unidirectionnelle sont ensuite utilisés pour traquer le signal et retrouver la chauve-souris (Figure 4). Le récepteur permet de convertir le signal radio en un bip sonore audible, dont l'intensité varie selon la distance entre l'émetteur et le système de réception, permettant de localiser progressivement l'individu. L'antenne unidirectionnelle permet d'amplifier le signal et de le diriger. De par leur technologie simple, les émetteurs peuvent être très légers, les plus petits pesant 0.15 g, le coût de ceux-ci est raisonnable et la précision est bonne (entre 5 mètres et quelques centaines de mètres). La **télémétrie VHF** permet de rechercher les gîtes et d'étudier les habitats de chasse et les routes de vol. Cependant, elle nécessite de nombreuses personnes pour la recherche de l'émetteur, la portée du signal est limitée par l'environnement (végétation dense, relief, bâti épais) et les animaux peuvent endommager l'antenne présente sur l'émetteur.



Figure 4 : Présentation du matériel de télémétrie VHF, antenne et récepteur (gauche), émetteur VHF (centre et droite)

b. Nouvelles technologies appliquées au suivi des chauves-souris

i. Technologies de suivi individuel et spatial

Les technologies de suivi individuel permettent d'étudier directement les déplacements des chauves-souris et leur utilisation de l'espace. Contrairement aux méthodes reposant sur des observations ponctuelles ou indirectes, elles fournissent des informations spatiales précises à l'échelle de l'individu, mais nécessitent généralement la fixation d'un dispositif sur les individus.

Lorsque l'objectif est d'étudier les déplacements des chauves-souris à petite (chasse, route de transit) ou grande échelle (migration), les **balises GPS miniaturisées** constituent désormais une alternative à la télémétrie VHF (Figure 5).



Figure 5 : Puces GPS équipées sur un Grand Murin (gauche) et un Murin de Daubenton (droite)

Elles utilisent la technologie GPS pour enregistrer la position des chauves-souris. Contrairement au radiopistage, elles permettent un suivi automatique de l'animal, sans nécessiter une présence humaine continue pour le localiser. Les données enregistrées peuvent être transmises à distance par liaison radio UHF, Bluetooth, satellite ou uniquement stockées (ce qui nécessite de récupérer la balise pour accéder aux données, en associant un émetteur VHF pour ce faire). Selon le dispositif utilisé, il suffit par exemple que la chauve-souris passe à proximité d'un récepteur ou qu'un satellite soit en mesure de capter le signal pour que les informations soient récupérées. Les localisations obtenues présentent une précision d'environ cinq mètres, chaque mesure étant accompagnée d'un indice de qualité permettant d'en évaluer la fiabilité. Ces données rendent possible la distinction des différentes phases d'activité de l'animal (repos, déplacement, chasse), facilitant ainsi l'étude de son comportement. Enfin, cette méthode requiert peu de moyens humains, limités essentiellement à la pose des balises et, le cas échéant, au relevé des récepteurs. Les progrès de la miniaturisation permettent par ailleurs d'équiper des espèces de chauves-souris de plus en plus petites.

Les progrès dans les technologies de communication ont conduit au développement de systèmes connectés reposant sur l'**Internet des objets** (IoT), permettant d'automatiser davantage la collecte et la transmission des données issues des dispositifs de suivi. IoT désigne un ensemble de dispositifs connectés capables de collecter, transmettre et parfois analyser automatiquement des données issues de capteurs (position GPS, température, activité, ultrasons, ...). Les informations sont ensuite envoyées via des réseaux de communication à faible consommation d'énergie vers des plateformes de stockage et de visualisation, permettant un suivi quasi en temps réel des animaux ou de leur environnement. La localisation peut reposer sur une triangulation passive à partir de la puissance des signaux reçus par plusieurs antennes. Moins précise que le GPS, cette méthode est cependant adaptée à l'étude des déplacements à grande échelle, en particulier lors de migrations. Cette approche automatise la collecte des données, réduit les interventions sur le terrain et offre une grande autonomie des dispositifs grâce à leur faible consommation énergétique. En revanche, son efficacité dépend de la couverture des réseaux de communication, qui peut être limitée dans certains milieux, ainsi que de la fiabilité des transmissions et des infrastructures utilisées.

ii. Technologies de détection et d'identification automatisées

Les méthodes de détection automatisée permettent d'étudier l'activité des chauves-souris sans suivi individuel direct, en enregistrant des signaux acoustiques ou visuels. Elles offrent la possibilité de réaliser des suivis sur de longues périodes tout en limitant les perturbations humaines.

La **détection acoustique passive** utilise le même principe que la détection acoustique active, mais les ultrasons sont enregistrés puis analysés *a posteriori*. Cette méthode est principalement utilisée pour réaliser des inventaires de chauve-souris, suivre leur activité au cours du temps ou comparer l'utilisation de différents habitats, grâce à des enregistrements de longue durée. Des enregistreurs passifs recueillent les signaux continuellement ou après dépassement d'un certain seuil de fréquence ou d'amplitude de déclenchement. Les données sont ensuite converties en spectrogrammes ou en série numérique afin d'analyser la signature acoustique des émissions. L'identification des espèces et des comportements est réalisée automatiquement à l'aide d'algorithmes spécialisés bien qu'une vérification humaine puisse être nécessaire pour corriger les erreurs liées au bruit ou à la similarité des cris de certaines espèces. Cette technique permet de réaliser des enregistrements de nuits entières sans déranger les animaux, augmentant ainsi la probabilité d'obtenir un inventaire exhaustif des espèces présentes. Elle permet également de traiter de grands volumes de données tout en limitant les coûts. Cependant, elle repose sur des dispositifs statiques et ne permet pas d'individualiser les animaux détectés, limitant son utilisation pour le suivi individuel.

Le **suiti automatisé par imagerie** regroupe plusieurs méthodes utilisant des capteurs optiques ou thermiques pour détecter, compter et parfois identifier les chauves-souris sans manipulation des individus. Selon le dispositif employé (barrière infrarouge, pièges photographiques, drones thermiques, LiDAR ou vidéosurveillance infrarouge), ces techniques sont adaptées au suivi des gîtes, des émergences ou des espèces arboricoles et s'appuient de plus en plus sur des outils d'analyse automatisée des images. Ces méthodes constituent des approches peu invasives, continues et standardisées, avec un traitement rapide de grands volumes de données grâce aux outils d'analyse d'image. Toutefois, le coût élevé, les contraintes techniques propres à chaque dispositif et les difficultés d'identification de certaines espèces en limitent encore les applications.

iii. Technologies d'analyse indirecte de l'écologie

Certaines approches récentes ne reposent pas sur l'observation directe des individus ou de leur activité, mais sur l'analyse de traces biologiques laissées dans l'environnement ou

intégrées aux tissus animaux. Ces méthodes permettent de reconstituer certains aspects de l'écologie des chauves-souris, comme leur présence, leur alimentation ou leurs déplacements. Le **métabarcodage** repose sur l'amplification et le séquençage de régions de l'ADN suffisamment variables pour distinguer les espèces. Il est appliqué à des échantillons d'ADN environnemental (eDNA) prélevés dans différents supports, tels que l'eau, le guano (fèces des chauves-souris), les sédiments ou encore les toiles d'araignées. Les séquences obtenues sont ensuite comparées à des bases de données de référence afin d'identifier les espèces présentes. Cette approche est notamment utilisée pour détecter les espèces rares ou discrètes, caractériser la biodiversité d'un site ou encore analyser finement le régime alimentaire des chauves-souris à partir de l'ADN des proies contenu dans le guano. Elle offre une résolution taxonomique élevée, souvent supérieure à celle des méthodes acoustiques ou de l'identification visuelle, tout en nécessitant peu de perturbations pour les animaux et un effort de terrain limité. En revanche, son efficacité dépend de la qualité et de la quantité d'ADN disponible, ainsi que de l'exhaustivité des bases de données de référence. De plus, cette méthode ne fournit pas d'information sur les caractéristiques individuelles des animaux ni sur leurs déplacements, et les analyses en laboratoire demeurent coûteuses.

L'**analyse des isotopes stables** repose sur le fait que les tissus des chauves-souris incorporent, au cours de leur formation, les signatures isotopiques de leur environnement et de leur alimentation. L'analyse des rapports isotopiques du carbone, de l'azote, de l'hydrogène ou de l'oxygène dans des tissus biologiques tels que le sang, les poils ou les griffes, puis leur comparaison avec des signatures isotopiques de référence (isoscapes), permettent de reconstituer certains aspects de l'histoire écologique des individus, notamment leur régime alimentaire, leur origine géographique ou leurs déplacements. Les différents tissus se renouvelant à des vitesses variables, cette méthode fournit des informations intégrées sur des échelles temporelles allant de quelques jours à plusieurs mois. Elle présente l'avantage d'étudier les migrations sans avoir à suivre les individus en temps réel, ni à équiper les animaux de balises, tout en permettant de quantifier les ressources alimentaires assimilées. En revanche, son interprétation dépend fortement de la disponibilité de références isotopiques fiables et d'une bonne connaissance du renouvellement des tissus. De plus, la résolution spatiale demeure souvent limitée et ne permet donc pas de localiser précisément les déplacements des individus.

Ainsi, ces nouvelles technologies ne constituent pas des substituts aux anciennes mais plutôt des approches complémentaires, apportant de nouvelles informations sur l'écologie des chauves-souris depuis le suivi des individus jusqu'à la caractérisation des communautés et des interactions trophiques.

IV. Problématique de l'étude

a. Programme de conservation du Murin de Daubenton en Bretagne

Cette étude s'inscrit au sein du programme de conservation du Murin de Daubenton en Bretagne intitulé « comprendre et déterminer les clés de la conservation du Murin de Daubenton, une chauve-souris menacée en Bretagne ». Ce programme a pour objectif de comprendre les mécanismes de régression de ce murin dans la région pour identifier et proposer des actions pertinentes pour l'enrayer et permet de mettre en œuvre les deux premières actions du PNAC. Il a débuté en 2024 et se décline en deux phases (GMB, *com. pers.*).

La première phase, réalisée en 2024-2025 a permis d'étudier les gîtes et la structuration des populations. 32 gîtes ont été découverts dans différents paysages (bocage, forêt, littoral et urbain) grâce à des opérations de capture et de radiopistage. Ces suivis ont été réalisés à différentes périodes (printemps, début et fin d'été) pour maximiser la compréhension. Les propriétaires des gîtes ont ensuite été contactés et sensibilisés à la protection de ces sites. Par

ailleurs, une synthèse bibliographique sur la biologie, l'écologie et la conservation de l'espèce (Dubos, Nédelec 2025) a été diffusée, mettant en avant les comportements et les traits écologiques fréquents, les traits plus rares et les lacunes de connaissance. Au cours de ce premier travail, plusieurs hypothèses sur la cause de la diminution de ces populations ont été énoncées : la destruction des gîtes, une diminution de la ressource alimentaire, une pollution des eaux et la fragmentation des habitats due à la pollution lumineuse. L'hypothèse de la destruction des gîtes n'a pas été confirmée par les résultats de l'étude sur les gîtes.

La deuxième phase du projet s'intéresse donc aux terrains de chasse et aux corridors du murin de Daubenton pour confirmer ou réfuter les hypothèses formulées sur les causes de la régression de cette espèce. Prévue entre 2026 et 2030, elle vise à étudier le comportement de chasse, les déplacements et la dispersion de ces murins. Pour cela, le GMB propose de trouver une alternative à la technique de suivi traditionnelle utilisée pour déterminer les habitats de chasse et routes de vol de colonies, à savoir le radiopistage d'émetteurs VHF, très coûteux en moyens humains, pour obtenir une quantité de données souvent limitées. Le développement des nouvelles technologies a permis le développement de nouvelles techniques qui pourraient s'avérer intéressantes.

b. Le mémoire comme étude préliminaire au déploiement à l'échelle régionale

Cette seconde phase se déroulera en deux étapes successives. La première constitue une phase préparatoire, au sein de laquelle s'inscrit ce mémoire. Elle vise à identifier une méthode de suivi adaptée aux objectifs du programme, à en évaluer la faisabilité sur un nombre limité d'individus et à préparer son déploiement à l'échelle régionale. La seconde étape consistera à mettre en œuvre cette méthode sur un échantillon plus important, au plus tôt à partir de 2027. Ce mémoire constitue ainsi une étape intermédiaire entre l'identification des enjeux de conservation du Murin de Daubenton et la mise en œuvre d'un suivi régional de ses déplacements et habitats de chasse. Il s'organise autour de trois objectifs complémentaires (Figure 6) : identifier une méthode adaptée grâce à une synthèse des nouvelles technologies et à la construction d'une clé de décision, en évaluer les performances à travers des tests en conditions réelles et des essais complémentaires, puis définir un plan d'échantillonnage pour préparer son déploiement à l'échelle régionale.

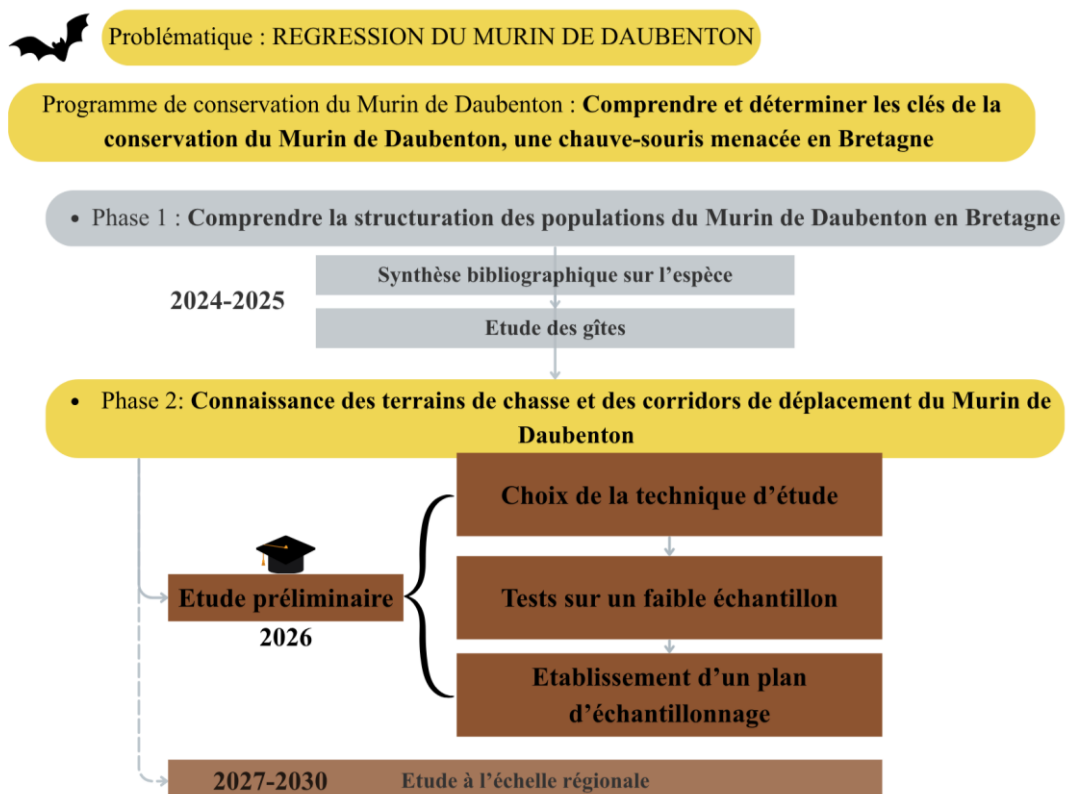


Figure 6 : Place du mémoire dans le programme de conservation
Le chapeau représente la place du mémoire

PARTIE 2 : Du recensement des nouvelles technologies au choix d'une méthode de suivi pour le Murin de Daubenton

La compréhension du déclin du Murin de Daubenton nécessite d'identifier les habitats qu'il utilise pour la chasse et les corridors de déplacement. Cette partie vise donc à répondre à la sous-problématique suivante : dans quelle mesure les nouvelles technologies peuvent-elles permettre d'améliorer l'étude des déplacements et des terrains de chasse du Murin de Daubenton, tout en restant adaptées aux contraintes liées à la taille de l'espèce ? Pour y répondre, différentes technologies utilisées dans l'étude des chauves-souris sont recensées et comparées, avant d'évaluer précisément l'intérêt du GPS par rapport à la télémétrie VHF et la faisabilité de son utilisation sur le Murin de Daubenton.

I. Méthodologie

a. Recherche et sélection bibliographique

Pour répondre à la problématique du GMB, une revue bibliographique a été réalisée. L'objectif était d'identifier, de comparer les nouvelles technologies utilisées dans le suivi des chauves-souris et d'évaluer leur intérêt dans le cadre de cette étude.

Dans un premier temps, les recherches bibliographiques ont été menées de manière générale, pour obtenir une vision d'ensemble des techniques de suivi existantes. Les articles scientifiques déjà recensés par le GMB ont constitué une première base documentaire, complétée par des recherches effectuées sur Google Scholar à l'aide de mots-clés relatifs aux différentes technologies de suivi et de termes restrictifs tels que « *new technologies* » et « *bats* ». Les documents obtenus ont ensuite été sélectionnés en fonction de leur pertinence vis-à-vis de l'étude des chauves-souris. Des articles scientifiques, mais également des thèses, rapports, prépublications et autres documents techniques accessibles ont été pris en compte. Aucune restriction n'a été appliquée concernant les espèces étudiées, l'objectif étant d'évaluer les technologies indépendamment de leur utilisation pour une espèce donnée. Pour chaque technologie identifiée, un minimum de quatre références bibliographiques a été recherché afin de disposer d'un niveau d'information suffisant pour la comparaison.

Les techniques ont été comparées selon plusieurs critères, notamment leur objectif d'utilisation et leur précision spatiale. A l'issue de cette première analyse, la technologie GPS a été identifiée comme particulièrement intéressante pour l'étude sur le Murin de Daubenton. Des recherches complémentaires ont donc été menées afin d'approfondir les connaissances relatives à cette technique.

b. Evaluation comparative du GPS et de la télémétrie VHF selon la qualité des données et les contraintes de suivi

Le GPS ayant été identifié comme particulièrement intéressant, son potentiel a été évalué par comparaison avec la télémétrie VHF, méthode traditionnellement utilisée pour le suivi des terrains de chasse. La comparaison repose sur quatre dimensions : la quantité et la résolution temporelle des données, leur précision spatiale, l'effort humain nécessaire au suivi et le coût de mise en œuvre.

Pour cela, nous avons récupéré les premiers tests de balises GPS effectués par Bretagne Vivante sur le Grand Murin (*Myotis myotis*, Borkhausen 1797). Bien que cette espèce diffère du Murin de Daubenton par sa taille et ses terrains de chasse (Simonnet 2015), ces données permettent d'évaluer la quantité et la qualité des données GPS obtenues durant plusieurs nuits et avec différentes configurations d'acquisition. Elles sont ainsi utilisées comme données de référence pour évaluer les possibilités offertes par la technologie GPS avant son utilisation sur le Murin de Daubenton. Elles ont été récoltées à partir de 13 GPS Lotek (PinPoint VHF40, poids : 2.4 g) composés d'une puce GPS et d'un émetteur VHF, pour récupérer la balise quand elle tombe, sur cinq périodes. Les chauves-souris équipées proviennent de deux colonies (Férel et Béganne,

Morbihan). Trois nuits ont été supprimées de l'analyse puisque le GPS a été perdu durant ces nuits. Un résumé des configurations des puces GPS est proposé dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Résumé des configurations des puces GPS posées sur les chauves-souris

*La dernière nuit de suivi de ces puces a été interrompue prématurément, en raison de la perte de la puce par la chauve-souris, cette nuit n'a donc pas été incluse dans les analyses.

Nom de la puce	Périodes d'acquisition	Colonie	Fréquence d'acquisition	Poids de la chauve-souris
0006B3B2E8	21/07/2023 – 23/07/2023	Férel	1 point toutes les 4 min	34.7 g
000715D770	21/07/2023 – 25/07/2023	Férel	1 point toutes les 4 min	34 g
00074C6B7E	28/06/2023 – 01/07/2023	Béganne	1 point toutes les 4 min	/
00079AC151	13/06/2023 – 16/06/2023	Férel	1 point toutes les 5 min	37 g
00079AEA44	21/06/2023 – 23/06/2023	Férel	1 point toutes les 6 min	33.2 g
	23/06/2023 – 24/06/2023		1 point toutes les 8 min	
00079B044D	21/06/2023 – 22/06/2023	Férel	1 point toutes les 6 min	32.8 g
00079B04E9	13/06/2023 – 15/06/2023	Férel	1 point toutes les 5 min	37.8 g
0007CD22C1*	21/06/2023 – 23/06/2023	Férel	1 point toutes les 6 min	33 g
	23/06/2023 – 24/06/2023		1 point toutes les 8 min	
0007CD25F4*	03/07/2023 – 06/07/2023	Béganne	1 point toutes les 4 min	25.9 g
0007CD2BA7	21/07/2023 – 23/07/2023	Férel	1 point toutes les 4 min	31.4 g
0007CD3058*	21/06/2023 – 24/06/2023	Férel	1 point toutes les 5 min	32.4 g
0007F2F4AF	21/07/2023 – 24/07/2023	Férel	1 point toutes les 4 min	30.2 g
0007192882	28/06/2023 – 01/07/2023	Béganne	1 point toutes les 4 min	/
	04/07/2023 – 05/07/2023		1 point toutes les 8 min	

Les données ont été regroupées par fréquence d'acquisition. Pour chaque nuit et chaque puce, le nombre de positions obtenues, le nombre de positions obtenues par heure, la médiane, le minimum et le maximum du taux de réussite des acquisitions et de la fréquence d'acquisition réelle ont été calculés. Pour chaque fréquence d'acquisition théorique, la médiane de ces indicateurs est présentée ainsi que le minimum et le maximum. Le nombre de positions par nuit correspond au nombre de positions GPS réellement enregistrées au cours d'une nuit. Le nombre de positions par heure permet de comparer la quantité de données obtenues entre des nuits de durée différente. Le taux de réussite correspond à la proportion de positions réellement enregistrées par rapport au nombre de positions théoriquement attendues pour la configuration utilisée :

$$\tau_{réussite} = \frac{\text{nombre de positions réellement enregistrées}}{\text{nombre théorique de positions attendues}}$$

Pour chaque nuit d'enregistrement, le nombre théorique de positions attendues a été calculé à partir de la durée d'enregistrement et de la fréquence d'acquisition :

$$nb_{theo} = \frac{\text{durée de l'enregistrement}}{\text{fréquence d'acquisition théorique}}$$

Enfin, la fréquence d'acquisition réelle entre les positions équivaut au temps écoulé entre deux positions GPS successives réellement enregistrées et permet d'évaluer la régularité des acquisitions.

Une analyse du taux de réussite sur l'influence de la fréquence d'acquisition des positions GPS a été menée, pour savoir si la quantité de données est impactée. Cette analyse a été réalisée sous R (version 4.4.3). Elle reprend donc par nuit le nombre théorique de positions attendues, le nombre de positions réellement enregistrées et le taux de réussite. Plusieurs nuits pouvant avoir été enregistrées par un même GPS, les observations associées à un même appareil ne sont pas totalement indépendantes. Un modèle linéaire mixte a été utilisé afin d'étudier l'influence de la fréquence d'acquisition sur le taux de réussite, avec l'identifiant du GPS comme effet aléatoire grâce à la fonction lmer() du package lme4. Les conditions

d'application du modèle ont été vérifiées à partir de l'analyse graphique des résidus, d'un test de normalité des résidus et des diagnostics de dispersion et de détection des valeurs aberrantes situés dans le package DHARMA.

Les données de télémétrie VHF sont récupérées dans les nombreuses études de comportement des chauves-souris utilisant la technologie VHF. Une recherche dans les publications concernant l'étude du terrain de chasse de toutes les espèces de chauves-souris a été effectuée. Dans chaque étude récupérée, nous avons extrait l'espèce ou les espèces suivie(s), le nombre d'individus équipés et suivis, le nombre de nuit-individu, c'est-à-dire la somme du nombre de nuits de suivi réalisées pour chaque individu, la fréquence théorique de relevé des points, le nombre de points récoltés par nuit et l'effort humain déployé pour le suivi des animaux quand cela est indiqué. Puis nous avons calculé quand cela est possible le nombre de points relevés par heure, l'intervalle réel entre les points et le taux de réussite pour comparer ces chiffres avec les données GPS.

L'effort humain a été comparé en récupérant les informations dans les publications pour la télémétrie VHF et en questionnant BV pour la technologie GPS. Les coûts associés à la technologie GPS et à la télémétrie VHF ont été calculés à partir des données obtenues sur des sites de vente du matériel de tracking pour les chauves-souris.

c. Evaluation de la faisabilité technique du suivi GPS

La technologie GPS étant retenue comme la plus adaptée aux objectifs de l'étude, plusieurs fabricants de dispositifs de suivi ont été contactés afin d'identifier une puce susceptible d'être utilisée sur des chauves-souris de moins de 10 g. Les dispositifs proposés ont été comparés à partir de plusieurs critères définis en fonction des contraintes biologiques, techniques et financières du projet. Le poids constitue le principal critère de sélection : pour respecter la limite de charge fixée à 10 % de la masse corporelle de l'animal, limite récente, la masse maximale recherchée est fixée à 0.85 g (Meierhofer et al. 2025). Les autres critères étudiés sont l'autonomie, avec un objectif minimal de deux à trois nuits de suivi, la présence d'un système de transmission des données à distance de plusieurs dizaines de mètres au minimum, ainsi que le coût du matériel. Ce dernier critère doit permettre d'envisager l'équipement simultané de plusieurs individus dans le cadre d'un suivi à plus grande échelle.

