



UNIVERSITÉ
DE MONTPELLIER

**MASTER
ECO-EPIDEMIOLOGIE
Parcours**

**Gestion et Surveillance
des Emergences Parasitaires et Infectieuses
Année 2**

Mémoire de Stage de Fin d'Etude

**Evaluation semi-quantitative de
la densité des stomoxes et de la
lutte intégrée associée dans les
élevages bovins réunionnais**

Présenté par

Céline SUTTER

Réalisé sous la direction de : Marlène Dupraz et Yannick Grimaud
Laboratoire/Organisme/Structure : Cirad UMR ASTRE Réunion
Période du stage : 01/02/2022 au 31/07/22
Date de soutenance : 1^{er} juillet 2022

Année universitaire 2021-2022



<i>Mots-clés:</i>	RÉSUMÉ
Bovin	<p>Les conditions environnementales et les pratiques d'élevage sur l'île de La Réunion constituent des conditions optimales à la pullulation des stomoxes, diptères hématophages jouant un rôle dans la transmission de maladies associées aux bovins. Afin d'adapter les mesures de lutte intégrée, il est important d'avoir une estimation de la densité et des niveaux de nuisances des stomoxes. Mais les méthodes de piégeage utilisées servant d'estimateur de la densité apparente (DAP) nécessitent une double intervention de la part des agents de terrain. Afin d'évaluer une méthode de comptage simplifiée, le premier objectif de ce stage s'est porté sur l'évaluation d'une méthode de mesure simple de cette DAP, consistant au comptage du nombre de mouches sur l'une des pattes avant du bovin. Cette méthode a déjà été éprouvée aux États-Unis, mais les résultats de notre étude montrent que celle-ci ne permet dans le contexte réunionnais, une estimation quantitative correcte. Dans un second temps, nous avons évalué la mise en relation des mouvements de défenses des animaux avec la densité des stomoxes présent sur ceux-ci. Nos résultats montrent que cette relation existe et qu'elle varie selon les individus. Les bovins les plus jeunes, de plus petite taille et les mâles sont relativement plus stressés que les autres. Aussi, plus il y a de mouches sur le bovin, plus celui-ci est stressé. Enfin, le second objectif de ce stage, nous a permis d'évaluer les méthodes de lutte intégrée, à l'échelle de l'exploitation, menée contre les stomoxes à La Réunion. Nos résultats montrent que cette lutte intégrée n'a pas d'effet significatif sur les populations de stomoxes. Il serait intéressant de poursuivre cette étude, mais cette fois sur un plus grand nombre d'exploitations et de peut-être appliquée la lutte intégrée sur un périmètre plus grand, tout cela afin de pouvoir adapter au mieux les mesures de lutte à La Réunion.</p>
Diptère hématophage	
Lutte intégrée	
Outil de mesure	
<i>Stomoxys calcitrans</i>	
<i>Stomoxys niger niger</i>	

<i>Keywords:</i>	ABSTRACT
Cattle	<p>Environmental conditions and husbandry practices on Reunion Island constitute optimal conditions for the pullulation of stomoxes, hematophagous diptera that play a role in the transmission of diseases associated with cattle. In order to adapt integrated control measures, it is important to have an estimate of the density and nuisance levels of stomoxes. However, the trapping methods used to estimate the apparent density (DAP) require a double intervention by field workers. In order to evaluate a simplified counting method, the first objective of this internship was to evaluate a simple method of measuring this DAP, consisting of counting the number of flies on one of the bovine's front legs. This method has already been tested in the United States, but the results of our study show that it does not allow a correct quantitative estimation in the Reunion Island context. In a second step, we evaluated the relation between the movements of defenses of the animals and the density of stomoxes present on them. Our results show that this relationship exists and that it varies according to the individuals. Younger, smaller and male cattle are relatively more stressed than others. Also, the more flies there are on the cattle, the more stressed they are. Finally, the second objective of this training course allowed us to evaluate the integrated pest methods, at the farm level, carried out against stomoxes in Reunion Island. Our results show that this integrated control has no significant effect on stomox populations. It would be interesting to continue this study, but this time on a larger number of farms and to perhaps apply integrated pest management on a larger perimeter, all this in order to be able to better adapt the control measures in Reunion.</p>
Evaluation	
Hematophagous diptera	
Integrated Pest Management	
<i>Stomoxys calcitrans</i>	
<i>Stomoxys niger niger</i>	

SOMMAIRE

Liste des tableaux	
Liste des figures	
Remerciements	
I- Introduction	1
1) Contexte général	1
2) Contexte à La Réunion	1
3) Problématique et objectifs	3
II- Matériels et méthodes	4
1) Matériel biologique	4
2) Sites d'études	6
3) Protocole	8
3.1) Suivi de la densité de mouches sur bovin et de leurs mouvements de défense	8
3.2) Suivi de la densité apparente des stomoxes	9
4) Données environnementales et météorologiques	9
5) Analyses statistiques	10
5.1) Influence des caractéristiques intrinsèque des bovins sur le nombre de mouches observées sur leur patte avant	10
5.2) Influence de la DAP des stomoxes sur le nombre de mouches observées sur une patte avant d'un bovin	10
5.3) Relation entre les mouvements de défense et le nombre de mouches sur la patte avant d'un bovin	11
5.4) Le nombre de mouche sur une patte avant est-il un bon indicateur de la DAP des stomoxes ?	11
5.5) Mesure de l'impact de la lutte intégrée sur la DAP des stomoxes	12
III- Résultats	12
1) Pluie et températures sur les sites d'études	12
2) Suivi du nombre de mouches et de stomoxes au cours du temps	13
3) Différence du nombre de mouches sur bovin selon les caractéristiques intrinsèques	14
4) Relation entre les indicateurs de stress et le nombre de mouches sur la patte avant d'un bovin	15
5) Relation entre la densité apparente de stomoxes et le nombre de mouches sur bovin	17
6) Effet de la lutte intégrée sur la densité apparente de stomoxes	18
IV- Discussion	18
1) Relation entre le nombre de mouches sur la patte avant d'un bovin et la DAP stomoxes	19
2) Relation entre les indicateurs de stress et le nombre de mouches sur la patte avant d'un bovin	20
3) Comparaison des exploitations avec lutte intégrée et lutte partielle	20
4) Limites de notre étude	21
5) Conclusion et perspectives	22
Bibliographie	
Annexes	

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Descriptif des mesures de luttres dans les différentes exploitations.	7
Tableau 2 : Nombre moyen de stomoxes capturés par piégeage ou de mouches observées sur une patte avant d'un bovin.	13

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Abdomen de <i>S. calcitrans</i> et de <i>S. niger niger</i> .	5
Figure 2 : Cycle de vie des stomoxes	5
Figure 3 : Carte de La Réunion avec la localisation des exploitations.	6
Figure 4 : Frise de la durée des visites des exploitations.	8
Figure 5 : Graphique ombrothermique des sites d'étude	12
Figure 6 : Nombre de stomoxes capturés par piégeage (fil à colle et piège Vavoua) et nombre moyen de mouches sur la patte avant d'un bovin au cours du temps pour les trois paires.	14
Figure 7 : Nombre de mouches sur la patte avant d'un bovin en fonction de leurs caractéristiques.	15
Figure 8 : Occurrence des mouvements de défenses durant 2 minutes en fonction du nombre de mouches sur la patte avant d'un bovin.	16
Figure 9 : Nombre moyen de mouches sur une patte avant d'un bovin en fonction de la DAP observée à l'aide des pièges Vavoua et en fonction des couleurs dominantes de la patte avant du bovin.	17

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier le Cirad et tout particulièrement le personnel du Pôle de Protection des Plantes de Saint-Pierre de m'avoir accueilli pendant toute la durée de mon stage.

Je remercie tout particulièrement mes responsables de stage, Yannick Grimaud et Marlène Dupraz pour leur soutien, leur patience, leurs expertises et leur aide tout au long de mon stage.

Je remercie l'équipe de l'UMR ASTRE, Thierry Baldet, Renaud Lancelot et Silvère Giraud pour leurs conseils et leur aide dans cette étude.

Je tiens à remercier aussi les stagiaires qui étaient avec moi au 3P, Justine Grillet, Alain Karkach, Robin Comte, Paul Baومت et Justine Leuleu, pour leurs conseils, leur aide et leur bonne humeur.

Ensuite, un grand merci aux éleveurs qui nous ont ouvert les portes de leur exploitation pour la durée du suivi.

Et enfin, je tenais à remercier ma sœur et mes amies Clarisse et Mahé pour leurs relectures de mon rapport et leurs encouragements.

I- INTRODUCTION

1) Contexte général

Les stomoxes (Diptera, *Muscidae*), aussi appelés mouche-boeufs, sont des mouches hématophages parasitant le bétail, mais aussi la faune sauvage et parfois l'homme. Dans de nombreuses régions du monde, les stomoxes sont considérés comme étant des ravageurs économiques importants du bétail (Zumpt, 1973), surtout lorsque les animaux sont confinés dans des étables ou des pâturages, offrant des conditions propices à l'alimentation et à la ponte de ces mouches (Moreki et al. 2022). En effet, leur reproduction est conditionnée par la prise de repas sanguin et leur comportement de nutrition, agressif et persistant, est à l'origine de douleurs et de souffrances chez les animaux domestiques. Leurs piqûres entraînent des effets indésirables directs pour l'animal comme une perte d'énergie, une réduction du temps passé à s'alimenter et du stress dont découle alors une diminution des défenses immunitaires qui se traduit par une réduction de la production (Barré, 1981 ; Ehrhardt, 2006 ; Baldacchino et al., 2013). Des réductions de 19% du gain de poids et de 40 à 60% du rendement laitier ont été signalées (Campbell et al., 2001). D'un point de vue économique, les pertes dans la production bovine ont été estimées à 2,2 millions de dollars par an aux Etats-Unis (Taylor et al., 2012). Au Brésil, une évaluation de l'impact des stomoxes fait état d'une perte potentielle de 335 millions de dollars par an (Grisi et al., 2014).

Le repas des stomoxes est souvent interrompu à cause de la douleur causée à l'animal. En effet, afin de chasser les stomoxes, les animaux exécutent des mouvements de défense comme les frémissements peauciers, les mouvements de queue, de la tête, des oreilles et des pattes (Barré, 1981 ; Gilles, 2005 ; Ehrhardt, 2006 ; Baldacchino et al., 2013). Les stomoxes changent donc facilement d'hôte au cours d'un même repas, ce qui en fait d'excellents vecteurs mécaniques pour des agents pathogènes (Ehrhardt, 2006 ; Bouyer et al., 2011). En plus de leurs nuisances, ils joueraient ainsi un rôle dans la transmission de nombreux virus (Virus de l'anémie infectieuse équine, Virus de la peste porcine africaine, Virus de la fièvre du Nil occidental, Virus de la leucose bovine, etc.), de bactéries (*Bacillus anthracis*) dont des rickettsies (*Anaplasma marginale*), de protozoaires (*Trypanosoma spp.*, *Besnoitia besnoiti*, *Babesia spp.*, etc.) et d'helminthes (*Habronema microstoma*) (Baldacchino et al., 2013). Les stomoxes sont susceptibles de transmettre ces agents pathogènes à l'intérieur d'un même troupeau ou entre deux troupeaux proches. La transmission entre des troupeaux plus distants est également possible grâce à la régurgitation différée d'une partie de leur repas lors du repas suivant et à leur capacité de vol. En effet, une partie du sang peut être dirigée vers le jabot (partie du tube digestif situé après l'œsophage). Étant dépourvu de sécrétions digestives, les agents pathogènes peuvent y survivre plus longtemps (24h à 48h selon les agents pathogènes) (Foil et Hogsette, 1994). L'intervalle de temps entre les repas peut varier de 4 à 72h, la régurgitation de sang infectieux a donc des chances d'avoir lieu. Concernant leur capacité de vol, les stomoxes peuvent parcourir jusqu'à 5 km pour trouver du bétail ou des conditions plus favorables (Foil et Hogsette, 1994 ; Bouyer et al., 2011 ; Baldacchino et al., 2013).

2) Contexte à La Réunion

À La Réunion, l'élevage bovin a connu un développement accéléré au cours des dernières décennies. Cette intensification de l'élevage combinée au climat tropical et à la culture de la canne à sucre, omniprésente à La Réunion, a permis de créer des conditions optimales pour la pullulation des stomoxes. Deux espèces y sont présentes : *Stomoxys calcitrans* (Linné, 1758) et *Stomoxys niger niger* (Macquart, 1851) (Barré, 1981 ; Gilles, 2005 ; Bouyer et al., 2011). Les pertes de production induites dans le cheptel bovin de l'île par ces deux espèces ne sont pas connues. Il existe toutefois des données datant des années 50 faisant état de pertes de lait pouvant atteindre les 50% et de pertes en poids vif allant jusqu'à 10kg sur 8 semaines (Barré, 1981). L'impact sanitaire des stomoxes à La Réunion est quant à lui mieux connu. Ils joueraient un rôle important dans la transmission mécanique d'*Anaplasma marginale*, responsable d'une maladie hémolytique chez les bovins : l'anaplasmose bovine. Cette

maladie est la principale hémoparasitose de l'île, comparativement aux babésioses (*Babesia bovis* et *B. bigemina*), et représentait 67% des mortalités par hémoparasitose en 2000. En 2005, les hémoparasitoses représentaient la première cause de mortalité pathologique avec 15% des cas observés par le Réseau d'Épidémiologie et de Surveillance de l'île de La Réunion (Ehrhardt, 2006 ; Bouyer et Stachurski, 2009 ; Bouyer et al., 2011 ; Baldacchino et al., 2013). En 2014, les hémoparasitoses ne représentaient plus que 3,6% des causes de mortalité (Comm. Pers. GDS Réunion).

