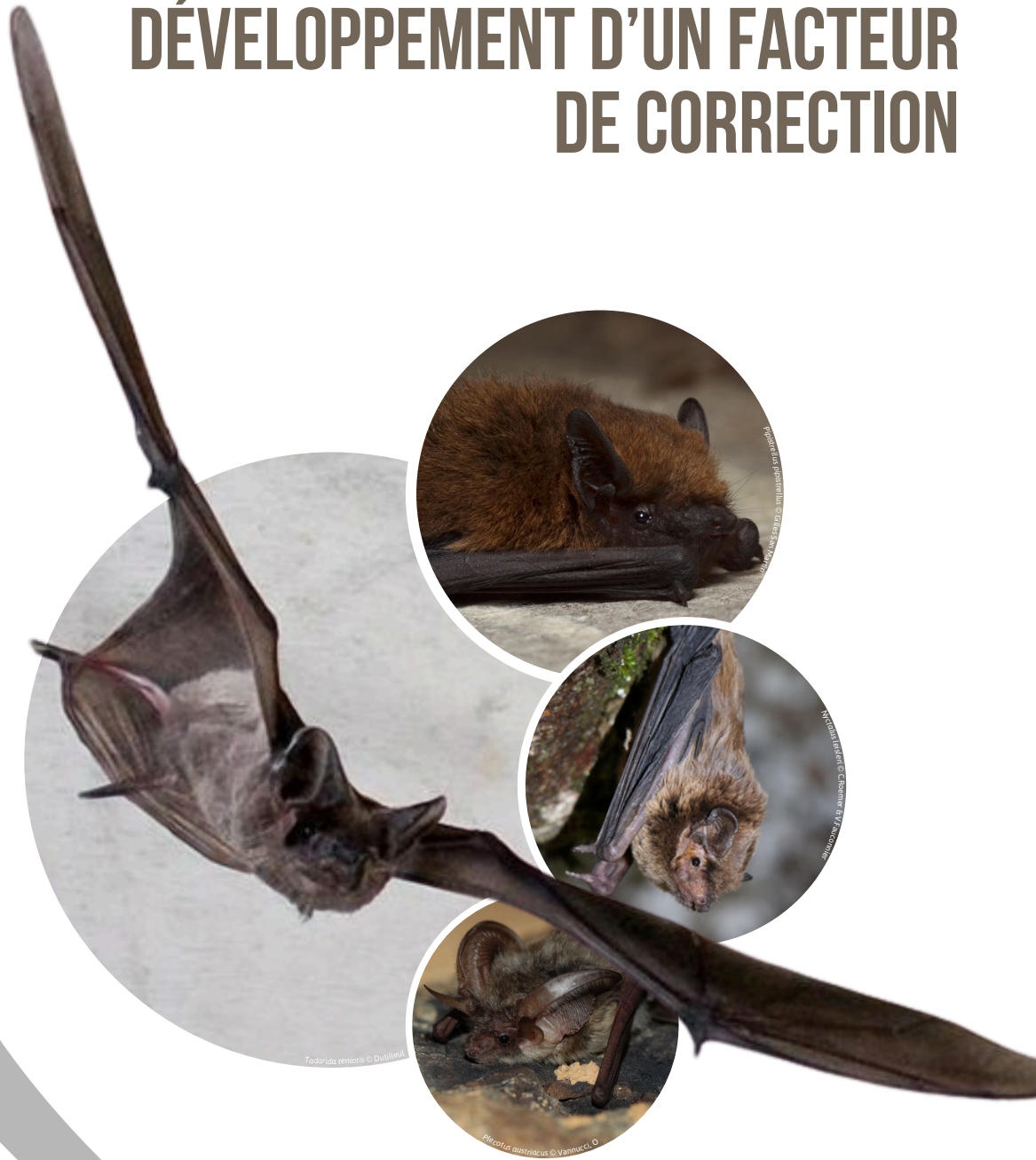


MASTER BIODIVERSITÉ  
ÉCOLOGIE ÉVOLUTION  
PREMIÈRE ANNÉE  
2024 - 2025

# SOLUTION AUX BIAIS DE SENSIBILITÉ ENTRE DIFFÉRENTS DÉTECTEURS ACOUSTIQUES DE CHIROPTÈRES : DÉVELOPPEMENT D'UN FACTEUR DE CORRECTION



BESNIER NATHAN & DRET LAUREEN  
ENCADRÉS PAR :  
ROEMER CHARLOTTE

# Charte relative à la lutte contre le plagiat de l'Université d'Aix-Marseille

*Approuvée par le Conseil des Études et de la Vie Universitaire de l'Université d'Aix-Marseille en date du 4 octobre 2012,*

*Approuvée par le Conseil Scientifique de l'Université d'Aix-Marseille en date du 16 octobre 2012,*

*Approuvée par le Conseil d'Administration de l'Université d'Aix-Marseille en date du 27 novembre 2012,*

## **Préambule**

Afin de garantir la qualité des diplômes délivrés à ses usagers, l'originalité des publications pédagogiques et scientifiques de ses personnels enseignants et/ou chercheurs, et faire respecter les droits de propriété intellectuelle des auteurs, l'Université d'Aix-Marseille est engagée dans la lutte contre le plagiat.

Les travaux réalisés par les usagers et par les personnels de l'Université doivent répondre à l'ambition de produire un savoir inédit et d'offrir une lecture nouvelle et personnelle d'un sujet.

Les travaux concernés par cette obligation sont notamment : les thèses, les mémoires, les articles, les supports de cours, sans que cette liste soit exhaustive.

## **Article 1**

Le plagiat consiste à reproduire un texte, une partie d'un texte, toute production littéraire ou graphique, ou les idées originales d'un auteur, sans lui en reconnaître la paternité.

Tout plagiat, quel qu'en soit le support, constitue une faute.

Le plagiat constitue à la fois la violation la plus grave de l'éthique universitaire et un acte de contrefaçon. C'est un délit au sens de l'article L 335-2 du code de la propriété intellectuelle.

En outre, le fait de commettre un plagiat dans un document destiné à être publié constitue une circonstance aggravante.

## **Article 2**

Les usagers et les personnels de l'Université ne doivent pas commettre de plagiat dans leurs travaux.

## **Article 3**

Les reproductions de courts extraits de travaux préexistants en vue d'illustration ou à des fins didactiques sont admises sans nécessité de demander le consentement de l'auteur, uniquement dans le strict respect de l'exception de courte citation.

Dans ce cadre, les usagers et les personnels de l'Université s'engagent, lorsqu'ils reproduisent de courts extraits de tels travaux, à identifier clairement qu'il s'agit d'un emprunt, en apposant des guillemets, et en indiquant le nom de l'auteur et la source de l'extrait.

## **Article 4**

L'Université d'Aix-Marseille est attachée au respect des droits de propriété intellectuelle et se réserve la possibilité de rechercher les tentatives de plagiat, notamment par l'utilisation d'un logiciel adapté.

## **Article 5**

Les cas présumés de plagiat feront l'objet de poursuites engagées par l'Université devant les instances compétentes, et leurs auteurs seront passibles de sanctions disciplinaires.

Ces violations des droits de propriété intellectuelle pourront également donner lieu à des poursuites judiciaires. Nous certifions avoir pris connaissance de la présente charte et nous nous engageons à la respecter.

Fait à Montpellier , le 13/06/2025 noms et signature(s) :

Dret Laureen



Nathan Besnier



# Solution aux biais de sensibilité entre différents détecteurs acoustiques pour Chiroptères : développement d'un facteur de correction.

*Solution to sensitivity biases between different acoustic detectors for bats: a correction factor development.*

Nathan BESNIER<sup>1</sup>, Laureen DRET<sup>2</sup>

Aix-Marseille Université, Campus Saint Jérôme

<sup>1</sup> Auteur correspondant : [nathan.besnier@etu.univ-amu.fr](mailto:nathan.besnier@etu.univ-amu.fr)

<sup>2</sup> Auteur correspondant : [laureen.dret@etu.univ-amu.fr](mailto:laureen.dret@etu.univ-amu.fr)

Total words count : 7604

Received : 13 June, 2025

## RESUME / ABSTRACT

L'utilisation de différents détecteurs de chiroptères engendre des difficultés dans l'analyse de données, du fait d'un biais lié à la sensibilité singulière des enregistreurs passifs. C'est-à-dire qu'ils ne sont pas égaux quant à leur capacité à enregistrer les ultrasons émis par les chauves-souris, selon leurs aspects techniques ou la façon dont ils sont paramétrés. Il n'est donc pas possible de correctement traiter des données issues d'enregistrements d'appareils différents. L'objectif est ici de rendre comparable ces données, dans le cadre du projet Bat Migration Routes of Europe (BMRE) qui vise à cartographier les routes migratoires de ces mammifères à l'échelle du continent, et orienter les décideurs sur l'installation des parcs éoliens. Par extension, la méthode de cette étude pourrait concerner d'autres méta-analyses du même type sur d'autres taxons. Pour savoir dans quelle mesure il est possible de pallier le problème de sensibilité, des simulations ont été réalisées pour imiter l'échantillonnage de cris de chauves-souris, en divers sites, en faisant varier les réglages des quatre modèles d'enregistreurs les plus répandus dans BMRE, afin de représenter de manière exhaustive leurs gammes de sensibilités. Sur les données simulées, des tests statistiques ont permis de produire ces facteurs de correction propres à chaque détecteur, tenant compte de la variable environnementale et applicables à des jeux de données de grandes tailles. Une utilisation de la méthode de cette étude, avec de réels jeux de données, permettrait de mettre en lumière des facteurs de correction polyvalents,

**Mots clés :** Chauve-souris, *Pipistrellus*, courbes de sensibilité, ultrasons, acoustique

**Keywords :** Bats, *Pipistrellus*, sensibility curves, ultrasounds, acoustic

fonctionnels pour différents contextes ou espèces. En outre, ayant été réalisée sur seulement quatre modèles, il est important de noter que cette étude devrait être à nouveau réalisée si de nouveaux appareils venaient à apparaître sur le marché. En vue de pérenniser l'étude de ce taxon fragile et protégé, il est nécessaire que les futurs détecteurs possèdent des réglages standardisés et soient compatibles entre eux.