II. Résultats et discussion

a. Une clé de décision orientant le choix méthodologique vers le GPS et la télémétrie VHF

Six « nouvelles technologies » pour l'étude des chauves-souris ont été identifiées au cours des recherches : les balises GPS, la détection acoustique automatisée, le suivi automatisé par imagerie, le metabarcodage, l'analyse d'isotopes stables et l'internet des objets. Ces technologies ont été présentées dans la PARTIE 1 : C. Un résumé du nombre d'études par technologie se trouve en Annexe ii. Les publications pour chaque technologie vont de 17 à 4. Ces recherches bibliographiques ont abouti à la création d'une synthèse bibliographique de 29 pages, accessible à la communauté des chiroptérologues. Cette synthèse prend la forme de fiches synthétiques structurées de la même manière pour chaque technologie et la technique classique de télémétrie VHF : une description de la méthode, puis les paramètres exploités et les métriques associées sont présentés. Les avantages et limites de la technique sont par la suite détaillés. Pour finir, des exemples de programmes sont mis en avant, lorsqu'ils existent. A la fin de cette synthèse, le principe de quelques technologies utilisant l'internet des objets est

présenté. Enfin, cette synthèse a conduit à la création d'une clé de décision, traduisant les résultats de la synthèse en un outil d'aide au choix méthodologique (Figure 7).

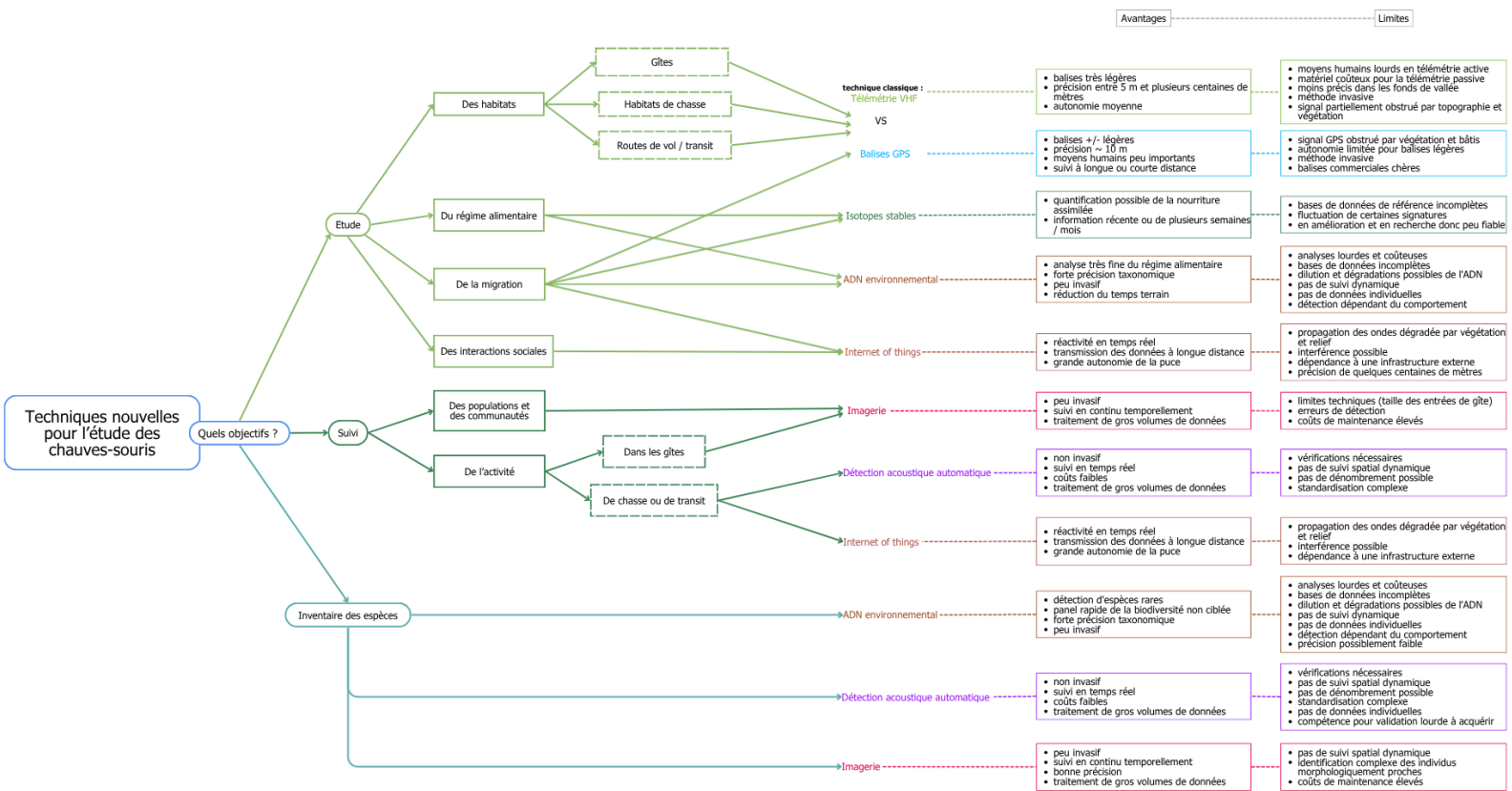


Figure 7 : Clé de décision d'étude des chauves-souris avec les technologies nouvelles

La clé de décision a ensuite été appliquée au cas d'étude du Murin de Daubenton.

Le premier embranchement de la clé permet de distinguer trois finalités : l'étude, le suivi et l'inventaire d'espèces. Dans le cas du projet du GMB, l'objectif est de comprendre les facteurs susceptibles d'expliquer le déclin du Murin de Daubenton. Il ne s'agit ni de réaliser un inventaire des espèces, ni de suivre l'évolution d'une population ou d'une communauté dans le temps. Le projet relève donc de la catégorie « étude ».

Deux hypothèses sont avancées : une diminution de la ressource alimentaire et une fragmentation des habitats. L'objectif n'est pas de caractériser le régime alimentaire, déjà connu, mais d'identifier les zones utilisées pour la chasse, pour caractériser les habitats concernés. Le projet relève donc de l'étude des habitats de chasse et de transit. Ainsi, la clé oriente vers la télémétrie VHF ou la technologie GPS, leurs fiches tirées de la synthèse bibliographique sont présentées en Annexe iii et iv.

L'application de la clé met toutefois en évidence une limite : le comportement de chasse et de transit constitue également un objet d'étude pertinent, sans nécessairement relever d'un suivi. L'ajout d'un embranchement « comportement » dans la catégorie « étude » permettrait donc de mieux prendre en compte ce type de problématique. Par ailleurs, la clé n'ayant pas été testée sur un ensemble d'études aux objectifs variés, ni évaluée par plusieurs utilisateurs, son caractère opérationnel et la pertinence des embranchements proposés restent à confirmer. Des tests sur différents cas d'étude et auprès d'utilisateurs extérieurs permettraient d'identifier d'éventuelles ambiguïtés et d'améliorer sa structure.

b. Le GPS : davantage de données et un effort de terrain réduit par rapport à la télémétrie VHF

Le Tableau 3 résume la qualité et la quantité des données GPS récupérées par BV. Les quatre fréquences d'acquisition n'ont pas été testées uniformément. Le suivi s'est effectué pour 16 nuits réparties en cinq périodes, à l'aide de 13 GPS, qui n'ont pas fonctionné simultanément toutes les nuits. Chaque combinaison entre une puce et une nuit de fonctionnement est comptabilisée comme une session GPS-nuit. Ainsi, plusieurs sessions GPS-nuit peuvent correspondre à une même nuit de suivi sur le terrain. La fréquence d'acquisition de 4 min est la plus représentée, avec sept puces et 20 sessions GPS-nuit, correspondant à dix nuits effectives de suivi.

Tableau 3 : Qualité et quantité des données GPS selon la fréquence d'acquisition

Les valeurs de positions par heure et par nuit, le taux de réussite des acquisitions et la fréquence d'acquisition réelle entre les positions sont présentées sous la forme : médiane [minimum ; maximum]. Le terme « nuit » désigne les sessions GPS-nuit.

Fréquence d'acquisition	4 min	5 min	6 min	8 min
Nombre de puces GPS	7	3	3	2
Nombre de nuits	20	7	5	2
Nombre de positions/nuit	79 [49 ; 85]	31 [28 ; 68]	46 [43 ; 53]	38 [36 ; 40]
Nombre de positions/h	13 [9 ; 15]	7 [7 ; 12]	8 [7 ; 8]	6 [6 ; 6]
Taux de réussite des acquisitions (%)	88 [65 ; 98]	66 [60 ; 100]	82 [80 ; 90]	92.5 [92 ; 93]
Fréquence d'acquisition réelle entre les positions (min)	4 [1 ; 60]	8 [1 ; 24]	6 [5 ; 36]	8 [2 ; 24]

Le nombre médian de positions obtenues par heure diminue globalement avec l'augmentation de la fréquence programmée, passant de 13 positions/h pour une fréquence de 4 min à 6 positions/h pour une fréquence de 8 min. Une tendance similaire est observée pour le nombre de positions obtenues par session GPS-nuit, bien que celui-ci dépende également de la durée des sessions et du nombre de sessions disponibles pour chaque configuration.

Le taux de réussite médian des acquisitions ne montre pas de tendance claire selon la fréquence programmée, avec des médianes comprises entre 66 % et 92.5 %. La configuration à 8 min présente le taux de réussite le plus élevé mais ce résultat doit être interprété avec prudence compte tenu du faible nombre de sessions GPS-nuit disponibles. La variabilité observée pour les configurations à 4 et 5 min est importante, ce qui peut être lié à la diversité des nuits et des individus représentés dans ces groupes.

La fréquence réelle médiane correspond globalement à la fréquence programmée, à l'exception de la configuration à 5 min, pour laquelle elle atteint 8 min. Des intervalles plus importants sont également observés ponctuellement, traduisant la présence d'acquisitions non réalisées.

Pour évaluer l'effet de la fréquence d'acquisition sur le taux de réussite des positions, un modèle linéaire mixte a été réalisé. Les diagnostics ne mettent pas en évidence de problème : absence de surdispersion ($p = 0.536$) et absence de valeurs aberrantes ($p = 0.232$). Enfin, l'analyse graphique des résidus montre une répartition globalement équilibrée autour de zéro. Ainsi, les conditions d'application du modèle sont respectées (Annexe v).

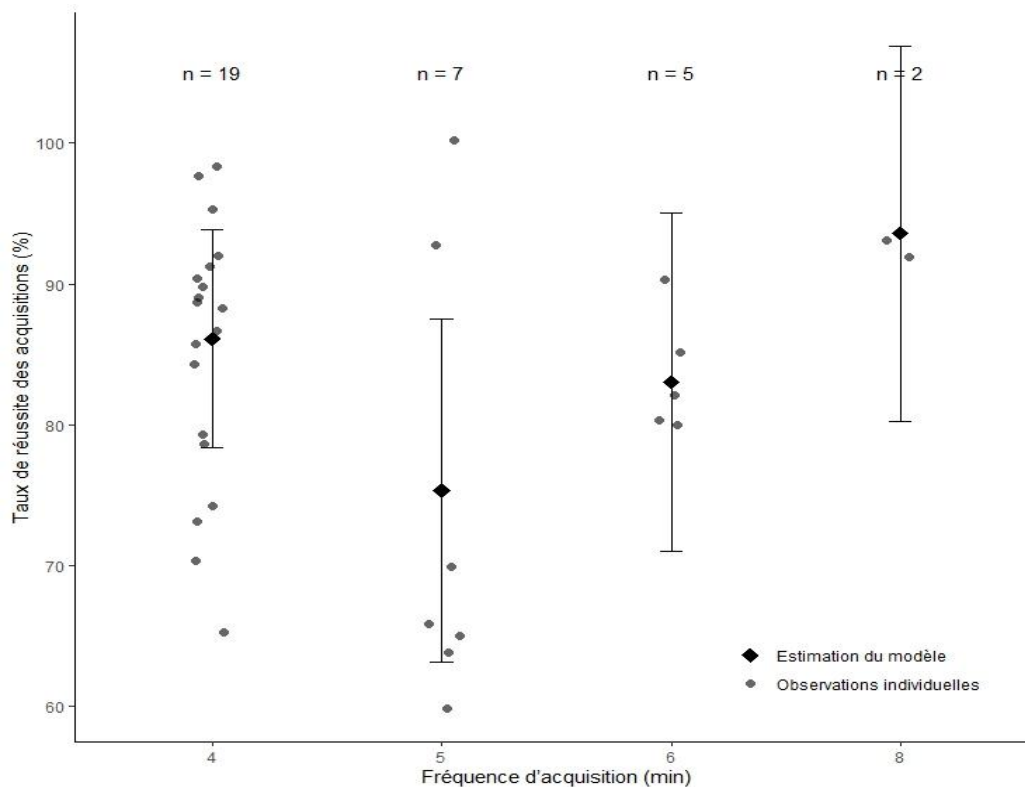


Figure 8 : Taux de réussite selon la fréquence d'acquisition pour les données GPS de BV

Les points représentent les positions réellement enregistrées, les barres verticales les intervalles de confiance à 95 % du modèle et les losanges les médianes du modèle.

Le modèle ne met pas en évidence d'effet significatif de la fréquence d'acquisition sur le taux de réussite des acquisitions ($F = 1.7423$, $p = 0.1961$). Les différences observées entre les médianes ne permettent donc pas de conclure à un effet de la fréquence (Figure 8). Ces résultats doivent toutefois être interprétés avec prudence pour la configuration à 8 min, qui ne repose que sur deux sessions GPS-nuit.

Six études reposant sur la télémétrie VHF ont été retenues, pour replacer les données obtenues par GPS dans le contexte des méthodes de suivi traditionnelles (Annexe vi). Aucune de ces études ne concerne directement le Grand Murin, mais elles incluent différentes espèces de chauve-souris, dont une étude portant sur le Murin de Daubenton. La comparaison doit donc être considérée comme une comparaison méthodologique sur la qualité et la quantité de données récoltées. Ces informations ne sont que peu renseignées dans les études VHF. En effet, le nombre d'individus et la durée du suivi sont généralement renseignés, mais le nombre de localisation, la fréquence d'acquisition théorique et réelle entre les points, et le taux de réussite des acquisitions sont peu rapportées.

Les fréquences d'acquisition rapportées dans les études varient entre 5 et 10 min, intervalle minimal laissant le temps aux opérateurs humains de trouver le signal et de réaliser une prise d'azimuts synchrone, correspondant respectivement à 12 et 6 localisations théoriques par heure, contre 4 à 8 min pour les GPS de l'étude. Les deux méthodes présentent ainsi des résolutions temporelles théoriques comparables, avec toutefois une fréquence d'acquisition théorique plus élevée pour les configurations GPS les plus rapides.

Le nombre de localisations par nuit n'a pu être comparé que pour trois études VHF (Almenar et al. 2009; Barataud et al. 2009; Belli et al. 2026). Il est supérieur dans les configurations GPS : les médianes varient de 31 à 79 positions par nuit avec des GPS contre 5.5 à 26.1 localisations par nuit pour les émetteurs VHF. La médiane la plus élevée observée en VHF,

26.1 localisations par nuit, reste inférieure à la médiane minimale observée avec le GPS (31 positions par session GPS-nuit). Cela est sûrement dû au fait que les positions prises avec la télémétrie VHF sont dépendantes de la capacité pour l'opérateur à suivre la chauve-souris. Cet indicateur doit cependant être interprété avec prudence, compte tenu du faible nombre d'études VHF pour lesquelles il était disponible et des différences de protocoles et d'espèces suivies. Les études VHF ne permettent pas de comparer la fréquence théorique à la fréquence réellement obtenue, n'ayant pas d'informations sur les acquisitions manquées et le nombre d'heures de suivi. Deux études précisent que les fréquences d'acquisition ont été choisies pour limiter l'autocorrélation temporelle et obtenir des observations considérées comme indépendantes. Ainsi, des positions GPS acquises à quelques minutes d'intervalle peuvent être fortement corrélées. L'intérêt d'une acquisition GPS à haute fréquence se trouve dans la possibilité de disposer d'une résolution temporelle fine et de sélectionner *a posteriori* un intervalle d'échantillonnage plus long pour limiter l'autocorrélation. Le GPS offre ainsi une flexibilité de résolution temporelle qui n'est pas nécessairement disponible quand le suivi VHF est directement conçu autour d'une fréquence d'acquisition fixée à 5 ou 10 min.

La précision spatiale constitue un élément important de comparaison. La précision VHF varie fortement selon les conditions de suivi et le terrain : elle peut atteindre quelques mètres dans des conditions favorables, mais se dégrader jusqu'à plusieurs kilomètres. Ces conditions optimales, notamment les milieux dégagés, sont peu représentées en Bretagne. La précision des puces GPS est estimée à environ 15 m. Le GPS fournit une précision plus homogène et suffisante pour les objectifs de suivi du Murin de Daubenton.

Le coût des dispositifs constitue également un critère de comparaison. Un émetteur VHF coûte 190.80 € TTC selon le tarif consulté chez Wildcare en août 2026. Le prix d'une puce GPS utilisée dans cette étude est de 1 500 € TTC, la puce pouvant être réutilisée 2 ou 3 fois, si elle est retrouvée. Cependant, cette comparaison ne peut se limiter au coût du dispositif. Les études VHF utilisées mobilisent entre deux et six personnes pour le suivi d'un individu au cours d'une nuit, soit pour une durée estimée à huit heures, un effort compris entre 16 et 48 heures-personnes par individu. A l'inverse dans cette étude, le suivi GPS a nécessité environ deux minutes de travail direct par chauve-souris, auxquelles s'ajoutait un temps déplacement estimé à 1h30 par session pour récupérer les données au gîte. Ce temps étant mutualisé entre un et cinq individus équipés simultanément, le temps-personne estimé variait ainsi d'environ 20 à 90 minutes par animal. Le coût global des deux méthodes dépend donc également fortement du temps de travail, qui nécessite au moins dix fois moins de temps par suivi GPS.

Pour conclure, le GPS a permis d'obtenir un nombre de localisations par nuit plus élevé que la télémétrie VHF, avec une résolution temporelle comparable ou supérieure. De plus, il permet de quantifier facilement le taux de réussite et les fréquences d'acquisitions réelles entre les positions, informations rarement disponibles dans les études VHF. La précision spatiale peut être du même ordre de grandeur mais celle-ci dépend fortement du terrain dans les études VHF. La précision d'environ 15 m obtenue avec le GPS apparaît suffisante pour les objectifs de l'étude. Le choix du GPS repose ainsi sur un compromis entre quantité de données, résolution temporelle, précision spatiale et effort de terrain. Malgré un coût matériel plus important et la nécessité d'un contrôle régulier de relevé des données sur les récepteurs, cette méthode permet d'obtenir un suivi moins dépendant de la présence continue d'opérateurs et une quantité de données plus importante. Le GPS apparaît donc comme la méthode la plus adaptée aux objectifs du projet, sous réserve de disposer d'un matériel suffisamment léger pour être utilisé sur l'espèce cible.

c. Le développement d'une puce GPS sur mesure comme alternative aux solutions commerciales

Parmi 10 fournisseurs contactés entre le 25 mars et le 1^{er} avril, huit ont répondu aux questions. Les dispositifs proposés présentent des masses très variables, allant de 0.75 g à plus de 140 g (Tableau 4). La plupart des dispositifs commercialisés dépassent la masse compatible avec l'équipement de petites chauves-souris de moins de 10 g.

Tableau 4 : Fournisseurs contactés et caractéristiques de leur produit le plus léger

Marque	Produit intéressant	Poids	Taille (L x l x h)	Antenne	Prix
Pathtrack	picoFix GPS	0.75 g	18 x 11 x 3 mm	5 cm	3 693 € pour 5 puces
<i>Lotek</i>	PinPoint 10 Store-on-Board	1 g	21 x 35 x 5 mm	5 cm	//
<i>Technosmart</i>	Gipsy 6	1.5 g	11 x 6 x 4 mm	/	//
<i>Arribada</i>	//	> 5 g	//		//
<i>Advanced Telemetry Systems</i>	ATS G5 series Iridium	140 g	149 x 50 x 29 mm		//
<i>e-obs</i>	Bird Solar 10/15	10.7 g	47 x 22 x 11 mm		//
<i>Plecotus Solutions</i>	Fabricants de télémétrie VHF uniquement				
<i>Telemetry Solutions</i>	Nano GPS Backpacks	5 g	30 x 10 x 13 mm		//
<i>Ecotone telemetry</i>	Logger JAY XS	3 g	21 x 13 x 10 mm		//
<i>Telenax</i>	TGB	> 70 g	//		//

Un seul produit, le picoFix de Pathtrack, présente une masse inférieure à 0.85 g. Le PinPoint 10 de Lotek, avec une masse annoncée de 1 g, se rapproche de cette contrainte mais dépasse néanmoins la masse maximale définie pour les individus ciblés. La puce picoFix apparaît donc comme la seule solution commerciale répondant au critère de masse. Cependant, son coût constitue une contrainte importante pour le développement du projet. L'achat de cinq puces, comprenant le matériel de transmission et les frais de livraison, représente un coût total de 3 963 € TTC, soit environ 739 € par puce. Le détail du devis est présenté en Annexe vii. A titre indicatif, l'équipement de dix chauves-souris représenterait ainsi un coût de 7 386 €, sans prendre en compte d'éventuels coûts supplémentaires liés au remplacement des dispositifs, aux pertes et aux frais de livraison. Par ailleurs, la transmission des données ne peut pas s'effectuer à distance : leur récupération nécessite de retrouver et recapturer la chauve-souris pour récupérer physiquement la puce. Cette contrainte rend cette solution difficilement compatible avec le protocole expérimental et ne permet pas d'envisager son utilisation.

Face à ces contraintes, la possibilité de développer les puces en interne a été envisagée avec l'aide d'un membre du GMB compétent en électronique. Il estime qu'une éventuelle commercialisation pourrait se situer entre 500 et 800 € par unité, selon les caractéristiques du dispositif et les coûts de fabrication. Le prix des récepteurs pour récupérer les données GPS des chauves-souris sans avoir à récupérer la puce pourrait quant à lui varier entre 800 et 2 000 € selon leur complexité. Ces montants constituent toutefois des estimations et ne correspondent pas à des prix commerciaux établis. Sur cette base, l'équipement de dix chauves-souris représenterait un coût estimé compris entre 5 000 et 8 000 € pour les puces, auquel s'ajouterait le coût du ou des récepteurs. Bien que cette solution ne constitue pas nécessairement une alternative moins coûteuse à court terme, son développement en interne permet de s'affranchir des contraintes liées à la disponibilité et d'adapter les caractéristiques des puces aux contraintes spécifiques du suivi des petites chauves-souris.

Pour conclure, cette partie a permis d'identifier une approche adaptée à l'étude des déplacements, des comportements de chasse et des habitats utilisés par le Murin de Daubenton. Ce choix s'est construit en plusieurs étapes et repose à la fois sur les caractéristiques des

données obtenues et sur les contraintes biologiques de l'espèce, techniques, humaines et financières associées au projet.

Plusieurs technologies peuvent être mobilisées pour l'étude des chauves-souris mais leur pertinence varie selon les objectifs poursuivis. Leur recensement et leur comparaison ont conduit à la réalisation d'une synthèse bibliographique sous forme de fiches, accompagnée d'une clé de décision, permettant de traduire ces connaissances en un outil d'aide au choix méthodologique. Cette clé présente encore des limites et mériterait d'être testée sur différents cas d'étude et auprès de plusieurs utilisateurs pour améliorer son utilisation. Son application au projet du GMB a permis d'identifier la technologie GPS et la télémétrie VHF traditionnelle comme les deux méthodes les plus pertinentes.

La comparaison de ces deux méthodes met en évidence plusieurs avantages du GPS. Celui-ci permet d'obtenir une quantité de données plus importante, avec une résolution temporelle comparable, voire supérieure à celle observée dans les études reposant sur la télémétrie VHF. Il permet également de quantifier directement le taux de réussite des acquisitions. Sa précision spatiale apparaît globalement meilleure et plus homogène. Enfin, son utilisation réduit l'effort de terrain, le suivi ne nécessitant pas la présence en continue d'opérateurs. Ainsi, le GPS apparaît plus adapté dans le cadre de cette étude. Cependant, la comparaison repose sur un nombre restreint d'informations disponibles dans les études utilisant la télémétrie VHF et sur des données issues de différentes espèces de chauves-souris. Le choix d'une technique reste donc étroitement lié à la question scientifique étudiée et aux contraintes propres à chaque projet. L'identification du GPS comme méthode retenue soulève une contrainte majeure pour son application au Murin de Daubenton : la masse des dispositifs disponibles. Peu de solutions commerciales respectent la limite définie pour l'équipement de cette espèce et le seul dispositif identifié présente un coût élevé et une contrainte sur la récupération des données. Dans ce contexte, le développement d'une puce au sein du GMB apparaît comme la piste la plus intéressante, notamment pour adapter les caractéristiques du dispositif aux contraintes spécifiques du suivi de petites chauves-souris.

Ainsi, ce travail souligne la nécessité d'utiliser des puces GPS fabriquées par un membre du GMB. Leur utilisation sur le Murin de Daubenton reste toutefois conditionnée à la réalisation d'essais permettant d'évaluer leur masse, leur autonomie, la qualité des localisations obtenues et les modalités de récupération des données.

PARTIE 3 : Du développement, à l'évaluation d'un prototype de GPS adapté au suivi du Murin de Daubenton

L'évaluation des performances des puces GPS miniaturisées a été menée selon deux approches complémentaires. Une première approche en conditions réelles a consisté à équiper des murins de Daubenton afin d'évaluer la faisabilité du suivi et d'examiner les informations comportementales pouvant être obtenues à partir des données GPS. Cependant, le faible nombre de données exploitables obtenu lors de cette expérimentation ne permettait pas d'évaluer certaines performances. Des tests supplémentaires ont donc été réalisés à l'aide de deux puces reposant sur le même système, mais équipées de batteries de capacité différente. Ces essais ont permis d'évaluer les performances d'acquisition, la précision de localisation, l'influence de la géométrie des satellites (DOP) sur cette précision, ainsi que la capacité des positions GPS à restituer les déplacements et à caractériser les phases d'activité.