Les stomoxes sont aussi suspectés de jouer un rôle dans la transmission du virus de la Leucose Bovine Enzoïtique (LBE), rétrovirus oncogène, qui fait actuellement l'objet d'un plan d'assainissement sur l'île. En effet, c'est la transmission iatrogène qui est la principale voie de transmission (palpation rectale, injection par aiguille et par l'écorchage en série) mais il a été démontré que la maladie peut aussi être transmise par des insectes hématophages (Ohshima et al., 1980 ; Buxton et al., 1985 ; Manet et al., 1989 ; Ehrhardt, 2006 ; Bouyer et al., 2011 ; Ooshiro et al., 2013 ; Kohara et al., 2018 ; Panei et al., 2019).

De par leur nuisance et leur rôle de vecteur, les stomoxes ont fait l'objet de différentes stratégies de lutte depuis les années 90 pour tenter de préserver la santé des animaux d'élevage et la sécurité alimentaire des populations. L'initialisation de cette lutte contre les stomoxes fait suite à une épizootie de dermatose nodulaire contagieuse en 1992, qui est à l'origine de la mise en place, en 1994, du programme POSEIDOM vétérinaire (Programme d'Options Spécifiques à l'Eloignement et à l'Insularité des Départements français d'Outre-Mer - 1991). Les mesures de contrôle des stomoxes furent d'abord chimiques (1994), puis implémentées de mesures biologiques (1995), mécaniques (2000) et environnementales (2003). Plus récemment, le Plan Global de Maîtrise Sanitaire Bovin (PGMSB), établi par la DAAF (Direction de l'alimentation de l'agriculture et de la forêt) en collaboration avec le Groupement de Défense sanitaire de la Réunion (GDS Réunion) et l'ensemble des acteurs du monde de l'élevage inclut un programme de lutte intégrée contre les stomoxes afin : (1) de réduire l'impact sanitaire général de ces vecteurs (anaplasmose, baisse de production, bien-être animal, etc.) et (2) de contribuer au plan d'assainissement de la leucose bovine enzoïtique (LBE) en cours sur l'île. La lutte intégrée contre les stomoxes comprend quatre mesures qui sont : la lutte chimique, la lutte mécanique, la lutte environnementale et la lutte biologique. L'ensemble de ces mesures permet d'agir sur chaque stade de vie des stomoxes (Bouyer et al., 2011 ; Baldacchino et al., 2013).

La lutte chimique par utilisation d'insecticides est une des techniques les plus utilisées par les éleveurs. Il existe différentes familles de molécules utilisées. Les adulticides, à base de deltaméthrine (famille des pyréthrinoides), sous la dénomination Butox[®], en aspersion ou en pour-on sur l'animal est une des techniques les plus utilisées par les éleveurs, notamment dans un but curatif lors de forte pullulation de stomoxes et sous prescription vétérinaire uniquement. Bouyer et al. (2011) fait part d'une réduction de 90% des attaques des stomoxes lors du traitement mais, de manière temporaire (entre 10 et 15 jours) et ne permettant pas une réduction globale de la population de vecteurs. Ces traitements sont coûteux et génèrent des résidus de pesticides dans les produits et sous-produits animaux, tout en entraînant des contaminations environnementales, notamment des eaux de surfaces (Desquesnes et al., 2021). Il est donc important d'avoir une utilisation responsable des insecticides (Durel et al., 2015). De plus, après deux décennies d'utilisation, des résistances à la deltaméthrine ont été mises en évidence en 2006 sur l'île (Ehrhardt, 2006). Concernant le larvicide utilisé, il s'agit d'un inhibiteur de croissance, la cyromazine, qui est principalement utilisée comme mesure de lutte chimique dans le programme de lutte intégrée à La Réunion. Ce larvicide est utilisé sur les gîtes larvaires des stomoxes qui ne peuvent être facilement éliminés tels que les tas de fumiers, la litière des bovins ou les croûtes de surface des fosses à lisier. En absence de lessivage, une rémanence d'efficacité 3 semaines est admise lors des traitements (Comm. Pers. GDS Réunion).

Pour la lutte mécanique, ce sont les pièges Vavoua ainsi que des fils à colle qui sont le plus souvent utilisés à La Réunion (Ehrhardt, 2006 ; Bouyer et al., 2011). Ces moyens de lutte visent les stades adultes. Le piège Vavoua est un piège avec des pièces de tissu bleu phtalogène, attractant pour les insectes et initialement conçu pour les glossines (Laveissière et al., 1990). Selon Gilles et al. (2007), le piège Vavoua représente le meilleur choix de piège de par son faible coût, sa facilité à être mis en place et sa spécificité envers les stomoxes. Les fils à colle, quant à eux, sont des fils collants généralement déroulés au niveau des cornadis. Ils capturent sans distinction les insectes volants à la recherche d'un reposoir, notamment de nombreuses mouches domestiques. La lutte mécanique représente un bon outil pour les propriétaires qui observent une diminution instantanée des nuisances, mais qui a un impact négligeable sur les populations de stomoxes. Cet impact pourrait être augmenté par l'utilisation de pièges imprégnés d'insecticides (Bouyer et al., 2011 ; Desquesnes et al., 2021).

La lutte environnementale, quant à elle, vise à créer des conditions défavorables au développement de ces insectes. Elle consiste donc au traitement, au bâchage et/ou à l'enlèvement des fumiers, à l'élimination des gîtes larvaires secondaires (restes de paille en décomposition, croûte dans les boxes ou sur le matériel, etc.), au nettoyage régulier des bâtiments et de leurs abords et à la gestion de la végétation aux alentours. Le but étant de réduire l'accessibilité et la viabilité des potentiels sites de pontes (Bouyer et al., 2011 ; Badacchino et al., 2013). Par exemple, Gilles (2005) a noté que parmi deux exploitations présentant les mêmes conditions d'élevage, celle avec la meilleure gestion des effluents et une meilleure propreté présentait des densités apparentes (DAP) de stomoxes deux fois moins importantes que l'autre exploitation qui était relativement plus sale. À La Réunion, la gestion des effluents va varier d'une exploitation à une autre et les actes effectifs de lutte environnementale sont encore lacunaires.

La lutte biologique consiste à utiliser les auxiliaires antagonistes naturels des stomoxes. Elle reposait de 1995 à 2011 sur l'utilisation de diverses microguêpes parasitoïdes tels que : *Spalangia endius*, *Trichopria* sp., *Tachinaephagus stomoxidae*. Cette forme de lutte biologique est limitée pendant les pics d'infestation et est difficile à mettre en place, notamment par la nécessité d'avoir un élevage conséquent de stomoxes et de microguêpes pour couvrir les besoins de l'île. Actuellement, elle n'est donc plus utilisée à La Réunion (Ehrhardt, 2006 ; Bouyer et al., 2011 ; comm. pers. GDS Réunion). Toutefois, des travaux sur un champignon entomopathogène des stomoxes (*Batkoa* sp.) ont été initiés depuis 2021 et ouvrent les perspectives d'une nouvelle lutte biologique (Win-Chin, 2021).

3) Problématique et objectifs

Le manque d'indicateurs concrets sur l'efficacité de la lutte intégrée contre les stomoxes à La Réunion constitue un frein à la sensibilisation des éleveurs, notamment sur les impacts directs tels que le stress, l'anxiété des animaux ou encore les pertes de production. Par ailleurs, la mise en place d'une lutte intégrée contre les stomoxes sur une exploitation nécessite des indicateurs comme l'estimation de la densité et des niveaux de nuisance des stomoxes dans les exploitations bovines. Cette estimation permet d'adapter les mesures de lutte intégrée à mettre en place et d'apprécier leurs impacts. Toutefois, l'estimation à visée quantitative de la densité de stomoxes, par distinction des estimations qualitatives et du ressenti de l'éleveur, ne se fait généralement que par des méthodes de piégeages (piège Vavoua, fil à colle, etc.). Ces méthodes nécessitent une double intervention des techniciens qui doivent venir installer les pièges, puis les récupérer 24h plus tard afin de dénombrer les stomoxes capturés. Par ailleurs, le piégeage ne permet pas une estimation réelle de la densité de stomoxes capturés, car il ne permet de capturer qu'une partie de la population. Ces pièges ont des biais et leur efficacité dépend beaucoup de leur emplacement (Taylor et al., 2020). À ce titre, le terme de « densité apparente » (DAP) est utilisé. Sans autres mesures, il est donc difficile d'évaluer l'efficacité de la lutte intégrée menée contre les stomoxes à La Réunion. Il existe en effet de nombreux paramètres qui peuvent entrer en considération et influencer l'impact de la lutte. On peut citer par exemple : l'environnement proche, tel que les champs de canne à sucre, des mesures de lutte plus utilisées par

rapport à d'autres, par exemple, la qualité de gestion des effluents d'élevage ou encore, l'usage intempestif d'insecticides. Toutefois, il est possible qu'un effort de lutte intégrée plus soutenu sur une exploitation aura davantage d'impact sur la population de stomoxes qu'une autre exploitation mettant en place moins d'efforts et ce pour des conditions similaires.

Compte tenu des besoins de ces indicateurs, le premier objectif de ce stage porte sur l'évaluation d'une méthode de mesure simple et rapide des densités apparentes de stomoxes dans les élevages bovins comme cela a été éprouvé aux États-Unis (Mullens et al., 2006 ; Gerry, 2007). Cela consistera donc à tester cette méthode afin d'établir une relation statistique, si elle existe, entre la densité apparente de stomoxes et le nombre de mouches observées sur la patte avant gauche des bovins. En effet, les stomoxes privilégient cette partie du corps des bovins. Les vaisseaux sanguins sont plus proches de la surface de la peau et le pelage y est aussi plus fin. Cette méthode permet un dénombrement direct des mouches et peut réduire les efforts d'une estimation quantitative (Dougherty et al., 1995). Aussi, l'intensité des mouvements de défense (coups de pattes et frémissements peauciers) des bovins sera mise en relation avec la densité des stomoxes observée sur les animaux et évaluée par piégeage. Cette approche permettra d'objectiver le stress engendré par les stomoxes, et par conséquent les niveaux de nuisance que cherchent à mettre en évidence les acteurs de la lutte intégrée contre les stomoxes.

Le second objectif vise à comparer l'impact sur les populations de stomoxes, d'un effort nul ou partiel de lutte intégrée, c'est à dire mené par l'éleveur, par rapport à un effort de lutte plus complet. La mise en place de cet effort sera appuyée par le GDS Réunion. La mise en évidence d'un effort de lutte intégrée plus important peut affecter de manière concrète la densité apparente des stomoxes, et par conséquent leur nuisance. Elle peut aussi servir les acteurs de cette lutte dans leurs objectifs de sensibilisation des éleveurs. Il s'agira *a priori* de la première évaluation globale, à l'échelle de l'exploitation, de la lutte intégrée menée contre les stomoxes à La Réunion.

II- MATERIELS ET METHODES

1) Matériel biologique

Les stomoxes sont des Diptères Brachycères de la famille des *Muscidae* et de la sous-famille des *Stomoxyinae*. Ils mesurent 3 à 10 mm de longueur et ont un aspect similaire à la mouche domestique (*Musca domestica* Linné, 1758) mais contrairement à celle-ci, les *Stomoxyinae* possèdent un appareil buccal adapté à la piqure, un proboscis dirigé vers l'avant en suivant l'axe du corps (Gilles, 2005 ; Bouyer et al., 2011). Cette sous-famille compte dix genres dont trois importants : *Haematobosca*, *Haematobia* et *Stomoxys*. Ce dernier comprend 18 espèces dont font partie *S. calcitrans* qui est cosmopolite et *S. niger niger* qui a, quant à elle, une aire de distribution beaucoup plus restreinte limitée à l'Afrique subsaharienne. *Stomoxys niger niger* aurait été introduite depuis le continent africain à Madagascar, à l'île de La Réunion et à l'île Maurice (Zumpt, 1973 ; Barré, 1981 ; Gilles, 2005 ; Baldacchino et al., 2013).

La diagnose entre les deux espèces présentes à La Réunion est réalisée en particulier en observant la variabilité des motifs abdominaux : *S. calcitrans* possède un abdomen ponctué de taches noires de forme arrondie avec un trait noir médian discontinu qui est plus large que chez *S. niger niger*. Celle-ci possède un abdomen rayé de bandes noires perpendiculaires à l'axe du corps avec un trait noir médian discontinu (Zumpt, 1973) (Figure 1).

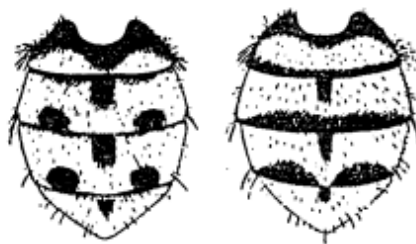


Figure 1 : Abdomen de *S. calcitrans* (à gauche) et de *S. niger niger* (à droite) (d'après Zumpt, 1973).

La reproduction des stomoxes est conditionnée par la prise de repas sanguin et les deux sexes sont hématophages. Par ailleurs, ils peuvent également s'alimenter de nectar, de pollen et de fruits mûrs (Barré, 1981 ; Foil et Hogsette, 1994 ; Gilles, 2005 ; Bouyer et al., 2011 ; Muller et al., 2012 ; Baldacchino et al., 2013). Ce sont des mouches piqueuses diurnes avec une activité journalière bimodale en saison chaude à basse altitude et unimodale à haute altitude ou en saison fraîche (Gilles, 2005 ; Bouyer et al., 2011).