*Using different bat recorders leads to difficulties in data analyses, due to a bias linked to singular sensibility of passive sensors. I.e. they're not equal as for their ability to register ultrasounds emitted by bats, according to their technical aspects or the manner they are configured. Then, it's not possible to correctly handle data that come from different recording devices. The objective is here to allow data comparisons, as part of the Bat Migration Routes of Europe project, that aims to map the migration lanes of bats on a mainland scale, and guide decision-makers of wind farms. By extension, this study's method could be applied on other meta-analyses of the same type, on other taxons. To know to what extent it is possible to mitigate this issue, simulations have been made-up to imitate samplings of bat calls, in several sites and using the sensibility ranges of the fourth most used models of recorders in BMRE, in order to exhaustively represent these ranges. On simulated data, statistical tests provided correction factors specific to each device, considering the environmental variable, and practical for large-scale datasets. Using this study's method on real data would highlight versatile correction factors, functional for different contexts or species. Furthermore, by being realized on only four models, it is important to notice that this study should be done again if new recorders came up on the market. With a view to making the study of those fragile and protected taxon durable, it is necessary that futures detectors hold standardized parameters, and be compatible between them.*

## INTRODUCTION

Les Chiroptères européens utilisent l'écholocation pour visualiser leurs proies et détecter les obstacles. L'écholocation correspond au délai de propagation du son entre l'émission du cri depuis leur nez ou leur bouche, selon l'espèce, sa réflexion sur un obstacle, puis la réception de l'écho par leurs oreilles et son analyse (Russ, 2023). La forme du signal, les fréquences utilisées, ainsi que la durée d'un cri dépendent de l'encombrement du milieu, du type de proie à identifier ainsi que la distance à la cible (Goldshtein et al., 2025). Chaque espèce utilise une niche écologique donnée et donc utilise un répertoire acoustique adapté qui lui est propre (Dietz et al., 2009; Russ, 2023). Les espèces européennes sont difficiles à observer et quasiment impossibles à identifier sans outil lorsqu'elles sont en vol. Pour cause : leur caractère nocturne, leur mode de déplacement (petite taille,

67 vol actif de 18 à 50 km/h (Bruderer & Popa-Lisseanu, 2005)), ainsi que l'utilisation de fréquences  
68 inaudibles par l'humain.

69 L'étude par l'acoustique permet de pallier ces difficultés puisqu'elle permet d'étudier les cris  
70 d'écholocation des chiroptères présents sur un site sans être invasif ou les stresser (Zamora-Gutierrez  
71 et al., 2021). Ainsi, Donald Griffin, en 1938, utilise pour la première fois un détecteur d'ultrasons,  
72 pour analyser les activités des chauves-souris (Pierce & Griffin, 1938). La volonté de mieux  
73 comprendre ce taxon mène la recherche à s'intensifier et pousse à améliorer les capacités techniques  
74 des détecteurs ; en 1985 est développée la technique d'expansion de temps, permettant d'écouter les  
75 cris tout en conservant l'intégrité des signaux enregistrés, ce pour l'ensemble du spectre des cris,  
76 mais le dispositif est contraignant et onéreux (Zamora-Gutierrez et al., 2021). En 2007, l'émergence  
77 de cartes d'acquisition peu coûteuses disposant de mémoires suffisamment performantes, pour  
78 stocker les enregistrements de cris sur des longues périodes, permettent l'utilisation d'enregistreurs  
79 acoustiques (Russ, 2023; Zamora-Gutierrez et al., 2021). Ces détecteurs "passifs", de plus en plus  
80 employés (Revilla-Martín et al., 2021; Zamora-Gutierrez et al., 2021), peuvent être disposés sur site  
81 et se déclenchent automatiquement lorsqu'ils captent un cri. Ils permettent d'enregistrer  
82 l'exhaustivité des fréquences ciblées en récoltant un large ensemble de données (jusqu'à plusieurs  
83 semaines d'enregistrement consécutives), tout en étant moins contraignants (Russ, 2023). Dès lors  
84 émergent différents types de détecteurs ayant leur propre sensibilité et gammes de réglages, plus ou  
85 moins abordables, répondant à différentes utilisations et conditionnant leur capacité de détection des  
86 chiroptères (Adams et al., 2012; Kunberger & Long, 2023; Zamora-Gutierrez et al., 2021). La  
87 sensibilité correspond à la capacité de détection et d'enregistrement de différentes gammes de cris  
88 de chauves-souris (Jarrett et al., 2025). De ce fait, l'accessibilité et la démocratisation de l'utilisation  
89 des enregistreurs passifs rend possible les suivis d'activité des chauves-souris à l'échelle d'un site  
90 (Salvarina et al., 2018) et permet la collecte d'un grand nombre de jeux de données à l'échelle  
91 régionale, nationale voire européenne. Ceci amenant au développement de projets de recherches à  
92 grandes échelles sur différentes thématiques comme les dynamiques de population, les schémas de  
93 distribution ou les flux migratoires des différentes espèces (Adams et al., 2012; Ahlén & Baagøe,  
94 1999; Eddington et al., 2025; Roemer et al., 2017). C'est dans cette trajectoire qu'est lancé le projet  
95 Bat Migration Routes in Europe (BMRE). Il a pour but de cartographier les voies et les périodes de  
96 migration de trois espèces communes (*Pipistrellus nathusii*, *Nyctalus noctula* et *Nyctalus leisleri*).  
97 Dans ce type d'étude, l'hétérogénéité de sensibilité acoustique du matériel influe sur la quantité  
98 d'activité acoustique mesurée (Barré et al., 2023; Barré & Kerbiriou, 2021; Disca, 2023; Haquart et  
99 al., 2013). Actuellement, BMRE compte 57 partenaires européens qui transmettent leurs  
100 enregistrements passifs pour la construction des cartes. Ces données sont collectées via plus de 17

modèles d'enregistreurs différents. Le biais de sensibilité pourrait être ici potentiellement élevé, d'autant plus que les réglages de chaque enregistreur sont propres à l'utilisateur. La définition de biais considéré dans l'étude est celle de David Jarrett et collaborateurs (2025), c'est-à-dire "tout facteur susceptible d'introduire une altération, une distorsion ou une représentation erronée systématique mais non quantifiée des données acoustiques, susceptible de conduire à des inférences inexactes" (Jarrett et al., 2025), à différencier du bruit qui lui peut devenir négligeable sous l'effet de la loi des grands nombres (Seneta, 2013). Les données de BMRE, telles quelles, sont donc difficilement exploitables.

Des solutions ont été envisagées pour limiter ce biais. Une première, consiste à utiliser la sensibilité du matériel comme variable d'ajustement du modèle de prédiction d'activité des chiroptères. Cependant, cette méthode nécessite de ne pas avoir d'effets confondants entre le matériel utilisé et les habitats échantillonnés (Barré et al., 2023). Or, dans BMRE certaines marques d'enregistreurs sont plus populaires dans certains pays que d'autres, ce qui crée des effets confondants. La seconde solution consiste à dégrader la précision temporelle de la donnée, de façon à lisser les différences de détection sur des intervalles plus longs (Haquart et al., 2013; Miller, 2001). En effet, lorsque l'on traite les données acoustiques, nous utilisons généralement des séquences de cinq secondes pour compter l'activité de chaque espèce. Il a été observé qu'un intervalle temporel d'une nuit permet de rendre négligeables les effets du matériels, cependant dégrader la précision temporelle de la donnée jusqu'à la nuit diminue fortement la puissance statistique des inférences (Haquart et al., 2013). De plus, cette méthode ne fonctionne pas pour pallier les effets des appareils les moins sensibles comme le Batcorder (EcoObs, Allemagne) (Grave, 2024).

La question de la présente étude est donc : dans quelle mesure est-il possible de corriger les différences de sensibilité entre détecteurs acoustiques pour Chiroptères, afin de produire des données comparables, et ainsi faciliter la mise en commun des données dans le cadre du projet BMRE ?

Par conséquent, notre premier objectif est de modéliser les différences de sensibilité entre les détecteurs les plus populaires utilisés dans BMRE. Notre second objectif est de développer une méthode de correction de ces différences en appliquant des facteurs spécifiques à chaque type d'appareil.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### Stratégie générale

Dans cette étude, trois étapes permettent d'obtenir les facteurs de correction désirés. La première consiste à démontrer les différences de détection entre les enregistreurs. La deuxième étape vise à caractériser les sensibilités de chaque appareil de manière exhaustive via des courbes. Enfin, la troisième a pour but d'enregistrer avec des réglages de sensibilité élevés et faibles, à des distances à la végétation différentes. Les moyennes des nombres de contacts relatifs obtenus permettant d'ajuster et d'intégrer le facteur environnemental aux courbes (Figure 1).