I. Méthodologie

a. Evaluation en conditions réelles sur le Murin de Daubenton

i. Cadre réglementaire et habilitation à la capture

Les chauves-souris étant des espèces protégées, leur capture, leur manipulation et la pose de dispositifs de suivi nécessitent une dérogation réglementaire. La plateforme CACCHI, coordonnée par le Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN) bénéficie d'une dérogation, renouvelable tous les cinq ans, permettant d'encadrer et d'harmoniser les demandes à des fins scientifiques et de conservation (Team Chiro CESCO). Le projet du GMB a donc dû faire l'objet d'une demande auprès du MNHN (Annexe viii). La capture de Chiroptères est également soumise à une habilitation spécifique, obtenue à l'issue d'une formation théorique et pratique suivie d'une validation des compétences (Figure 9). Cette formation vise à garantir la maîtrise des pratiques de capture, leur homogénéisation et celle des données à l'échelle nationale. La plateforme CACCHI assure par ailleurs la centralisation et la valorisation des données ainsi qu'une veille scientifique sur les méthodes et connaissances relatives aux Chiroptères.

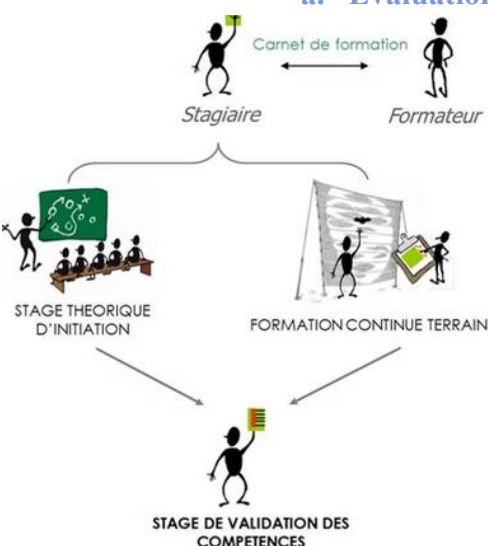


Figure 9 : Les étapes de la formation à la capture

Source : Plateforme CACCHI

ii. Capture et équipement des chauves-souris

La capture s'est déroulée le 30 juin 2026 entre 22h20 et 23h20 au moulin de Milin Kerhe (22), en posant un filet japonais (monofilament 5x5m) installé juste à la sortie de leur gîte. Notre objectif était d'équiper deux femelles allaitantes, de longueur d'avant-bras supérieur à 37.5 mm et d'un poids supérieur à 8 g. Les animaux devant pouvoir porter la charge du dispositif, la puce ne doit pas dépasser 10 % de leur masse corporelle (Meierhofer et al. 2025). Nous avons choisi d'équiper des femelles allaitantes, celles-ci étant susceptibles de revenir la journée au gîte pour nourrir leur petit. Ce comportement facilite la récupération des données. Les puces GPS pesaient 0.75 g et 0.82 g, et ont été fabriquées par un membre du GMB. Elles sont constituées d'un circuit imprimé, d'un module GNSS (u-blox, MIA-M10Q, 0.07 g), d'un système de transmission des données et d'une batterie LiPo (9 mAh, 0.35 g). Le tout est protégé par du vernis. Le module est capable d'utiliser plusieurs constellations GNSS, mais seule la constellation GPS est activée dans le cadre de cette étude. Un dispositif d'aide au positionnement est implémenté dans les puces pour leur permettre de réduire le temps nécessaire à acquérir la première position (u-blox 2025).

iii. Acquisition et préparation des données GPS

Dans le cadre de cette étude, la puce enregistre une séquence d'acquisition constituée de deux points séparés d'une seconde toutes les 5 ou 10 minutes (Figure 10). L'acquisition commence à 22h50 ou 22h55 et se termine à 5h30. Les données sont transmises à distance à un récepteur, et récupérées quotidiennement au niveau du gîte. Cette récupération permet également de vérifier visuellement la présence et l'état des individus équipés.

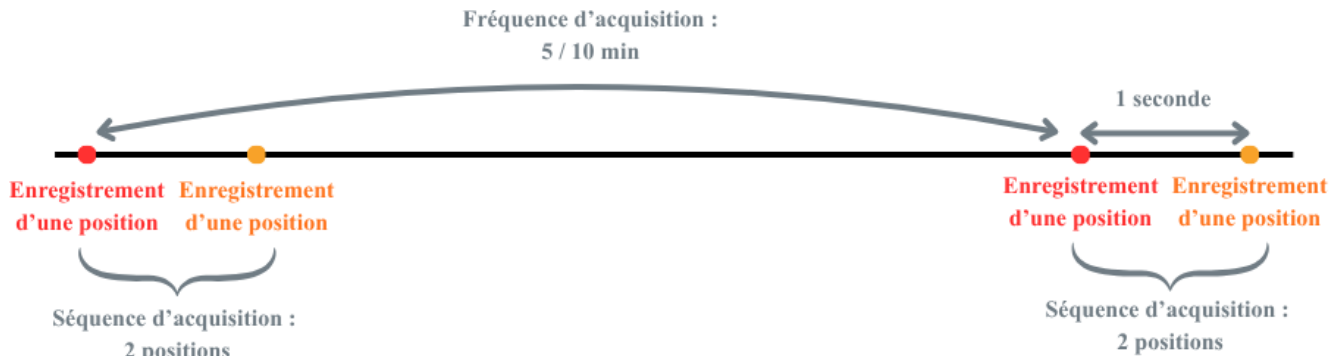


Figure 10 : Schéma de deux séquences d'acquisition de données

Les données transmises comprennent l'identifiant de la puce GPS, la date, l'heure UTC (2 heures de moins que l'heure française), la longitude, la latitude, l'altitude, le nombre de satellites, le DOP et le temps de premier fix. Le DOP (Dilution Of Precision) correspond à un indicateur de la géométrie des satellites utilisés pour déterminer la position. Une valeur faible indique une géométrie favorable, donc une meilleure précision théorique du positionnement. Le temps de premier fix équivaut au temps que met la puce à récupérer sa position géographique.

iv. Analyse des données GPS

Le taux de réussite des enregistrements a été calculé de la même manière que précédemment.

Une analyse exploratoire des déplacements a été effectuée en calculant la distance totale parcourue par l'animal. Puis à partir des données récoltées, la vitesse a été calculée entre deux séquences d'acquisition successives, à partir de la distance géodésique (distance à vol d'oiseau) séparant les positions et du temps écoulé entre celles-ci. La vitesse calculée a été associée à la première séquence d'acquisition et représente la vitesse moyenne de déplacement entre cette séquence et la suivante.

Les phases d'activité ont été caractérisées à partir de la vitesse des déplacements et du contexte spatial des positions. Les phases de transit correspondent aux déplacements relativement rapides, tandis que les phases de chasse sont identifiées par des déplacements répétés dans un périmètre plus réduit à proximité d'un cours d'eau. Les phases de repos sont définies dans cette étude par une localisation au niveau de son gîte.

Par ailleurs, une analyse exploratoire de la hauteur de vol a été réalisée afin d'évaluer la possibilité de détecter des variations verticales à partir des données GPS. Ainsi la hauteur de vol théorique a été estimée par différence entre l'altitude donnée par le GPS et l'altitude du Modèle Numérique de Terrain de l'IGN (MNT ; pas de 1m, 2022), en supposant que l'altitude du MNT représente l'altitude du sol.

b. Tests complémentaires sur les performances des puces GPS miniaturisées

i. Acquisition des données complémentaires

N'ayant récolté que peu de données sur les murins de Daubenton, nous avons décidé de réaliser des tests complémentaires pour analyser les performances des puces GPS miniaturisées.

Pour cela, deux puces GPS reposant sur le même système de positionnement ont été utilisées. Elles diffèrent cependant par leur capacité de batterie : la puce 921 possède une batterie LiPo de 9 mAh identique à celle posée sur les murins et la puce 5019 possède une batterie LiPo de 50 mAh permettant une autonomie plus importante.

Les positions ont été relevés lors de trajets en voiture (18 et 19 juillet) ou en bateau (du 21 au 25 juillet). Les données récoltées sont les mêmes que précédemment (date, heure UTC, longitude, latitude, altitude, nombre de satellite, DOP et temps de premier fix). Les puces étaient configurées pour enregistrer une séquence d'acquisition de deux positions espacées d'une seconde toutes les 10 ou 20 minutes selon les sessions.

ii. Evaluation de la performance d'acquisition des puces

Plusieurs indicateurs ont été calculés pour chaque puce et chaque session permettant de caractériser la performance d'acquisition des puces GPS. Chaque séquence d'acquisition comprenant deux positions séparées d'une seconde, les indicateurs ont été calculés uniquement avec le premier point de chaque séquence. Le temps de fix du second point étant nul, les indicateurs sur le temps pour trouver la position auraient diminué artificiellement :

- Nombre total de points : nombre de positions GPS obtenues lors de la session ;
- Réussite des acquisitions (%), déjà présentée dans la PARTIE 2 ;
- Proportion de fix longs (%) : pourcentage de points où le temps pour trouver la position dépasse 30 s.
- Temps de fix moyen : temps moyen nécessaire à l'obtention d'une position GPS ;

iii. Influence de la miniaturisation sur l'erreur de localisation

La distance entre la position GPS et la trajectoire de référence a été déterminée sous QGIS en comparant les positions enregistrées et la trajectoire empruntée, représentée par le réseau routier ou le canal figurant sur le fond de carte OpenStreetMap. Pour chaque position GPS, la distance la plus courte entre le point et la route ou le canal a été mesurée à l'aide de l'outil « Mesurer une distance ». Cette distance a été retenue comme indicateur de l'erreur de localisation. Ces erreurs ont ensuite été arrondies au multiple de 5 m le plus proche.

Un éventuel décalage entre ce fond de carte et la position réelle des routes ou du canal pourrait influencer les distances mesurées. Toutefois, l'ensemble des mesures ayant été réalisée à partir du même référentiel cartographique, ce biais potentiel est identique pour les deux puces GPS. La normalité de la distribution des erreurs de localisation a été évaluée à l'aide du test de Shapiro-Wilk. Lorsque les distributions ne suivaient pas une loi normale, des tests non paramétriques ont été privilégiés et les données ont été décrites par leur médiane et leur écart interquartile (IQR). Les analyses statistiques ont été réalisées sous R (version 4.4.3).

iv. Influence de la qualité géométrique des satellites sur l'erreur de localisation

Pour évaluer l'influence de la géométrie des satellites sur l'erreur de localisation, les valeurs de DOP ont été regroupées en quatre classes (Baby, 2025) : DOP entre 0 et 2 (géométrie excellente), entre 2 et 5 (bonne géométrie), entre 5 et 10 (géométrie modérée) et supérieur ou égal à 10 (très mauvaise géométrie). Les distributions des erreurs de localisation ont ensuite été comparées entre ces 4 classes avec un test de Kruskal-Wallis. Quand ce test a mis en évidence une différence significative, des comparaisons post hoc ont été réalisées par des tests de Wilcoxon par paires avec correction de Holm afin de contrôler le risque d'erreur lié aux comparaisons multiples. Le seuil de significativité a été fixé à 0.05.

v. Evaluation de la restitution des déplacements et des vitesses

Pour estimer la fidélité de la restitution des déplacements, nous avons travaillé sur les données acquises sur le bateau, c'est-à-dire du 21 au 25 juillet 2026.

Pour chaque session, le parcours réellement emprunté a été retracé manuellement dans QGIS à l'aide du fond de carte OpenStreetMap. La distance obtenue à partir de ce tracé est considérée comme la distance de référence estimée du trajet. Elle ne correspond pas à une mesure exacte de la distance réellement parcourue, mais constitue une approximation du trajet suivi. Pour évaluer si les distances enregistrées par les puces GPS permettent de restituer de manière cohérente les distances parcourues, les distances calculées à partir des positions GPS ont été comparées aux distances de référence.

La distance GPS correspond à la somme des distances géodésiques calculées entre deux positions GPS successives d'une même puce. Cette distance correspond donc à la distance à vol d'oiseau entre les positions successives et peut être inférieure à la distance réellement parcourue lorsque le trajet entre ces deux positions n'est pas rectiligne.

Les distances GPS et de référence ont été comparées selon la puce et l'intervalle entre les acquisitions (10 ou 20 min). La différence entre les deux distances, ainsi que la proportion de sous-estimation de la distance GPS par rapport à la distance de référence ont été calculées :

$$\text{Sous-estimation (\%)} = \frac{\text{Différence}}{\text{Distance de référence}} * 100$$

Cette comparaison permet d'évaluer l'influence de l'intervalle sur la capacité des puces à restituer la distance du trajet de référence.

Les vitesses ont été calculées à partir de la distance géodésique entre deux positions GPS successives d'une même puce, divisée par le temps écoulé entre ces deux acquisitions. Les distances ont été calculées à partir des coordonnées géographiques des positions enregistrées : elles correspondent donc à la distance la plus courte entre deux positions et non à la distance réellement parcourue. Chaque vitesse a été associée au premier point du couple de positions utilisé pour son calcul. Elle représente ainsi le déplacement entre cette position et la position suivante. Le calcul initial de la vitesse a été réalisé entre toutes les positions successives. Seules les vitesses entre les séquences d'acquisitions ont été retenues, pour caractériser les déplacements sur les intervalles de temps correspondant à la fréquence d'acquisition (5 ou 10 minutes).

vi. Détermination d'un seuil de vitesse pour l'identification des phases d'activité

Pour chaque intervalle entre deux séquences successives, le déplacement de la puce (en mouvement ou immobile) a été déterminé visuellement à partir de la trajectoire et des heures de navigation. Cette classification a été considérée comme la référence. Différents seuils de vitesse (pas de 0.05 km/h entre 0 et 5 km/h) ont ensuite été testés afin de classer automatiquement les intervalles comme correspondant à un déplacement (vitesse supérieure au seuil) ou à une immobilité (vitesse inférieure ou égale au seuil). Les classifications ont ensuite été comparées à la référence établie en utilisant une matrice de confusion entre le mouvement prédit et le mouvement réel (Annexe ix).

Tableau 5 : Principe de la matrice de confusion

Prédiction \ Réel	Mobile	Immobile
	Mobile	Immobile
Mobile	Vrai positif (VP)	Faux négatif (FN)
Immobile	Faux positif (FP)	Vrai négatif (VN)

Dans cette matrice (Tableau 5), un vrai positif (VP) correspond à un intervalle réellement mobile correctement détecté par le programme, un faux positif (FP) correspond à un intervalle immobile détecté comme mobile, un faux négatif à un intervalle détecté comme immobile mais étant mobile et un vrai négatif un intervalle immobile et détecté comme tel.

Avec les différentes valeurs, nous avons calculé trois indicateurs :

- **Pourcentage de bonnes classifications (B)** : proportion de l'ensemble des intervalles correctement classés comme en mouvement ou immobile.

$$B = \frac{VN + VP}{total}$$

- **Sensibilité (Se)** : capacité du seuil à détecter les phases de déplacement, correspondant à la proportion des intervalles réellement mobiles correctement identifiés.

$$Se = \frac{VP}{VP + FN}$$

- **Spécificité (Sp)** : capacité à détecter les phases d'immobilité, correspondant à la proportion des intervalles réellement immobiles correctement détectés.

$$Sp = \frac{VN}{VN + FP}$$

Nous avons ensuite tracé deux graphiques représentant les performances de classification en fonction du seuil de vitesse afin d'identifier le seuil le plus performant pour distinguer les phases de mouvement des phases d'immobilité. Ce seuil a pour but de devenir un critère pour l'analyse du comportement des chauves-souris.

II. Résultats et discussion

a. Deux Murins de Daubenton équipés, mais une seule puce ayant fourni des données exploitables

i. Un trajet vers une zone de chasse en trois phases distinctes

Six chauves-souris ont été capturées lors de la soirée de capture, dont cinq Murins de Daubenton et une Pipistrelle commune. Deux murins de Daubenton, pesant 7.8 et 7.6 g, ont été équipés de puces GPS (Tableau 6).

Tableau 6 : Caractéristiques des individus capturés et des puces GPS utilisées

Poids de la chauve-souris	Avant-bras de la chauve-souris	Identifiant de la puce GPS	Poids de la puce GPS	Configuration de la puce GPS	Période étudiée
7.8 g	38.7 mm	917	0.82 g	1 pt / 10 min	Lactation
7.6 g	38.5 mm	918	0.75 g	1 pt / 5 min	Lactation

Seules les données de la puce 918 ont été récupérées. La puce 917 a été retrouvée grignotée et sa batterie gonflée lors de son retrait de l'animal le 1^{er} juillet. La batterie de la puce 918 n'a fonctionné qu'une seule nuit. Au total, 101 localisations ont été enregistrées entre 22h50 et 5h12, soit pendant 382 min. Le taux de réussite obtenu (66 %) est comparable à la médiane observée chez Bretagne Vivante pour la même configuration. Ce résultat ne suggère pas de diminution évidente du taux de réussite, mais il repose sur une seule nuit d'acquisition.

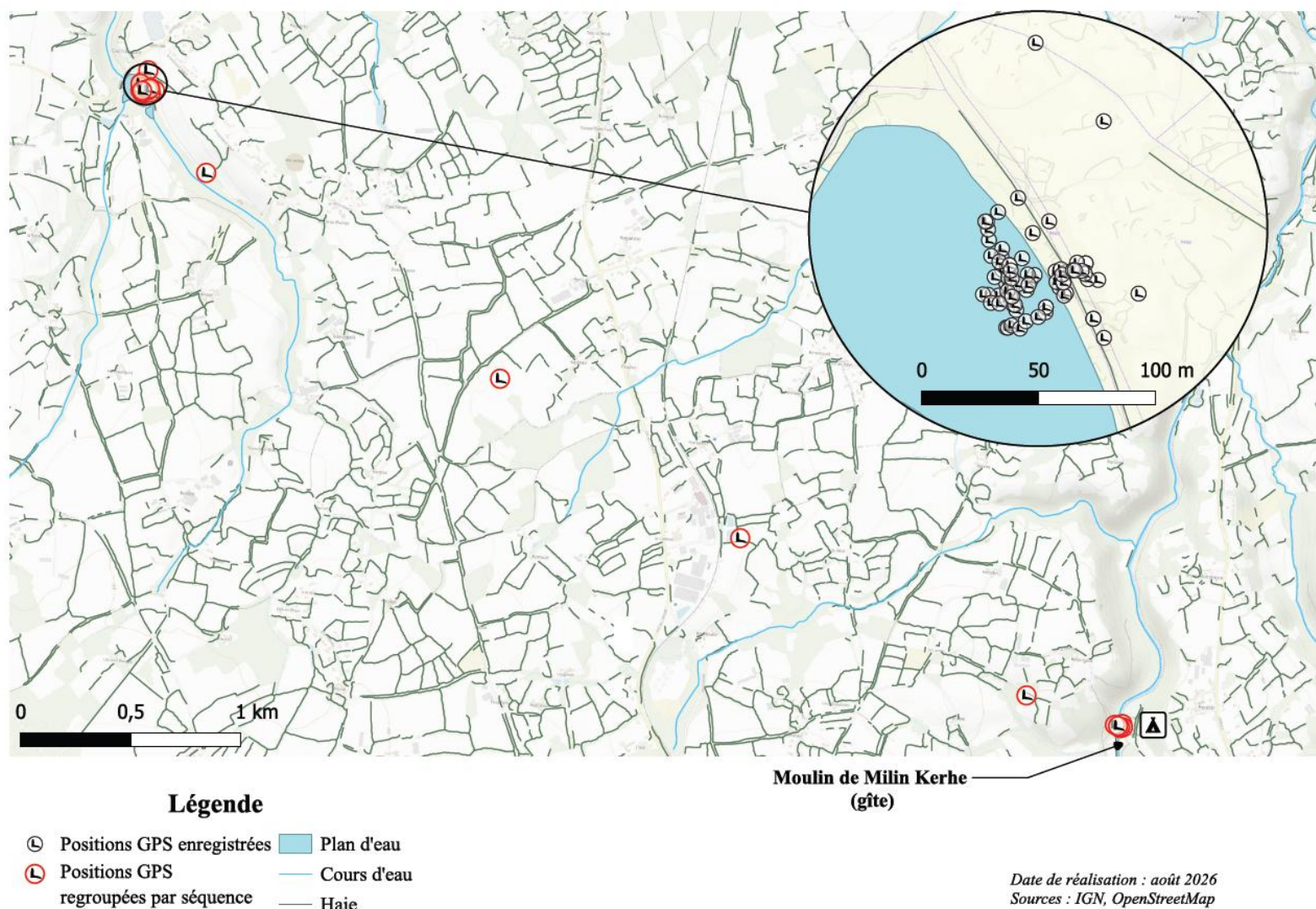


Figure 11 : Trajet du Murin de Daubenton équipé dans la nuit du 30 juin 2026

Durant la nuit de fonctionnement, la chauve-souris se déplace vers le nord-ouest de son gîte et rejoint un étang privé entouré d'arbres, situé à plus de 5 km du gîte (Figure 11). Les positions enregistrées pendant le transit se situent au niveau de haies ou de fossés. La trajectoire peut être découpée en trois phases : une première phase, en début de nuit, est caractérisée par un regroupement des positions à proximité du gîte, la chauve-souris ayant été relâchée à 23h17. Une deuxième phase entre 23h32 et 23h47, est constituée de quatre séquences d'acquisition plus espacées, correspondant à un déplacement rapide vers le nord-ouest. Les vitesses calculées au cours de cette phase varient entre 5 km/h et 18 km/h. Enfin une troisième phase se distingue par un regroupement de positions autour de l'étang privé, à proximité des arbres, associé à des vitesses inférieures à 1.5 km/h.

La concentration de positions autour de l'étang est compatible avec une phase d'activité de chasse de cette espèce. En effet, le Murin de Daubenton chasse principalement les insectes aquatiques et peut effectuer des déplacements courts et répétés à la surface de l'eau. Cependant, avec une fréquence d'acquisition de cinq minutes, les changements de direction à une échelle temporelle plus fine ne peuvent pas être restitués. Une activité de chasse peut ainsi apparaître sous la forme d'un regroupement de points, sans qu'il soit possible de distinguer précisément les phases de déplacement, d'immobilité ou de chasse. Si l'ensemble des positions enregistrées à proximité de l'étang est considéré comme correspondant à un comportement de chasse, celle-ci représenterait 84 % de la nuit enregistrée. Ces estimations doivent toutefois être considérées avec prudence, car le trajet de retour au gîte n'a pas été enregistré. En effet, la puce est passée

en veille à 5h30 et aucune position n'a été enregistrée lors du retour de la chauve-souris vers son gîte. Le trajet de retour et sa durée n'ont donc pas pu être déterminés.

Un résumé des principaux résultats du suivi GPS est présenté dans le Tableau 7.

Tableau 7 : Synthèse des principaux résultats du suivi GPS du Murin de Daubenton

Indicateur	Résultat
<i>Durée d'enregistrement</i>	382 min
<i>Nombre de positions</i>	101
<i>Taux de réussite des acquisitions</i>	66 %
<i>Distance cumulée entre les positions GPS</i>	6.4 km
<i>Distance gîte – zone de chasse</i>	5.3 km
<i>Vitesse de transit</i>	5-18 km/h
<i>Vitesse dans la zone de chasse</i>	< 1.5 km/h
<i>Part de la période enregistrée à proximité du gîte</i>	7 %
<i>Part de la période enregistrée interprétée comme transit</i>	10 %
<i>Part de la période enregistrée interprétée comme chasse</i>	84 %

ii. Des données d'altitude incertaines

La hauteur de vol estimée est en moyenne d'environ 10 mètres, mais présente une forte variabilité, avec des valeurs atteignant 389 m (Figure 12).

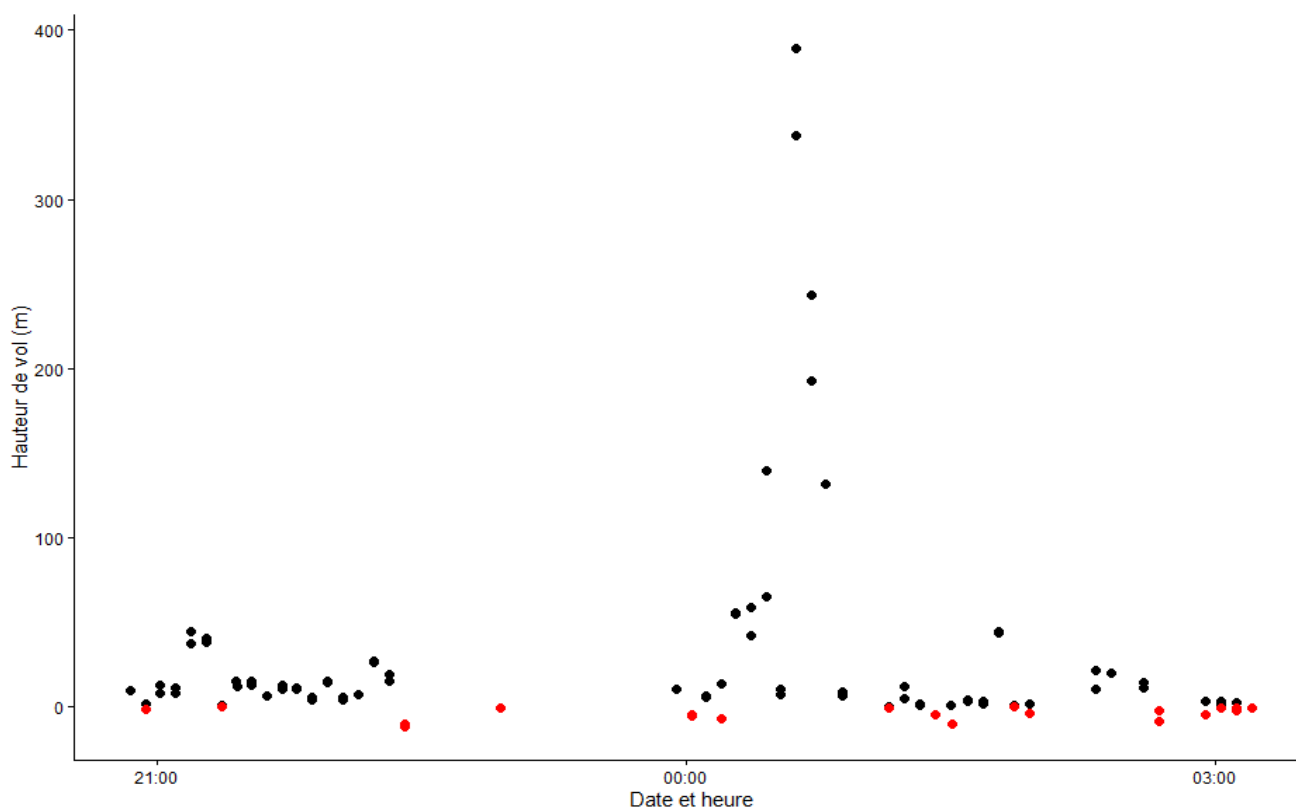


Figure 12 : Hauteur de vol de la chauve-souris

Les points rouges correspondent aux positions dont la hauteur de vol est négative.