En ce qui concerne leur cycle de développement, celui-ci comprend quatre stades : l'œuf d'environ 1 mm, ensuite la larve (avec trois stades de développement L1 à L3) mesurant jusqu'à 1 cm au stade L3, puis la pupa renfermant la nymphe qui fait entre 4 à 7 mm et enfin l'imago de 5 à 7 mm (Gilles, 2005 ; Bouyer et al., 2011) (Figure 2). Au cours du temps, ces deux espèces de stomoxes présentent des variations d'abondance avec des densités élevées en période estivale et une réduction de la taille des populations en hiver qui sont déterminées par la variation de température (Lysyk, 1998 ; Gilles, 2005 ; Ehrhardt, 2006). Les sites de ponte favorables à *S. calcitrans* sont constitués de matières végétales en décomposition (végétaux coupés, feuilles d'arbres en décomposition, litière ou encore déchets alimentaires) pouvant être mélangées à des déjections animales. Cependant, *S. niger niger* préfère pondre sur des végétaux en décomposition non enrichis en déjection animal, notamment dans les amas de feuilles de canne à sucre laissés au sol après la coupe. En revanche, les fèces pures ou le fumier exposé directement aux intempéries ne sont, pas des lieux propices à la ponte et au développement larvaire (Barré, 1981 ; Lysyk, 1998 ; Ehrhardt, 2006 ; Bouyer et al., 2011).

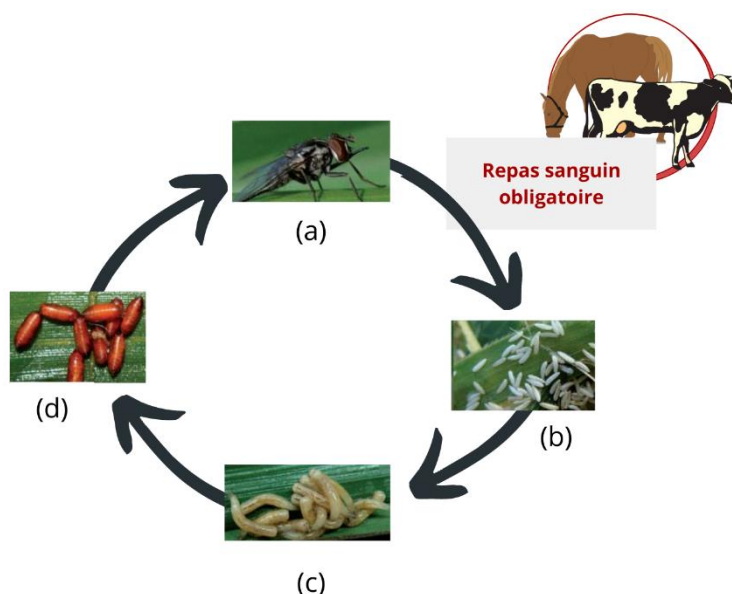


Figure 2 : Cycle de vie des stomoxes. (a) L'imago, (b) l'œuf, (c) la larve (L1 à L3) et (d) la pupa. Photo : M. Pannequin.

Les stomoxes ont un sens visuel et un thermotropisme excellents associés à des sens olfactifs affinés, ils choisissent donc leur hôte en fonction de la couleur, de l'épaisseur du pelage, des mouvements (comportement de l'animal) ou encore des odeurs (Zumpt, 1973 ; Ehrhardt, 2006 ; Gerry, 2007).

2) Sites d'étude

La Réunion est une île volcanique de 2 512 km² située dans l'océan Indien. Le climat y est tropical humide avec une saison chaude et pluvieuse de décembre à avril (été austral). C'est la saison où peuvent survenir des cyclones comme le cyclone Batsirai survenu le 02 février 2022 et le cyclone Emnati, survenue le 20 février 2022. La période de mai à septembre (hiver austral) correspond à la saison froide et sèche (Barré, 1981 ; Gilles, 2005).

Les exploitations sélectionnées sont situées au sud-ouest de l'île dans une zone au climat océanique (selon la classification de Köppen). Elles sont situées à des altitudes comprises entre 435 m et 745 m (Figure 3). Pour chaque exploitation, le consentement oral et écrit des éleveurs a été demandé au préalable.

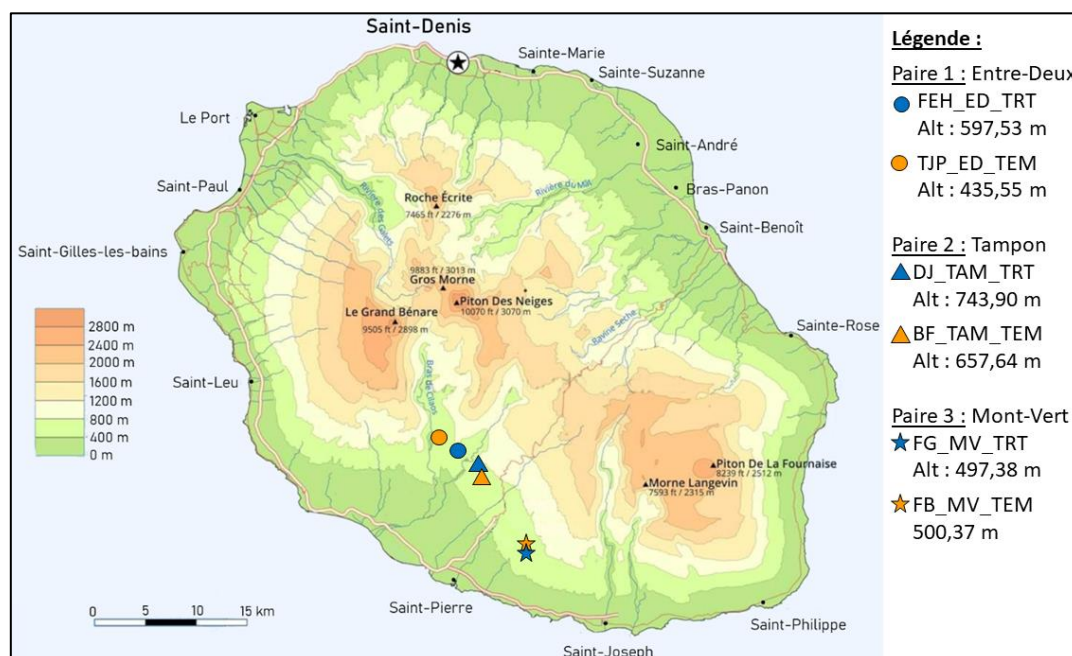


Figure 3 : Carte de La Réunion avec la localisation des exploitations.

Les observations de terrain seront menées sur trois paires d'exploitations, chacune composée d'une exploitation avec une lutte intégrée partielle réalisée par l'éleveur et d'une autre avec une lutte intégrée appuyée par le GDS (Tableau 1). La première paires d'exploitation est située dans la commune de l'Entre-deux (FEH_ED_TRT et TJP_ED_TEM), la seconde dans le lieu-dit Trois mares dans la commune du Tampon (DJ_TAM_TRT et BF_TAM_TEM) et la dernière paire à Mont-Vert dans la commune de Saint-Pierre (FG_MV_TRT et FB_MV_TEM) (Figure 3). Pour les identifiants des exploitations, le premier groupe de lettres (ex : FEH) représente le nom et le prénom de l'éleveur, le second groupe, le lieu de l'exploitation (ex : ED pour Entre-Deux) et enfin le dernier groupe, TEM (témoin) pour l'exploitation avec une lutte partielle ou absente et TRT (traitée) pour l'exploitation avec application de la lutte intégrée.

Les six éleveurs sont des engraisseurs avec des animaux dans des bâtiments ouverts. Les exploitations à Mont-Verts possèdent des animaux attachés par cordes sinon tous possèdent des animaux en box. L'exploitation BF_TAM_TEM, au Tampon, est la seule qui possède une aire d'exercices pour certains de ses animaux.

Tableau 1 : Descriptif des mesures de lutttes dans les différentes exploitations.

Localisation	Exploitation avec lutte intégrée		Exploitation avec lutte partielle
Entre-Deux	Avant traitement	Durant le traitement	Exploitation TJP_ED_TEM
	Exploitation FEH_ED_TRT		Présence de 3 pièges Vavoua non fonctionnels (à l'ombre et délavés). Présence d'anciens fils à colle (non fonctionnels). Pas d'utilisation d'insecticides et pas de gestion environnementale. 9 mètres de fil à colle sont placés uniquement pour les comptages, à l'arrière des box.
	Présence de 3 pièges Vavoua délavés. 18 mètres de fils à colle tirés. Pas d'utilisation d'insecticides.	Mise en place de 5 pièges Vavoua plus deux anciens. Mise en place de 45 mètres de fils à colle au niveau des cornadis. Gîtes larvaires secondaires enlevés toutes les 3 semaines. Traitement larvicide toutes les 3 semaines sur le fumier et là où il y a formation de croûte dans les box.	
Trois mares	Exploitation DJ_TAM_TRT		Exploitation BF_TAM_TEM
	Présence de 2 pièges Vavoua fonctionnels et un non fonctionnel. Plus de 40 mètres de fils à colle tirés. Utilisation d'un produit contre les mouches domestiques.	Mise en place de 5 pièges Vavoua. Ajout de 10 mètres de fils à colle supplémentaires, sur piquets à proximité des box. Pas de présence de gîtes secondaires à récupérer. Application de larvicide toutes les 3 semaines, dans les coins des box avec récurage des croûtes les 2 première fois, puis sur toute la surface des box après récurage de la litière. Application de Cythrine® par l'éleveur et à sa propre initiative sur la végétation alentours.	Pas de pièges mis en place. Pas de gestion environnementale. Pas d'utilisation d'insecticides. 12 mètres de fil à colle sont placés uniquement pour les comptages, au niveau des cornadis et un peu autour des box.
Mont-Vert	Exploitation FG_MV_TRT		Exploitation FB_MV_TEM
	Pas de pièges mis en place. Avant notre arrivée, utilisation de Butox® sur animaux tous les 15 jours (De novembre à début mars).	Mise en place de 5 pièges Vavoua. Application de plus de 20 mètres de fils à colle par l'éleveur, plus ajout de 8 mètres de notre part, au-dessus et autour de la structure. Les comptages sont effectués sur les 8 mètres	Pas de pièges mis en place. Traitement au larvicide des tas de litière fraîchement récurés. 12 mètres de fil à colle sont placés uniquement pour les comptages, au niveau des cornadis.

		placés en face de 3 bovins et à hauteur d'homme. Récupération des gîtes larvaires secondaires toutes les 3 semaines si présence. Traitement au larvicide des box des cabris, des taureaux, des amas végétaux et de la fumière.	
--	--	--	--

3) Protocole

Les observations ont été réalisées dans chaque ferme une fois par semaine pendant 16 semaines de mars à juin, entre 7h00 et 9h00 pour les exploitations de l'Entre-Deux et du Tampon et entre 13h00 et 14h30 pour les exploitations à Mont-Vert. Pour chaque paire d'exploitations, l'ordre des visites était alterné chaque semaine pour ne pas induire de variable horaire. Sur les exploitations de l'Entre-Deux et du Tampon, les créneaux horaires du matin correspondent au pic attendu d'activité des stomoxes. Le créneau horaire sur Mont-Vert était contraint par l'accord d'un des éleveurs mais aussi motivé par la situation d'ensoleillement. En effet, les exploitations de Mont-Vert sont situées en contre-bas d'une colline et sont donc à l'ombre une grande partie de la matinée. Pour s'assurer de l'activité des stomoxes, des relevés par piégeage et sur bovins ont tout de même été effectués le matin entre 7h00 et 9h00 et en début d'après-midi pendant 10 semaines sur l'exploitation accessible. La comparaison des résultats montre une plus grande activité des stomoxes sur le créneau de l'après-midi et finalement, justifie sa conservation. Ce faisant, les résultats de cette présente étude pour les exploitations de Mont-Vert concernent donc uniquement le créneau horaire mentionné ci-dessus, soit 13h00 à 14h30. Les trois premières semaines d'observation (semaine -3, -2 et -1) ont été effectuées avant l'intervention du GDS dans les fermes concernées et ont servi de mesure initiale pour les relevés de densité de mouches sur bovin, des indicateurs de stress ou encore de la DAP des stomoxes (Figure 4). À partir de la semaine 0 (semaine du 28 mars au 1^{er} avril 2022), les mesures de lutte ont été mises en place sur les exploitations ciblées pour la lutte intégrée (Tableau 1).

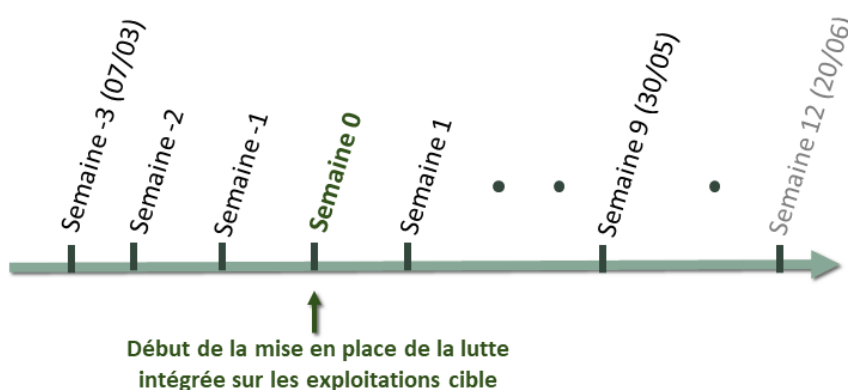


Figure 4 : Frise de la durée des visites des exploitations.