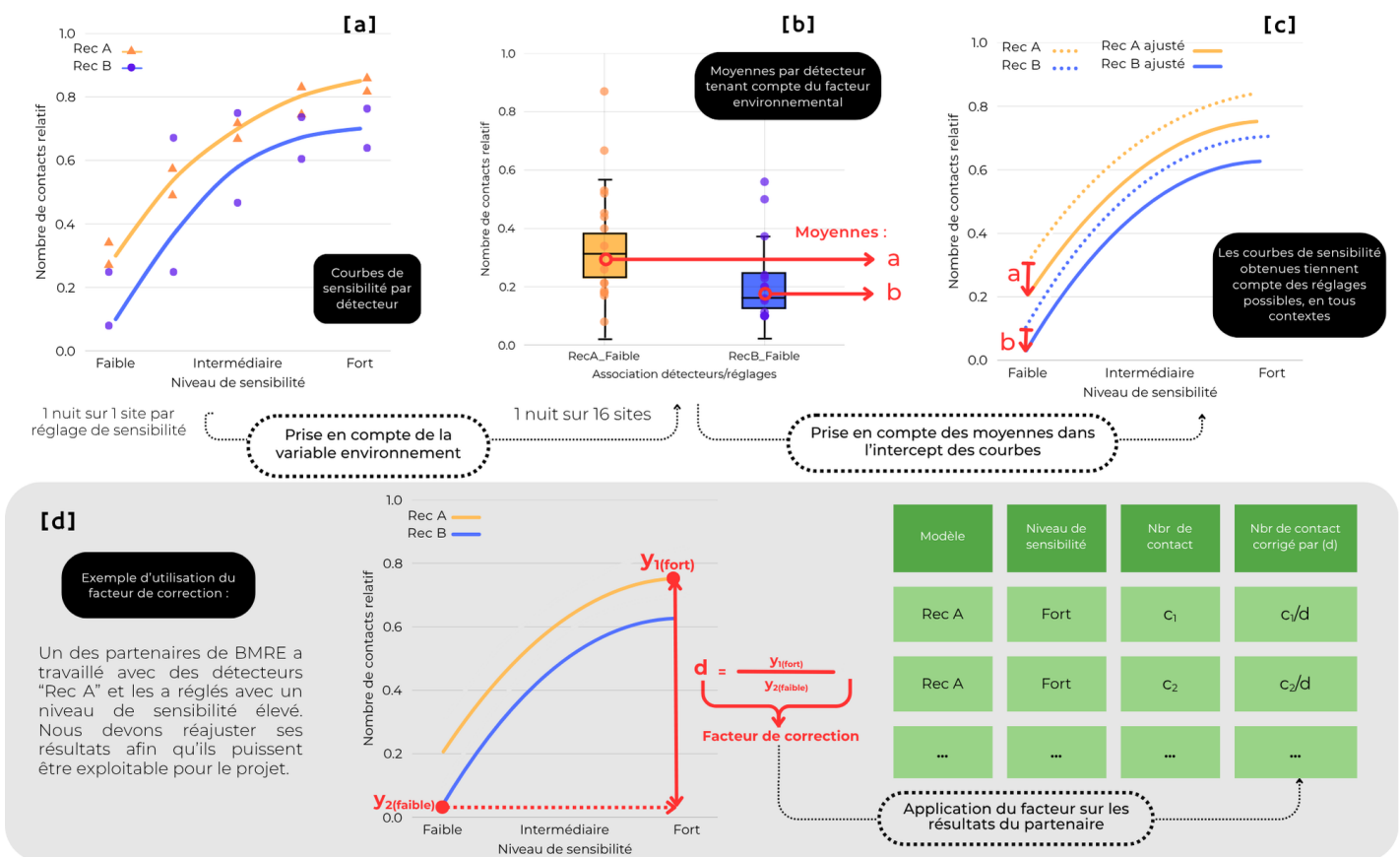


Figure 1 : Stratégie générale de l'étude. a: modélisation des courbes de sensibilité, b-c: ajustement pour intégrer les différences de sensibilité propres à différents types d'environnements, d: application des facteurs de correction sur le jeu de données BMRE. *Main study strategy. a: modelling sensitivity curves, b-c: adjustment to incorporate differences in sensitivity specific to different types of environments, d: application of correction factors to BMRE dataset.*

### Acquisition des données

#### Type de protocole acoustique (point fixe)

Les protocoles de cette étude se basent sur de l'écoute passive. C'est-à-dire que les enregistreurs, équipés de microphones omnidirectionnels, sont placés et réglés pour capter de manière automatique

et continue les signaux sonores. Les appareils choisis pour l'étude sont les plus utilisés dans le jeu de données de BMRE : Audiomoth (Open Acoustics Devices, Angleterre), Song Meter SM4BAT FS (Wildlife Acoustics, Etats-Unis), Batcorder (ecoObs, Allemagne), Batlogger A+ (Elekon AG, Suisse). A noter que le Song Meter SM2BAT (Wildlife Acoustics, Etats-Unis) est également très employé, mais son fonctionnement est sensiblement le même que le SM4BAT.

Les microphones sont réglés pour débiter l'enregistrement 30 minutes avant le coucher du soleil et s'arrêter 30 minutes après son lever, correspondant aux horaires d'activité des Chiroptères (Lemaire & Arthur, 2009, p. 124). Une observation correspond au nombre de contacts pour une espèce donnée sur une nuit, permettant de quantifier leur activité. Un contact est ici considéré comme un enregistrement de 5 secondes contenant au moins un cri. Un enregistrement avec deux cris correspond donc tout de même à un seul contact. Cette métrique permet d'évaluer les différences entre appareils et réglages.

#### *Description du prototype*

Les microphones sont disposés en cercle, et orientés vers le ciel, afin que le son leur parvienne de manière identique (Adams et al., 2012). Le plateau du prototype est surélevé de 0,5 à 1 m de haut à l'aide d'un trépied pour être au-dessus des hautes herbes. Cela permet d'éviter les obstacles et les conditions d'humidité trop élevées liées à la rosée matinale, tout en étant suffisamment bas pour enregistrer les chauves-souris adeptes du vol en rase-motte. Les boîtiers d'enregistrement sont posés sous le support. Enfin, l'appareillage ne doit pas être placé à proximité d'objets susceptibles de réfléchir les cris émis, ce qui dégraderait la qualité des signaux (Haquart et al., 2013). Cette même problématique a conduit à la création d'un support en mousse plutôt qu'en PVC ou autre surface plane et solide, et justifie le positionnement des microphones dans le socle (Figure 2).

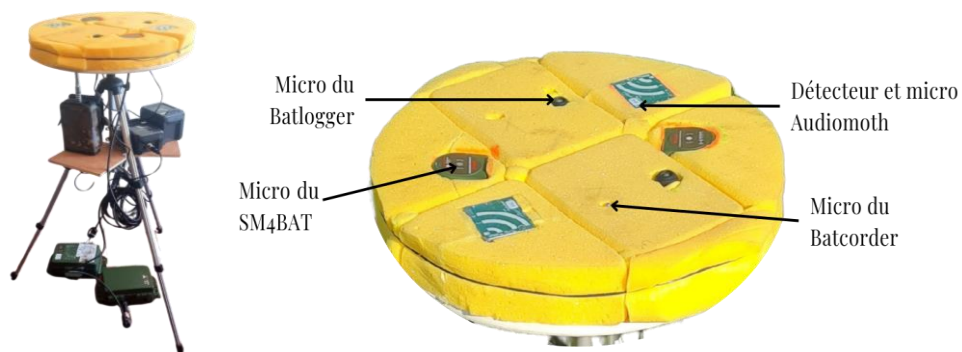


Figure 2 : Prototype d'enregistrement. Les micros sont isolés dans la mousse et orientés vers le ciel. Le tout installé sur un trépied pour être surélevé et stabilisé. *Recording prototype. Microphones are insulated in foam and pointed towards the sky. The whole setup is mounted on a tripod for elevation and stability.*



## Protocole pour modéliser les courbes de sensibilités du matériel

Le protocole pour caractériser les courbes de sensibilité (CS) (Figure 1.a) est réalisé à l'aide du prototype (Figure 2), placé sur un site pour une nuit complète. Ici, il s'agit du terrain d'expérimentation du Centre National de Recherche Scientifique (CNRS) de Montpellier. Disposant de deux exemplaires maximum de chaque détecteur, l'échantillonnage est effectué sur plusieurs nuits, avec un niveau de sensibilité par nuit. La sensibilité est définie par le seuil de déclenchement appelé "trigger" (Tableau 1). Chaque nuit, un détecteur sert de témoin, il s'agit du SM4BAT réglé au plus sensible (trigger level = OFF). Les analyses consistent à mesurer le nombre de contacts par nuit par détecteur à une sensibilité donnée, relativement au témoin. Cela permet de modéliser ces ratios en fonction du réglage de sensibilité pour obtenir les CS (Figure 1a).