Parmi les 101 positions étudiées, 23 présentent une hauteur de vol négative allant jusqu'à - 12 m, correspondant à une altitude GPS inférieure à celle du MNT. Ces valeurs traduisent une incohérence entre l'altitude fournie par le GPS et l'altitude du sol estimée par le MNT et suggèrent une incertitude dans l'estimation de l'altitude. Une forte variabilité est également observée au sein de mêmes séquences d'acquisition. Entre 0h16 et 0h47, les hauteurs de vol sont plus élevées et présentent une différence maximale de 75 m entre deux positions d'une même séquence. Une telle variation sur une période d'une seconde est difficilement compatible

avec un déplacement réel de l'animal suggérant une variabilité importante de l'altitude à très court terme.

Les valeurs extrêmes ne semblent pas être liées directement à la qualité géométrique des satellites. Les positions présentant une différence de hauteur très élevée au sein d'une même séquence sont associées à des valeurs de DOP comprises entre 1.04 et 1.40, indiquant une géométrie satellitaire favorable. Par ailleurs, les positions avec une hauteur de vol négative sont associées à des valeurs de DOP comprises entre 1.18 et 6.24. Ainsi, si certaines estimations négatives peuvent être associées à une géométrie moins favorable, des incohérences apparaissent également lorsque le DOP est faible. Cet indicateur ne semble donc pas être le seul facteur influençant la variabilité des estimations d'altitude.

Ainsi, dans les conditions de cette étude, les données d'altitude apparaissent peu fiables pour estimer la hauteur de vol des chauves-souris. L'utilisation de ces données pour caractériser les changements d'altitude de l'animal est à considérer avec prudence.

b. Des tests complémentaires pour évaluer les performances des puces miniaturisées

i. Aucune différence démontrée entre les puces dans les performances d'acquisition

Les tests complémentaires ont permis de récupérer 369 positions sur sept jours avec deux puces GPS. Un résumé des configurations et de la durée des sessions est présenté dans le Tableau 8.

Tableau 8 : Synthèse des indicateurs de performance des puces utilisés et de la durée des sessions

**Le pourcentage de réussites dépassant 100 % correspond à des sessions où il y a plus de deux points dans les séquences d'acquisition à cause d'un comportement anormal de la puce*

Session		18-juil	19-juil	21-juil	22-juil	23-juil	24-juil	25-juil
Durée (h)		5	5	3	4	4	4	4
Fréquence d'acquisition (min)		10	20	10	10	20	20	20
921	Réussite des points (%)	70	57	108*	90	71	75	67
	Proportion de fix longs (%)	23	11	16	10	0	22	0
	Tps de fix moy (s)	36,00	19,67	20,42	13,67	10,75	36,89	14,67
5019	Réussite des points (%)	58	13	75	96	108*	92	71
	Proportion de fix longs (%)	35	50	15	5	8	1	13
	Tps de fix moy (s)	40,71	96,50	47,23	13,68	12,25	16,60	24,88

Les performances d'acquisition des puces GPS ont été comparées à partir du temps de fix moyen et de la proportion de fix longs (Figure 13).

Le temps de fix moyen de la puce 5019 est supérieur à celui de la puce 921 lors de six sessions sur sept. La seule exception est la session du 24 juillet, au cours de laquelle le temps de fix moyen de la puce 921 est supérieur de 10 secondes à celui de la puce 5019. Cependant, aucune différence significative n'a été mise en évidence entre les deux puces (test de Wilcoxon pour données appariées : $p = 0.1508$).

La proportion de fix longs varie davantage entre les sessions. Elle est supérieure chez la puce 5019 lors de quatre sessions sur sept et chez la puce 921 au cours des trois autres. Aucune différence significative n'a été montrée entre les deux puces pour cet indicateur (test de Wilcoxon pour données appariées : $p = 0.2719$). Les différences observées ne semblent, par ailleurs, pas associées à la fréquence d'acquisition des positions.

Ainsi, aucune différence significative n'a été mise en évidence entre les deux puces pour ces indicateurs, même si la fabrication artisanale aurait pu engendrer des variations de qualité. Dans ces conditions expérimentales, leurs performances d'acquisition apparaissent comparables.

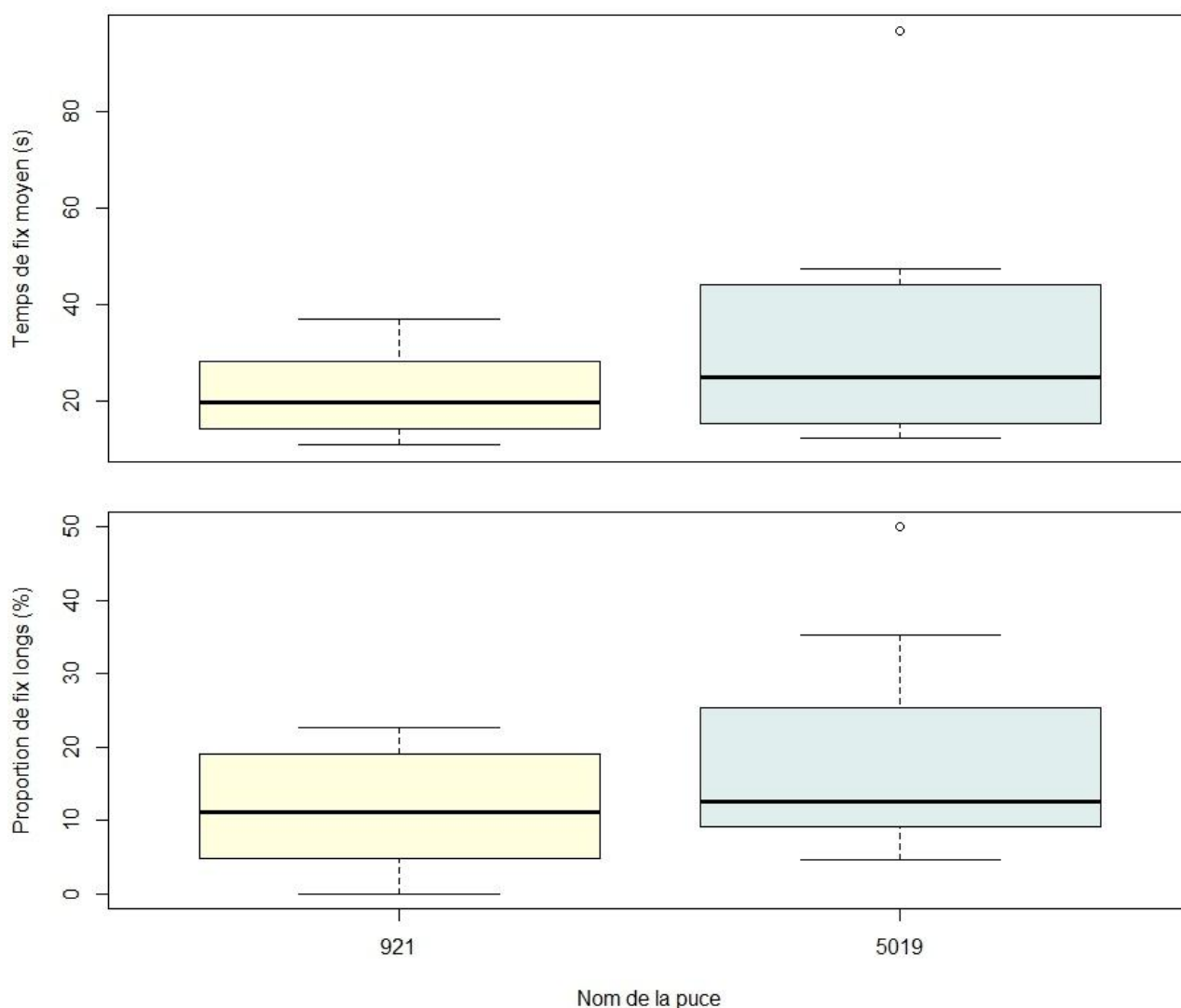


Figure 13 : Comparaison du temps de fix moyen et de la proportion de fix longs entre les deux puces GPS

ii. Aucune influence détectée entre les deux puces sur l'erreur de localisation

La Figure 14 montre une médiane de l'erreur de localisation de 0 m, mais une dispersion plus faible des erreurs pour la puce 921 (IQR = 5 m contre 10 m). Cette différence n'est cependant pas statistiquement significative (test de Fligner-Killeen : $\chi^2 = 3.5742$, $p = 0.059$). Par ailleurs, le test de Wilcoxon n'a pas mis en évidence de différence significative entre les distributions des erreurs de localisation ($W = 15\ 228$, $p = 0.060$). Ainsi, il n'y a pas de différence démontrée sur les erreurs de localisation entre les deux puces, que ce soit sur la distribution ou la dispersion.

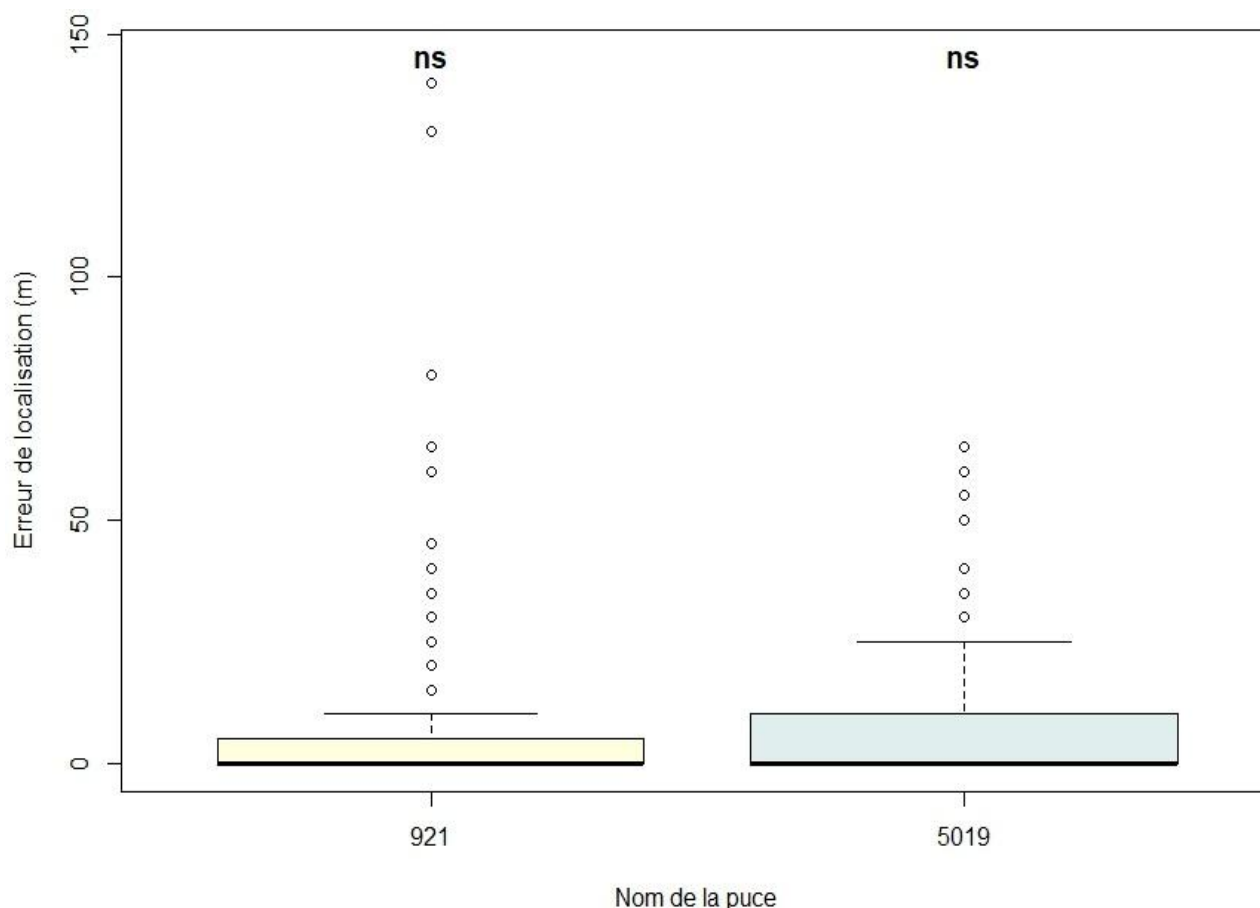


Figure 14 : Distribution des erreurs de localisation selon la puce GPS
 ns : différence non significative (test de Wilcoxon, $p = 0.060$)

iii. Une augmentation de l'erreur de localisation pour les DOP supérieurs à 5

Les distributions des erreurs de localisation diffèrent significativement selon les classes de DOP (test de Kruskal-Wallis : $\chi^2 = 48.12$; $df = 3$; $p = 2.011 \times 10^{-10}$; Figure 15). Les comparaisons post-hoc ont montré qu'il n'existait pas de différence significative entre les classes de DOP « excellente » et « bonne », ni entre les classes « moyenne » et « mauvaise ». En revanche, les classes de DOP inférieures à 5 diffèrent significativement des classes de DOP supérieures ou égales à 5, c'est-à-dire qu'ici un DOP supérieur à cinq est associé à une augmentation significative de l'erreur de localisation.

Ces résultats doivent être interprétés avec prudence pour la classe « très mauvaise ». En effet, le faible effectif ($n = 11$) réduit la puissance statistique des tests et limite ainsi la capacité à détecter d'éventuelles différences avec les autres classes.

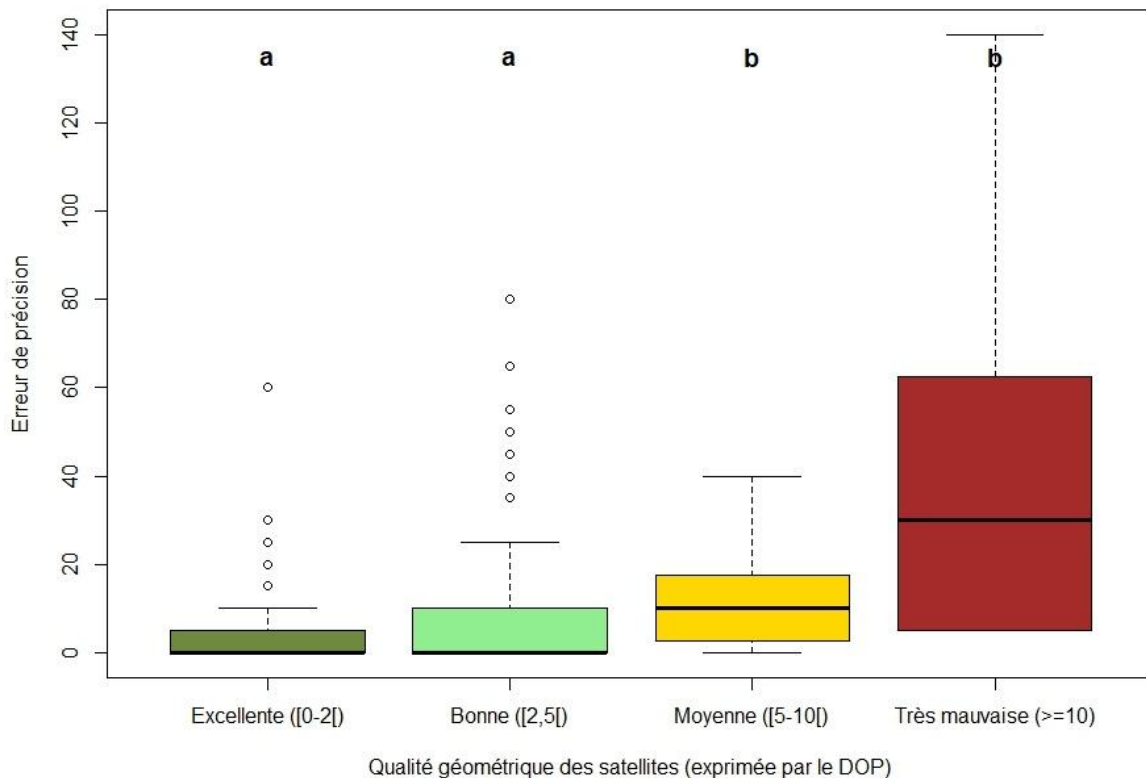


Figure 15 : Distribution de l'erreur de localisation en fonction du DOP
Deux lettres différentes indiquent une différence significative (test post-hoc de Wilcoxon)

iv. Une sous-estimation des distances parcourues malgré des vitesses cohérentes avec les conditions de déplacement

Les distances parcourues calculées à partir des positions GPS sont systématiquement inférieures aux distances de référence, quelle que soit la puce et la configuration choisie (Tableau 9). Pour la puce 921, la distance GPS représente 86 % du trajet de référence avec un intervalle de 10 min entre les séquences d'acquisition, soit une sous-estimation de 14 %. Cette sous-estimation peut atteindre 30 % quand l'intervalle entre les acquisitions passe à 20 minutes. Pour la puce 5019, les distances GPS sous-estiment respectivement de 16 % et 9 % la distance du trajet pour les configurations à 10 et 20 minutes. Sur l'ensemble des trajets, la distance calculée pour la puce 921 est inférieure de 22 % à la distance de référence, tandis que celle pour la puce 5019 est inférieure de 12 %. Les distances parcourues sont donc sous-estimées pour les deux puces, mais l'ampleur de cette sous-estimation varie selon la puce et la fréquence d'acquisition.

Tableau 9 : Distances de référence et distances GPS selon la fréquence d'acquisition et la puce GPS

Puce	Fréquence d'acquisition	Nombre d'acquisition	Distance de référence (m)	Distance GPS (m)	Différence	Sous-estimation
921	10 min	38	26 994	23 247	3 747	14%
	20 min	23	29 550	20 797	8 753	30%
	TOTAL	61	56 544	44 045	12 500	22%
5019	10 min	34	26 994	22 724	4 270	16%
	20 min	27	29 550	27 013	2 537	9%
	TOTAL	61	56 544	49 737	6 808	12%

Une augmentation de l'intervalle entre les points ne conduit pas systématiquement à une augmentation de la sous-estimation de la distance parcourue. En effet, elle diminue de 7 % lorsque la fréquence augmente de 10 à 20 minutes pour la puce 5019. Cette variation peut

notamment s'expliquer par les trajectoires suivies au cours des différentes sessions : lorsque le trajet réel est relativement rectiligne, la distance géodésique entre deux positions successives est plus proche de la distance réellement parcourue. Ainsi les distances géodésiques permettent de restituer la tendance générale du déplacement, mais sous-estiment la distance réellement parcourue lorsque la trajectoire comporte des changements de direction entre deux acquisitions.

La vitesse moyenne des deux sessions en voiture pour les intervalles de points en mouvement est de 64.35 km/h. Cette valeur apparaît cohérente avec les routes empruntées qui comprenaient des portions d'autoroute et de voies rapides, ainsi que des traversées de village et de courtes pauses. La vitesse maximale calculée est de 118.87 km/h, ce qui est également cohérent, puisqu'elle a été calculée entre deux points sur une partie d'autoroute à 130 km/h où la circulation n'était pas fluide.

Lors des essais sur le bateau, la vitesse maximale calculée est de 8.28 km/h. Cette valeur apparaît cohérente avec les conditions de navigation, la vitesse de déplacement sur le canal étant comprise entre 5 et 6 km/h. La vitesse moyenne calculée pour les intervalles correspondant à des phases de déplacement est de 4.15 km/h. Cette valeur est légèrement inférieure à la vitesse habituelle de navigation, ce qui peut s'expliquer par les variations de vitesse au cours du trajet, les ralentissements et les arrêts effectués au niveau des 21 écluses. Ainsi, dans l'ensemble, les vitesses calculées paraissent cohérentes avec les conditions de déplacement sur le canal et sur la route.

Pour conclure, les positions GPS ne permettent pas de restituer avec précision la distance réellement parcourue, la trajectoire étant simplifiée entre deux acquisitions successives. Cependant, cette approximation ne semble pas empêcher l'estimation de vitesses de déplacement cohérentes avec les conditions réelles de déplacement.

v. Un seuil de vitesse permettant d'identifier le transit mais pas l'activité de chasse

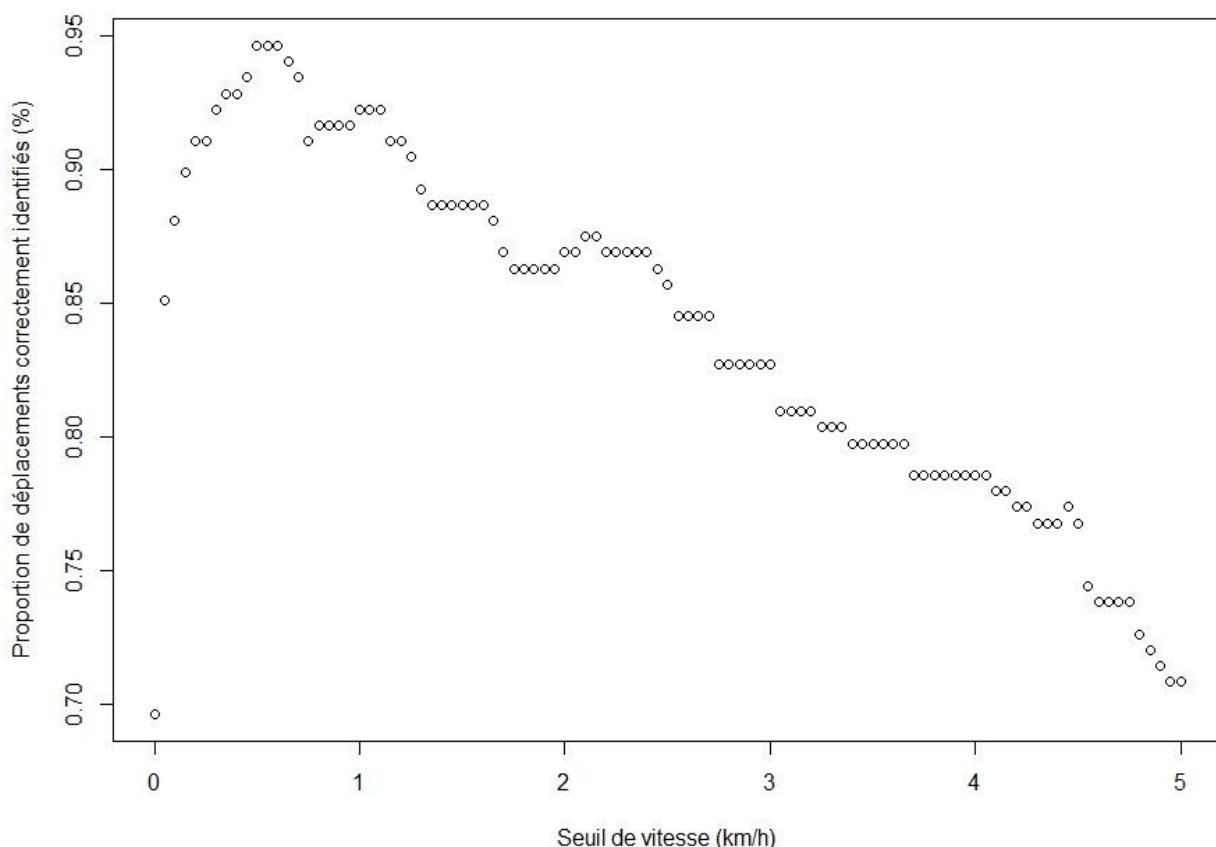


Figure 16 : Influence du seuil de vitesse sur la détection des déplacements

Afin d'évaluer la capacité de la vitesse calculée à partir des positions GPS à caractériser les périodes de déplacement des périodes d'immobilité, différents seuils de vitesse ont été testés. Le détail des indicateurs tirés des matrices de confusion de chaque seuil de vitesse se trouve en Annexe x. La proportion de bonnes classifications augmente rapidement jusqu'à un seuil de 0.5 km/h, puis reste stable entre 0.5 et 0.6 km/h avant de diminuer progressivement (Figure 16). Le pourcentage maximal de classifications correctes est ainsi obtenu pour un seuil compris entre 0.5 et 0.6 km/h avec une proportion de classifications correctes de 95 %.

Bien que le pourcentage maximal de bonnes classifications soit obtenu pour un seuil compris entre 0.5 et 0.6 km/h, ce critère seul ne permet pas de garantir une bonne détection des deux types de phases. En effet, un seuil très bas peut favoriser la détection des déplacements au détriment des phases d'immobilité.

La sensibilité et la spécificité ont ainsi été comparées. Les deux courbes se croisent pour un seuil de 1.25 km/h (Figure 17). A ce seuil, la différence entre la capacité à détecter les phases de déplacement ($Se = 0.906$) et celle à détecter les phases d'immobilité ($Sp = 0.902$) est minimale. Le pourcentage de classifications correctes reste par ailleurs élevé (90.4 %). Ce seuil constitue donc un compromis entre la détection du mouvement et de l'immobilité. Nous retiendrons donc ce seuil pour le plan d'échantillonnage.