3.1) Suivi de la densité de mouches sur bovin et de leurs mouvements de défense

À chaque visite, cinq bovins se tenant debout et qui n'étaient pas en train de s'alimenter ont été observés. Leurs identifiants, leurs sexes, leurs races, la couleur dominante de leurs pattes avant ont été relevés. Un critère de « taille du bovin » a aussi été pris en compte. Cependant, ne pouvant pas

connaître leur poids ainsi que leur taille, trois mesures qualitatives ont été sélectionnés : les bovins jeunes, c'est-à-dire, les bovins mâles ou femelles dont l'âge est compris entre 8 et 12 mois et qui n'ont pas encore atteint une taille adulte comparativement au reste du troupeau ; les bovins adultes âgés de plus de 12 mois et qui ont atteint une taille adulte ; et enfin les grands taureaux, c'est-à-dire des bovins mâles de taille adulte, de plus de 12 mois et dont le poids approche ou excède la tonne.

Le suivi de la densité de mouche sur chacun des bovins ainsi que leurs mouvements de défense suit un protocole déjà établi dans d'autres études pour évaluer l'impact des stomoxes sur la production bovine ou la réponse comportementale des bovins aux stomoxes (Barré 1981, Berry et al., 1983, Dougherty et al., 1993, 1995, Mullens et al., 2006, Taylor 2012). Ainsi, dans cette étude, le nombre de mouches a été dénombré sur une des pattes avant de cinq bovins pendant 30 secondes. Cette partie du corps correspond en effet à un site privilégié par les stomoxes (Dougherty et al., 1995). Enfin, c'est le nombre de mouches qui est dénombré et non le nombre de stomoxes car il est impossible de faire la distinction à l'œil nu entre des mouches domestiques et des stomoxes au-delà de quelques dizaines de centimètres. À la suite du comptage sur un bovin, les comportements de défense ont été dénombrés pendant les deux minutes qui ont suivi. Ils concernent le nombre de frémissements peauciers et le nombre de coups de pattes. Le nombre de frémissements peauciers constitue un comportement fréquent et correspond à un mouvement de la peau réalisé par l'animal lors de nuisances légères par les stomoxes (Dougherty et al., 1995). Une ondulation continue de quelques secondes est comptée comme un événement unique. Le nombre de coups de pattes représente, cette fois, un comportement face à une nuisance plus conséquente (Dougherty et al., 1995). Cet événement est enregistré quand la patte quitte le sol.

3.2) Suivi de la densité apparente des stomoxes

La DAP de stomoxes a été mesurée à l'aide de piège Vavoua et de fil à colle. Pour cela, cinq pièges Vavoua et plusieurs mètres linéaires de fils à colle ont été installés à chaque visite. À l'issue d'une période de 24h, le nombre de stomoxes capturés par pièges Vavoua a été dénombré et les espèces ont été identifiées morphologiquement au laboratoire. Les pièges Vavoua ont été placés dans une zone dégagée, à plus de 5 mètres des animaux et exposés au soleil afin, respectivement, d'augmenter leur attractivité, les rendre plus visible sur de longues distances et limiter l'interaction avec les animaux. Les fils à colle ont été installés préférentiellement au niveau des cornadis, zone qui est plus favorable à la capture des stomoxes selon Gilles (2001). Le nombre de stomoxes a été dénombré directement sur 5 portions espacées d'un mètre de fil à colle, sur le terrain. Cette fois, les espèces n'ont pas été identifiées, car il est difficile de voir correctement leurs caractéristiques morphologiques et qu'il n'est pas possible de les transporter au laboratoire en gardant les individus intacts. Le fil à colle a été laissé sur chaque exploitation et un nouveau a été installé chaque semaine. Pour les exploitations avant traitement et les exploitations non traitées, les pièges Vavoua ont été retirés du site après chaque capture. Autrement, ils sont laissés sur place puisqu'ils constituent une des mesures de lutte intégrée.

4) Données environnementales et météorologiques

À chaque visite, plusieurs paramètres relatifs aux conditions météorologiques et environnementales ont été relevés car ils peuvent impacter l'activité des stomoxes. Ces paramètres sont :

- La date ;
- L'heure ;
- La pluie au moment de chaque observation (aucune, bruine ou brouillard, fine, forte) ;
- Les précipitations journalières via smartis.re (<https://smartis.re/METEOR>) aux coordonnées des sites d'études ;
- La couverture nuageuse (ciel dégagé, moins de 50% de ciel ennuagé, c'est-à-dire quelques nuages, plus de 50% de ciel ennuagé, c'est-à-dire un ciel presque couvert, complètement couvert) ;

- Le rayonnement global via smartis.re aux coordonnées des sites d'études ;
- Le vent (nul, légère brise à vent faible, vent faible, vent fort) ;
- La température horaire à l'aide d'enregistreur (Tiny Tags) sur chaque site d'études ;
- L'hygrométrie horaire à l'aide d'enregistreur (Tiny Tags) sur chaque site d'études.

5) Analyses statistiques

Une base de données sur OpenOffice Base a été réalisée afin de compiler toutes les données. Toutes les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide du logiciel R (version 4.0.5). Compte-tenu des contraintes de rédaction et de soumission du rapport de stage, les analyses statistiques présentées ici, ont été effectuées sur les relevés allant du 07/03/22 au 02/06/22 (semaine -3 à 9). Les données de la semaine 10 à 12 seront compilées ultérieurement pour une analyse statistique définitive. Les graphiques ont été réalisés avec la fonction « plot » existant de base dans le logiciel R ou à l'aide du package *ggplot2*. Les comparaisons de deux moyennes ont été effectuées à l'aide d'un test de Student, ou, dans le cas de non-respect de la normalité et de l'homoscédasticité, à l'aide d'un test non paramétrique de Wilcoxon-Mann-Whitney.

5.1) Influence des caractéristiques intrinsèque des bovins sur le nombre de mouches observées sur leur patte avant

Les stomoxes choisissent leurs hôtes grâce à leur sens visuel et olfactif (Zumpt, 1973 ; Ehrhardt, 2006 ; Gerry, 2007). Une première analyse doit donc être menée pour vérifier si les caractéristiques intrinsèques des bovins, i.e. les caractéristiques de race, de couleur, de sexe ou encore de taille, influent directement sur le nombre de stomoxes observés sur une de leur patte avant. Si des caractéristiques intrinsèques des bovins ont des différences significatives, elles devront être considérées dans la relation à établir entre la DAP des stomoxes, le nombre de mouches sur une patte avant d'un bovin et les indicateurs de stress. Un modèle linéaire généralisé (GLM) a été utilisé compte tenu du nombre de caractéristiques. En générale, pour les données de comptage, on utilise des GLM suivant une distribution de Poisson (Zeileis et al., 2008), sauf en cas de surdispersion (variance supérieure à la moyenne) où l'on se tourne obligatoirement vers une régression binomiale négative. Pour vérifier la surdispersion des données, la fonction « dispersiontest » du package AER (Kleiber et al., 2017) a été utilisée et a confirmé que l'analyse doit être effectuée avec un GLM suivant une régression binomiale négative. La fonction « glm.nb » du package MASS (Ripley et al., 2011) a donc été utilisée pour construire le modèle. Dans les GLM faisant appel à plusieurs variables, leurs colinéarités peuvent entraîner des biais dans l'interprétation du modèle. Cette colinéarité entre les caractéristiques intrinsèques des bovins a été vérifiée à l'aide de la fonction « vif » du package car (Fox et al., 2016). Une par une, les variables avec les plus fortes colinéarités sont enlevées du modèle jusqu'à ce que plus aucune colinéarité ne soit constatée. Ensuite, une sélection automatique des variables, en accord avec le Critère d'Information d'Akaike (AIC), a été réalisée sur le GLM. Cette sélection suit une procédure d'ajout et de retrait des variables depuis le modèle d'origine. Le modèle avec le meilleur AIC est retenu. Enfin, pour déterminer quelles sont les caractéristiques intrinsèques des bovins qui sont significatives, une Anova a été appliquée sur le modèle retenu. Pour conclure, un test post-hoc à l'aide de la fonction « emmeans » du package *emmeans* (Lenth et al., 2020) a permis de comparer la différence du nombre de mouches sur une patte avant entre les modalités d'une même variable.

5.2) Influence de la DAP des stomoxes sur le nombre de mouches observées sur une patte avant d'un bovin

Cette analyse vise à vérifier s'il existe une relation entre le nombre de mouches observées sur une patte avant d'un bovin et les DAP observées de stomoxes par des pièges Vavoua et des fils à colle. Pour cela, un GLM a également été utilisé, incluant les deux DAP de stomoxes observées (par Vavoua et par fil à colle). Suite aux résultats de l'analyse sur les caractéristiques intrinsèques des bovins, ces

paramètres ont également été pris en compte dans le modèle. La construction du modèle suit la même procédure que précédemment. À cette procédure a été rajoutée une étape de validation du modèle en le comparant à un modèle dit « nul », c'est-à-dire un modèle sans variables prédictives. Dans cette comparaison, une réduction significative de l'écart résiduel, c'est à dire des erreurs de prédictions des données observées, indique que le modèle retenu donne des prédictions non aléatoires. Pour cela, la fonction « `anova.glm` » comprenant un test statistique de χ^2 pour la p-value, test approprié pour une distribution binomiale négative, est utilisé pour comparer l'écart résiduel du modèle retenu et celui du modèle nul. Le *pseudo* R^2 (ou R^2 de McFadden) qui mesure la qualité de prédiction d'un GLM a aussi été calculé.

5.3) Relation entre les mouvements de défense et le nombre de mouche sur la patte avant d'un bovin

La relation entre les mouvements de défense des bovins et le nombre de mouches qui se trouvent sur l'une de ses pattes avant pose la question de l'habituation du bovin aux piqûres des stomoxes. Cette habituation a, en effet, été mise en évidence par Mullens et al. (2006). Dans cette étude, des mesures répétées ont été effectuées sur un même bovin et ont nécessité donc de faire appel à un modèle linéaire généralisé mixte (GLMM). Deux modèles GLMM ont été construits, un pour les frémissements peauciers et un autre pour les coups de pattes en incluant l'identification du bovin en facteur aléatoire. Le nombre de mouche sur une patte avant ainsi que les caractéristiques intrinsèques du bovin ont été considérés comme variable à effet fixe. La construction de ces deux modèles suit en partie, la même procédure que précédemment (Partie II-5.2). Tout d'abord, la surdispersion et la colinéarité ont été vérifiées à partir de GLM simples puisque ces deux tests ne nécessitent pas l'inclusion de l'effet aléatoire. Suivant une distribution binomiale négative, la fonction « `glmmTMB` » du package du même nom (Magnusson et al., 2017) a été utilisée. À notre connaissance, il n'y a pas de fonction automatique de sélection AIC pour des modèles construits avec « `glmmTMB` ». De ce fait, cette sélection a été faite manuellement par la méthode dite « backward » et qui part donc d'un modèle global (avec toutes les variables) vers un modèle le plus simplifié possible. Après cette étape de sélection, les modèles mixtes obtenus ont été comparés avec leurs versions en modèles simples pour vérifier si l'effet aléatoire était significatif en les comparant à l'aide de la fonction « `anova.glm` ». En cas d'apport non significatif de l'effet aléatoire, ce sont les modèles simples qui ont été retenus. Une étape supplémentaire a aussi été rajoutée pour définir les performances prédictives des deux modèles. Pour cela, le « Normalized Root Mean Square Error » (NRMSE) a été calculé en utilisant le package *HydroGOF* (Zambrano-Bigiarini, 2017). Le NRMSE (exprimé en pourcentage si multiplié par 100) fait référence au taux d'erreur moyen par rapport à l'étendu des valeurs observées. Dans la mesure où ce sont des GLMM qui sont retenus à l'issue de la procédure, un R^2 adapté est utilisé en utilisant la fonction « `r2_nakagawa` » du package *performance* (Lüdtke et al., 2019) qui donne un R^2 marginal (concerne la variance expliquée par les facteurs fixes) et un R^2 conditionnel (concerne la variance expliquée par les facteurs fixes et aléatoires) (Nakagawa et Schielzeth, 2013).

5.4) Le nombre de mouches sur une patte avant des bovins est-il un bon indicateur de la DAP des stomoxes ?

Afin de répondre à cette question, un modèle GLMM a été construit pour voir si le nombre moyen des stomoxes capturés à l'aide des pièges Vavoua ou des fils à colle pouvait être prédit par le nombre de mouches observées sur une patte avant des bovins, en suivant la même procédure que précédemment (Partie II-5.3). Les caractéristiques intrinsèques des bovins ont été considérées dans les modèles, ainsi que l'identifiant des bovins, en effet aléatoire pour tenir compte de tout autre variation induite par chaque bovin.

5.5) Mesure de l'impact de la lutte intégrée sur la DAP des stomoxes

Les relevés de DAP de stomoxes ont été effectués de manière répétée sur chaque exploitation. Une analyse par GLMM pour chaque méthode de piégeage (piège Vavoua et fil à colle), avec la variable « exploitations » en effet aléatoire a été utilisée en suivant la même procédure que celle décrite dans la partie II-5.3. Dans ces GLMM, la DAP des stomoxes a été mise en relation avec les traitements. Toutefois, la DAP des stomoxes peut aussi varier avec les paramètres environnementaux et météorologiques. Chacune des données météorologiques à la date de pose et au relevé des pièges ainsi que la moyenne des températures journalières (minimale, moyenne et maximale), l'hygrométrie et le cumul des pluies sur une période de 7 jours et de 14 jours avant le relevé des pièges ont été considérées dans les GLMM.