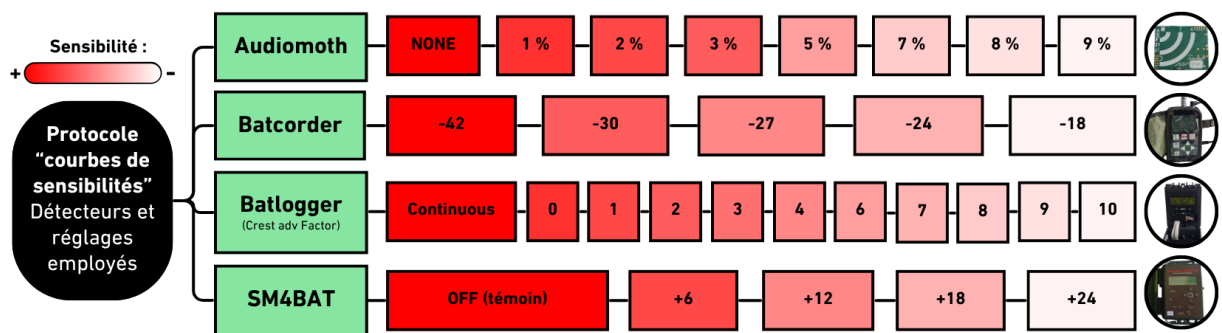


Figure 3 : Sensibilités des détecteurs utilisées pour le protocole "courbes de sensibilités". A noter que l'échelle de couleur n'est pas transposée d'un détecteur à l'autre. *Sensitivities of the detectors used for the 'sensitivity curves' protocol. Note that the colour scale is not transposed from one detector to another.* (Photos : N.Besnier)

Selon les appareils, les niveaux de sensibilités possibles sont plus ou moins nombreux (Figure 3). Certains appareils ont des paramètres qui leur sont propres, comme c'est le cas du Batcorder, qui tire son originalité de son objectif d'utilisation : seuls les cris d'une excellente qualité sont enregistrés, de façon à aisément déterminer l'espèce. Tandis que les autres enregistreurs ont un objectif d'exhaustivité, et enregistrent même les cris d'une faible qualité sonore au risque qu'ils ne permettent pas d'identifier l'espèce.

Le Batcorder ainsi que l'Audiomoth possèdent un seuil de déclenchement absolu, c'est-à-dire qu'ils enregistrent les cris jusqu'à un seuil sonore (dB) défini de manière fixe. Ainsi, les régler à -18 (ou 10% pour l'audiomoth) fait en sorte qu'ils enregistrent des cris jusqu'à 18 dB. Le SM4BAT et le Batlogger sont ici réglés avec un seuil de déclenchement relatif : l'enregistrement se déclenche lorsque l'amplitude d'un événement sonore est un certain nombre de décibels au-dessus du bruit de fond. Des valeurs élevées évitent de déclencher l'enregistrement quand il y a du "bruit" tandis que des valeurs basses permettent d'enregistrer tous les cris, même faibles (comme ceux amortis par la végétation, ou proches du bruit de fond (Adams et al., 2012; Elekon AG, 2019; Russo & Voigt,

2016)), mais également tous les bruits inutiles (tels que les stridulations d'insectes ou tout autre son autre qu'un cri de chauve-souris). Pour l'Audiomoth, le SM4BAT, et le Batlogger, il est possible de ne pas sélectionner de seuil de déclenchement, en les réglant respectivement sur "NONE", "OFF", ou "Continuous", en résulte un enregistrement de tous les sons produits.

*Protocole de prise en compte de l'influence de l'environnement*

Le second protocole vise à inclure l'influence de l'environnement sur la sensibilité des appareils (Figure 1b). Le comportement acoustique des chiroptères varie en fonction du degré d'encombrement des milieux. En effet, la durée, la modulation des fréquences et les intervalles d'impulsions des cris varient en fonction de la quantité d'obstacles du milieu (Fenton et al., 2011; Oliveira et al., 2018; Russo & Voigt, 2016). Sachant qu'il existe ces variations, la capacité de détection des enregistreurs pourrait être différente en fonction du taux d'encombrement analogue à la distance aux lisières.

Le but est d'obtenir un nombre de contacts suffisants pour une grande diversité d'espèces, en évitant les zéros et en évitant de saturer les détections, ce qui équivaut à une activité continue toute la nuit. De ce fait, un site doit comporter un point d'eau à proximité indirecte pour maximiser les chances d'échantillonner des chauves-souris. Seize lieux potentiels ont donc été sélectionnés le long des fleuves du Lez et de La Mosson ainsi que le long de la rivière Le Durzon (Figure 4). Dans le cas où deux sites sont proches, la distance entre deux points d'écoute ne doit pas être inférieure à 100 m.

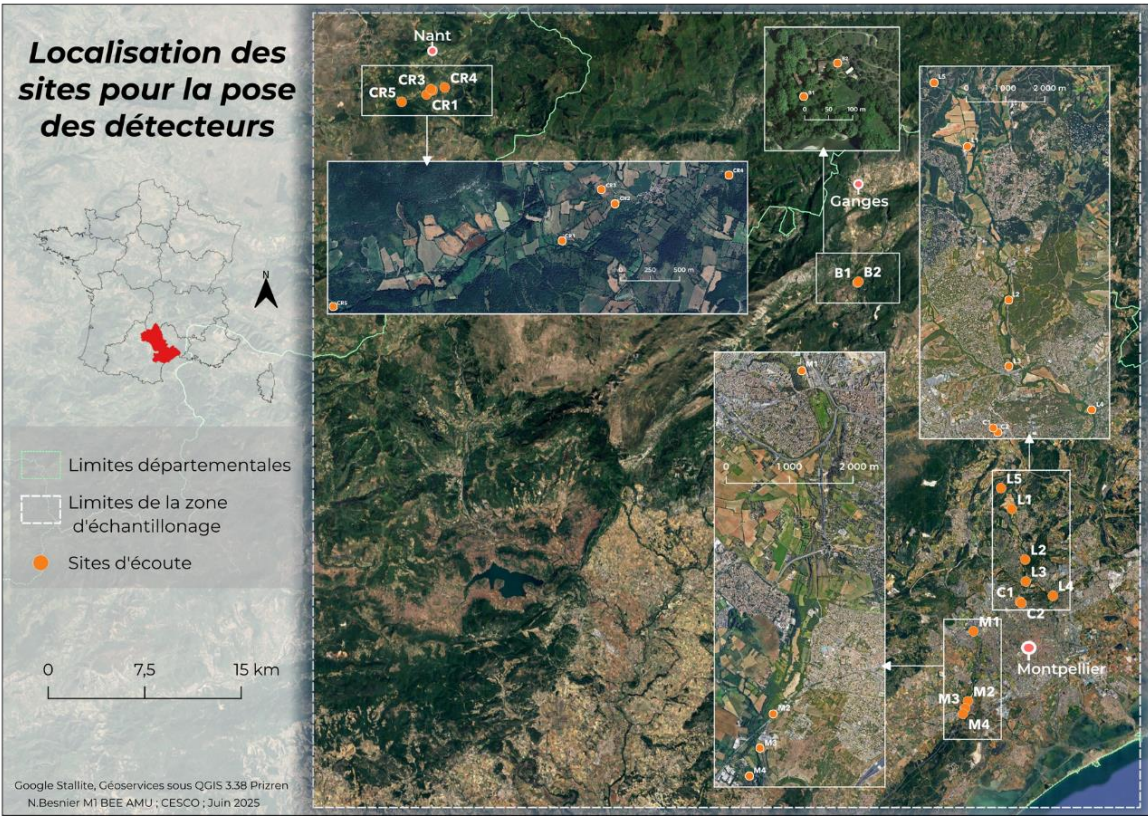
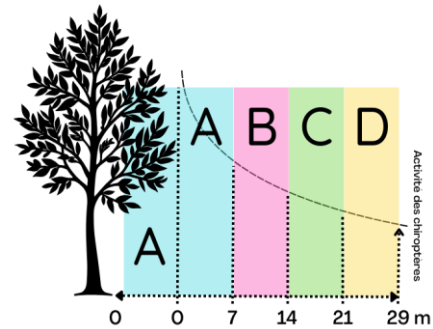


Figure 4 : Localisation des sites pour la pose des détecteurs. *Sites localization for recorders laying.*

Le prototype est placé selon 4 classes de distance aux lisières (0-7 m ; 8-14 m ; 15-21 m ; 22-29 m) (Figure 5), pour varier les comportements acoustiques des chauves-souris (Blakey et al., 2017; Heim et al., 2015).

Figure 5 : Représentation des quatre classes de distance aux lisières échantillonnées selon la distance. La courbe représente l'activité acoustique théorique des Chiroptères. *Representation of four vegetation classes depending on distance. The curve shows acoustic activity of chiropterans : the closer they are from an obstacle, the higher the call's recurrence is.*



Il est considéré comme végétation tout buisson ou arbuste de plus de 2,50 m. De surcroît, il est important que le prototype ne soit pas placé le long de lisières droites, dans des couloirs forestiers ou le long d'une route goudronnée. En effet, ces zones constituent des axes principaux de passage des Chiroptères. Par conséquent, si l'objectif de l'étude est d'évaluer les sensibilités des détecteurs en prenant en compte leurs comportements acoustiques, une telle composition du terrain ne produirait pas de résultats satisfaisants : les chauves-souris sont, dans ces cas, contraintes de longer les obstacles (Lemaire & Arthur, 2009), et par extension de passer forcément à proximité des microphones, équilibrant les différences recherchées.