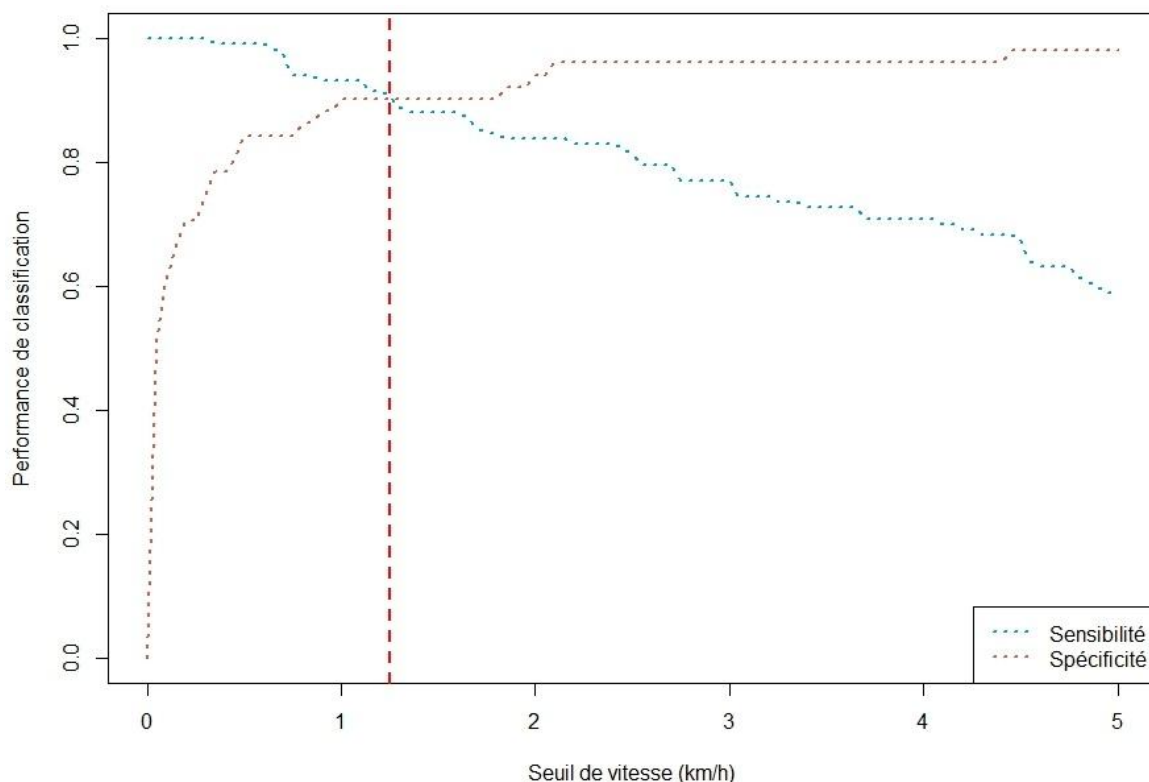


Figure 17 : Evolution de la sensibilité et spécificité de la détection du mouvement selon le seuil de vitesse

Après avoir testé ce seuil sur les données acquises le 30 juin sur un Murin de Daubenton, nous constatons que tous les points situés autour du point d'eau, où la chauve-souris est considérée en chasse sont classés comme immobiles selon le seuil de vitesse retenu. Seuls les points correspondant aux déplacements en transit sont notés comme mobiles. La vitesse calculée à partir de la distance géodésique entre deux séquences d'acquisitions ne permet donc pas, à elle seule, de distinguer les phases d'immobilité des phases de chasse. En effet, le comportement de chasse, caractérisé par de nombreux allers-retours autour des zones d'alimentation, peuvent conduire à des positions successives relativement proches malgré une

activité importante de l'animal. La distance géodésique calculée entre ces positions peut alors être faible et diminuer artificiellement la vitesse.

Ainsi, le seuil de 1.25 km/h semble adapté pour distinguer les phases de transit des périodes de faible déplacement, mais il ne permet pas de différencier une phase d'immobilité d'une phase de chasse. L'utilisation d'un accéléromètre pourrait constituer une méthode complémentaire pour distinguer ces phases. En mesurant les accélérations du corps de l'animal, l'accéléromètre permet de caractériser son activité et peut ainsi contribuer à différencier ces comportements (Costa et al. 2020; O'Mara et al. 2019).

En conclusion, le prototype semble fonctionnel et constitue une première preuve de faisabilité de l'utilisation d'une puce GPS miniaturisée pour le suivi du Murin de Daubenton. Il a permis d'obtenir des localisations sur un individu et de restituer correctement ses déplacements. Les données récoltées ont également permis de mettre en évidence une zone compatible avec les terrains de chasse et de distinguer globalement les phases de transit des faibles déplacements. Les tests complémentaires ont par ailleurs permis d'évaluer les performances des puces en matière d'acquisition et de précision, ainsi que d'identifier l'influence du DOP et de la fréquence d'acquisition sur la qualité et l'interprétation des données.

Cependant, certaines limites sont à prendre en compte. Le test en conditions réelles ne repose que sur une nuit d'un seul individu, l'autonomie n'ayant pas permis d'obtenir davantage de données. Par ailleurs, les comportements à une échelle fine ne peuvent être identifiés avec certitude à partir des données GPS seules, et l'ajout d'un capteur d'accélération pourrait compléter ce dispositif. Les distances calculées à partir des positions GPS sous-estiment également les distances réelles, en particulier lorsque la fréquence entre les acquisitions augmente, tandis que la hauteur de vol ne peut être estimée de manière fiable avec les données disponibles.

Ainsi, cette étude ne permet pas encore de valider définitivement l'utilisation du prototype pour son déploiement en l'état mais consolide le principe de la fonctionnalité d'une puce GPS auto-construite qui pourra être perfectionnée et optimisée afin d'être utilisée pour un suivi à grande échelle. Elle permet, en outre, d'identifier les conditions d'utilisation du GPS et les paramètres à prendre en compte pour l'interprétation des données. Ces résultats pourront ainsi être mobilisés dans l'élaboration du plan d'échantillonnage.

PARTIE 4 : Du suivi expérimental au déploiement régional : élaboration d'un plan d'échantillonnage

La miniaturisation des puces GPS fonctionne correctement et permet d'obtenir suffisamment de données pour répondre à la problématique du GMB, qui porte sur l'étude du comportement de chasse, de déplacement et de dispersion du Murin de Daubenton. Cette technologie peut être développée à plus grande échelle pour cartographier et caractériser l'utilisation de l'espace par cette espèce en Bretagne.

Le plan d'échantillonnage construit doit donc répondre à deux questions principales :

- Où le Murin de Daubenton se nourrit-il ?
- Par où passe-t-il pour accéder à ses terrains de chasse ?

I. Méthodologie : définition des paramètres du plan d'échantillonnage

Pour répondre à ces questions, le plan d'échantillonnage sera décliné en plusieurs étapes : la définition de la configuration du suivi GPS, la détermination et la sélection des individus à suivre, puis la caractérisation des habitats potentiellement utilisés comme terrains de chasse et comme corridors.

a. Définition de la configuration du GPS et de la durée de suivi

Le nombre de nuits de suivi et la fréquence d'acquisition ont été définis pour maximiser le nombre de localisations obtenues tout en conservant une autonomie suffisante de la puce pour suivre les chauves-souris durant plusieurs nuits.

Plusieurs configurations d'acquisition ont été testées sur une puce GPS équipée d'une batterie de 9 mAh. Pour chaque configuration, la durée totale de fonctionnement de la puce a été relevée. Le nombre de nuits d'échantillonnage a ensuite été défini en fonction de l'autonomie possible et du nombre de localisations nécessaire aux analyses spatiales envisagées. Le nombre de localisations attendu a été estimé à partir de la fréquence d'acquisition et du taux de réussite observé lors des essais en conditions réelles.

b. Définition d'un échantillon représentatif des situations étudiées

Les données disponibles sur les gîtes connus en Bretagne ont été utilisées pour caractériser la répartition du Murin de Daubenton dans les différents contextes paysagers de la région d'étude (Dubos, Nédelec 2025). La population établie en colonies estivales, connue est notamment répartie dans les 32 gîtes découverts lors des travaux de 2024-2025 distribués dans 4 contextes paysagers différents : forestier, urbain, littoral et bocager (Tableau 10). Les gîtes peuvent correspondre à différents types de structure, principalement des arbres mais également des constructions.

Tableau 10 : Nombre de gîtes selon le contexte

L'effectif maximal correspond à la plage des effectifs maximaux de chaque gîte connu dans chaque contexte

Contexte	Nombre de gîtes arboricoles	Nombre de gîtes en bâti	Nombre de gîtes	Effectif maximal
Forestier	10	0	10	1 – 15
Urbain	5	1	6	1 – 23
Littoral	6	0	6	1 – 7
Bocager	5	5	10	1 – 340

Le nombre d'individus à suivre n'a cependant pas été déterminé directement à partir du nombre de gîtes. Les données sur les gîtes ont principalement permis de caractériser les différents contextes paysagers dans lesquels l'espèce est présente.

Une recherche bibliographique a été réalisée sur les études consacrées à l'utilisation spatiale du Murin de Daubenton. La recherche a porté particulièrement sur les études utilisant la télémétrie VHF ou des méthodes de suivi individuel permettant de caractériser les domaines vitaux, les territoires de chasse et les déplacements entre les gîtes et les sites de chasse. Les publications ont été sélectionnées quand elles concernaient l'espèce cible et fournissaient des informations sur l'effectif d'individus suivis.

Pour chaque étude retenue, les informations suivantes ont été relevées : le nombre total d'individus suivis, le nombre de femelles, leur statut reproducteur, la période de suivi et l'objectif du suivi spatial. Les effectifs ont ensuite été comparés pour identifier les ordres de grandeur couramment utilisés dans les études de suivi spatial de l'espèce.

c. Définition des modalités d'identification des terrains de chasse et corridors

Pour identifier les terrains de chasse et les corridors utilisés par le Murin de Daubenton, une comparaison entre les habitats potentiellement disponibles pour l'espèce et les habitats effectivement utilisés par les individus suivis sera réalisée.

Dans un premier temps, une carte des habitats de chaque zone d'étude sera construite à partir de données spatialisées de végétations et milieux naturels, de paysage et de topographie, ou encore de pressions telles que la pollution lumineuse ou chimique des cours d'eau.

Dans un second temps, les positions GPS permettront d'identifier les zones réellement utilisées au sein du domaine vital par les individus pour l'alimentation et pour le transit. La comparaison entre habitats disponibles au sein du domaine vital et habitats des terrains de chasse et corridors de déplacement permettra de déterminer la sélection positive ou négative de ces derniers par les individus.

II. Résultats : proposition d'un plan d'échantillonnage pour le suivi régional

a. Trois nuits de suivi préconisées pour concilier acquisition des données et autonomie du dispositif

Les essais d'autonomie confirment que la configuration influence la durée de fonctionnement de la puce (Tableau 11). Une fréquence d'acquisition d'un point toutes les 10 minutes permet d'obtenir davantage de localisations dans une période donnée, mais réduit l'autonomie de la puce et donc le nombre de nuits pouvant être suivies. A l'inverse, une fréquence d'un point toutes les 20 minutes permet d'augmenter l'autonomie mais réduit la résolution temporelle des déplacements, ce qui peut être dommageable, en particulier pendant les phases de transit. La fréquence d'un point toutes les 15 minutes constitue donc un compromis entre ces deux contraintes. Avec cette configuration, la puce a fonctionné pendant 19h, permettant théoriquement de couvrir trois nuits consécutives de 6 h. Elle permet d'obtenir 24 localisations par nuit, soit 72 localisations en trois nuits. En appliquant le taux de réussite de 66 % obtenu lors du suivi en conditions réelles, environ 47 localisations seraient ainsi attendues pour l'ensemble des trois nuits.

Tableau 11 : Résumé des configurations testées et du temps d'utilisation de la puce

Configuration	Durée de fonctionnement
1 pt / 10 min (7h) puis 1 pt / 20 min	19 h
1 point / 10 min	12 h
1 point / 15 min	19 h

Cependant, en reprenant le suivi expérimental d'un Murin de Daubenton, le trajet entre le gîte et le terrain de chasse n'a duré que 15 minutes entre 23h32 et 23h47. Avec une fréquence d'acquisition d'un point toutes les 15 minutes, l'intégralité d'un déplacement entre le gîte et le terrain de chasse peut donc potentiellement avoir lieu entre deux localisations successives.

Aucune information ne permettrait alors de reconstruire précisément le corridor de déplacement.

Ainsi, un enregistrement des positions toutes les 15 minutes pendant trois nuits de 6 h apparaît théoriquement suffisant pour étudier l'utilisation générale de l'espace et identifier certaines zones de chasse du Murin de Daubenton, mais cette configuration est insuffisante pour reconstruire les corridors de déplacement.

L'utilisation d'un accéléromètre pourrait permettre de détecter des changements dans le niveau ou le type d'activité et de déclencher temporairement une augmentation de la fréquence d'acquisition GPS. Des tests complémentaires seraient nécessaires pour déterminer si les signaux enregistrés permettent d'identifier de manière suffisamment fiable les phases de déplacement rapide ou les changements de comportement associés aux déplacements entre différentes zones d'activité.

Il serait ainsi possible de tester des phases temporaires d'acquisition plus fréquentes, par exemple un point toutes les minutes ou toutes les cinq minutes pendant une durée limitée, 30 minutes par exemple, pour obtenir davantage de positions pendant certaines phases d'activité. De nouveaux tests d'autonomie devront être réalisés pour déterminer l'effet de cette configuration sur la durée totale du suivi.

b. Un échantillon de 108 femelles réparties dans différents contextes et périodes pour couvrir la diversité de la population bretonne

La recherche bibliographique a permis d'identifier cinq études répondant aux critères de sélection et portant sur l'utilisation de l'espace, les déplacements ou les terrains de chasse du Murin de Daubenton. Les tailles d'échantillon utilisés sont variables allant de 14 à 54 individus, avec des effectifs de femelles compris entre 11 et 30 individus (Tableau 12).

Tableau 12 : Synthèse des études pertinentes chez le Murin de Daubenton

Etude	Objectif du suivi	Contexte	Nombre total d'individus suivis	Nombre de femelles	Période de suivi
Lucan & Radil, 2010	Influence de l'état reproducteur sur l'activité de chasse et de repos	Forêt – Marais	15	15	Gestation – lactation – post-lactation
Encarnaçao, 2011	Ségrégation sexuelle des gîtes et terrains de chasse	Forêt	54	12	Gestation – lactation – post-lactation
Dietz & al., 2006	Identification des zones de chasse, mesure des distances gîtes – terrain de chasse, variation de la ségrégation sexuelle	Forêt – vallée bocagère	30	30	Gestation – lactation
Dietz & Kalko, 2007	Effet du stade reproducteur et du sexe sur l'activité de chasse	Urbain	29	16	Gestation – lactation
Kapfer et al., 2008	Etude de la fidélité aux gîtes et zones de chasse	Forêt	14	11	Gestation – lactation – post-lactation

Parmi les études utilisées, Lučan, Radil (2010) ont suivi 15 femelles reproductrices, réparties en trois périodes : gestation, lactation et post-lactation. Leur objectif était d'étudier les variations de l'activité de chasse et de repos au cours du cycle reproducteur. Cette étude met en évidence l'intérêt de considérer plusieurs périodes du cycle reproducteur dans l'étude de l'utilisation spatiale. En effet, l'activité de chasse diminue entre la gestation et la lactation et ré-augmente en post-lactation.

Dans l'étude d'Encarnaç o (2011), les scientifiques ont suivi 54 individus, dont 12 femelles, au cours des trois périodes de reproduction pour étudier la ségrégation sexuelle des gîtes et des terrains de chasse. Le suivi a permis de mettre en évidence des différences dans l'utilisation des habitats entre mâles et femelles. Les femelles chassent plus près de leur gîte, le domaine vital des mâles est donc plus étendu atteignant 47.3 km² contre 9.7 km².

Les autres études recensées confirment la diversité des effectifs employés pour étudier l'utilisation spatiale du Murin de Daubenton. Dietz, Encarnaç o, Kalko (2009) ont suivi 30 femelles reproductrices pour déterminer les zones de chasse et mesurer les distances entre celles-ci et leur gîte, tandis que Dietz, Kalko (2007) ont suivi 16 femelles pour étudier l'influence du stade reproducteur et du sexe sur l'activité de chasse. Kapfer et al. (2008) ont, quant à eux, suivi 11 femelles dans le cadre d'une analyse sur la fidélité aux gîtes et aux terrains de chasse. Ainsi, les études utilisent des effectifs de l'ordre de 10 à 30 femelles, avec plusieurs publications reposant sur une quinzaine d'individus.

L'étude portera spécifiquement sur les femelles reproductrices. Ce choix repose sur le fait que les femelles constituent une partie essentielle de la dynamique et du maintien de la population et permettent d'étudier l'utilisation de l'espace au cours des différentes phases du cycle reproducteur. Les trois périodes retenues sont ainsi la sortie d'hibernation, l'élevage des jeunes / lactation et l'émancipation / post-lactation. Les individus seront attribués à l'un des quatre contextes paysager en fonction de leur lieu de capture. Ainsi, un individu capturé dans un site appartenant au contexte forestier sera intégré au groupe « forestier », indépendamment du contexte dans lequel il réalisera ses déplacements ou ses activités de chasse.

Pour prendre en compte les différences possibles entre les contextes paysagers et entre les périodes du cycle reproducteur, un effectif de 9 femelles reproductrices par contexte et par période a été retenu. Ce choix correspond à un compromis entre les ordres de grandeur du nombre d'individus suivis par colonie observés dans la littérature et la nécessité de répartir l'échantillonnage entre quatre contextes et trois périodes biologiques. Le plan d'échantillonnage repose ainsi sur :

$$4 \text{ contextes} \times 3 \text{ périodes} \times 9 \text{ femelles}$$

, soit un total prévisionnel de 108 femelles équipées.

Les 9 individus constituent un objectif par combinaison *contexte x période*. Lorsque les captures sont réalisées directement dans un gîte et que plusieurs gîtes sont échantillonnés dans un même contexte, les individus équipés seront répartis aussi uniformément que possible entre ces gîtes pour limiter la sur-représentation d'un seul groupe. Lorsque les captures sont effectuées en extérieur, cette répartition ne pourra pas être contrôlée à priori.

Les animaux équipés devront également respecter les critères permettant la pose d'un dispositif de suivi. La masse totale du dispositif ne devra pas dépasser 10 % de la masse corporelle de l'individu (Meierhofer et al. 2025).

c. Les données GPS permettant d'identifier les déplacements, terrains de chasse et corridors

La carte des habitats disponibles sera construite à l'aide des cartographies des habitats disponibles comme la carte des végétations du Conservatoire botanique national de Brest et la carte des habitats naturels du programme CarHab. Cette carte int grera les cours d'eau et plans d'eau, les surfaces boisées, les haies et autres éléments linéaires de végétation, les lisières, les milieux ouverts, les infrastructures routières, des caractéristiques du paysage ou de la topographie, ou encore des facteurs de pression tels que les zones soumises à un éclairage artificiel ou la pollution des milieux aquatiques quand des informations spatialisées seront disponibles.

Dans un second temps, les données issues des suivis GPS seront utilisées pour identifier les domaines vitaux et les zones effectivement utilisées en chasse et en transit par les individus. Cette identification reposera sur les MCP (Polygones convexes minimum), qui correspondent à la plus petite surface convexe contenant l'ensemble des localisations de chaque individu et fournissant une estimation de l'étendue spatiale de leur domaine vital. Les localisations seront filtrées à partir du DOP. Les positions présentant un DOP supérieur à 5 seront mises de côté et vérifiées manuellement. Une incertitude spatiale plus importante pourra leur être associée, si elles sont conservées pour les analyses.

Par ailleurs, aucun tri ne sera réalisé sur la seule base du nombre de nuits suivies ou du nombre total de localisations. L'exploitabilité des données sera évaluée en fonction de sa capacité à apporter une information sur une zone de chasse ou une phase de déplacement. Cependant, les analyses nécessitant une caractérisation plus complète de l'utilisation de l'espace, en particulier l'estimation du domaine vital, seront réalisées uniquement pour les individus disposant d'une durée et d'un nombre de localisations suffisants pour le modèle considéré.

L'utilisation de l'espace par les individus sera modélisée à l'aide du package *ctmm* sous R, qui prend en compte l'autocorrélation des données GPS (Calabrese, Fleming, Gurarie 2016). Cette autocorrélation sera explorée à l'aide d'un variogramme représentant l'évolution de la semi-variance des positions en fonction du décalage temporel. Il permet ainsi d'observer comment la similarité entre deux positions évolue à mesure que le temps qui les sépare augmente et contribue au choix d'un modèle de mouvement adapté.

L'analyse du variogramme permettra également d'évaluer *a posteriori* si la durée du suivi est suffisante pour caractériser l'utilisation spatiale de chaque individu dans le cadre du modèle considéré. L'atteinte éventuelle d'une asymptote suggère que les localisations couvrent une structure spatiale compatible avec une estimation stabilisée de l'utilisation de l'espace. À l'inverse, l'absence de plateau peut indiquer que la durée du suivi reste insuffisante pour caractériser l'utilisation spatiale de l'individu.

Les localisations successives permettront ensuite de caractériser les déplacements des individus. Pour chaque paire de localisations successives, une vitesse apparente moyenne sera calculée grâce à la distance séparant les deux positions et le temps écoulé entre celles-ci. Cette variable ne correspond pas à la vitesse réelle de vol de la chauve-souris, puisque la trajectoire réelle entre les deux positions n'est pas connue, mais constitue un indicateur du déplacement net entre deux positions.

Les phases de déplacement seront caractérisées par une vitesse apparente supérieure à 1.25 km/h, seuil défini lors des tests complémentaires pour distinguer les déplacements importants de l'immobilité ou des déplacements dans une zone restreinte. Ce seuil devra être vérifié pour qu'il soit valable avec des fréquences d'acquisitions plus élevées et il ne sera pas utilisé seul pour identifier les comportements.

L'identification des différentes phases d'activité reposera sur la combinaison de plusieurs informations : la vitesse apparente entre deux localisations, la concentration ou la récurrence de positions dans une même zone, le contexte environnemental dans lequel se situe l'individu et, si les données sont disponibles, les informations issues de l'accéléromètre. Cette distinction entre les différentes phases permettra de calculer la proportion de temps allouée aux différentes activités et d'améliorer les connaissances sur le comportement spatial de cette espèce.

Pour spatialiser ces différentes phases d'activité, les zones de forte utilisation de l'espace par les chauves-souris seront identifiées à partir des données de localisation à l'aide du package *ctmm*, qui permet d'estimer une distribution d'utilisation. Deux niveaux de cette distribution seront considérés : une zone centrale regroupant 50 % de la probabilité d'utilisation, correspondant aux secteurs de plus forte utilisation de l'espace, et une zone plus large

regroupant 95% de la probabilité d'utilisation, permettant de caractériser l'ensemble des secteurs régulièrement utilisés par l'individu. Ces zones seront ensuite croisées avec les données environnementales et les indicateurs comportementaux décrits précédemment, pour identifier les terrains de chasse. La récurrence des localisations, les faibles déplacements apparents et les caractéristiques environnementales compatibles avec l'activité de chasse, en particulier la proximité d'un point d'eau seront considérés. Les corridors de déplacement correspondent aux portions de l'espace caractérisées par une succession de localisations traduisant un déplacement rapide entre différentes zones d'utilisation. Compte tenu de la fréquence d'acquisition des données GPS, les corridors identifiés devront être interprétés comme des zones de déplacement probables plutôt que comme la trajectoire exacte suivie par l'individu.

Une fois les terrains de chasse et les routes de vol identifiés, leurs caractéristiques environnementales seront décrites.

Les terrains de chasse effectifs seront dénombrés et caractérisés par leur surface, le type de milieu, la distance au gîte lorsqu'il pourra être identifié, la durée d'utilisation par nuit, le nombre d'individus les utilisant, leur composition en habitat, et la spécificité de cette composition par comparaison aux mêmes habitats disponibles recensés au sein du domaine vital. Les corridors seront caractérisés selon leur longueur, la présence d'intersection avec des routes, la proportion de zones ouvertes et fermées, ainsi que la proportion de zones éclairées et non éclairées.

Les mêmes caractéristiques seront ensuite décrites pour les habitats potentiellement favorables identifiés sur la carte initiale. La comparaison entre les habitats potentiellement disponibles et les terrains de chasse et corridors effectifs permettra ainsi d'identifier les caractéristiques environnementales associées à la sélection par les individus.

En conclusion, cette partie a permis de traduire les objectifs du programme de conservation du Murin de Daubenton en une proposition de plan d'échantillonnage pour le déploiement du suivi GPS à l'échelle régionale. Ce plan cherche à concilier la représentativité écologique, les objectifs scientifiques, ainsi que les contraintes techniques, matérielles et de terrain.

Le choix d'un GPS construit par le GMB comme méthode de suivi découle de la comparaison des différentes technologies disponibles, tandis que les paramètres de suivi et l'interprétation des données prennent en compte les performances et les limites mises en évidence lors des essais du prototype. Un protocole d'acquisition déclenché par l'accéléromètre, avec des localisations enregistrées toutes les minutes ou toutes les cinq minutes pendant 30 minutes, ainsi que le suivi de 108 femelles reproductrices pendant trois nuits, réparties en trois périodes et dans quatre contextes paysagers, sont ainsi préconisés pour obtenir un échantillon représentatif de la diversité des situations rencontrées au sein des populations bretonnes. Ce protocole constitue toutefois une proposition initiale qui devra être ajustée en fonction des conditions réelles de terrain et de l'évolution du prototype GPS. La disponibilité des puces et des récepteurs, le succès des captures, les performances réelles des dispositifs et la qualité des données recueillies pourront conduire à adapter l'échantillonnage.

Ainsi, cette partie aboutit à la définition d'un cadre méthodologique pour passer d'une phase de développement et de validation du dispositif à la mise en œuvre d'un suivi.

PARTIE 5 : Discussion générale

I. Le GPS : une technologie prometteuse pour le suivi de petites chauves-souris

La mise au point de ce plan d'échantillonnage constitue l'aboutissement d'un travail visant à évaluer la faisabilité du suivi GPS chez une espèce de très petite taille, le Murin de Daubenton. Les essais réalisés ont permis d'obtenir, chez un seul individu, 101 localisations exploitables au cours d'une nuit et d'identifier un terrain de chasse, ainsi qu'une partie de son trajet. Malgré le faible nombre de données obtenues, ces résultats montrent qu'un suivi GPS est envisageable chez cette espèce, tout en restant soumis à des contraintes d'autonomie et de fiabilité du dispositif.