III- RESULTATS

1) Pluie et températures sur les sites d'études

Les conditions météorologiques ont été relevées dans les différents sites de suivis à chaque visite. Une diminution des températures a été constatée sur l'ensemble des lieux d'études au fil des semaines (Figure 5). De fortes précipitations ont été observées entre la semaine -3 et 0 pour l'Entre-Deux et le Tampon. Pour Mont-Vert, la période de forte pluie dure jusqu'à la semaine 2. Un fort phénomène pluvieux a été également observé à la semaine zéro pour le Tampon (Figure 5).

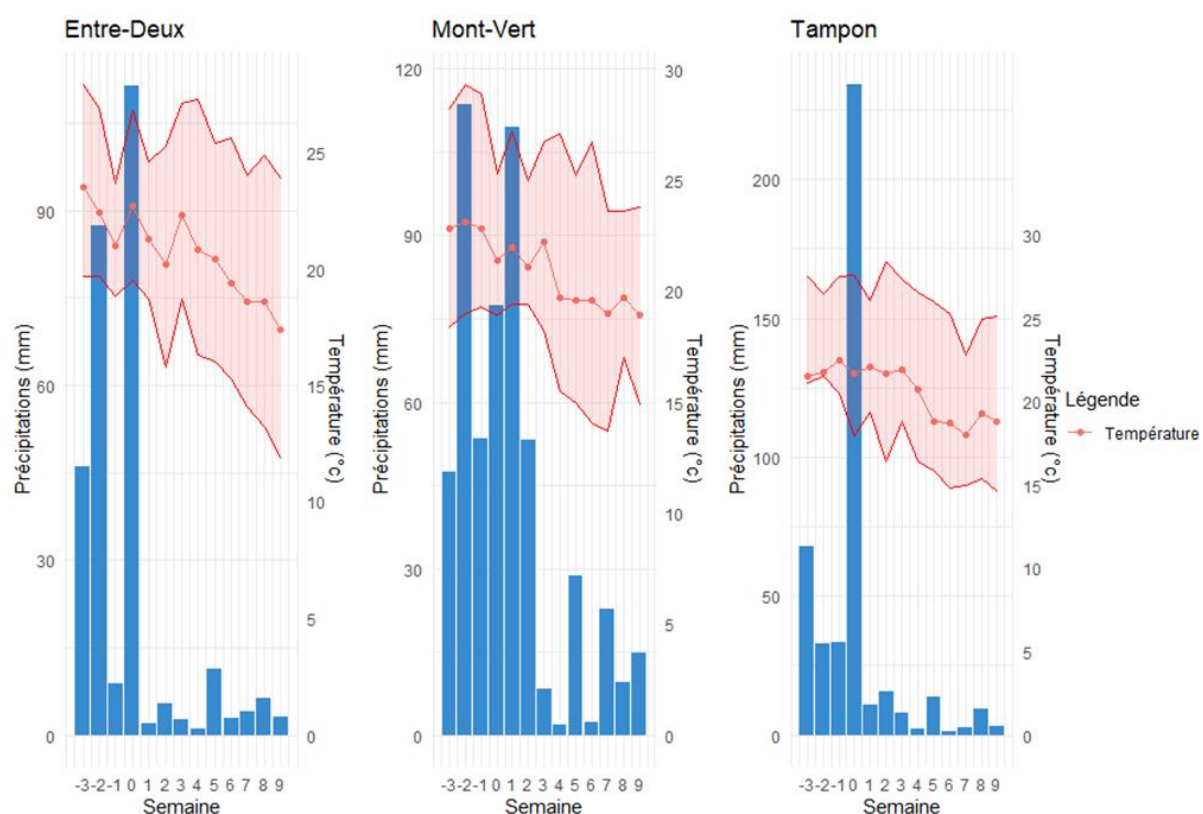


Figure 5 : Graphique ombrothermique des sites d'étude. La pluviométrie est représentée par les barres en bleues et la température en rouge par les lignes pointillée rouge, bordée par les températures minimales et maximales.

2) Suivi du nombre de mouches et de stomoxes au cours du temps

Durant les 13 semaines de suivi, 78 visites ont été effectuées comptabilisant 65 relevés du nombre de mouches sur une patte avant d'un bovin par exploitation, soit un total de 390 dénombrements effectués. Le nombre moyen de mouches sur une patte avant d'un bovin durant la période de suivi et toute exploitations confondues est de 5.7 (± 5.9). Le même nombre de comptages (390) par mètre de fil à colle et par piège Vavoua ont aussi été effectués, 19.9(± 35.8) stomoxes ont été observé en moyenne par mètre linéaire de fil à colle et 22.6(± 39.7) stomoxes par piège Vavoua (Tableau 2).

En comparant par exploitation, les captures moyennes de stomoxes par piège Vavoua varient entre 12.0(± 13.7) individus pour FEH-ED-TRT et 40.8(± 42.4) individus pour DJ-TAM-TRT. En ce qui concerne les fils à colle, les captures moyennes de stomoxes par mètre linéaire varient entre 4.2(± 3.8) individus pour FEH-ED-TRT et 54.5(± 67.6) individus pour DJ-TAM-TRT. Cette dernière exploitation (DJ-TAM-TRT) est la seule pour laquelle il y a eu en moyenne plus de capture par fil à colle que par piège Vavoua. Enfin, en ce qui concerne le nombre de mouches sur une patte avant des bovins, les moyennes vont de 2.6(± 2.6) pour FEH-ED-TRT à 9.9(± 7.9) pour FG-MV-TRT. Sur l'exploitation DJ-TAM-TRT ou la DAP observée de stomoxes était la plus importante, le nombre de mouches sur une patte avant d'un bovin était en moyenne de 4.75(± 3.9) individus. Sur le total de stomoxes capturés, il y a en moyenne plus de *S. niger niger* que de *S. calcitrans* (Tableau 2).

Tableau 2 : Nombre moyen de stomoxes capturés par piégeage ou de mouches observées sur une patte avant d'un bovin. Pour chaque exploitation, des lettres différentes entre la moyenne de *S. calcitrans* et de *S. n. niger* indique une différence significative (p-value < 0.05).

Exploitations	Nombre moyen de stomoxes (\pm écart-type) par piège Vavoua	Nombre moyen de <i>S. calcitrans</i> (\pm écart-type) par piège Vavoua	Nombre moyen de <i>S. n. niger</i> (\pm écart-type) par piège Vavoua	Nombre moyen de stomoxes (\pm écart-type) par mètre linéaire de fil à colle	Nombre moyen de mouche (\pm écart-type) par patte avant d'un bovin
FEH-ED-TRT	12.0(± 13.7)	13.5(± 14.9) ^a	10.4(± 12.2) ^a	4.2(± 3.8)	2.6(± 2.6)
TJP-ED-TEM	24.4(± 59.0)	7.0(± 12.0) ^a	41.8(± 79.2) ^b	19.3(± 23.2)	4.4(± 4.2)
DJ-TAM-TRT	40.8(± 42.4)	25.3(± 23.0) ^a	56.3(± 51.0) ^b	54.5(± 67.6)	4.75(± 3.9)
BF-TAM-TEM	19.7(± 26.3)	18.7(± 25.7) ^a	20.8(± 27.1) ^a	18.0(± 26.0)	7.1(± 7.4)
FG-MV-TRT	25.3(± 49.8)	13.6(± 19.8) ^a	37.0(± 65.7) ^b	14.6(± 15.9)	9.9(± 7.9)
FB-MV-TEM	13.3(± 19.0)	11.2(± 16.1) ^a	15.5(± 21.5) ^a	8.7(± 7.9)	5.5(± 4.4)
Total	22.6(± 39.7)	14.9(± 20.0) ^a	30.3(± 51.3) ^b	19.9(± 35.8)	5.7(± 5.9)

D'un point de vue de la dynamique temporelle, une diminution de la DAP des stomoxes, par fil à colle, a été observée sur toutes les exploitations (Figure 6). Pour les pièges Vavoua, il n'y a pas de diminution significative du nombre de stomoxes, entre le début du suivi et la fin, pour l'exploitation traitées à L'Entre-Deux et les exploitations non traitées de Mont-Vert et du Tampon. La diminution du nombre de stomoxe par fil à colle est toutefois moins évidente sur FB-MV-TRT ou un rebond de la DAP s'observe de la semaine 7 à la semaine 9. Des pics de la DAP des stomoxes ont aussi été observés avec les pièges Vavoua, à la semaine -2 sur les exploitations DJ-TAM-TRT et TJP-ED-TEM, et à la semaine 1 sur les exploitations FEH-ED-TRT, FG-MV-TRT, TJP-ED-TEM. Sur l'exploitation DJ-TAM-TRT, un pic de DAP de stomoxes, cette fois sur les fils à colle, a été observé à la semaine 3. En ce qui concerne le nombre de mouches sur une patte avant d'un bovin, des diminutions au fil des semaines s'observent aussi sur

toutes les exploitations, sauf sur celles de Mont-Vert où les densités observées semblent s'être maintenu.

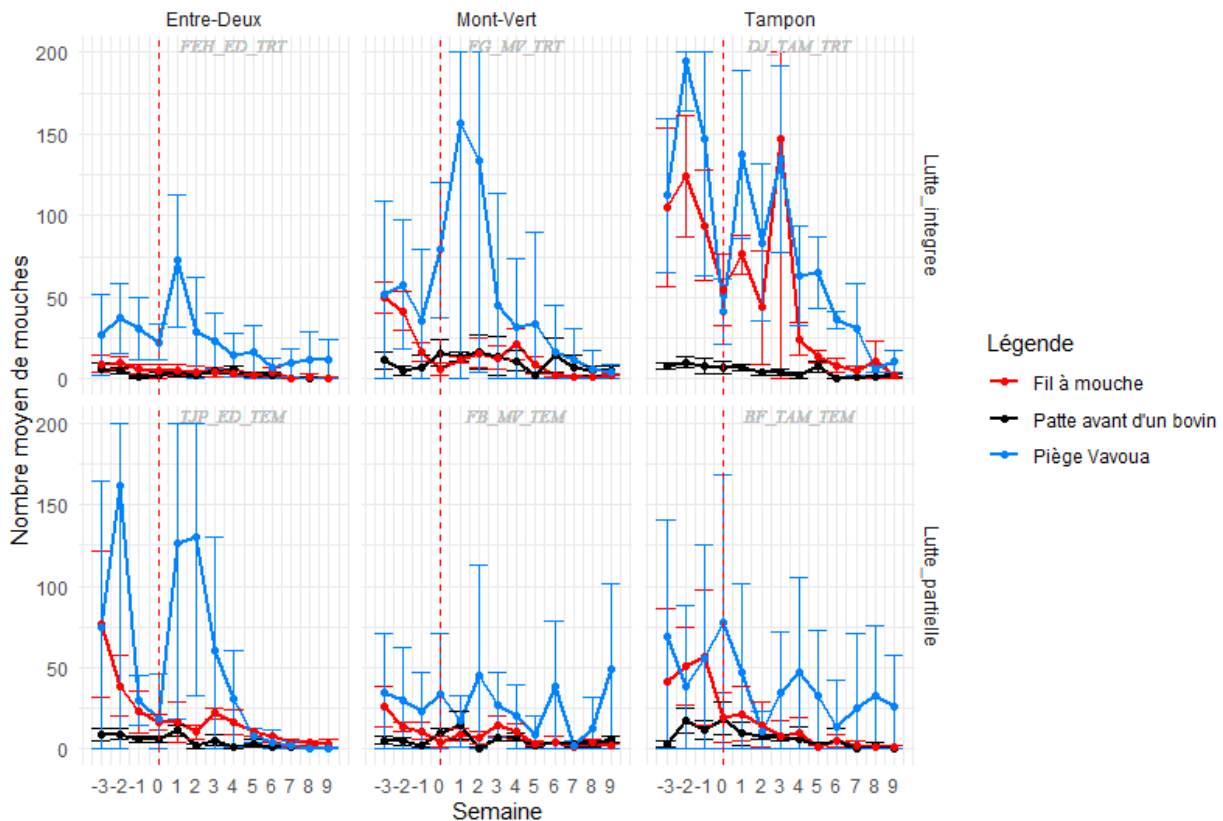


Figure 6 : Nombre de stomoxes capturés par piégeage (fil à colle et piège Vavoua) et nombre moyen de mouches sur la patte avant d'un bovin au cours du temps pour les trois paires d'exploitations visitées.

3) Différence du nombre de mouches sur bovin selon les caractéristiques intrinsèques

Pour le nombre de mouches sur la patte avant d'un bovin en fonction des caractéristiques intrinsèques des bovins (Figure 7), on observe que les variables taille ($p\text{-value} < 0.001$) et sexe ($p\text{-value} = 0.004$) ont un effet significatif. La variable race contribuerait aussi à la variation du nombre de mouches sur bovin mais de manière peu significative ($p\text{-value} = 0.062$). Il y a en moyenne, 1.20 et 1.46 mouches en plus sur la patte avant d'un grand taureau que sur celle d'un bovin adulte ($p\text{-value} < 0.001$) et d'un bovin jeune ($p\text{-value} < 0.001$) respectivement. Aussi, il y a en moyenne 0.26 mouches en plus sur la patte avant d'un bovin adulte que sur celle d'un bovin jeune ($p\text{-value} = 0.018$). En ce qui concerne le sexe, il y a en moyenne 0.35 mouches en plus sur la patte avant d'un bovin femelle que sur celle d'un mâle ($p\text{-value} = 0.003$). Pour la variable « race » seules les modalités limousine et blonde sont peu significatives ($p\text{-value} = 0.062$). En ce qui concerne la couleur, cette caractéristique ne semble pas entrer en considération dans les observations effectuées sur les bovins.