#### *Réglages fixes et réglages variables*

Différents systèmes de réglages sont configurés, en se basant sur ceux utilisés dans BMRE :

Le filtre analogique passe-haut permet de filtrer les sons enregistrés pour ne garder que ceux au-delà d'une certaine fréquence. Il est désactivé pour tous sauf le Batcorder fixé à 16 kHz, pour lequel la modification n'est pas possible. Par ailleurs, la fonction de fréquence minimum de déclenchement est réglée au minimum (ou OFF), de manière à déclencher l'enregistrement de toutes les fréquences (y compris les chiroptères émettant en dessous de 16 kHz). De même, le Batcorder ne peut pas descendre en dessous de 16kHz. Ces différences induisent d'office un biais de sensibilité de manière générale : les Batcorders ne sont pas capables d'enregistrer certains cris comme ceux de *Tadarida teniotis* dont la fréquence maximum d'énergie est autour de 14 kHz (Russ, 2023, p. 436). Ce biais est recherché dans notre cas car il reflète la réalité du jeu de données BMRE. La fenêtre de déclenchement permet de poursuivre un enregistrement après qu'un son a été produit. Elle est fixée à deux secondes pour tous (sauf le batcorder qui ne peut excéder 800 ms). C'est-à-dire qu'un enregistrement s'arrêtera si aucun son n'a été capté pendant 2 secondes (ou 800 ms), jusqu'au prochain déclenchement. Enfin, le taux d'échantillonnage est réglé à 384 kHz sur tous les détecteurs

afin de contacter correctement les signaux émis jusqu'à 192 kHz, pour capter l'ensemble des chiroptères présents sur le territoire européen.

Tableau 1 : Récapitulatif des réglages utilisés pour l'ensemble de l'étude. *Recap of settings used for the whole study.*

RÉCAPITULATIF DES RÉGLAGES					
Détecteurs		Audiomoth	Batcorder	Batlogger	SM4BAT
Réglages fixes	Gain	Medium	Non modifiable	/	0
	Filtre passe-haut	OFF	16 kHz	OFF	OFF
	Fenêtre de déclenchement (ms)	2000	800 (maximum)	2000	2000
	Fréquence minimum de déclenchement	OFF	Critical Frequency : 16 kHz	2 kHz (minimum)	OFF
	Durée d'enregistrement maximum (s)	300	Non modifiable	300	300
	Taux d'échantillonnage (kHz)	384			
	Heure d'échantillonnage	30 minutes avant le coucher du soleil à 30 minutes après le lever du soleil			
Réglage variable des protocoles : seuil de déclenchement	Courbe de sensibilité du matériel (du plus au moins sensible)	Amplitude trigger (%) : 9, 8, 7, 5, 3, 2, 1 ; NONE	Sensitivity (dB): -18, -24, -27, -30, -42	Crest Adv (factor) : 10, 9 , 8, 7, 6, 4, 3, 2, 1, 0 ; Continuous	Trigger level (dB) : +24, +18,+12, +6 ; OFF
	Influence de l'environnement	Fort : NONE	-27 dB	Fort : Continuous	Fort : OFF
		Faible : 5%		Faible : CrestAdv : 10	Faible : +24
Réglages spécifiques		/	Quality : 20	/	Durée d'enregistrement minimum : 0 s

## Analyse des données

### Traitement avant identification

Les données sont des fichiers audios de type WAV ou RAW de durées et nombres variables selon les réglages des appareils. Les fichiers RAW sont convertis en WAV avant traitement.

Les enregistrements sont découpés en morceaux de 5 secondes pour comptabiliser les contacts. Puis ils subissent une expansion de temps de facteur 10 afin de les rendre audibles pour les vérifications manuelles. Toutes ces opérations avant identification sont réalisées par Charlotte Roemer grâce à des scripts développés dans le cadre du projet Vigie-Chiro (Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN)).

### Identification et vérification



Chaque dossier correspondant aux différentes associations (site-détecteur-réglage) contenant les fichiers audios est téléversé sur la plateforme de traitement en ligne de Vigie Chiro (<https://vigiechiro.herokuapp.com>). Cela permet qu'ils soient analysés via Tadarida (Bas et al., 2017), un logiciel d'identification automatique créé par le MNHN. Celui-ci traite les séquences sonores de 5 secondes, pour fournir un tableau de sortie indiquant les espèces identifiées accompagnées des probabilités d'identification (PI). Les fichiers ayant une PI inférieure à 0,5 ne sont pas utilisés pour la suite de l'analyse (Barré et al., 2019).

### *Simulation des données et vérification de la fonctionnalité d'un facteur de correction*

La récolte de données se révélant être très chronophage en raison de sa dépendance aux conditions météorologiques, des simulateurs de jeux de données ont été créés sur le logiciel Rstudio pour imiter les protocoles en attendant les données finales. Les simulations sont basées sur des valeurs attendues de chaque détecteur dans des jeux de données réels, en termes de moyennes et variances (Audiomoth moy = 80 ; var = 4, Batlogger 120 ; 5, Batcorder 24 ; 2, SM4BAT 150 ; 4). La fonction `rnbinom()` est utilisée pour générer les contacts. Dans une première simulation imitant l'influence de l'environnement, cela est fait selon les 3 variables explicatives qui sont prises en compte dans ce même protocole. Premièrement, les sites, ici simplement numérotés de 1 à 16. Ensuite, l'effet de la distance aux lisières qui est basé sur une équation faite à la main pour imiter ce qui est attendu dans la réalité :

$$f(x) = \frac{I}{0,4 \times \log(0,5x + 1,5) + 0,8} \quad (1)$$

Enfin, deux sensibilités sont simulées pour chaque détecteur : "High" qui multiplie les contacts par 1,5 et "Low" qui les multiplie par 0,5.

Cette simulation permet ainsi de réaliser les analyses comme sur un réel jeu de données, et donc de visualiser les différences en fonction de différentes variables (sites, détecteurs, réglages, distance). Ceci est démontré en prenant en compte le plus de composantes possibles. Au départ en mettant en relation le nombre de contacts en fonction des quatre enregistreurs avec un test post-hoc `pairwise.wilcox.test()`. Puis en réalisant un modèle additif avec l'ajout de l'effet aléatoire des sites, de la distance à la végétation, et des sensibilités, à l'aide d'un GLMM. La dispersion de chaque modèle est vérifiée avec `simulateResiduals(glm)` du package DHARMA. Le modèle final est obtenu en vérifiant que l'ajout de chaque variable a un effet significatif avec des analyses de la variance : `anova(glm1, glm2)`. Enfin, un test post-hoc du package emmeans est réalisé pour vérifier la significativité des différences de sensibilité des ID entre eux : `emmeans(glm, pairwise ~ ID, adjust = "tukey")`. Ce jeu de données est aussi utilisé pour vérifier qu'un facteur de correction peut fonctionner en théorie. Pour se faire, les *Estimates* des enregistreurs les plus sensibles

sont mis à l'exponentiel et divisés par l'*Estimate* de l'enregistreur le moins sensible (référence vers laquelle il faut tendre) lui aussi mis à l'exponentiel :

$$Facteur = \frac{\exp(\text{estimate détecteur fort})}{\exp(\text{estimate détecteur de référence})} \quad (2)$$

La mise à l'exponentielle permet de retrouver des nombres de contacts interprétables car les GLM passent les estimations en log. Enfin, l'ajustement des données se fait en divisant le nombre de contacts par le résultat de ce rapport.

La deuxième simulation imite le protocole de modélisation des courbes, et génère les contacts selon une unique variable qu'est la sensibilité, contenant de nombreuses autres modalités que simplement High et Low. Elle est matérialisée à l'aide d'un facteur parfaitement arbitraire allant de 0,5 à 1,5 avec un pas de 0,1, qui multiplie les nombres de contacts. Ces deux simulations permettent de réaliser les tests nécessaires à la validation de la méthode de l'étude.

### *Modélisation des courbes de sensibilités*

Dans le but de modéliser les CS (Figure 1a), le nombre de contacts enregistrés par chaque appareil est divisé par le nombre de contacts de l'enregistreur témoin de la nuit correspondante, ici le SM4 OFF, afin d'obtenir les nombres de contacts relatifs.

Dans un premier temps, et dans le but de visualiser la forme des CS, est utilisé un Modèle Additif Généralisé (GAM) via les packages mgcv et tidygam, qui modélise les relations linéaires et non linéaires entre variables indépendantes (sensibilités) et dépendantes (contacts) pour chaque enregistreur. Le GAM utilise une méthode de maximum de vraisemblance restreint (REML), afin de faire un compromis entre un ajustement trop faible (le modèle devient linéaire) et un ajustement trop fort (le bruit est pris en compte dans les prédictions des données manquantes) (`gam(nb_contact ~ s(sensibilité), method = "REML")`). La forme des courbes ou des droites permet d'identifier si l'équation de ces dernières est polynomiale ou linéaire. Puis un GLM est construit en mettant le détecteur en effet linéaire ou polynomial selon les résultats du GAM, afin d'obtenir l'équation des courbes.