Ces résultats s'inscrivent dans le développement de dispositifs GPS miniaturisés utilisés chez différentes espèces de chauves-souris (Castle et al. 2015; Conenna et al. 2019; Roeleke et al. 2016; Wild et al. 2022). Les espèces étudiées dans ces publications présentent des masses corporelles plus importantes, comprises entre 15 et 35 g, permettant l'utilisation de dispositifs plus lourds. Les stratégies d'acquisition et les autonomies obtenues varient selon les études : Castle et al. ont privilégié un nombre limité de localisations programmées à des dates et heures spécifiques, Conenna et al. ont obtenu des données sur sept nuits, tandis que Roeleke et al. ont suivi des individus pendant une à cinq nuits avec une localisation toutes les 30 secondes. Wild et al. illustrent le compromis entre fréquence d'acquisition et autonomie, avec une durée de fonctionnement de la puce de 2.8 heures pour une localisation par seconde, contre 18.4 heures pour une localisation toutes les cinq minutes.

La masse du dispositif conditionne le choix de la batterie et demande d'adapter la fréquence d'acquisition et la stratégie de suivi pour trouver un compromis entre autonomie et quantité d'informations obtenues. Dans le cas du Murin de Daubenton, dont la masse corporelle n'est que de 7 à 9 g, ce compromis est particulièrement contraignant. Avec une masse de 0.75 g, le prototype utilisé dans cette étude montre néanmoins que la miniaturisation à un poids inférieur à 0.85 g permet d'envisager l'acquisition de données spatiales chez des chauves-souris de quelques grammes. Le défi consiste à concilier cette réduction de masse avec une autonomie et une fiabilité suffisante pour répondre aux objectifs écologiques du suivi.

II. La miniaturisation des technologies de suivi : un compromis entre masse, autonomie et qualité des données

Chez d'autres vertébrés, le suivi a également évolué grâce à la miniaturisation des dispositifs. Chez le Martin-pêcheur d'Europe (*Alcedo atthis*), les individus ont d'abord été suivis par télémetrie VHF (Hurner, Libois 2005), puis des GPS miniaturisés de 1.4 g ont permis d'étudier l'utilisation de l'espace et la connectivité des habitats (Musseau et al. 2023). D'autres technologies permettent de suivre des espèces de taille encore plus faibles, comme des insectes. Le radar harmonique repose sur l'émission d'un signal radio dont un transpondeur passif renvoie une fréquence harmonique détectée par le récepteur. Des dispositifs d'environ 3 mg suivent des insectes tels que le doryphore de la pomme de terre (Colpitts, Boiteau 2004). La RFID permet également de suivre des individus équipés de transpondeurs passifs légers. Elle a notamment été utilisée pour comprendre les déplacements de coléoptères en conditions naturelles, mais nécessite le passage de l'individu à proximité d'un lecteur (Blight et al. 2023). Ces technologies permettent donc de réduire considérablement la masse embarquée, mais l'information spatiale est limitée. Ces exemples, bien qu'ils concernent des groupes taxonomiques et des échelles de déplacement différentes, illustrent une contrainte commune au suivi des petits animaux : la réduction de la masse du dispositif s'accompagne d'une diminution de l'autonomie ou de la quantité d'information spatiale. Ainsi, le choix d'une technique de suivi pour ces petites espèces repose sur un compromis entre masse du dispositif, effort de

terrain, autonomie et précision des informations obtenues. Pour le Murin de Daubenton, le GPS présente l'intérêt de fournir de manière autonome des positions servant à reconstituer les trajectoires et à identifier les terrains de chasse.

III. Une preuve de faisabilité encore limitée et plusieurs améliorations nécessaires avant le déploiement à plus large échelle

a. Des résultats exploratoires limitant la validité du dispositif

Le développement de ce premier prototype du GMB a nécessité de nombreuses étapes d'essais, d'identification de dysfonctionnements et d'améliorations du dispositif. Le protocole initial prévoyait des essais sur plusieurs individus de deux espèces de chauve-souris de plus grande taille, le Grand Rhinolophe et le Grand Murin, pour évaluer différentes configurations, les performances de la puce et la gêne possible du dispositif sur les animaux. Une seule femelle de Grand Rhinolophe a finalement été équipée et une seule nuit de données a pu être récupérée. Deux Grands Murins ont également été équipés, mais aucune donnée n'a été enregistrée en raison d'une décharge trop rapide des batteries, liée à une configuration inadaptée des fréquences d'acquisition. Plusieurs dysfonctionnements ont ainsi été identifiés et corrigés au cours du développement, tandis que des améliorations ont progressivement été apportées au dispositif, notamment concernant l'aide au positionnement et la miniaturisation de la batterie. Les résultats obtenus dans cette étude doivent donc être considérés comme exploratoires, compte tenu du faible nombre d'individus suivis et de la quantité limitée de données récoltées. Une limite concerne également le plan d'échantillonnage proposé pour le déploiement régional. Celui-ci prévoit de privilégier l'équipement des femelles reproductrices pour caractériser les terrains de chasse. Or plusieurs études (Augusteyn et al. 2017; Encarnação 2011) montrent une ségrégation des habitats et des terrains de chasse selon le sexe chez le Murin de Daubenton. L'absence de données sur les mâles pourrait ainsi limiter la caractérisation de l'ensemble des habitats utilisés par la population. Ce choix implique que les résultats obtenus décriront l'utilisation de l'espace par les femelles et non celle de l'ensemble de la population.

b. Des améliorations techniques pour renforcer l'autonomie et les performances

Plusieurs améliorations techniques pourraient permettre de renforcer les performances du dispositif. A terme, le récepteur pourrait être installé de manière autonome sur le terrain, dans les gîtes ou sur des zones de chasse connues, pour récupérer les données sans nécessiter une intervention systématique sur le terrain. L'utilisation d'une nouvelle batterie de 40 mAh, présentant une taille et un poids à peine supérieurs à celles de la batterie de 9 mAh actuellement utilisée, conjuguée à une réduction de la taille du circuit imprimé, permettrait également d'augmenter l'autonomie du dispositif sans augmenter significativement son volume. Enfin, l'intégration de capteurs supplémentaires, en particulier l'accéléromètre, permettrait d'optimiser la consommation d'énergie en déclenchant l'acquisition des positions uniquement lorsque l'animal est actif. Cette piste nécessiterait des essais complémentaires pour déterminer les paramètres de déclenchement les plus adaptés.

IV. Perspectives pour répondre aux hypothèses du déclin du Murin de Daubenton

Pour proposer des actions concrètes pour stabiliser la population bretonne du Murin de Daubenton, les données GPS permettront de caractériser clairement les terrains de chasse et les corridors écologiques de cette espèce dans les différents contextes où elle se rencontre dans la région. Ces données pourront être combinées à d'autres méthodes de suivi et à des données

environnementales pour aborder directement les enjeux de conservation du programme régional.

a. Ressource alimentaire et qualité des milieux

L'identification des terrains de chasse par le suivi GPS pourrait permettre de cibler l'échantillonnage de la ressource alimentaire dans les habitats effectivement utilisés. Une comparaison avec des habitats favorables et disponibles mais non utilisés permettrait d'évaluer dans quelle mesure la disponibilité en proies participe au choix du terrain de chasse. Cet échantillonnage pourra être mis en place en association avec d'autres associations naturalistes spécialisées en entomologie, comme Viv'Armor Nature, GRETIA ou encore Bretagne Vivante. Ces données pourraient également être mises en relation avec la qualité des milieux aquatiques, à travers l'étude des contaminants pour identifier les facteurs susceptibles d'influencer indirectement l'utilisation de l'espace. L'exploration de l'évolution au cours des 30 dernières années des facteurs déterminants identifiés, lorsque les informations sont disponibles, pourrait permettre de confronter les hypothèses de cause du déclin de l'espèce à ces résultats.

b. Complémentarité entre GPS et suivi acoustique

Le suivi GPS renseigne sur les déplacements des individus équipés, mais ne permet pas de caractériser la fréquentation des habitats par l'ensemble de la population. L'installation de détecteurs acoustiques passifs sur les terrains de chasse identifiés par GPS permettrait de compléter le suivi individuel par une estimation de l'activité des chauves-souris à l'échelle du site. Ce croisement pourrait distinguer les habitats ponctuellement utilisés par quelques individus de zones présentant une fréquentation plus importante. De plus, les détecteurs acoustiques pourront être utiles pour vérifier que les habitats non utilisés par les individus équipés ne sont pas utilisés par d'autres murins de Daubenton non équipés de puce GPS, ces sites pourront ainsi servir de sites témoins pour comprendre la répartition de cette espèce.

c. Etude de la fragmentation des habitats

A une échelle plus large, l'assemblage des trajectoires de vol des murins dans différents contextes permettrait d'étudier l'influence des structures du paysage sur les déplacements de cette espèce. Les données pourraient être utilisées pour analyser les relations entre les trajectoires et la présence d'éléments linéaires, de routes ou de sources lumineuses. Une recherche historique sur le changement du paysage pourrait s'avérer également intéressante pour mettre en évidence les modifications paysagères et les isolements de certaines zones. Ces résultats pourraient ensuite contribuer à orienter les mesures de conservation vers les corridors les plus utilisés ou les secteurs présentant des obstacles aux déplacements.

Conclusion

Ce mémoire avait pour objectif de développer une méthode de suivi pour étudier les déplacements et les habitats de chasse du Murin de Daubenton, malgré sa très petite taille. La comparaison des différentes technologies disponibles a conduit à identifier le GPS comme la méthode la plus adaptée aux objectifs du suivi, bien que la masse des dispositifs constitue une contrainte majeure.

Le prototype de 0.75 g développé par le GMB a permis d'enregistrer 101 localisations exploitables chez un Murin de Daubenton et de restituer une partie de ses déplacements. Malgré le caractère limité de cet essai, ces résultats constituent une première preuve de faisabilité de l'utilisation d'un dispositif GPS de moins d'un gramme chez cette espèce.

A partir de ces résultats, un plan d'échantillonnage pour le déploiement de cette méthode à l'échelle régionale a été proposé. Il précise notamment la configuration du dispositif, la fréquence d'acquisition des positions, la durée du suivi et les caractéristiques de l'échantillon à suivre. Cependant, la méthode reste exploratoire et une validation sur davantage d'individus

et dans différents contextes reste nécessaire. Elle ne constitue donc pas une méthode définitive mais pose un premier cadre méthodologique et technique pour le déploiement du suivi GPS à l'échelle régionale. La poursuite du développement de cette méthode devra désormais permettre de passer de la validation d'un outil de suivi à son utilisation pour répondre aux hypothèses formulées sur le déclin du Murin de Daubenton. Le déploiement à l'échelle régionale pourrait ainsi contribuer à mieux comprendre les relations entre les déplacements de l'espèce, les habitats qu'elle utilise et les pressions susceptibles d'affecter sa conservation.

Bibliographie

ALMENAR, David, AIHARTZA, Joxerra, GOITI, Urtzi, SALSAMENDI, Egoitz et GARIN, Inazio, 2009. Foraging behaviour of the long-fingered bat *Myotis capaccinii*: implications for conservation and management. *Endangered Species Research*. 9 juillet 2009. Vol. 8, pp. 69-78. DOI 10.3354/esr00183.

ARTHUR, Laurent et LEMAIRE, Michèle, 2009. *Les chauves-souris de France, Belgique, Luxembourg et Suisse*. Mèze Paris : Biotope [Museum national d'histoire naturelle]. Collection Parthénope. ISBN 978-2-914817-35-6.

AUGUSTEYN, John, HUGHES, Jane, ARMSTRONG, Graeme, REAL, Kathryn et PACIONI, Carlo, 2017. Tracking and tracing central Queensland's *Macroderma* – determining the size of the Mount Etna ghost bat population and potential threats. *Australian Mammalogy*. 2017. Vol. 40. DOI 10.1071/AM16010.

AZMY, Suzanna Noor, SAH, Shahrul Anuar Mohd, SHAFIE, Nur Juliani, ARIFFIN, Azman, MAJID, Zulkepli, ISMAIL, Muhamad Nor Akmal et SHAMSIR, Mohd Shahir, 2012. Counting in the dark: Non-intrusive laser scanning for population counting and identifying roosting bats. *Scientific Reports*. 23 juillet 2012. Vol. 2, pp. 524. DOI 10.1038/srep00524.

BARATAUD, Michel, JEMIN, Julien, GRUGIER, Yvan et MAZAUD, Serge, 2009. Étude sur les territoires de chasse du Rhinolophe euryale, *Rhinolophus euryale*, en Corrèze, site Natura 2000 des Abîmes de la Fage. *Le Naturaliste Vendéen*. 2009. Vol. 9, pp. 43-55.

BARBOSA, Emilie et DUBOS, Thomas, 2022. *Synthèse des analyses d'évolution des populations de chiroptères dénombrées au gîte en Bretagne - Période 1988/2020*. Synthèse. Groupe Mammalogique Breton.

BARTHELEMY, Nans, 2025. *Le devenir et les conséquences écologiques de la présence de microplastiques dans les cours d'eau intermittents et éphémères* [en ligne]. Theses. Université Claude Bernard - Lyon I. [Consulté le 4 juin 2026]. Disponible à l'adresse : <https://theses.hal.science/tel-05295786>

BELLI, Chiara, CISTRONE, Luca, KNÖRNSCHILD, Mirjam, ŠESTOVIĆ, Belma, EKKLISIARCHOS, Ioannis, ALDASORO, Miren, BORGONOVO, Chiara, MIGLIARESI, Ilaria, DI DOMENICO, Mariella, RATCLIFFE, John et RUSSO, Danilo, 2026. Riparian bats temporally partition foraging at the cold edge of an upslope climate-driven range expansion. *Global Ecology and Conservation*. 1 février 2026. Vol. 66, pp. e04129. DOI 10.1016/j.gecco.2026.e04129.

BERLKESSA, Ghania et BOUTRAA, Thilelli, 2025. *Contribution à l'étude faunistique et écologique des Ephéméroptères Plécoptères, Tricoptères (E.P.T) de quelques cours d'eau du sous bassin versant de l'Oued Boubhir (Tizi-Ouzou)*. Mémoire. Tizi-Ouzou : Université Mouloud Mammeri.

BITEAU, Emilian et DUBOS, Thomas, 2024. *Le Murin de Daubenton Myotis daubentonii* - *Revue de la bibliographie*. Groupe Mammalogique Breton.

BLIGHT, Olivier, GESLIN, Benoît, MOTTET, Lola et ALBERT, Cécile H., 2023. Potential of RFID telemetry for monitoring ground-dwelling beetle movements: A Mediterranean dry grassland study. *Frontiers in Ecology and Evolution*. 17 avril 2023. Vol. 11. DOI 10.3389/fevo.2023.1040931.

BREWER, Caralie T., RAUCH-DAVIS, William A. et FRASER, Erin E., 2021. The Use of Intrinsic Markers for Studying the Migratory Movements of Bats. *Animals*. 2021. Vol. 11. DOI 10.3390/ani11123477.

BRINKLØV, Signe M. M., MACAULAY, Jamie, BERGLER, Christian, TOUGAARD, Jakob, BEEDHOLM, Kristian, ELMEROS, Morten et MADSEN, Peter Teglberg, 2023. Open-source workflow approaches to passive acoustic monitoring of bats. *Methods in Ecology and Evolution*. 2023. Vol. 14, pp. 1747-1763. DOI 10.1111/2041-210X.14131.

CALABRESE, Justin M., FLEMING, Chris H. et GURARIE, Eliezer, 2016. ctm: an R package for analyzing animal relocation data as a continuous-time stochastic process. FRECKLETON, Robert (éd.), *Methods in Ecology and Evolution*. septembre 2016. Vol. 7, n° 9, pp. 1124-1132. DOI 10.1111/2041-210X.12559.

CASTLE, Kevin T., WELLER, Theodore J., CRYAN, Paul M., HEIN, Cris D. et SCHIRMACHER, Michael R., 2015. Using sutures to attach miniature tracking tags to small bats for multimonth movement and behavioral studies. *Ecology and Evolution*. juillet 2015. Vol. 5, n° 14, pp. 2980-2989. DOI 10.1002/ece3.1584.

CHORNELIA, Ada, LU, Jianmei et HUGHES, Alice C., 2025. Following the Flight of Asian Bats: Stable Hydrogen Isotope Analysis Uncovers Bat Migration Patterns, and Promising Future Directions. *Journal of Biogeography*. 2025. Vol. 52. DOI 10.1111/jbi.70063.

COLPITTS, B.G. et BOITEAU, G., 2004. Harmonic radar transceiver design: miniature tags for insect tracking. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. novembre 2004. Vol. 52, n° 11, pp. 2825-2832. DOI 10.1109/TAP.2004.835166.

CONENNA, Irene, LÓPEZ-BAUCCELLS, Adrià, ROCHA, Ricardo, RIPPERGER, Simon et CABEZA, Mar, 2019. Movement seasonality in a desert-dwelling bat revealed by miniature GPS loggers. *Movement Ecology*. 16 août 2019. Vol. 7, pp. 27. DOI 10.1186/s40462-019-0170-8.

COSTA, Tânia Domingues, SANTOS, Carlos D., RAINHO, Ana, ABEDI-LARTEY, Michael, FAHR, Jakob, WIKELSKI, Martin et DECHMANN, Dina K. N., 2020. Assessing roost disturbance of straw-coloured fruit bats (*Eidolon helvum*) through tri-axial acceleration. *PLOS ONE*. 2020. Vol. 15, n° 11. DOI 10.1371/journal.pone.0242662.

DIETZ, Christian et KIEFER, Andreas, 2018. *Bats of Britain and Europe*. Londres : Bloomsbury Publishing. ISBN 978-1-4729-6318-5.

DIETZ, Markus, ENCARNACÃO, Jorge et KALKO, Elisabeth, 2009. Small scale distribution patterns of female and male Daubenton's bats (*Myotis daubentonii*). *Acta Chiropterologica*. 14 janvier 2009. Vol. 8, pp. 403-415. DOI 10.3161/1733-5329(2006)8[403:SSDPOF]2.0.CO;2.

DIETZ, Markus et KALKO, E.K.V., 2007. Reproduction affects flight activity in female and male Daubentons bats, *Myotis daubentonii*. *Canadian Journal of Zoology*. 19 juin 2007. Vol. 85, pp. 653-664. DOI 10.1139/Z07-045.

DUBOS, Thomas et NÉDELEC, Ronan, 2025. *Rapport Phase 1 - 2024/2025 : Comprendre la structuration des populations du Murin de Daubenton en Bretagne*. Groupe Mammalogique Breton.

DUDA, Niklas, NOWAK, Thorsten, HARTMANN, Markus, SCHADHAUSER, Michael, CASSENS, Björn, WÄGEMANN, Peter, NABEEL, Muhammad, RIPPERGER, Simon, HERBST, Sebastian, MEYER-WEGENER, Klaus, MAYER, Frieder, DRESSLER, Falko, SCHRÖDER-PREIKSCHAT, Wolfgang, KAPITZA, Rüdiger, ROBERT, Jörg, THIELECKE, Jörn, WEIGEL, Robert et KÖLPIN, Alexander, 2018. BATS: Adaptive Ultra Low Power Sensor Network for Animal Tracking. *Sensors*. 2018. Vol. 18, n° 10. DOI 10.3390/s18103343.

DUPONT, Hélène, 2024. Comment se portent les chauves-souris en France ? *VigieNature* [en ligne]. avril 2024. [Consulté le 1 avril 2026]. Disponible à l'adresse : <https://www.vigienature.fr/fr/tous-nos-articles/comment-se-portent-les-chauves-souris-en-france>

ENCARNACÃO, Jorge A., 2011. Spatiotemporal pattern of local sexual segregation in a tree-dwelling temperate bat *Myotis daubentonii*. *Journal of Ethology*. 2011. DOI 10.1007/s10164-011-0323-8.

EPSTEIN, Jonathan H. et NEWMAN, Scott H., 2011. The use of telemetry to understand bat movement and ecology. In : *Investigating the role of bats in emerging zoonoses: balancing ecology, conservation and public health interest*. Rome : FAO. pp. 151-161. FAO animal production and health, 12. ISBN 978-92-5-107028-4.

FRASER, Kevin C., MCKINNON, Emily A. et DIAMOND, Antony W., 2010. Migration, Diet, or Molt? Interpreting Stable-Hydrogen Isotope Values in Neotropical Bats. *Biotropica*. 2010. Vol. 42, n° 4, pp. 512-517. DOI 10.1111/j.1744-7429.2009.00608.x.

GIDORA, Samantha, 2025. *Investigation of eDNA air sampling as a tool for bat conservation and management*. Thèse. Kamloops : Thompson Rivers University.

GOTTWALD, Jannis, ROYAUTÉ, Raphaël, BECKER, Marcel, GEITZ, Tobias, HÖCHST, Jonas, LAMPE, Patrick, LEISTER, Lea, LINDNER, Kim, MAIER, Julia, RÖSNER, Sascha, SCHABO, Dana G., FREISLEBEN, Bernd, BRANDL, Roland, MÜLLER, Thomas, FARWIG, Nina et

NAUSS, Thomas, 2023. Classifying the activity states of small vertebrates using automated VHF telemetry. *Methods in Ecology and Evolution*. 2023. Vol. 14, pp. 252-264. DOI 10.1111/2041-210X.14037.

HERRERA M., L. Gerardo, HOBSON, Keith A., MANZO A, Adriana, ESTRADA B, Daniel, SÁNCHEZ-CORDERO, Victor et MÉNDEZ C., Germán, 2001. The Role of Fruits and Insects in the Nutrition of Frugivorous Bats: Evaluating the Use of Stable Isotope Models. *Biotropica*. 2001. Vol. 33, n° 3, pp. 520-528. DOI 10.1111/j.1744-7429.2001.tb00206.x.

HURME, Edward, LENZI, Ivan, WIKELSKI, Martin, WILD, Timm et DECHMANN, Dina, 2025. Bats surf storm fronts during spring migration. *Science*. 2 janvier 2025. Vol. 387, pp. 97-102. DOI 10.1126/science.ade7441.

HURNER, Hélène et LIBOIS, Roland, 2005. Etude par radiopistage de la territorialité chez le martin pêcheur (*Alcedo atthis*): cas de deux mâles voisins. . 1 janvier 2005. Vol. 42.

IPBES, 2019. *Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services*.

KAPFER, Géraldine, RIGOT, Thibaud, HOLSBEEK, Ludo et ARON, Serge, 2008. Roost and hunting site fidelity of female and juvenile Daubenton's bat *Myotis daubentonii* (Kuhl, 1817) (Chiroptera: Vespertilionidae). *Mammalian Biology*. juillet 2008. Vol. 73, n° 4, pp. 267-275. DOI 10.1016/j.mambio.2007.01.001.

KERBIRIOU, Christian, BAS, Yves, JULIEN, Jean-Francois, et LES GROUPES CHIROPTÈRES DE LA SFEPM, 2018. Estimations des tendances des populations de Chiroptères à partir des suivis de gîtes hivernaux. In : *Rencontre Chiroptères de la SFEPM*. Bourges. 9 avril 2018.

KOTILA, Miika, SUOMINEN, Kati M., VASKO, Ville V., BLOMBERG, Anna S., LEHIKONEN, Aleks, ANDERSSON, Tommi, ASPI, Jouni, CEDERBERG, Tony, HÄNNINEN, Jari, INKINEN, Jasmin, KOSKINEN, Janne, LUNDBERG, Göran, MÄKINEN, Katja, RONTTI, Markku, SNICKARS, Martin, SOLBAKKEN, Jostein, SUNDELL, Janne, SYVÄNPERÄ, Ilkka, VUORENMAA, Silja, YLÖNEN, Jari, VESTERINEN, Eero J. et LILLEY, Thomas M., 2023. Large-scale long-term passive-acoustic monitoring reveals spatio-temporal activity patterns of boreal bats. *Ecography*. 2023. Vol. 2023, n° 6. DOI 10.1111/ecog.06617.

KRIVEK, Gabriella, 2023. *Improving bat monitoring and conservation through infrared light barriers, camera traps and deep learning*. Thèse. Greifswald : Universität Greifswald.

LAURIDSEN, Mads, NGUYEN, Huan, VEJLGAARD, Benny, KOVACS, Istvan Z., MOGENSEN, Preben et SORENSEN, Mads, 2017. Coverage Comparison of GPRS, NB-IoT, LoRa, and SigFox in a 7800 km² Area. In : *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. Sydney. 2017. ISBN 978-1-5090-5932-4.

LAWTON, Katie, 2021. *Exploring premature detachment of radio-transmitters used on bats in telemetry surveys*. Fort Worth : Departement of Environmental Sciences Texas Christian University.

LE GALL, Enora et DUBOS, Thomas, 2023. *Bilan des analyses approfondies des tendances d'évolution de l'activité des chauves-souris dans les forêts bretonnes - Période 2014/2020*. Synthèse. Groupe Mammalogique Breton.

LUČAN, Radek et RADIL, Jan, 2010. Variability of foraging and roosting activities in adult females of Daubenton's bat (*Myotis daubentonii*) in different seasons. *Biologia*. 15 octobre 2010. Vol. 65, pp. 1072-1080. DOI 10.2478/s11756-010-0124-5.

MAHBUB, Taslim, BHAGWAGAR, Azadan, CHAND, Priyanka, ZUALKERNAN, Imran, JUDAS, Jacky et DGHAYM, Dana, 2024. Bat2Web: A Framework for Real-Time Classification of Bat Species Echolocation Signals Using Audio Sensor Data. *Sensors*. 2024. Vol. 24, n° 9. DOI 10.3390/s24092899.

MARMET, Julie et LEUCHTMANN, Maxime, 2014. Le marquage des Chiroptères : état des lieux. *Rencontres nationales Chauves-souris*. Bourges. 2014.

MATTHÄUS, Laura, KUGELSCHAFTER, Karl et FIETZ, Joanna, 2022. Evaluation of different monitoring methods at maternity roosts of greater mouse-eared bats (*Myotis myotis*). *Biodiversity and Conservation*. 1 mars 2022. Vol. 31, n° 4, pp. 1289-1312. DOI 10.1007/s10531-022-02389-7.