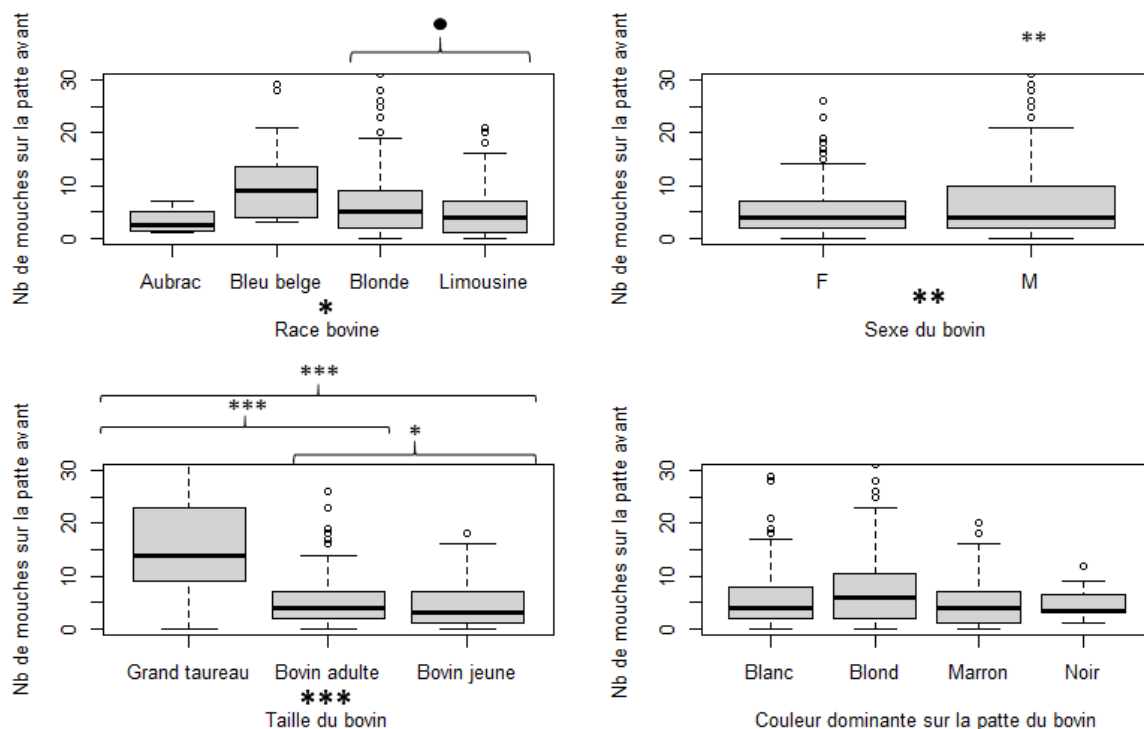


Figure 7 : Nombre de mouches sur la patte avant d'un bovin en fonction de leurs caractéristiques. Les astérisques représentent le niveau de significativité de la variable dans le modèle.

4) Relation entre les indicateurs de stress et le nombre de mouches sur la patte avant d'un bovin

Le modèle établit (GLM) ne retient pas d'effet individuel des bovins. Le nombre de mouches (p -value < 0.001), la taille (p -value < 0.001) et le sexe (p -value = 0.005) influencent significativement sur le nombre de frémissements peauciers des bovins (Figure 8). Les grands taureaux ont significativement plus de frémissements peauciers que les bovins adultes (p -value < 0.001) et que les bovins jeunes (p -value < 0.001). Il n'y a pas de différences significatives entre les bovins adultes et les bovins jeunes (p -value = 0.378).

Selon le modèle établi, les bovins jeunes et les bovins adultes sont respectivement 2.5 fois et 2.2 fois plus nerveux que les grands taureaux. Les mâles ont aussi 1.3 fois plus de frémissements peauciers que les femelles. Le nombre de frémissements peauciers augmente de 1.1 fois par rapport au nombre de mouches sur la patte avant du bovin (Figure 8). L'erreur d'ajustement du modèle est de 24.2%.

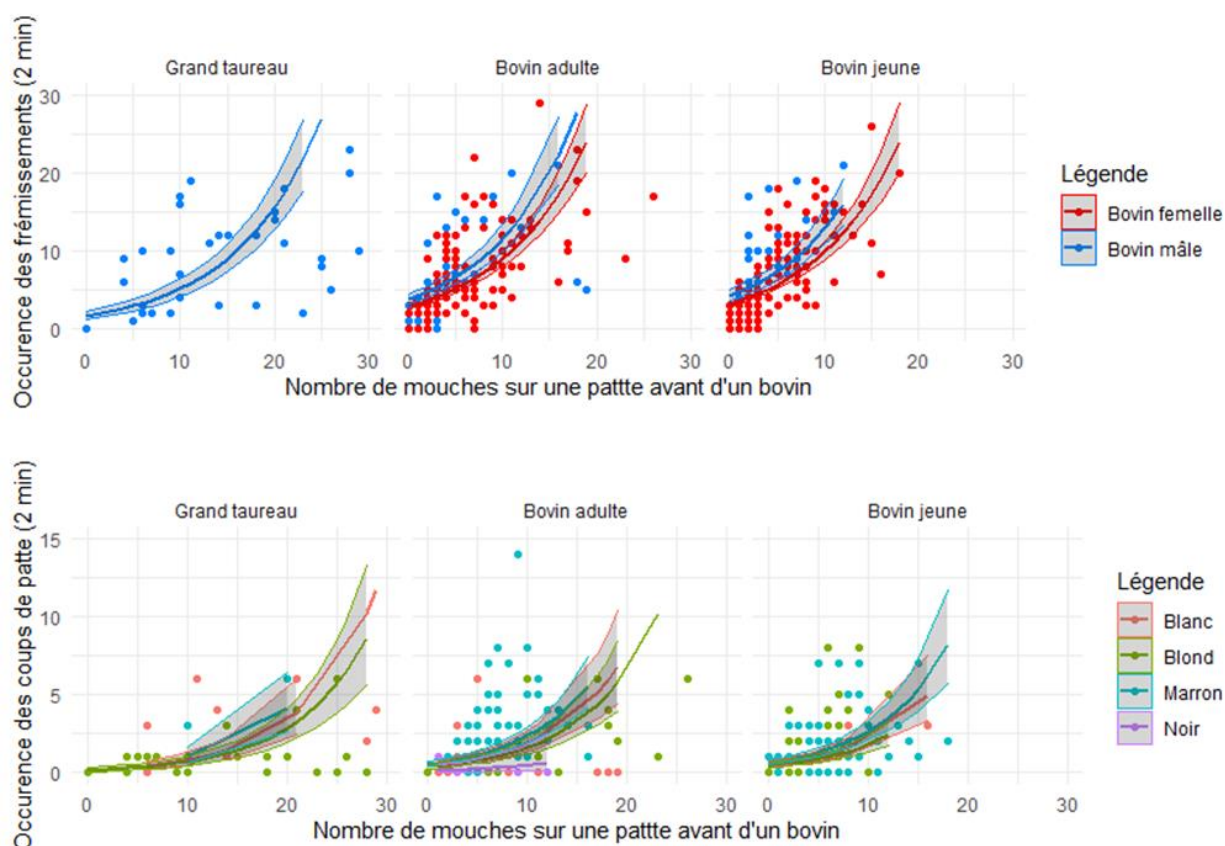


Figure 8 : Occurrence des mouvements de défenses durant 2 minutes en fonction du nombre de mouches sur la patte avant d'un bovin. Occurrence des frémissements peauciers en haut et occurrence des coups de patte en bas. Les courbes de couleurs représentent les prédictions de par modélisation et la bande grise autour de la courbe représente les intervalles de confiance à 95%. Pour les occurrences des frémissements, les limites de x et y ont été mise à 30 afin de ne pas aplatir les courbes.

Concernant l'indicateur de stress représenté par le nombre de coups de pattes, le modèle établi ne retient pas non plus d'effet individuel des bovins. Le nombre de mouches (p -value < 0.001), la taille (p -value = 0.008) et la couleur (p -value = 0.035) influencent significativement le nombre de coups de pattes des bovins. La couleur a un effet significatif sur le nombre de coups de patte mais, il n'y a pas de différences significatives entre les différentes couleurs (p -value > 0.1 pour toutes). Pour la taille, on observe une différence significative entre les grands taureaux et les bovins adultes (p -value = 0.005), et entre les grands taureaux et les bovins jeunes (p -value = 0.002). Par contre, il n'y a pas de différences significatives entre les bovins adultes et les bovins jeunes (p -value = 0.767).

Par rapport aux bovins dont la couleur dominante des pattes est blanche, les blondes donnent 1.18 fois moins de coups de pattes alors que les bovins de couleurs noires et marrons donnent respectivement 1.15 fois et 1.5 fois plus de coups de pattes. Aussi, les bovins adultes et les bovins jeunes donnent respectivement 2.37 fois et 2.63 fois plus de coups de pattes que les grands taureaux. Enfin, le nombre de coups de pattes augmente de 1.15 fois par rapport au nombre de mouches sur la patte avant du bovin (Figure 8). Le modèle établi présente une erreur d'ajustement de 17.6%.

5) Relation entre la densité apparente de stomoxes et le nombre de mouches sur bovin

Pour la relation entre le nombre de mouches et la DAP par piège Vavoua et par fil à colle, on obtient un modèle avec le nombre moyen de stomoxes par piège Vavoua (p-value < 0.001), la taille (p-value < 0.001) et la couleur (p-value < 0.001) qui sont significativement reliés au nombre de mouches sur la patte avant du bovin. Le nombre moyen de stomoxes par fil à colle intervient aussi dans notre modèle, mais est peu significatif (p-value = 0.056). Il y a une différence significative entre les bovins blonds et marrons (p-value < 0.001), et entre les bovins blancs et marrons (p-value = 0.044).

Le modèle établi ($pseudo R^2 = 0.332$; NRMSE = 13.3%) prédit que pour chaque stomoxe capturé par piège Vavoua, il y a 1.01 fois plus de mouches comptées sur la patte avant d'un bovin. Pour la taille, il y a respectivement 2.8 et 3.1 fois moins de mouches sur les bovins adultes et les bovins jeunes que sur les grands taureaux. Par rapport à la couleur du bovin, il y a respectivement 1.4 fois et 1.02 fois moins de mouches sur la patte avant d'un bovin marron et noir par rapport à un bovin de couleur blanche. Au contraire, les bovins de couleurs blondes ont 1.18 fois plus de mouches sur la patte avant qu'un bovin de couleur blanche (Figure 9).

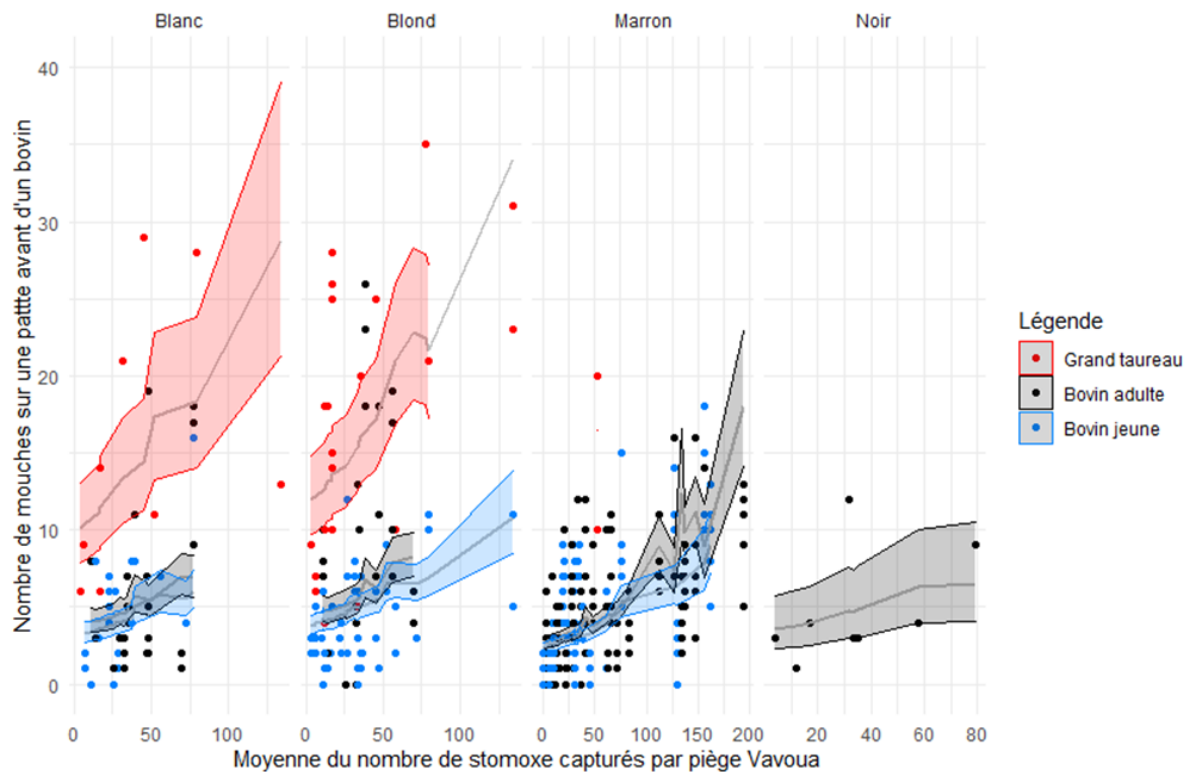


Figure 9 : Nombre moyen de mouches sur une patte avant d'un bovin en fonction de la DAP observée à l'aide des pièges Vavoua et en fonction des couleurs dominantes de la patte avant du bovin. Les courbes de couleurs représentent les prédictions par modélisation et la bande grise autour de la courbe représente leurs intervalles de confiance à 95%.