### *Modélisation de l'effet de l'environnement sur les détections et ajustement des courbes*

Le nombre de contacts récoltés via le protocole de l'influence de l'environnement (ici le premier jeu de données simulé) est divisé par le nombre de contacts du SM4 OFF de la même manière que pour le protocole des CS, afin de travailler en échelle relative. Les moyennes des détecteurs en réglages "Low" sont ensuite intégrées aux équations précédemment obtenues en remplaçant leur valeur d'ordonnée à l'origine. De cette manière, l'influence de l'environnement est intégrée aux CS, en ajustant verticalement les courbes (Figure 1b).

*Application du facteur à un jeu de données*

L'application du facteur s'effectue sur les enregistreurs les plus sensibles pour les ajuster à l'enregistreur le moins sensible. Afin d'ajuster les nombres de contacts pour lisser les différences de sensibilité, le type d'enregistreur et la sensibilité utilisée par les partenaires doivent être identifiés. Ensuite, il faut lire le nombre de contacts relatifs de la courbe de l'enregistreur utilisé par le partenaire à la sensibilité calibrée par ce dernier, ainsi que ceux de la courbe de l'enregistreur le moins sensible associé à la sensibilité souhaitée. Dans un premier temps, les deux valeurs sont divisées l'une par l'autre (nombres de contacts relatifs pour l'enregistreur et la sensibilité utilisée/nombres de contacts relatifs pour l'enregistreur et la sensibilité souhaitée). Le rapport obtenu donne le facteur de correction à appliquer. Le nombre de contacts est finalement divisé par ce facteur (Figure 1d).

Retrouver les scripts de l'étude sur : [https://github.com/NathB44/Chiro\\_RecorderFactor\\_Script.git](https://github.com/NathB44/Chiro_RecorderFactor_Script.git)

**RÉSULTATS**

L'acquisition des données du protocole des CS est désormais finalisée (Annexe 1). Ces dernières sont toujours en cours de traitement par les logiciels d'identification. La récolte des données pour le protocole du facteur environnemental est en cours, 9 sites ont été échantillonnés sur les 16 nécessaires (Annexe 1).

**Effet du matériel acoustique et application du facteur de correction sur le jeu de don**

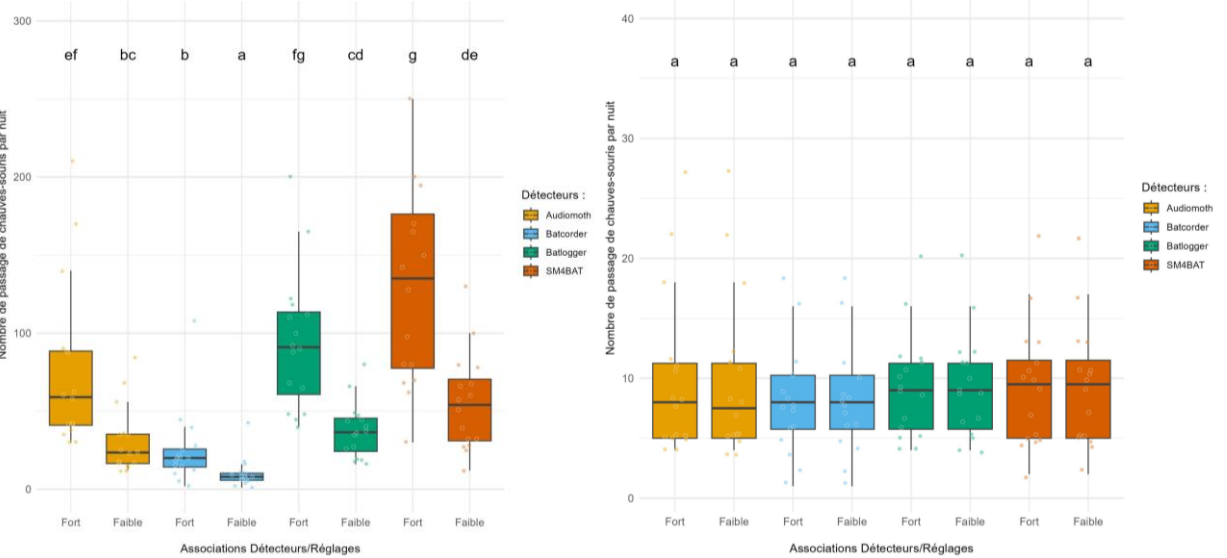


Figure 6 : À gauche : Boîtes à moustache du nombre de contacts par nuit en fonction des associations détecteurs/réglages (données simulées). Les lettres associées permettent de visualiser les associations qui sont significativement différentes

entre elles (anova,  $p < 0.01$ ). À droite : Boîte à moustache du nombre de contacts par nuit après application du facteur de correction. Les lettres associées montrent une absence de différence significative entre les groupes ( $p > 1$ ).

*On the left : Boxplots of number of contacts per night depending on recorders/settings associations (simulated data). Related letters allow to see which associations are significantly different between them ( $p < 0.01$ ). On the right : Boxplots of detection values after adjustment with the correction factor. Related letters show no difference between groups ( $p > 1$ ).*

De nettes variations de sensibilité entre les différents enregistreurs testés sont observables. Les nombres de contacts sont significativement différents (wilcox.test,  $p < 0.05$ ) indiquant qu'il existe bien des différences de sensibilité en fonction des détecteurs. La simulation montre aussi un effet significatif de la prise en compte aléatoire des sites (ANOVA,  $p < 0.01$ ), met en évidence une relation significativement négative liée à la distance à aux lisières (ANOVA,  $p < 0.05$ ) et également un effet significatif des réglages (ANOVA,  $p < 0.01$ ).

Après application du facteur de correction sur les nombres de contacts du jeu de données simulé, tous les détecteurs et réglages affichent un nombre quasiment similaire de contacts (Figure 6).

### Courbes de sensibilités et ajustement

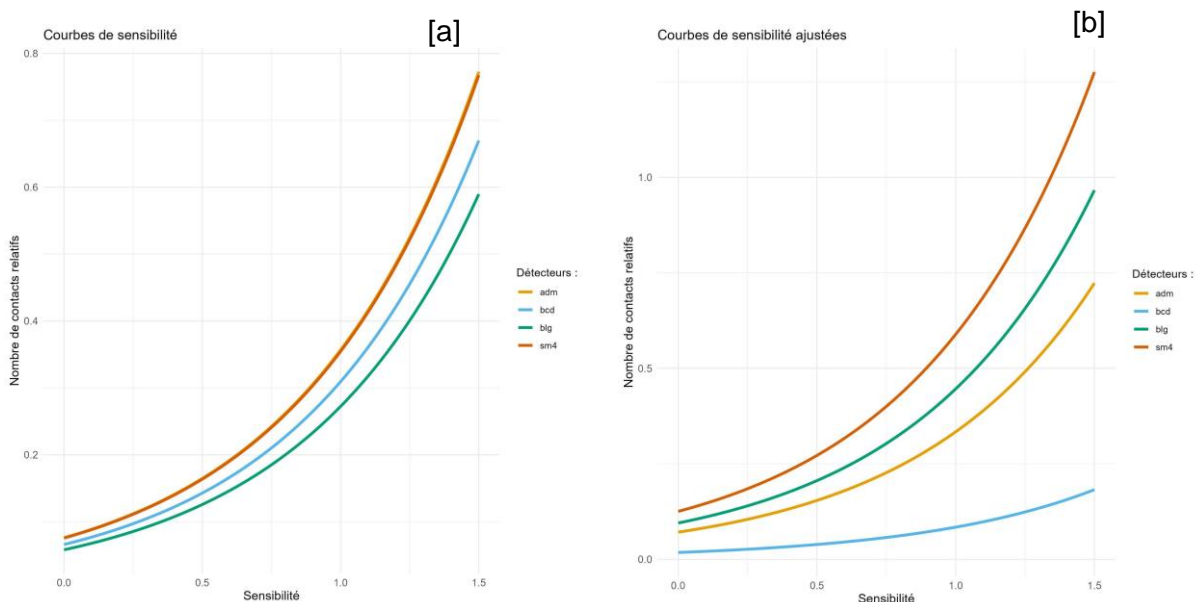


Figure 7 : Relation de la capacité de détection en fonction de la sensibilité des détecteurs avant (a) et après (b) ajustement avec la prise en compte de la variable environnementale. *Relationship of detection ability according to detector's sensibility before (a) and after (b) adjustment by taking the environment into consideration*

Les courbes ont été modélisées depuis le GLM pour chaque détecteur (Figure 7a), puis ajustées avec les moyennes tenant compte de la simulation de la variable environnementale (Figure 7b). L'effet d'ajustement n'est cependant pas significatif pour tous les détecteurs.