MCCARTHY, Eliane D., MARTIN, John M., BOER, Matthias M. et WELBERGEN, Justin A., 2021. Drone-based thermal remote sensing provides an effective new tool for monitoring the abundance

of roosting fruit bats. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*. 2021. Vol. 7, n° 3, pp. 461-474. DOI 10.1002/rse2.202.

MEIERHOFER, Melissa B., TENA, Elena, LILLEY, Thomas M., DECHMANN, Dina K. N., VOIGT, Christian C., TROITSKY, Tanya S., DE BRUYN, Luc, BRAUN DE TORREZ, Elizabeth, ELDEGARD, Katrine, ELMEROS, Morten, GYSELINGS, Ralf, HOYT, Dillan, JANSSEN, René, JONASSON, Kristin A., LÓPEZ-BAUCELLS, Adrià, MATLOVA, Mariia, MELBER, Markus, PEREA, Santiago, STIDSHOLT, Laura, VALANNE, Valeria, VARGHESE, Mebin George, ZAVATTONI, Giorgio et WELLER, Theodore J., 2025. Re-weighting the 5% tagging recommendation: assessing the potential impacts of tags on the behaviour and body condition of bats. *Mammal Review*. avril 2025. Vol. 55, n° 2. DOI 10.1111/mam.12369.

MENA, José Luis, YAGUI, Hiromi, TEJEDA, Vania, BONIFAZ, Emilio, BELLEMAIN, Eva, VALENTINI, Alice, TOBLER, Mathias W., SÁNCHEZ-VENDIZÚ, Pamela et LYET, Arnaud, 2021. Environmental DNA metabarcoding as a useful tool for evaluating terrestrial mammal diversity in tropical forests. *Ecological Applications*. 2021. Vol. 31, n° 5. DOI 10.1002/eap.2335.

MUSSEAU, Raphaël, ANGELIER, Frédéric, BICHET, Coraline, MILLET, Maurice, ROUSSELLE, Céline, MOREAU, Jérôme et BUSTAMANTE, Paco, 2023. Sensitivity of the European Kingfisher (*Alcedo atthis*) to global change: evidence from home range features and contaminations by trace elements and organic pollutants, a case study in the marshes of Western Europe. In : *4th international Kingfisher conference*. Tleń (Poland). 28 septembre 2023.

OBF, 2025. Observatoire de la pollution lumineuse. *Trame verte et bleue - Centre de ressources* [en ligne]. 25 août 2025. [Consulté le 8 juin 2026]. Disponible à l'adresse : <https://www.trameverteetbleue.fr/observatoire-de-la-pollution-lumineuse>

OFFICE NATIONAL DES FORÊTS, 2023. FEDER POIA - Comprendre pour préserver - Utilisation de la trame verte forestière par les chauves-souris dans les Alpes françaises. *Office national des forêts* [en ligne]. 27 juillet 2023. [Consulté le 16 avril 2026]. Disponible à l'adresse : <https://www.onf.fr/onf/+1b77::feder-poia-comprendre-pour-preserver-utilisation-de-la-trame-verte-forestiere-par-les-chauves-souris-dans-les-alpes-francaises.html>

O'MARA, M. Teague, SCHARF, Anne K., FAHR, Jakob, ABEDI-LARTEY, Michael, WIKELSKI, Martin, DECHMANN, Dina K. N. et SAFI, Kamran, 2019. Overall Dynamic Body Acceleration in Straw-Colored Fruit Bats Increases in Headwinds but Not With Airspeed. *Frontiers in Ecology and Evolution*. 31 mai 2019. Vol. 7. DOI 10.3389/fevo.2019.00200.

ONU, 1992. *Convention sur la diversité génétique*. Rio de Janeiro : Organisation des Nations Unies.

ONU, 2022. *Cadre Mondial de la biodiversité de Kunming à Montréal*. Montréal, Canada : Organisation des Nations Unies.

PERKS, Samantha J., O'CONNELL, Mark J. et GOODENOUGH, Anne E., 2025. Comparing passive acoustic monitoring bat data from commercial and open-source detectors: Evidence to support best practice. *Ecological Solutions and Evidence*. 2025. Vol. 6, n° 3. DOI 10.1002/2688-8319.70103.

POPA-LISSEANU, Ana G., SÖRGEL, Karin, LUCKNER, Anja, WASSENAAR, Leonard I., IBÁÑEZ, Carlos, KRAMER-SCHADT, Stephanie, CIECHANOWSKI, Mateusz, GÖRFÖL, Tamás, NIERMANN, Ivo, BEUNEUX, Grégory, MYŚLAJEK, Robert W., JUSTE, Javier, FONDERFLICK, Jocelyn, KELM, Detlev H. et VOIGT, Christian C., 2012. A Triple-Isotope Approach to Predict the Breeding Origins of European Bats. *PLOS ONE*. 2012. Vol. 7. DOI 10.1371/journal.pone.0030388.

PRUD'HOMME, Sophie, 2015. *Conséquences de l'exposition de l'insecte modèle Aedes aegypti aux polluants des eaux de surface : Des mécanismes moléculaires à la dynamique des populations* [en ligne]. Theses. Université Grenoble Alpes. [Consulté le 4 juin 2026]. Disponible à l'adresse : <https://theses.hal.science/tel-01419174>

RIBATTO, Edouard, 2016. *Inventaire des chiroptères - Suivi acoustique, capture et suivi télémétrique - Espace Naturel Sensible de la Vallée en Barret*. novembre 2016.

ROELEKE, Manuel, BLOHM, Torsten, KRAMER-SCHADT, Stephanie, YOVEL, Yossi et VOIGT, Christian C., 2016. Habitat use of bats in relation to wind turbines revealed by GPS tracking. *Scientific Reports*. 4 juillet 2016. Vol. 6, n° 28961. DOI 10.1038/srep28961.

ROEMER, Charlotte, HAQUART, Alexandre, LÓPEZ-BAUCELLS, Adrià et BESNARD, Aurélien, 2025. Current frontiers in the passive acoustic monitoring of bats. *Methods in Ecology and Evolution*. 2025. Vol. 16, n° 11. DOI 10.1111/2041-210X.70157.

SALAÜN, Loïc, 2023. Méthodes d'études des Chiroptères. *Groupe Chiroptères Centre-Val-de-Loire* [en ligne]. 2023. [Consulté le 18 juin 2026]. Disponible à l'adresse : <https://chauves-souris-centre.fr/methodes-detudes-des-chiropteres/>

SALGANÉK, Skye, WELLER, Theodore J. et SZEWCZAK, Joseph M., 2022. Autumn roost-site selection by male hoary bats (*Lasiurus cinereus*) in northern California. *Journal of Mammalogy*. 1 octobre 2022. Vol. 103, n° 5, pp. 1103-1111. DOI 10.1093/jmammal/gyac055.

SANCHEZ, Daniel E., WALKER, Faith M., MARRIOTT, Savannah J., RILEY, Anna L., STANKAVICH, Sarah, ADAMS, Amanda M., SOLICK, Donald, BRADLEY, Doug et NEWMAN, Christian, 2025. Out in the Open: Investigating Passive Airborne eDNA Detection of Bats at Artificial Feeding Stations. *Environmental DNA*. 2025. Vol. 7, pp. 14. DOI 10.1002/edn3.70108.

SANCHEZ-BAYO, Francisco et WYCKHUYS, Kris A. G., 2019. Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers. *Biological Conservation*. 2019. Vol. 232, pp. 8-27. DOI 10.1016/j.biocon.2019.01.020.

SECRÉTARIAT DE LA CONVENTION DE RAMSAR, 2018. *Perspectives mondiales des zones humides - L'état mondial des zones humides et de leurs services à l'humanité 2018*. Suisse. Convention de Ramsar sur les zones humides.

SIMONNET, Franck, 2015. *Atlas des mammifères de Bretagne*. Lopérec : Locus solus. ISBN 978-2-36833-092-0.

SIMONNET, Franck et DUBOS, Thomas, 2025. *Liste Rouge des Mammifères menacés de Bretagne - Révision 2025*. décembre 2025.

TEAM CHIRO CESCO, [sans date]. Plateforme CACCHI - Coordination et Animation de la Capture CHiroptère. *Team-Chiro* [en ligne]. [Consulté le 27 août 2026]. Disponible à l'adresse : <https://croemer3.wixsite.com/teamchiro/cacchi?lang=fr>

TEETS, Katherine D., LOEB, Susan C. et JACHOWSKI, David S., 2019. Detection Probability of Bats Using Active Versus Passive Monitoring. *Acta Chiropterologica*. 5 octobre 2019. Vol. 21, n° 1, pp. 205. DOI 10.3161/15081109ACC2019.21.1.017.

TOURNAYRE, Orianne, LEUCHTMANN, Maxime, GALAN, Maxime, TRILLAT, Marine, PIRY, Sylvain, PINAUD, David, FILIPPI-CODACCIONI, Ondine, PONTIER, Dominique et CHARBONNEL, Nathalie, 2021. eDNA metabarcoding reveals a core and secondary diets of the greater horseshoe bat with strong spatio-temporal plasticity. *Environmental DNA*. 2021. Vol. 3, pp. 277-296. DOI 10.1002/edn3.167.

U-BLOX, 2025. *AssistNow - assisted GNSS (A-GNSS) service*. Notice d'utilisation.

VAN LEEUWEN, Pauline et MICHAUX, Johan, 2023. Using eDNA for mammal inventories still needs naturalist expertise, a meta-analysis. *Ecology and Evolution*. 2023. Vol. 13, n° 12. DOI 10.1002/ece3.10788.

WILD, Timm A., KOBLITZ, Jens C., DECHMANN, Dina K. N., DIETZ, Christian, MEBOLDT, Mirko et WIKELSKI, Martin, 2022. Micro-sized open-source and low-cost GPS loggers below 1 g minimise the impact on animals while collecting thousands of fixes. GILESTRO, Giorgio F. (éd.), *PLOS ONE*. 29 juin 2022. Vol. 17, n° 6. DOI 10.1371/journal.pone.0267730.

WILD, Timm A., VAN SCHALKWYK, Louis, VILJOEN, Pauli, HEINE, Georg, RICHTER, Nina, VORNEWEG, Bernd, KOBLITZ, Jens C., DECHMANN, Dina K. N., ROGERS, Will, PARTECKE, Jesko, LINEK, Nils, VOLKMER, Tamara, GREGERSEN, Troels, HAVMØLLER, Rasmus W., MORELLE, Kevin, DAIM, Andreas, WIESNER, Miriam, WOLTER, Kerri, FIEDLER, Wolfgang, KAYS, Roland, EZENWA, Vanessa O., MEBOLDT, Mirko et WIKELSKI, Martin, 2023. A multi-species evaluation of digital wildlife monitoring using the Sigfox IoT network. *Animal Biotelemetry*. 25 mars 2023. Vol. 11, pp. 13. DOI 10.1186/s40317-023-00326-1.

WWF, 2024. *Rapport Planète Vivante 2024 - Un système en péril*. Gland, Suisse : World Wide Fund.

ZUALKERNAN, Imran, JUDAS, Jacky, MAHBUB, Taslim, BHAGWAGAR, Azadan et CHAND, Priyanka, 2021. An AIoT System for Bat Species Classification. In : *2020 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence System (IoTIS)*. janvier 2021. pp. 155-160.

Annexes

Annexe i : Liste rouge des Chiroptères de Bretagne (adapté de Simonnet, Dubos (2025))

EN : en danger d'extinction, VU : vulnérable, NT : quasi-menacé, LC : préoccupation mineure, DD : données insuffisantes, NA : non applicable.

Famille	Nom commun	Nom latin	Liste Rouge Bretagne (2025)	Liste Rouge France (2017)	Liste Rouge mondial
Rhinolophidés	Grand Rhinolophe	<i>Rhinolophus ferrumequinum</i>	LC	LC	LC
	Petit Rhinolophe	<i>Rhinolophus hipposideros</i>	NT	LC	LC
Vespertilionidés	Vespertilion bicolore	<i>Vespertilio murinus</i>	NA	DD	LC
	Sérotine commune	<i>Eptesicus serotinus</i>	LC	NT	LC
	Noctule de Leisler	<i>Nyctalus leisleri</i>	NT	NT	LC
	Noctule commune	<i>Nyctalus noctula</i>	EN	VU	LC
	Pipistrelle commune	<i>Pipistrellus pipistrellus</i>	NT	NT	LC
	Pipistrelle pygmée	<i>Pipistrellus pygmaeus</i>	DD	LC	LC
	Pipistrelle de Nathusius	<i>Pipistrelle nathusii</i>	NT	NT	LC
	Pipistrelle de Kuhl	<i>Pipistrelle kuhlii</i>	LC	LC	LC
	Barbastelle d'Europe	<i>Barbastella barbastellus</i>	LC	LC	NT
	Oreillard roux	<i>Plecotus auritus</i>	LC	LC	LC
	Oreillard gris	<i>Plecotus austriacus</i>	LC	LC	LC
	Murin à oreilles échancrées	<i>Myotis emarginatus</i>	LC	LC	LC
	Murin de Natterer	<i>Myotis nattereri</i>	LC	LC	LC
	Murin à moustaches	<i>Myotis mystacinus</i>	LC	LC	LC
	Murin d'alcaïde	<i>Myotis alcathoe</i>	DD	LC	DD
	Murin de Bechstein	<i>Myotis bechsteinii</i>	VU	NT	NT
	Murin de Daubenton	<i>Myotis daubentonii</i>	VU	LC	LC
	Grand Murin	<i>Myotis myotis</i>	NT	LC	LC
Minioptéridés	Minioptère de Schreibers	<i>Miniopterus schreibersii</i>	NA	VU	NT

Annexe ii : Récapitulatif des ressources utilisées par technologie

Les études apparaissent dans la bibliographie

Technologie	Nombre	Ressources
VHF	6	Augusteyn et al. 2017 ; Epstein, Newman 2011 ; Gottwald et al. 2023 ; Lawton 2021 ; Office national des forêts 2023 ; Salganek, Weller, Szewczak 2022
GPS	17	Voir annexe iv
Détection acoustique automatique	8	Brinkløv et al. 2023 ; Kotila et al. 2023 ; Mahbub et al. 2024 ; Perks, O'Connell, Goodenough 2025 ; Ribatto 2016 ; Roemer et al. 2025 ; Teets, Loeb, Jachowski 2019 ; Zualkernan et al. 2021
Suivi automatisé par imagerie	4	Azmy et al. 2012 ; Krivek 2023 ; Matthäus, Kugelschafter, Fietz 2022 ; McCarthy et al. 2021
Métabarcodage	5	Gidora 2025; Mena et al. 2021; Sanchez et al. 2025; Tournayre et al. 2021; Van Leeuwen, Michaux 2023
Analyse d'isotopes stables	5	Brewer, Rauch-Davis, Fraser 2021; Chornelia, Lu, Hughes 2025; Fraser, McKinnon, Diamond 2010; Herrera M. et al. 2001; Popa-Lisseanu et al. 2012
IoT	6	Duda et al. 2018; Hurme et al. 2025; Lauridsen et al. 2017; Mahbub et al. 2024; Wild et al. 2023; Zualkernan et al. 2021

Annexe iii : Fiche de la synthèse bibliographique sur la télémétrie VHF

Télémétrie VHF traditionnelle

Outil standard et le plus courant pour le suivi des petites chauves-souris.

Description de cette technique

- Un **émetteur** sur le dos de l'animal, émettant un signal électromagnétique sur une fréquence radio spécifique.
- Un **système de réception**, composé d'une antenne et d'un récepteur convertissant le signal radio en bip sonore audible ou données numériques. Changement de la fréquence du bip ou de l'intensité sonore en fct de la distance entre l'émetteur et l'antenne.
- Deux types de suivi :
 - o **Suivi manuel** : localisation de l'animal à pied ou en véhicule avec la technique du 'homing-in' (se rapprocher autant que possible de l'animal, c'est-à-dire percevoir le bip de l'émetteur dans toutes les directions avec le gain du récepteur au minimum, l'animal se trouve à +/- 50 m) ou par triangulation.
 - o **Suivi automatisé** avec des stations fixes : enregistrement des signaux par des réseau comme tRackIT ou Lotek SRX-800. Captation de la puissance du signal, la fréquence et la durée.

Paramètres exploités

- Puissance et variations du signal
- Direction du signal et position géographique de l'animal par utilisation d'antennes directionnelles.
- Fréquence radio différente pour chaque émetteur → suivi de plusieurs indiv de manière simultanée sans confusion.
- Durée du signal et heure de réception.

Métriques utilisées

- **Détection des mouvements** par calcul de la variance, de l'écart-type et de la somme des carrés de la puissance du signal.
- **Forme de la distribution** de la puissance du signal pour classer l'activité : ChS active ou passive.
- **Précision de la localisation** en fonction du gain du récepteur en « Homing-in » et/ou de la finesse de la triangulation
- **Suivi de l'activité** : durée totale de l'activité, heure de début et de fin d'activité, nombre et durée des pauses, et heure de pic d'activité.
- **Sélection de l'habitat** : distance par rapport aux éléments du paysage pour déterminer les préférences de gîte ou de chasse, comparaison des milieux avec les plus fortes densités de localisations (analyses Kernel) avec les milieux disponibles (analyse de « Minimum Convex Polygon » ou autre).
- Préférence pour les arbres émergents → différence entre la hauteur max d'un arbre abritant des ChS et la hauteur moyenne des arbres de cette forêt.

De performance

- **Précision globale** : score F1, sensibilité et spécificité → fiabilité de la distinction entre le repos et le vol.

Avantages et limites

Avantages

- Émetteurs très légers (les plus petits à 0.15 g).
- Coût raisonnable des émetteurs.
- Précision de localisation : ~ 5 mètres si utilisation de la triangulation mais peut aller jusqu'à quelques kilomètres.

Limites

- Moyens humains nécessaires très lourds avec des nuits entières de travail de plusieurs personnes (3 équipes de 2 personnes pour le suivi d'une ChS, *source : Dubos T. comm. pers.*).
- Portée limitée par des obstacles physiques comme la végétation dense ou le relief, et portée typique de quelques centaines de mètres à 3-4 km en conditions de terrain en Bretagne.
- Sensibilité aux variations environnementales (T°C, humidité).
- Aléa du matériel → endommagement des antennes des émetteurs par les chauves-souris, dysfonctionnements réguliers des émetteurs de par leur miniaturisation.
- Autonomie moyenne : de quelques jours à quelques semaines.

Exemples de programme utilisant cette technologie

- Dans le cadre du projet européen POIA (Programme Opérationnel Interrégional du Massif Alpin) financé par le FEDER : analyse du comportement des chauves-souris dans les zones forestières et comparaison de leur activité et la fonctionnalité des milieux (ONF, 2020 – 2022).
- Système tRackIT : système de radio-télémétrie automatique, positions en temps réel (<https://trackit.systems/en/radiotelemetry/>).

Références

- AUGUSTEYN, John, HUGHES, Jane, ARMSTRONG, Graeme, REAL, Kathryn et PACIONI, Carlo, 2017. Tracking and tracing central Queensland's Macroderma – determining the size of the Mount Etna ghost bat population and potential threats. *Australian Mammalogy*. 2017. Vol. 40. DOI [10.1071/AM16010](https://doi.org/10.1071/AM16010).
- EPSTEIN, Jonathan H. et NEWMAN, Scott H., 2011. The use of telemetry to understand bat movement and ecology. In : *Investigating the role of bats in emerging zoonoses: balancing ecology, conservation and public health interest*. Rome : FAO. pp. 151-161. FAO animal production and health, 12. ISBN 978-92-5-107028-4.
- GOTTWALD, Jannis, ROYAUTÉ, Raphaël, BECKER, Marcel, GEITZ, Tobias, HÖCHST, Jonas, LAMPE, Patrick, LEISTER, Lea, LINDNER, Kim, MAIER, Julia, RÖSNER, Sascha, SCHABO, Dana G., FREISLEBEN, Bernd, BRANDL, Roland, MÜLLER, Thomas, FARWIG, Nina et NAUSS, Thomas, 2023. Classifying the activity states of small vertebrates using automated VHF telemetry. *Methods in Ecology and Evolution*. 2023. Vol. 14, pp. 252-264. DOI [10.1111/2041-210X.14037](https://doi.org/10.1111/2041-210X.14037).
- LAWTON, Katie, 2021. *Exploring premature detachment of radio-transmitters used on bats in telemetry surveys*. Fort Worth : Departement of Environmental Sciences Texas Christian University.
- OFFICE NATIONAL DES FORÊTS, 2023. FEDER POIA - Comprendre pour préserver - Utilisation de la trame verte forestière par les chauves-souris dans les Alpes françaises. *Office national des forêts* [en ligne]. 27 juillet 2023. [Consulté le 16 avril 2026]. Disponible à l'adresse : https://www.onf.fr/onf/+/_1b77::feder-poia-comprendre-pour-preserver-utilisation-de-la-trame-verte-forestiere-par-les-chauves-souris-dans-les-alpes-francaises.html
- SALGANEK, Skye, WELLER, Theodore J. et SZEWCZAK, Joseph M., 2022. Autumn roost-site selection by male hoary bats (*Lasiurus cinereus*) in northern California. *Journal of Mammalogy*. 1 octobre 2022. Vol. 103, n° 5, pp. 1103-1111. DOI [10.1093/jmammal/gyac055](https://doi.org/10.1093/jmammal/gyac055).

Annexe iv : Fiche de la synthèse bibliographique sur les balises GPS miniaturisées

Balises GPS miniaturisées

Défi technique consistant à réduire le poids des balises pour respecter la règle expliquant qu'il ne faut pas que le matériel dépasse 5 % (ou 10% dans certaines circonstances) du poids de l'animal.

Description de cette technique

- Utilisation de balises légères (entre 0.95 g – Pathtrack nanoFix – à 1.5 g – Technosmart Gipsy 6) comprenant un module GPS, une antenne, un microcontrôleur pour coordonner les tâches, une mémoire de stockage (EEPROM ou FRAM) et une batterie.
- Récupération des données de deux manières : **Data Loggers** (données stockées dans la balise, nécessité d'une recapture de l'animal ou récupération de la balise si elle est tombée) ; **téléchargement à distance** (transfert des données par liaison radio UHF, Bluetooth ou satellite pour des systèmes comme ARGOS ou ICARUS – récupération par satellite souvent plus lourde et énergivore).

Paramètres exploités

- Données de localisation (**coordonnées géographiques X, Y**) pouvant être précises à quelques mètres près.
- **Altitude (Z)** : moins précise que la position horizontale.
- **Accélérométrie** : accélération corporelle dynamique globale, permettant de distinguer la phase de repos, le vol stable ou la phase de chasse active.
- **Capteurs environnementaux** : température, pression atmosphérique, niveaux de lumière, ...

/!\ Plus il y a de capteurs sur la balise, plus elle est lourde.

Métriques utilisées

De performance technologique :

- **Nb de fixes** : nb total de localisation GPS enregistrées par balise.
- **Taux de succès des fixes (%)** : proportion de tentatives de localisation ayant réussi.
- **Précision** : utilisation de l'indice Horizontal Dilution of Precision (HDOP) et du nb de satellites captés pour un filtrage des données.
- **Autonomie de la batterie** (jours) : durée de vie opérationnelle de la balise avant épuisement de l'énergie.
- **Délai du premier point (TTFF)** : tps nécessaire pour obtenir une première position après l'activation.

Pour le suivi des ChS

- **Domaine vital** : calculé via des modèles de Kernel (95 % pour le domaine global et 50 % pour les aires de chasse) ou des polygones convexes minimaux (MCP).
- **Distance au gîte** (km) : distance moyenne ou max séparant le gîte de repos des terrains de chasse.
- **Vitesse de vol** (km/h ou m/s) : vitesse moyenne ou pics de vitesse lors des vols de transit.
- **Altitude de vol** (m) : mesurée par rapport au niveau de la mer, au sol (MNT) ou à la canopée (MNS) pour évaluer les risques de collision avec les éoliennes.
- **Angle de virage** (degrés) : distinguer les phases de chasse sinueuses des vols de transit rectilignes.

- **ODBA** (Overall Dynamic Body Acceleration) : indice d'accélération corporelle permettant de quantifier l'intensité de l'activité et de distinguer le repos du vol actif.
- **Temps de premier passage** (FPT) : temps mis par l'animal pour sortir d'un cercle de rayon défini.
- **Budget temps** : proportion de la nuit allouée à différentes activités.
- **Fidélité au site** : nb de nuits consécutives où un indiv retourne sur un même terrain de chasse.
- **Coefficient de chevauchement** : mesure la ségrégation spatiale ou le partage de ressources entre individus.
- **Proportion d'utilisation de l'habitat** (%) : pourcentage de points de localisation situés dans différents milieux.
- **Distance aux ressources** : variable de distance à l'eau ou aux arbres fruitiers pour modéliser la probabilité de présence.

Avantages et limites

Avantages

- Balises légères pour un suivi de petits animaux.
- Données assez précises (imprécision souvent inférieure à 10 mètres), calculs possibles de vitesses moyennes de déplacement, avec des détails sur les capacités de vol et les performances des animaux.
- Moyens humains réduits à la pose des balises et au relevé des récepteurs (potentiellement même inutile dans les cas de transmissions des données de localisation par réseaux de communication ou satellite), sans nécessité de suivre les animaux en temps réel et en continu.
- Suivi à longue distance possible.
- Distinction possible entre les phases de transit et de chasse et identification possible de sites d'intérêt tels que les gîtes secondaires, des corridors de vols préférentiels ou des arbres de nourrissage spécifiques.

Limites

- Obstruction du signal : signal GPS bloqué par les structures solides ou sous couvert forestier dense.
- Coût : balises commerciales onéreuses.
- Autonomie assez limitée (quelques jours) pour les balises les plus légères
- Précision verticale / altitude : méthodes de calibration complexes à l'aide de drones pour une validation de la fiabilité des données.