Le GLM établit pour définir si le nombre de mouche sur la patte avant d'un bovin est un bon indicateur de la DAP de stomoxes observée par piège Vavoua montre les liens significatifs avec certaines variables. Ainsi, le sexe (p-value = 0.001), la taille (p-value = 0.005), la couleur (p-value = 0.025) et le nombre de mouches sur la patte avant du bovin (p-value < 0.001) seraient les variables qui pourraient

prédire le nombre de stomoxes par piège Vavoua. Le *pseudo* R^2 est de 0.215. L'erreur d'ajustement de notre modèle est de 19.9%. Ces valeurs élevées correspondent à de fortes erreurs de prédiction.

Pour le modèle sur la DAP par fil à colle, l'effet individuel des bovins influe dans les prédictions et un GLMM a donc été établi. Les variables explicatives sont le sexe (p-value < 0.001), la couleur (p-value = 0.029) et le nombre de mouches sur la patte avant du bovin (p-value < 0.001). Le R^2 marginal est de 0.579 et le R^2 conditionnel est de 0.320. L'erreur d'ajustement de notre modèle est de 22.9%.

6) Effet de la lutte intégrée sur la densité apparente de stomoxes

Que ce soit pour la DAP par piège Vavoua ou par fil à colle, l'ensemble des modèles construits ne retiennent pas la lutte intégrée comme facteurs influençant ces DAPs. Les variations de ces DAPs ont toutefois été corrélées à des variables météorologiques. Ainsi, en considérant la DAP mesurée à l'aide des pièges Vavoua, la moyenne des températures minimums sur les 7 jours précédant le relevé du piège Vavoua (p-value = 0.009) et l'hygrométrie moyenne sur les 14 jours précédents (p-value < 0.001) sont les paramètres qui impactent significativement la capture des stomoxes par piège Vavoua. Les précipitations cumulées sur les 7 jours précédant le piégeage par Vavoua ont un effet peu significatif (p-value = 0.085). Selon la modélisation (NRMSE = 18.7%), quand la moyenne des températures minimums sur les 7 jours précédents augmente d'un degré Celsius, le nombre de stomoxes capturés par piège Vavoua augmente de 1.16 fois. Le nombre de stomoxes par Vavoua augmente lui de 1.08 fois quand l'hygrométrie augmente d'une unité.

En se rapportant à la DAP observée à l'aide des fils à colle, l'exploitation conditionne cette DAP. Ce modèle (GLMM, NRMSE = 7.6%) soulève une influence significative de la température au moment du relevé du nombre de stomoxes sur le fil à colle (p-value = 0.01), de la moyenne des températures maximales sur les 7 jours qui précèdent (p-value < 0.001) et de l'hygrométrie moyenne, également sur les 7 jours précédents (p-value = 0.01) qui ont un effet significatif sur le nombre de stomoxes sur fil à colle. Le vent au moment du relevé des pièges (p-value = 0.696) et les précipitations sur 14 jours (p-value = 0.461) sont pris en compte dans notre modèle mais ils n'ont pas d'effet significatif sur le nombre de stomoxes. Ces variables explicatives restent dans le modèle car elles permettent d'avoir un meilleur AIC. Ainsi, le nombre de stomoxes par mètre linéaire de fil à colle serait 1.08 fois plus élevé, conditionnellement à chaque exploitation, à chaque degré Celsius supplémentaire au moment du relevé. Cette augmentation serait de 1.47 et de 1.06 fois en considérant respectivement la moyenne des températures maximales et l'hygrométrie moyenne sur les 7 jours précédant le piégeage.

IV- DISCUSSION ET PERSPECTIVES

Les conditions environnementales et les pratiques d'élevage à l'île de La Réunion constituent des conditions optimales à la pullulation des stomoxes, il est alors important d'avoir une estimation de la densité et des niveaux de nuisances des stomoxes afin d'adapter et d'évaluer les mesures de lutte à mettre en place. Mais les méthodes de piégeage qui servent d'estimateur de la DAP nécessitent une double intervention de la part des agents de terrains pour installer et relever les pièges, c'est pour cela que ce stage s'est, tout d'abord, porté sur l'évaluation d'une méthode de mesure simple de cette DAP.

Pour répondre à cette question, nous nous sommes, tout d'abord, intéressés aux effets des variables intrinsèques aux bovins par rapport au nombre de mouches sur une de leurs pattes avant. Nous avons pu montrer que la taille et le sexe avait un effet significatif sur le nombre de mouches observées sur la patte avant d'un bovin. Ces résultats sont en accord avec l'étude de Torr et al. (2006). En effet, ils ont montré qu'il existe une forte corrélation positive entre l'attraction des mouches et la production de dioxyde de carbone par rapport au poids de l'animal. Les mâles étant généralement plus lourds que les femelles, notamment, les grands taureaux qui étaient ceux ayant attiré le plus de mouches.

1) Relation entre la densité apparente de stomoxes et le nombre de mouches sur bovin

Pour le nombre moyen de mouches sur la patte avant d'un bovin en fonction de la DAP, il y a une augmentation significative du nombre de mouches sur bovins quand le nombre de stomoxes par Vavoua augmente contrairement au nombre de stomoxes par fil à colle qui lui est peu significatif (Figure 9). En effet, le piège Vavoua est un piège spécifique au stomoxes contrairement au fil à colle qui n'est pas spécifique (Gilles et al., 2007). On observe beaucoup de mouches domestiques sur le fil à colle contrairement au piège Vavoua qui ne capture principalement que des stomoxes.

Dans notre modèle, la couleur joue aussi significativement sur le nombre de mouches sur la patte avant en fonction de la DAP. Les bovins de couleurs blondes et blanches attirent plus de mouches que ceux de couleurs marrons. Ce sont donc les bovins ayant des couleurs plus claires qui semblent attirés le plus de mouches comparativement aux bovins de couleurs foncés. Cela semble correspondre au modèle sur l'influence des caractères intrinsèques au bovin sur le nombre de mouches sur la patte avant d'un bovin, où la race avait un effet peu significatif sur le nombre de mouches et les blondes d'Aquitaine qui sont blanches/blondes, attiraient plus de mouches par rapport aux limousines de couleur brune. Les stomoxes seraient possiblement plus attirés par les bovins de couleurs plus claires par rapport aux plus foncées. Il faut savoir que les stomoxes ont un sens visuel excellent, ce serait donc pour eux un critère de sélection d'hôtes pour leur repas sanguin (Ballard, 1958 ; Zumpt, 1973).

Afin de savoir si le comptage sur la patte avant d'un bovin peut constituer un bon indicateur de la DAP des stomoxes, nous avons construit un modèle pour lequel, le nombre de mouches sur la patte avant montre une corrélation positive avec le nombre de stomoxes par piège Vavoua. Notre modèle prend aussi en compte un effet du sexe, de la taille et de la couleur sur le nombre de stomoxes que l'on va retrouver dans les pièges Vavoua par rapport au nombre de mouches dénombrées sur la patte avant du bovin. Le *pseudo* R^2 du modèle est de 0.215, ce qui est une valeur faible. On a donc une corrélation qui n'est pas très bonne. Il faut aussi savoir que la qualité d'ajustement de notre modèle est élevée avec un pourcentage de 19.9%.

Pour la DAP par fil à colle, cette fois, il y a une influence de l'effet aléatoire (identifiant du bovin), il faut donc le prendre en compte dans le modèle. Pour cette relation, l'effet de la couleur, du sexe et de la taille du bovin est prise en compte pour le nombre de stomoxes comptabilisé sur le fil à colle par rapport au nombre de mouches sur la patte avant du bovin. Il faut alors considérer ces variables. Ici, le R^2 marginal est de 0.579 et le R^2 conditionnel de 0.320, la corrélation est donc plus forte que pour la DAP par Vavoua mais elle reste faible. Le fil à colle n'est pas un piège spécifique aux stomoxes et qu'il ne permet donc pas d'avoir la meilleure DAP comparativement au piège Vavoua comme cela a déjà été montré à La Réunion (Gilles et al., 2007). Aussi, l'erreur d'ajustement de notre modèle est élevée avec 22.9%.

À première vue, le nombre de mouches sur la patte avant du bovin n'est donc pas un bon indicateur de la DAP des stomoxes. Il ne permet pas d'estimation quantitative, mais peut quand même être considéré comme un indicateur qualitatif. En effet, il permet de savoir s'il y a beaucoup ou peu de stomoxes dans l'exploitation.

2) Relation entre les indicateurs de stress et le nombre de mouches sur la patte avant d'un bovin

Ce stage s'est aussi porté sur la mise en relation des mouvements de défenses avec la densité des stomoxes sur les animaux. Pour les frémissements peauciers par rapport au nombre de mouches sur la patte avant d'un bovin, nous avons pu voir une corrélation positive entre les deux paramètres. Cette relation nous permet de voir également que les bovins mâles sont généralement plus stressés que les femelles et que les bovins jeunes et adultes sont aussi deux fois plus stressés que les grands taureaux.

Pour la relation avec les coups de pattes, il y a aussi une corrélation positive entre les coups de pattes et le nombre de mouches. Il y a aussi une influence de la taille du bovin sur le stress de l'animal. Comme pour les frémissements peauciers, ce sont les bovins jeunes et les bovins adultes qui sont les plus stressés. Notre modèle indique que la couleur a une influence significative mais lorsque l'on regarde au niveau individuel, c'est-à-dire par couleur, on n'observe pas de différences significatives, il n'y a donc pas de couleurs pour lesquelles les bovins sont significativement plus stressés.

Il faut noter qu'il y a aussi une forte dispersion dans nos observations, il y a donc sûrement d'autres facteurs qui entrent en jeu. Ce n'est en tout cas pas une habituation des bovins face aux mouches, car l'effet aléatoire n'apporte pas d'effet significatif au modèle. Seules les mouches sur une des pattes avant sont comptabilisées, mais il peut y avoir une répartition des stomoxes sur le reste du corps du bovin qui peuvent entraîner un stress chez l'animal. Aussi, les conditions météorologiques ne sont pas prises en compte dans ces modèles ce qui peut entraîner des biais. Nous n'avons pas pris en compte l'état de santé des animaux, il est possible que certains animaux puissent être plus affaiblis que d'autres et donc qu'ils aient moins d'énergie pour réagir face aux mouches. Dans l'étude de Mullens et al. (2006), ils observent aussi une corrélation positive pour les deux indicateurs de stress que nous avons sélectionnés. Plusieurs études ont également observé une saturation dans les mouvements de défenses et donc qu'il y aurait une habituation de l'animal face aux mouches (Dougherty et al., 1993 ; Mullens et al., 2006). Nous n'observons pas ce résultat, mais il n'est pas possible avec un modèle négatif binomial de pouvoir observer un tel plateau.

3) Comparaison des exploitations avec lutte intégrée et lutte partielle

Le second objectif de notre stage portait *a priori* sur la première évaluation globale, à l'échelle de l'exploitation, de la lutte intégrée menée contre les stomoxes à La Réunion. Nous avons pu observer une différence significative entre le début des comptages et la fin des comptages pour toutes les exploitations en ce qui concerne le nombre de stomoxes par fil à colle mais pas pour la DAP par Vavoua où il n'y a pas de différence pour les exploitations FEH_ED_TRT, FB_MV_TEM et BF_TAM_TEM. Il y a une diminution du nombre de stomoxes sur toutes les exploitations, sauf ces trois-là qui semblent avoir un nombre de stomoxes plus constant (Figure 4). Par contre, lorsque nous avons cherché si la lutte intégrée avait un impact sur le nombre de stomoxes par piège Vavoua et par fil à colle, seule des variables météorologiques sont ressorties comme ayant une influence significative. La lutte intégrée n'aurait alors probablement pas d'effet significatif sur les populations de stomoxes.

La lutte intégrée ne s'est portée que sur l'échelle de l'exploitation. Il est alors possible qu'il y ai eu une ré-infestation des stomoxes. Par exemple, l'exploitation DJ_TAM_TRT, en absence ou avec peu de gîtes larvaires secondaires sur la propriété, avait pourtant une DAP de stomoxes importante en début de suivi (en moyenne 105 stomoxes sur le fil à colle et 112.2 stomoxes en moyenne par Vavoua pour la semaine -3). Il est donc fort probable que les stomoxes trouvent des gîtes larvaires en dehors de la propriété. De plus, toutes les exploitations étaient entourées de végétation avec notamment la présence de cannes fourragères (les tas de cannes étant des lieux propices à la ponte et au développement larvaire des stomoxes) autour du périmètre des exploitations. Pour les exploitations à Mont-Vert, celles-ci étaient situées côte-à-côte, il est donc possible que le fait qu'une des deux n'ait pas bénéficié de la mise en place de la lutte intégrée ait créé un biais. En effet, il est probable que les stomoxes soient passés d'une exploitation à l'autre.