## DISCUSSION

Depuis plus d'une décennie, les problèmes liés aux biais de sensibilité des enregistreurs acoustiques engendrent des difficultés dans la surveillance de la faune sauvage. Et jusque récemment, des chercheurs explorent des pistes afin d'y remédier, par diverses méthodes, soit encore inefficaces ou peu réalisables (Jarrett et al., 2025), par exemple à travers une extension des jeux de données sur de très longs termes ou encore une multiplication de l'effort d'échantillonnage (Smith et al., 2021). Cette étude montre que le facteur de correction est un bon candidat pour résoudre cette problématique, car il est facile à appliquer sur des grands jeux de données et intègre le facteur environnemental, un facteur de variation à la détection qui est trop peu pris en compte en écologie acoustique (Pérez-Granados & Traba, 2021). Bien que le développement de facteur de correction en écologie existe déjà (Dabkowski et al., 2025; Van Wilgenburg et al., 2018), cette pratique semble encore peu appliquée. Et il n'a jusqu'ici encore jamais été développé de facteurs permettant de corriger des biais de sensibilité comme dans la présente étude. L'utilisation de l'acoustique passive pour l'étude de l'abondance des chiroptères est développée depuis plus de 10 ans, la solution d'un facteur de correction inter-détecteurs est donc pionnière dans ce domaine.

Dans le cadre de BMRE, les facteurs de correction permettent d'étudier, sans biais du matériel, les variations d'activités dans le temps et l'espace sur l'ensemble du continent européen. La méthode du facteur peut également s'appliquer aux autres types de méta-analyses qui se basent sur l'écoute passive. De plus, bien que les Chiroptères soient ici l'objet de l'étude, il est probable que ce facteur puisse fonctionner pour les autres taxons sujets à l'étude acoustique.

### **Acquisition des données**

Le traitement des données récoltées dans le cadre du protocole des courbes des sensibilités n'est pas achevé. L'acquisition du jeu de données du protocole du facteur environnemental est également en cours. Il sera nécessaire d'utiliser ces données pour vérifier que la méthode des courbes gomme correctement les différences entre enregistreurs.

### **Utilisation d'un jeu de données simulé**

La modélisation ainsi que l'ajustement des CS effectué dans ce rapport ne sont pas soutenus par de réels résultats de terrain. Bien que le facteur fonctionne sur la simulation, celle-ci se base sur des éléments purement théoriques et plus-ou-moins arbitraires. Par conséquent, les facteurs fonctionnent pour la simulation mais ne représentent pas les valeurs finales. Néanmoins, cela permet de valider la méthode du développement du facteur de correction ainsi que celle de l'ajustement des courbes. Il est attendu qu'en se basant sur la réalisation de données de terrain, qui permettrait de caractériser les

facteurs environnementaux et l'activité acoustique des chiroptères, les modèles marchent de la même manière et fournissent des facteurs fonctionnels (Zurell et al., 2010).

## **Interprétation des résultats**

### *Modélisation du facteur de correction*

Le facteur lisse les différences de sensibilité des détecteurs du jeu de données simulé avec succès. Les légères différences observables pourraient s'expliquer par du bruit statistique dû à la variabilité des mesures. Le jeu de données de BMRE étant très conséquent (plus de 16 000 sites), ces effets sur les inférences seraient négligeables puisque la variabilité des mesures serait lissée par la grande quantité de données (Seneta, 2013). De ce fait, le facteur ne pourrait pas fonctionner pour des petits jeux de données pour lesquels le bruit deviendrait un biais caractérisant des différences entre les enregistreurs.

### *Modélisation des courbes de sensibilités*

Le workflow d'ajustement des CS est désormais développé et est prêt à être appliqué à des données terrain. L'application de cette méthode à un jeu de données réel est à finaliser afin d'obtenir les CS ajustées définitives. L'ajustement des courbes est supposé nécessaire puisque l'environnement explique une part des différences sur les capacités de détection des appareils. Il est probable que l'absence de significativité, entre les courbes ajustées et non ajustées, découle d'une échelle de sensibilité semblable à tous les détecteurs dans la simulation, au lieu d'une échelle spécifique. Cela n'a cependant pas été jugé nécessaire puisque la méthode fonctionne de la même manière, qu'importe les valeurs obtenues par cette simulation.

## **Perspectives**

### *Acquisition d'un jeu de données réelles*

Dans l'objectif de produire de la donnée réelle et de valider définitivement la méthode, il reste à terminer le protocole énoncé plus tôt et à appliquer la méthode pour obtenir les courbes de sensibilité, dans un premier temps, pour la Pipistrelle commune (*Pipistrellus pipistrellus* (Schreber, 1774)). Présente dans tous les types de milieux, cette chauve-souris est la plus commune en Europe (Lemaire & Arthur, 2009; Russ, 2023). La probabilité de contacter l'espèce étant très élevée, cela permettrait de récolter un grand nombre de données suffisamment complètes pour réaliser précisément les tests statistiques qui serviraient à modéliser les CS et par la suite de les ajuster.

#### *Effet des espèces et facteur polyvalent*

Les facteurs pourraient être plus précis s'ils étaient appliqués par groupes acoustiques ou directement par espèces. Cependant, il est aussi possible qu'un facteur "polyvalent" tout aussi précis fonctionne pour les différentes espèces. Pour tester cette hypothèse, il faudrait reproduire les protocoles en se focalisant sur deux espèces ayant des comportements de vol et acoustiques opposés comme la Noctule de Leisler (*Nyctalus leisleri*) et l'Oreillard gris (*Plecotus austriacus*), la première étant très détectable et chassant plutôt haut dans le ciel et la seconde étant peu détectable et chassant en rase-motte (Lemaire & Arthur, 2009; Russ, 2023). Les différences entre les facteurs de correction nous permettraient de trancher sur la possibilité d'un facteur de correction "polyvalent".

#### *Effet de l'habitat*

Les facteurs de correction fonctionnent en pratique dans le cadre de notre étude, en théorie dans le cadre de BMRE et dans tout contexte similaire à celui de ce projet. Afin d'affiner les facteurs de correction, il serait intéressant d'évaluer l'intérêt de développer un facteur de correction par degré d'encombrement de la végétation. Par exemple, en zone fortement boisée :  $SM4BAT = 6X$  contacts et Batlogger =  $2X \rightarrow$  facteur de 3 ; En zone steppique :  $SM4BAT = 6,5X$  contacts et Batlogger =  $2,2X \rightarrow$  facteur de 2,9. En effet, le comportement acoustique est variable en fonction de la densité d'obstacle présente dans le milieu. Les facteurs de correction pourraient donc être spécifiques à un type d'encombrement.

#### *Combinaison du facteur de correction avec une dégradation temporelle des données*

Dans le contexte de l'étude, l'efficacité du facteur de correction est vérifiée de façon théorique. S'il s'avère que ce facteur ne lisse pas suffisamment le biais de sensibilité pour les jeux de données de BMRE il pourrait être envisagé de le combiner à la méthode de dégradation de la précision temporelle de la donnée (Grave, 2024). Cela permettrait d'apporter une correction des effets restants sans avoir à trop dégrader les données, selon la qualité de la correction apportée par le facteur.

#### CONCLUSION

L'absence de protocoles ou de réglages standardisés a mené au développement de la méthode du facteur de correction. Elle permettra de traiter des données jusqu'ici non exploitables des quatre enregistreurs traités dans la présente étude. Néanmoins chaque année, de nouveaux appareils sont conçus, dont la compatibilité avec les précédents n'est pas une priorité affichée par les fabricants. Afin de pérenniser l'étude acoustique des Chiroptères, il est essentiel que la construction de nouveaux détecteurs intègre cette notion de compatibilité de réglages, permettant le traitement de données

futures sans la création de nouveaux facteurs de correction. L'*Agreement on the Conservation of Populations of European Bats* (EUROBATS) va publier prochainement des lignes directrices concernant les méthodes pour l'étude des populations de chauves-souris ; des recommandations concernant les réglages à utiliser seront incluses afin de standardiser les suivis acoustiques passifs dans le futur. Pour ce qui est des autres continents, les réglages standardisés pourraient se référer aux programmes de sciences participatives, pour homogénéiser la récolte de données.

## Remerciements

Nous adressons nos sincères remerciements à Charlotte Roemer, notre tutrice de stage, pour son accompagnement, ses précieux conseils, et l'opportunité qu'elle nous offre de co-rédiger le manuscrit final lié à cette étude ; Yves Bas, Kévin Barré et Christian Kerbiriou pour leurs suggestions et leurs recommandations sur le design expérimental et les statistiques ; David Degueldre pour sa contribution à l'élaboration du prototype ; Vincent Sablain et Geoffrey Didier pour leur aide dans la recherche des sites de pose d'enregistreurs ; les propriétaires des terrains pour leur accueil et leur contribution au projet ; Pierre Jay-Robert, Yves Bas, Anaïs Pessato, Christian Kerbiriou, François Chiron et Volker Runkel (EcoObs) pour le prêt du matériel ; ainsi que les équipes du Centre d'Écologie Fonctionnelle et Evolutive du CNRS de Montpellier pour leur accueil et leur conseils .