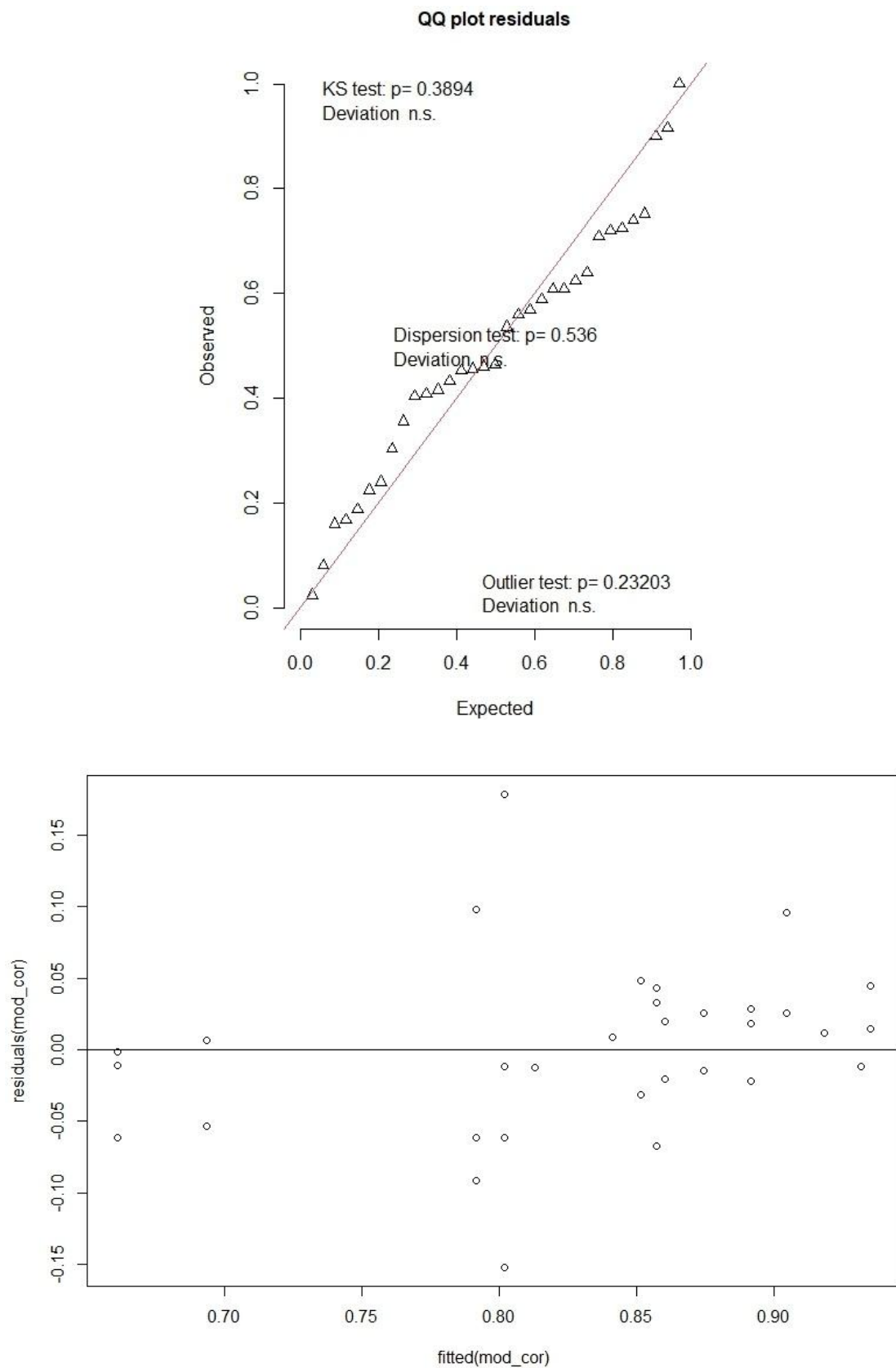
Exemples de programmes utilisant cette technologie

- ICARUS (International Cooperation for Animal Research Using Space) : programme international qui utilise les antennes de l'ISS (Station Spatiale Internationale) pour recevoir les données de balises GPS posées sur des oiseaux ou des chauves-souris pour suivre les migrations.
- Programmes liés à EUROBATS (Accord sur la conservation des populations de chauves-souris en Europe).
- Projet BATS : projet financé par la Fondation allemande pour la science (DFG) ayant pour but de suivre le comportement des chauves-souris en milieu naturel via un réseau de capteurs sans fil à ultra-basse consommation.

Références

- BEUCHER, Yannick, DARNIS, Thomas et PARMAIN, Vincent, 2021. Utilisation de balises GPS pour étudier l'écologie de la Grande noctule (*Nyctalus lasiopterus*) : retours d'expériences. In : *Actes de la XVIIIe Rencontre nationale Chauves-souris de la S.F.E.P.M.* Bourges : Rémuce. mars 2021. pp. 37-48. ISBN 0395-8957.
- CASTLE, Kevin T., WELLER, Theodore J., CRYAN, Paul M., HEIN, Cris D. et SCHIRMACHER, Michael R., 2015. Using sutures to attach miniature tracking tags to small bats for multimonth movement and behavioral studies. *Ecology and Evolution*. juillet 2015. Vol. 5, n° 14. DOI [10.1002/ece3.1584](https://doi.org/10.1002/ece3.1584).
- CONENNA, Irene, LÓPEZ-BAUCELLS, Adrià, ROCHA, Ricardo, RIPPERGER, Simon et CABEZA, Mar, 2019. Movement seasonality in a desert-dwelling bat revealed by miniature GPS loggers. *Movement Ecology*. 16 août 2019. Vol. 7, pp. 27. DOI [10.1186/s40462-019-0170-8](https://doi.org/10.1186/s40462-019-0170-8).
- CVIKEL, Noam, EGERT BERG, Katya, LEVIN, Eran, HURME, Edward, BORISSOV, Ivailo, BOONMAN, Arjan, AMICHAÏ, Eran et YOVEL, Yossi, 2015. Bats Aggregate to Improve Prey Search but Might Be Impaired when Their Density Becomes Too High. *Current Biology*. janvier 2015. Vol. 25, n° 2, pp. 206-211. DOI [10.1016/j.cub.2014.11.010](https://doi.org/10.1016/j.cub.2014.11.010).
- DUDA, Niklas, NOWAK, Thorsten, HARTMANN, Markus, SCHADHAUSER, Michael, CASSENS, Björn, WÄGEMANN, Peter, NABEEL, Muhammad, RIPPERGER, Simon, HERBST, Sebastian, MEYER-WEGENER, Klaus, MAYER, Frieder, DRESSLER, Falko, SCHRÖDER-PREIKSCHAT, Wolfgang, KAPITZA, Rüdiger, ROBERT, Jörg, THIELECKE, Jörn, WEIGEL, Robert et KÖLPIN, Alexander, 2018. BATS: Adaptive Ultra Low Power Sensor Network for Animal Tracking. *Sensors*. octobre 2018. N° 18. DOI [10.3390/s18103343](https://doi.org/10.3390/s18103343).
- FUJIOKA, Emyo, YOSHIMURA, Koki, UJINO, Tomohiro, YODA, Ken, FUKUI, Dai et HIRYU, Shizuko, 2020. *Selection of foraging and commuting habitats of the greater horseshoe bat, revealed by high-resolution GPS-tracking*. 21 février 2020.
- HURME, Edward, GURARIE, Eliezer, GREIF, Stefan, HERRERA M., L. Gerardo, FLORES-MARTÍNEZ, José Juan, WILKINSON, Gerald S. et YOVEL, Yossi, 2019. Acoustic evaluation of behavioral states predicted from GPS tracking: a case study of a marine fishing bat. *Movement Ecology*. 14 juin 2019. Vol. 7, n° 21. DOI [10.1186/s40462-019-0163-7](https://doi.org/10.1186/s40462-019-0163-7).
- LAGERVELD, Sander et MOSTERT, Kees, 2023. Are offshore wind farms in the Netherlands a potential threat for coastal populations of noctule? *Lutra*. 15 décembre 2023. Vol. 66, pp. 39-53. DOI [10.63269/SJL5380](https://doi.org/10.63269/SJL5380).
- MANDL, Isabella, ABDOU, Badrane Ben Ali, SAID, Ishaka, O'MARA, Teague, FLANDERS, Jon, CHAIHANE, Sourette Said Ali, LEWIS, Owen T., MOHAMED, Misbahou et DOULTON, Hugh, 2025. Home ranges, feeding sites, and daily movement behavior of the highly threatened Livingstone's fruit bat revealed through GPS tracking. *Conservation Science and Practice*. 12 décembre 2025. DOI [10.1111/csp2.70208](https://doi.org/10.1111/csp2.70208).
- NAĐO, Ladislav, LÖBBOVÁ, Denisa, HAPL, Ervín, CEEUCH, Martin, UHRIN, Marcel, ŠARA, Michal et KAŇUCH, Peter, 2019. Highly selective roosting of the giant noctule bat and its astonishing foraging activity by GPS tracking in a mountain environment. *Mammal Research*. 20 juillet 2019. Vol. 64, n° 4, pp. 587-594. DOI [10.1007/s13364-019-00446-1](https://doi.org/10.1007/s13364-019-00446-1).
- NYSSSEN, Pierrette, BECKERS, Aarnaud, RENARD, Perrine et GODEAU, Jean-François, 2023. *Étude de l'utilisation de l'espace et du temps par le grand murin par GPS loggers miniaturisés, Rapport final*. Ecofirst et CSD Ingénieurs.
- RAVON, Sébastien, 2016. *Suivi GPS de Pteropus Lylei à l'interface chauves-souris humains : intérêt pour la conservation et l'étude du risque d'émergence du virus Nipah au Cambodge*. Thèse d'exercice. ENVT : Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse.
- RERUCHA, Simon, JEDLICKA, Petr, HRABINA, Jan, CIZEK, Martin, MIKEL, Bretislav, CIP, Ondrej, BARTONICKA, Tomas et HELAN, Radek, 2017. Miniaturized GPS position logger for tracking of small mammals. In : *6th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*. Montenegro. juin 2017. pp. 1-4.
- ROELEKE, Manuel, BLOHM, Torsten, KRAMER-SCHADT, Stephanie, YOVEL, Yossi et VOIGT, Christian C., 2016. Habitat use of bats in relation to wind turbines revealed by GPS tracking. *Scientific Reports*. 4 juillet 2016. Vol. 6, n° 28961. DOI [10.1038/srep28961](https://doi.org/10.1038/srep28961).
- VINET, Olivier, COLOMBO, Raphaël, GATTUS, Jean-Christophe et BOURLON, Sophie, 2019. Étude télémétrique du Grand Rhinolophe dans le site Natura 2000 du massif du Luberon, été 2018 Test d'une technologie de télémétrie par GPS. *Courrier scientifique du Parc naturel régional du Luberon et de la Réserve de biosphère Luberon-Lure*. 2020 2019. N° 16, pp. 118-127.
- WELLER, Theodore J., CASTLE, Kevin T., LIECHTI, Felix, HEIN, Cris D., SCHIRMACHER, Michael R. et CRYAN, Paul M., 2016. First Direct Evidence of Long-distance Seasonal Movements and Hibernation in a Migratory Bat. *Scientific Reports*. 4 octobre 2016. Vol. 6, n° 34585. DOI [10.1038/srep34585](https://doi.org/10.1038/srep34585).
- WILD, Timm A., KOBLITZ, Jens C., DECHMANN, Dina K. N., DIETZ, Christian, MEBOLDT, Mirko et WIKELSKI, Martin, 2022. Micro-sized open-source and low-cost GPS loggers below 1 g minimise the impact on animals while collecting thousands of fixes. GILESTRO, Giorgio F. (éd.), *PLOS ONE*. 29 juin 2022. Vol. 17, n° 6. DOI [10.1371/journal.pone.0267730](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0267730).
- WILMART, Antonin, 2025. *Amélioration des connaissances de la population de Grande Noctule de la Montagne noire. Synthèse des résultats 2024* [en ligne]. Groupe Chiroptères Languedoc-Roussillon pour l'Office Nationale des Forêts.
- Disponible à l'adresse : https://drive.google.com/file/d/119_ohr_T-6XtPb46730Iyy46nFTHHP-t/view

Annexe v : Conditions d'application du modèle linéaire mixte du taux de réussite en fonction de la fréquence d'acquisition sur les données GPS de Bretagne Vivante – QQplot des résidus simulés du modèle (haut) et résidus en fonction des valeurs ajustées du modèle (bas)



Annexe vi : Comparaison de la quantité et qualité des données récoltées par suivi GPS ou suivi télémétrique

MyoMyo : Grand Murin, MyoCap : Murin de Capaccini, RhiEur : Rhinolophe euryale, RhiHip : Petit Rhinolophe, MyoDau : Murin de Daubenton

ND = non disponible

**Le nombre de points par nuit et le nombre de nuits-individus ont été calculé sur les 15 chauves-souris analysées (celles qui avaient le plus de fixes en chasse)*

Méthode	Etude	Espèce suivie	N individus	N nuits-individus	Fréquence théorique	Points / nuit	Points / h	Intervalle réel	Taux de réussite	Effort humain connu
GPS	BV 2024	MyoMyo	7	20	4 min	79 [49-85]	13 [9-15]	4 [1-60]	88 [65-98]	1 passage tous les jours pour récupérer les données
GPS	BV 2024	MyoMyo	3	7	5 min	31 [28-68]	7 [7-12]	8 [1-24]	66 [60-100]	
GPS	BV 2024	MyoMyo	3	5	6 min	46 [43-53]	8 [7-8]	6 [5-36]	82 [80-90]	
GPS	BV 2024	MyoMyo	2	2	8 min	38 [36-40]	6	8 [2-24]	92.5 [92-93]	
VHF	Almenar et al, 2009*	MyoCap	45	149	10 min	14 [2.8-41]	ND	ND	ND	6 équipes simultanées
VHF	Augusteyn et al, 2017	<i>Macroderma gigas</i>	3	56	10 min	ND	ND	ND	ND	ND
VHF	Barataud et al., 2009	RhiEur	8	43	5 min	5.5 [3-15.25]	ND	ND	ND	>3 pers
VHF	Belli et al., 2026	MyoDau	14	90	5 min	26.1 [0.9-65.3]	ND	ND	ND	ND
VHF	Dubos, 2004	RhiHip	20	38	5 min	ND	ND	ND	ND	8 pers / 3 animaux
VHF	Rist, Beuneux et Courtois, 2010	MyoCap	25	43	ND	ND	ND	ND	ND	2 - 11 pers/ session

Annexe vii : Détail du devis obtenu pour l'acquisition de cinq puces picoFix GPS et du matériel associé

	<i>Livres sterling</i>	<i>Euro</i>
<i>Puces (x5)</i>	£ 2 475	2 896 €
<i>Câble de programmeur (x1)</i>	£ 90	316 €
<i>Assurance et frais de livraison</i>	£ 65	76 €
<i>Total hors TVA</i>	£ 2 630	3 077 €
<i>Prix TTC</i>	£ 3 156	3 693 €

Annexe viii : Demande de dérogation de capture pour la pose de GPS sur plusieurs murins de Daubenton



MUSEUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE
PLATEFORME CACCHI
43 RUE BUFFON, BP135, 75005 PARIS
Tel. : 01.40.79.57.64, Email : julie.marmet@mnhn.fr

A Paris, le 10/03/2026

Attestation de référencement CACCHI

Vu l'Arrêté Ministériel délivré par la Ministre de la Transition Ecologique et Solidaire portant dérogation à la protection stricte des espèces, dérogation aux interdictions de capture, de prélèvement, d'enlèvement, de transport, de détention, d'utilisation et de destruction de spécimens (ainsi que de parties de spécimens et d'échantillons de matériel biologique) d'espèces protégées de Chiroptères (en application des articles L. 411-1 et L. 411-2 du code de l'environnement) daté du 02 juin 2020 (valable 5 ans), déposée par le Muséum national d'histoire naturelle (MNHN) et l'arrêté modifiant l'arrêté du 2 juin 2020 stipulant que cette dérogation est reconduite jusqu'au 31 décembre 2026 ;

Julie MARMET, coordinatrice de la plateforme CACCHI (Coordination et Animation de la Capture des Chiroptères) certifie que le programme concepteur « Localisation de gîtes de mise-bas de Grand rhinolophe et Murin de Daubenton en Bretagne par l'utilisation de puces GPS », sous la responsabilité de Thomas DUBOS (GMB) et Ronan NEDELEC, est désormais référencé (N° de référencement : PROGACCHI_030) au sein de la plateforme CACCHI pour la période du 01/04/2026 – 31/12/2026.

Périmètre du projet :

Espèce(s) concernée(s) : *Rhinolophus ferrumequinum* et *Myotis daubentonii* et toutes espèces de Chiroptères de France métropolitaine susceptibles d'être capturées de manière collatérale (capture uniquement).

Zone(s) géographique(s) concernée(s) : Bretagne et Pays-de-la-Loire

Moyens de captures autorisés : Filet, harp trap

Marquage permanent autorisé : aucun

Pose d'équipement externe pour géolocalisation autorisé : GPS (*Rhinolophus ferrumequinum* et *Myotis daubentonii*)

Prélèvements autorisés : aucun

Coordinatrice scientifique de la
plateforme CACCHI

Muséum national d'Histoire naturelle

Julie Marmet

Annexe ix : Matrice de confusion du mouvement prédit et réel avec un seuil de vitesse de 1.25 km/h

Prédiction	Mobile	Immobile
Réel		
Mobile	106	11
Immobile	5	46

Annexe x : Indicateurs tirés des matrices de confusion pour chaque seuil de vitesse

<i>Seuil (km/h)</i>	<i>Bonne classification (%)</i>	<i>Sensibilité (%)</i>	<i>Spécificité (%)</i>
0	0,69642857	1	0
0,05	0,85119048	1	0,50980392
0,1	0,88095238	1	0,60784314
0,15	0,89880952	1	0,66666667
0,2	0,91071429	1	0,70588235
0,25	0,91071429	1	0,70588235
0,3	0,92261905	1	0,74509804
0,35	0,92857143	0,99145299	0,78431373
0,4	0,92857143	0,99145299	0,78431373
0,45	0,93452381	0,99145299	0,80392157
0,5	0,94642857	0,99145299	0,84313726
0,55	0,94642857	0,99145299	0,84313726
0,6	0,94642857	0,99145299	0,84313726
0,65	0,94047619	0,98290598	0,84313726
0,7	0,93452381	0,97435897	0,84313726
0,75	0,91071429	0,94017094	0,84313726
0,8	0,91666667	0,94017094	0,8627451
0,85	0,91666667	0,94017094	0,8627451
0,9	0,91666667	0,93162393	0,88235294
0,95	0,91666667	0,93162393	0,88235294
1	0,92261905	0,93162393	0,90196078
1,05	0,92261905	0,93162393	0,90196078
1,1	0,92261905	0,93162393	0,90196078
1,15	0,91071429	0,91452992	0,90196078
1,2	0,91071429	0,91452992	0,90196078
1,25	0,90476191	0,90598291	0,90196078
1,3	0,89285714	0,88888889	0,90196078
1,35	0,88690476	0,88034188	0,90196078
1,4	0,88690476	0,88034188	0,90196078
1,45	0,88690476	0,88034188	0,90196078
1,5	0,88690476	0,88034188	0,90196078
1,55	0,88690476	0,88034188	0,90196078
1,6	0,88690476	0,88034188	0,90196078
1,65	0,88095238	0,87179487	0,90196078
1,7	0,86904762	0,85470086	0,90196078
1,75	0,86309524	0,84615385	0,90196078
1,8	0,86309524	0,84615385	0,90196078

1,85	0,86309524	0,83760684	0,92156863
1,9	0,86309524	0,83760684	0,92156863
1,95	0,86309524	0,83760684	0,92156863
2	0,86904762	0,83760684	0,94117647
2,05	0,86904762	0,83760684	0,94117647
2,1	0,875	0,83760684	0,96078431
2,15	0,875	0,83760684	0,96078431
2,2	0,86904762	0,82905983	0,96078431
2,25	0,86904762	0,82905983	0,96078431
2,3	0,86904762	0,82905983	0,96078431
2,35	0,86904762	0,82905983	0,96078431
2,4	0,86904762	0,82905983	0,96078431
2,45	0,86309524	0,82051282	0,96078431
2,5	0,85714286	0,81196581	0,96078431
2,55	0,8452381	0,7948718	0,96078431
2,6	0,8452381	0,7948718	0,96078431
2,65	0,8452381	0,7948718	0,96078431
2,7	0,8452381	0,7948718	0,96078431
2,75	0,82738095	0,76923077	0,96078431
2,8	0,82738095	0,76923077	0,96078431
2,85	0,82738095	0,76923077	0,96078431
2,9	0,82738095	0,76923077	0,96078431
2,95	0,82738095	0,76923077	0,96078431
3	0,82738095	0,76923077	0,96078431
3,05	0,80952381	0,74358974	0,96078431
3,1	0,80952381	0,74358974	0,96078431
3,15	0,80952381	0,74358974	0,96078431
3,2	0,80952381	0,74358974	0,96078431
3,25	0,80357143	0,73504274	0,96078431
3,3	0,80357143	0,73504274	0,96078431
3,35	0,80357143	0,73504274	0,96078431
3,4	0,79761905	0,72649573	0,96078431
3,45	0,79761905	0,72649573	0,96078431
3,5	0,79761905	0,72649573	0,96078431
3,55	0,79761905	0,72649573	0,96078431
3,6	0,79761905	0,72649573	0,96078431
3,65	0,79761905	0,72649573	0,96078431
3,7	0,78571429	0,70940171	0,96078431
3,75	0,78571429	0,70940171	0,96078431
3,8	0,78571429	0,70940171	0,96078431
3,85	0,78571429	0,70940171	0,96078431
3,9	0,78571429	0,70940171	0,96078431
3,95	0,78571429	0,70940171	0,96078431
4	0,78571429	0,70940171	0,96078431
4,05	0,78571429	0,70940171	0,96078431
4,1	0,77976191	0,7008547	0,96078431

4,15	0,77976191	0,7008547	0,96078431
4,2	0,77380952	0,69230769	0,96078431
4,25	0,77380952	0,69230769	0,96078431
4,3	0,76785714	0,68376068	0,96078431
4,35	0,76785714	0,68376068	0,96078431
4,4	0,76785714	0,68376068	0,96078431
4,45	0,77380952	0,68376068	0,98039216
4,5	0,76785714	0,67521368	0,98039216
4,55	0,74404762	0,64102564	0,98039216
4,6	0,73809524	0,63247863	0,98039216
4,65	0,73809524	0,63247863	0,98039216
4,7	0,73809524	0,63247863	0,98039216
4,75	0,73809524	0,63247863	0,98039216
4,8	0,72619048	0,61538462	0,98039216
4,85	0,7202381	0,60683761	0,98039216
4,9	0,71428571	0,5982906	0,98039216
4,95	0,70833333	0,58974359	0,98039216
5	0,70833333	0,58974359	0,98039216

RESUME

Développement d'une technique de suivi du murin de Daubenton (*Myotis daubentonii*, Kuhl 1817) pour l'étude des déplacements et des corridors de chasse – Choix, premiers tests et plan d'échantillonnage, Eve Léglise, 2026

Le développement des nouvelles technologies a permis, depuis 2005, de réduire la taille des dispositifs de suivi de la faune sauvage, améliorant les connaissances et la conservation des petites espèces. Le Murin de Daubenton (*Myotis daubentonii*, Kuhl 1817), espèce de Chiroptère classée vulnérable en Bretagne fait l'objet depuis 2024 d'un programme de conservation conduit par le Groupe mammalogique breton visant à comprendre les causes de son déclin. L'hypothèse de la destruction des gîtes ayant été rejetée, nous nous intéressons aux déplacements et aux terrains de chasse de cette population.

Pour permettre un déploiement régional du suivi avec des moyens humains limités, une méthode alternative au radiopistage est recherchée. Une synthèse bibliographique des nouvelles technologies de suivi des Chiroptères et une comparaison avec le radiopistage ont conduit à retenir la technologie GPS. Des tests réalisés avec une puce GPS fabriquée en interne, pesant 0.75 g, ont permis d'obtenir 101 localisations en une nuit sur un Murin de Daubenton et d'identifier un terrain de chasse. Des tests complémentaires réalisés sur l'eau n'ont montré aucun effet notable de la miniaturisation sur les performances de la puce. Ces résultats, complétés par la bibliographie, ont permis d'élaborer un plan d'échantillonnage, prévoyant le suivi de 108 femelles pendant trois nuits, dans quatre contextes et trois périodes.

Ce dispositif GPS constitue le plus petit jamais déployé sur une chauve-souris et apporte une première preuve de faisabilité d'un suivi GPS par un dispositif de 0.75 g. Des améliorations, notamment de son autonomie, restent nécessaires avant un déploiement régional.

Mots-clés : *Myotis daubentonii*, balise GPS, échantillonnage, conservation, Bretagne

ABSTRACT

Since 2005, advances in technology have made it possible to reduce the size of wildlife tracking devices, thereby improving our understanding and conservation of small-bodied species. Daubenton's bat (*Myotis daubentonii*, Kuhl 1817), a bat species classified as vulnerable in Brittany, has been the subject of a conservation program led by the Groupe mammalogique breton since 2024, aimed at understanding the causes of its decline. Since the hypothesis of roost destruction has been ruled out, we are now focusing on the movements and foraging areas of this population.

To enable regional deployment of the monitoring program with limited human resources, an alternative method to radiotracking is being sought. A literature review of new bat tracking technologies and a comparison with radiotracking led to the selection of GPS technology. Tests using a 0.75-g GPS tag developed internally provided 101 locations in a single night from a Daubenton's bat and identified a foraging area. Additional tests conducted over water showed no notable effect of miniaturization on the tag's performance. These results, supplemented by the literature review, enabled the development of a sampling plan to track 108 females over three nights, across four landscape contexts and three time periods.

The GPS device is the smallest ever attached on a bat and provides initial evidence that GPS tracking is feasible using a device weighing 0.75 g. Improvements, particularly in terms of batterie life, are still needed before regional-scale deployment.

Key words: *Myotis daubentonii*, GPS tag, sampling, conservation, Brittany