## BIBLIOGRAPHIE

- Adams, A. M., Jantzen, M. K., Hamilton, R. M., & Fenton, M. B. (2012). Do you hear what I hear ? Implications of detector selection for acoustic monitoring of bats. *Methods in Ecology and Evolution*, 3(6), 992-998.
- Ahlén, I., & Baagøe, H. J. (1999). Use of ultrasound detectors for bat studies in Europe : Experiences from field identification, surveys, and monitoring. *Acta Chiropterologica*, 1(2), 137-150.
- Barré, K., Froidevaux, J. S., Sotillo, A., Roemer, C., & Kerbiriou, C. (2023). Drivers of bat activity at wind turbines advocate for mitigating bat exposure using multicriteria algorithm-based curtailment. *Science of the Total Environment*, 866, 161404.
- Barré, K., & Kerbiriou, C. (2021). *Activité de vol des chiroptères à hauteur des pales des éoliennes : Quels déterminants de la variation spatiotemporelle de cette activité?*
- Barré, K., Le Viol, I., Julliard, R., Pauwels, J., Newson, S. E., Julien, J., Claireau, F., Kerbiriou, C., & Bas, Y. (2019). Accounting for automated identification errors in acoustic surveys. *Methods in Ecology and Evolution*, 10(8), 1171-1188.
- Bas, Y., Bas, D., & Julien, J.-F. (2017). Tadarida : A toolbox for animal detection on acoustic recordings. *Journal of open research software*, 5(1), 6-6.
- Blakey, R. V., Law, B. S., Kingsford, R. T., & Stoklosa, J. (2017). Terrestrial laser scanning reveals

- below-canopy bat trait relationships with forest structure. *Remote Sensing of Environment*, 198, 40-51.
- Bruderer, B., & Popa-Lisseanu, A. G. (2005). Radar data on wing-beat frequencies and flight speeds of two bat species. *Acta chiropterologica*, 7(1), 73-82.
- Dabkowski, O., Ellenberg, U., Mattern, T., Pütz, K., & Borboroglu, P. G. (2025). Correction factors for prey size estimation from PenguCams. *PeerJ*, 13, e18598.
- Dietz, C., von Helversen, O., & Nill, D. (2009). *L'encyclopédie des chauves-souris d'Europe et d'Afrique du Nord : Biologie, caractéristiques, protection*. Delachaux et Niestlé.
- Disca, T. (2023). *Analyse comparée de quatre enregistreurs passifs d'ultrasons. Quelles conséquences pour l'analyse et l'interprétation des données d'activité de chiroptères ?* Documents techniques de la Fondation Biotope. n°2.
- Eddington, V. M., Ahlberg, S. E., Kuczynska, V., White, E. R., & Kloepper, L. N. (2025). *Evaluating an Acoustic Method for Estimating Trends in Bat Summer Colony Counts with AudioMoth Recorders*.
- Elekon AG. (2019). *Batlogger A/A+ Manual Firmware version V 2.6*. [www.batlogger.com](http://www.batlogger.com)
- Fenton, M. B., Skowronski, M. D., McGuire, L. P., & Faure, P. A. (2011). Variation in the use of harmonics in the calls of laryngeally echolocating bats. *Acta Chiropterologica*, 13(1), 169-178.
- Goldshtein, A., Mazar, O., Harten, L., Amichai, E., Assa, R., Levi, A., Orchan, Y., Toledo, S., Nathan, R., & Yovel, Y. (2025). Onboard recordings reveal how bats maneuver under severe acoustic interference. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 122(14), e2407810122.
- Grave, A. (2024). *L'agrégation temporelle : Vers une méthode pour prendre en compte la variabilité liée aux méthodes d'enregistrement dans les suivis acoustiques des chiroptères ?* [Rapport de stage M1]. Université de Rennes.
- Haquart, A., Christian, K., Aurélien, B., Luc, B., & Jocelyn, F. (2013). *Actichiro, référentiel d'activité des chiroptères. Eléments pour l'interprétation des dénombrements de chiroptères avec les méthodes acoustiques en zone méditerranéenne française*.
- Heim, O., Treitler, J. T., Tschapka, M., Knörnschild, M., & Jung, K. (2015). The importance of landscape elements for bat activity and species richness in agricultural areas. *PloS one*, 10(7), e0134443.
- Jarrett, D., Barnett, R., Bradfer-Lawrence, T., Froidevaux, J. S., Gibb, K., Guinet, P., Greenhalgh, J., Heath, B., Johnston, A., & Monfort, J. J. L. (2025). Mitigating bias in long-term terrestrial ecoacoustic studies. *Journal of Applied Ecology*.
- Kunberger, J. M., & Long, A. M. (2023). A comparison of bat calls recorded by two acoustic monitors. *Journal of Fish and Wildlife Management*, 14(1), 171-178.
- Lemaire, M., & Arthur, L. (2009). *Les Chauves-souris de France, Belgique, Luxembourg et Suisse*. Biotope.

576 Miller, B. W. (2001). A method for determining relative activity of free flying bats using a new activity  
577 index for acoustic monitoring. *Acta chiropterologica*, 3(1), 93-105.

578 Oliveira, T. F., Ramalho, D. F., Mora, E. C., & Aguiar, L. M. (2018). The acoustic gymnastics of the  
579 dwarf dog-faced bat (*Molossops temminckii*) in environments with different degrees of clutter.  
580 *Journal of Mammalogy*, 99(4), 965-973.

581 Pérez-Granados, C., & Traba, J. (2021). Estimating bird density using passive acoustic monitoring : A  
582 review of methods and suggestions for further research. *Ibis*, 163(3), 765-783.

583 Pierce, G. W., & Griffin, D. R. (1938). Experimental determination of supersonic notes emitted by bats.  
584 *Journal of Mammalogy*, 19(4), 454-455.

585 Revilla-Martín, N., Budinski, I., Puig-Montserrat, X., Flaquer, C., & López-Baucells, A. (2021).  
586 Monitoring cave-dwelling bats using remote passive acoustic detectors : A new approach for cave  
587 monitoring. *Bioacoustics*, 30(5), 527-542.

588 Roemer, C., Disca, T., Coulon, A., & Bas, Y. (2017). Bat flight height monitored from wind masts  
589 predicts mortality risk at wind farms. *Biological conservation*, 215, 116-122.

590 Russ, J. (2023). *Les chauves-souris par le son : Identifier toutes les espèces de France et d'Europe*.  
591 Delachaux et Niestlé.

592 Russo, D., & Voigt, C. C. (2016). The use of automated identification of bat echolocation calls in acoustic  
593 monitoring : A cautionary note for a sound analysis. *Ecological Indicators*, 66, 598-602.

594 Salvarina, I., Gravier, D., & Rothhaupt, K. (2018). Seasonal bat activity related to insect emergence at  
595 three temperate lakes. *Ecology and Evolution*, 8(7), 3738-3750.

596 Seneta, E. (2013). *A tricentenary history of the law of large numbers*.

597 Smith, B. R., Root-Gutteridge, H., Butkiewicz, H., Dassow, A., Fontaine, A. C., Markham, A., Owens,  
598 J., Schindler, L., Wijers, M., & Kershenbaum, A. (2021). Acoustic localisation of wildlife with  
599 low-cost equipment : Lower sensitivity, but no loss of precision. *Wildlife Research*, 49(4),  
600 372-381.

601 Van Wilgenburg, S., Sólymos, P., Kardynal, K., & Frey, M. D. (2018). Estimating densities of terrestrial  
602 wildlife using passive acoustic recordings : A pragmatic approach using paired human  
603 observations. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 144(3\_Supplement), 1849-1849.

604 Zamora-Gutierrez, V., MacSwiney G, M. C., Martínez Balvanera, S., & Robredo Esquivelzeta, E. (2021).  
605 The evolution of acoustic methods for the study of bats. *50 years of bat research: foundations*  
606 *and new frontiers*, 43-59.

607 Zurell, D., Berger, U., Cabral, J. S., Jeltsch, F., Meynard, C. N., Münkemüller, T., Nehrbass, N., Pagel,  
608 J., Reineking, B., & Schröder, B. (2010). The virtual ecologist approach : Simulating data and  
609 observers. *Oikos*, 119(4), 622-635.

## ANNEXES :

Tableaux 2 et 3 : Récapitulatifs des poses d'enregistreurs

Registre de pose pour le protocole des courbes de sensibilité					
		Audiomoth	Batcorder	Batlogger	SM4BAT
		Seuils de déclenchement			
Coordonnées site	Dates des nuits	Amplitude trigger (%) :	Sensitivity (dB):	Crest Adv (factor) :	Trigger level (dB) :
3.86284 43.6 3825	28/04/25 au 29/04/25				12 ; OFF
	12/05/25 au 13/05/25		-24	4 ; 6	18; OFF
	13/05/25 au 14/05/25		-27	8	OFF
	20/05/25 au 21/05/25	1 ; 3	-18		OFF
	27/05/25 au 28/05/25	7 ; 9		1 ; 9	OFF
	05/06/25 au 06/06/25	2 ; 8	-30	0 ; 2	6 ; OFF
	13/05/25 au 14/05/25		-42	3 ; 7	OFF

610

Registre de pose pour le protocole du facteur environnementale				L = Le Lez M = La Mosson D = Le Durzon
Code site	x	y	Dates des nuits	
CE1	3.86284	43.63825	14/05/25 au 15/05/25	
L3	3.86742	43.65209	15/05/25 au 16/05/25	
M4	3.80648	43.55905	16/05/25 au 17/05/25	
M1	3.81622	43.61812	22/05/25 au 23/05/25	
L1	3.85545	43.70359	23/05/25 au 24/05/25	
D2	392332	43.9992	29/05/25 au 130/05/25	
D1	395985	44.0007	30/05/25 au 32/05/25	
L4	3.89050	43.64170	11/06/25 au 12/06/25	
M3	3.80683	43.56452	12/06/25 au 13/06/25	