D'autres part, certaines variables météorologiques ressortent comme ayant des impacts significatifs sur la DAP de stomoxes. Quand la température minimum sous 7 jours ou la température au moment du relevé augmente, le nombre de stomoxes comptabilisés augmente aussi. Selon l'étude de Gilles (2005), la température a une influence sur la durée de développement et la survie des stades immatures mais aussi sur la reproduction des femelles et la longévité des adultes. Notre observation est donc en accord avec l'étude de Gilles (2005), qui montre que les deux espèces ont une réponse positive quand la température augmente entre 15 et 30°C (Figure 6). Les deux espèces ont besoin d'un substrat humide pour la ponte et le développement des larves, il est donc normal que celles-ci soient influencées par le taux d'humidité et par les précipitations (Gilles, 2005). Il n'y a pas d'effet significatif pour le vent, mais cette variable entre en compte dans nos modèles. Cela est possiblement dû au fait qu'il y a peu d'observations avec des vents forts mais on sait que le vent peut rendre le piégeage des stomoxes plus difficile.

Les facteurs abiotiques tels que la température ou l'humidité influencent sur l'abondance des populations d'insectes et la période hivernale s'accompagne d'une baisse des températures mais aussi, à La Réunion, d'une période sèche, qui entraînent chez beaucoup d'insecte une diminution des tailles de population (Andrewartha et Birch, 1954 ; Danks 1978). Comme observé sur la figure 6, il y a eu dans les trois sites d'études une diminution des pluies avec un passage à la saison sèche mais aussi une baisse des températures. Ces conditions climatiques plus défavorables réduisent donc l'abondance des populations de stomoxes.

Il est aussi à noter que nous avons observé une diminution plus forte de *S. niger niger* par rapport à *S. calcitrans*. Cela s'explique par le fait que *S. niger niger* est une espèce tropicale en comparaison avec *S. calcitrans* qui est une espèce cosmopolite et supportant mieux les baisses de température comparativement à *S. niger niger* (Zumpt, 1973 ; Barré, 1981 ; Gilles, 2005).

4) Limites de notre étude

Plus les valeurs de NRMSE et du R^2 sont respectivement proches de zéro pourcent et de un, plus les résultats du modèle seront précis. Or, pour tous nos modèles, il y a des erreurs d'ajustements entre 13.3% et 24.2%, sauf pour la comparaison du nombre de stomoxes par fil à colle entre les exploitations avec lutte intégrée et lutte partielle qui a une erreur d'ajustement de 7.6%. Les R^2 que nous avons calculés sont aussi inférieurs à 0.6. Nos modèles ne sont donc pas très bons mais cela peut s'expliquer par le fait qu'il y a sûrement d'autres facteurs qui entrent en jeu. En effet, notre étude se passe exclusivement sur le terrain, nos observations dépendent donc des conditions météorologiques qui

influencent l'activité des stomoxes. Ces conditions n'ont pas été prises en compte dans tous nos modèles (sauf pour la comparaison des exploitations avec lutte intégrée et lutte partielle) car on cherchait tout d'abord à savoir l'influence des caractéristiques intrinsèques aux bovins mais aussi d'établir une relation en la modulant uniquement selon ces caractéristiques.

De plus, même si les comptages ont été presque essentiellement effectués par moi-même, il y a quand même eu deux observateurs, ce qui peut également entraîner un biais d'observation.

Concernant le dénombrement du nombre de mouches sur la patte avant des bovins, il est difficile de faire la différence entre un stomoxe et une mouche domestique, à la distance à laquelle on effectue les comptages. Cela entraîne un biais de la densité de stomoxes considérée sur l'animal.

Ensuite, concernant les pièges Vavoua, il existe un biais en fonction du positionnement du piège dans l'exploitation. Nous avons pu constater sur le terrain que certains pièges semblaient capturer plus de stomoxes que d'autres, il aurait fallu pour cela prendre en compte la position des pièges et ajouter cette variable comme effet aléatoire (Gilles et al., 2007 ; Bouyer et al., 2011 ; Taylor et al., 2020). Nous observons la même chose pour les fils à colle, le meilleur endroit de capture selon Gilles et al. (2007) est au niveau des cornadis. Par contre, il n'était pas toujours possible de placer les fils à colle, à cet endroit. En effet, il ne fallait pas que le fil soit accessible aux bovins ou aux oiseaux tout en permettant la réalisation des comptages.

Puis, selon les exploitations, les animaux sont plus ou moins mobiles (bovin attaché à une corde, box individuel, box mixte), leurs comportements peuvent donc être influencés cette mobilité. Aussi, les comptages sont effectués sur les bovins les plus visibles et qui se situent donc bien souvent en périphérie du groupe. En effet, le comportement de regroupement est une réponse courante chez les mammifères vivant en troupeaux, il permet de diluer les taux d'attaque globaux et peut aussi protéger les animaux placés à l'intérieur (Hart, 1992 ; Mooring et Hart, 1992 ; Mullens et al., 2006). Il est donc probable que les animaux observés avaient plus de mouches que ceux au centre du troupeau. Aussi, nous avons observé que les animaux étant plusieurs dans un même box pouvaient se donner des coups, bouger ou encore passer de l'extérieur à l'intérieur du troupeau pendant le comptage des indicateurs de stress, faisant fuir ainsi les mouches présentes sur eux.

Enfin, la lutte intégrée a été mise en place uniquement au niveau de l'exploitation et comme dit précédemment, il est donc possible qu'il y ait eu une réinfestation des stomoxes dans les exploitations. Aussi, notre étude ne s'est portée que sur six exploitations, nous n'avons donc qu'un échantillon restreint.

5) Conclusion et perspectives

Pour conclure, ce stage a permis de tester une méthode semi-quantitative plus simple et plus rapide d'estimation des densités de stomoxes. Même si cette méthode a déjà été éprouvée aux États-Unis sur *S. calcitrans* et dans un contexte d'élevage extensif (Mullens et al., 2006 ; Gerry, 2007), notre étude montre que cette méthode ne permet pas une estimation quantitative correcte, à La Réunion, étant donné que notre modèle manque de précision. De plus, ce stage nous a permis de montrer qu'il existe bel et bien une relation entre les comportements de défense et le nombre de mouches présentes sur la patte d'un bovin. Les stomoxes sont donc une vraie nuisance chez les bovins, engendrant un stress comportemental qui peut fatiguer l'animal (Barré, 1981 ; Ehrhardt, 2006 ; Bouyer et al., 2011). Enfin, on a pu mettre en place *a priori* la première évaluation globale de la lutte intégrée menée contre les stomoxes, à l'échelle de l'exploitation, à La Réunion. Nos résultats démontrent cependant, que cette lutte intégrée n'aurait pas d'effet significatif sur les populations de stomoxes à La Réunion. Les mesures de lutte pourraient potentiellement être déployées à plus grande échelle car il est possible que si une

ou plusieurs exploitations ne mettent en place aucune mesure de lutte. L'effet de cette lutte peut être limitée si elle est appliquée isolément au niveau d'une seule exploitation du fait des échanges de stomoxes entre les exploitations proches. Aussi, il faudrait mieux contrôler le périmètre extérieur autour des exploitations afin de veiller à ce qu'il n'y ait pas de gîtes larvaires secondaires mais cela reste difficile à mettre en place.

Ce stage nous a donc permis d'avoir de premiers résultats malgré des modèles avec de forts pourcentages d'erreurs d'ajustement. Pour la suite, il serait intéressant de poursuivre et d'approfondir nos analyses en prenant en compte cette fois, les données de l'ensemble de la période de suivi. Il faudrait également comparer l'effet de la lutte intégrée, sur les comptages sur bovins mais aussi par paires d'exploitations afin de bien comparer s'il y a eu une différence au niveau de la localisation. Enfin, il serait aussi intéressant de poursuivre cette étude, mais cette fois sur un plus grand nombre d'exploitations et de peut-être appliquer la lutte intégrée sur un périmètre plus grand, tout cela afin de pouvoir adapter au mieux les mesures de lutte à La Réunion.

BIBLIOGRAPHIE

Andrewartha, H. G., Birch, L. C. (1954). The distribution and abundance of animals. University of Chicago Press : 782 p.

Baldacchino, F., Muenworn, V., Desquesnes, M., Desoli, F., Charoenviriyaphap, T. & Duvallet, G. (2013) Transmission of pathogens by Stomoxys flies (Diptera, Muscidae): a review. *Parasite*, 20, 26.

Ballard, R. C. (1958). Responses of Stomoxys Calcitrans (L.) to Radiant Energy and Their Relation to Absorption Characteristics of the Eye. *Annals of the Entomological Society of America*, 51(5), 449–464.

Barré, N. (1981). Les stomoxes ou "mouches boeuf" à La Réunion. Pouvoir pathogène, écologie, moyen de lutte. GERDAT-IEMVT, Maisons-Alfort. 90p.

Berry, I. L., Stage, D. A., Campbell, J. B. (1983). Populations and economic impacts of stable flies on cattle. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 26: 873–877.

Bouyer, J., Stachurski, F. (2009). Rapport de mission. Mission d'appui pour les orientations du programmes CMTV (Contrôle des Maladies à Transmission Vectorielle).

Bouyer, J., Grimaud, Y., Pannequin, M., Esnault, O. & Desquesnes, M. (2011) Importance épidémiologique et contrôle des stomoxes à la Réunion. *Bulletin Epidémiologique*, 43/spécial Dom-Tom, 53-58.

Buxton, B. A., Hinkle, N. C., Schultz, R. D. (1985). Role of insects in the transmission of bovine leukosis virus: potential for transmission by stable flies, horn flies, and tabanids. *American Journal of Veterinary Research*, 46, 123–126.

Campbell, J. B., Skoda, S. R., Berkebile, D. R., Boxler, D. J., Thomas, G. D., Adams, D. C., Davis, R. (2001). Effects of stable flies (Diptera: Muscidae) on weight gains of grazing yearling cattle. *Journal of Economic Entomology*, 94, 780–783.

Danks H. V. (1978). Modes of seasonal adaptation in the insects - I. Winter survival. *Canadian Entomologist*, 110: 1167-1205.

Desquesnes, M., Bouhsira, E., Chalermwong, P., Drosne, L., Duvallet, G., Franc, M., Gimonneau, G., Grimaud, Y. R. P., Guillet, P., Himeidan, Y. E., Jacquiet, P., Jittapalapong, S., Karanja, W., Liénard, E., Onju, S., Ouma, J., Rayaisse, J. B., Masmatathip, R., Salou, E., Shah, V., Shukri, S., Thaisungnoen, K. (2021). Insecticide-impregnated screens used under 'multi-target method' for haematophagous fly control in cattle: a proof of concept. In Innovative strategies for vector control, C. Koenraadt, J. Spitzen, et W. Takken, 6:91 105. *The Netherlands: Wageningen Academic Publishers*. 260p.

Dougherty, C. T., Knapp, F. W., Burrus, P. B., Willis, D. C., Burg, J. G., Cornelius, P. L., Bradley, N. W. (1993). Stable flies and the behavior of grazing beef cattle. *Applied Animal Behaviour Science*, 35, 215–233.

Dougherty, C. T., Knapp, F. W., Burrus, P. B., Willis, D. C., Cornelius, P. L. (1995). Behavior of grazing cattle exposed to small populations of stable flies (*Stomoxys calcitrans* L.). *Applied Animal Behaviour Science*, 42, 231-248.

Durel, L., Estrada-Peña, A., Franc, M., Mehlhorn, H. & Bouyer, J. (2015) Integrated Fly Management in European Ruminant Operations from the Perspective of Directive 2009/128/EC on Sustainable Use of Pesticides. *Parasitology Research*, 114, 379-389.

Ehrhardt, N. (2006). Etude de l'activité d'une formulation à 50% de deltaméthrine sur *Stomoxys calcitrans* à la Réunion : résistance et rémanence. Thèse, Ecole Vétérinaire Nationale de Toulouse ENVT. 89p.

Foil, L. D., Hogsette, J. A. (1994). Biology and control of tabanids, stable flies and horn flies. *Revue scientifique et technique de l'Office International des Epizooties*, 13(4): 1125-1158.

Fox, J., Weisberg, S., Adler, D., Bates, D., Baud-Bovy, G., Ellison, S. (2016). Package 'Car.'

Gerry, A. C. (2007) Predicting and controlling stable flies on California dairies. UCANR Publications.

Gilles J. (2001). Test d'efficacité de différents types de pièges dans la lutte contre les stomoxes. Introduction à l'étude de la biologie des stomoxes présents à La Réunion. Mémoire de DEA de Parasitologie. Montpellier I et II. 25pp

Gilles, J. (2005). Dynamique et génétique des populations d'insectes vecteurs. Thèse, Université de La Réunion, 151p.

Gilles J, David JF, Duvallet G, De La Rocque S, Tillard E. (2007). Efficiency of traps for *Stomoxys calcitrans* and *Stomoxys niger niger* on Reunion Island. *Medical Veterinary Entomology*, 21(1):65-9.

Grisi, L., Leite, R. C., Martins, J. R. D. S., Barros, A. T. M. D., Andreotti, R., Cançado, P. H. D., Leon, A. A. P., Pereira, J. B., Villela, H. S. (2014). Reassessment of the potential economic impact of cattle parasites in Brazil. *Revista Brasileira de Parasitologia Veterinária*, 23, 150-156.

Hart, B. L. (1992). Behavioral adaptations to parasites: an ethological approach. *Journal of Parasitology*, 78 : 256–265.

Kleiber, C., Zeileis, A., Zeileis, M. A. Package 'AER'. R package version 1.2. 2017;4. <https://CRAN.Rproject.org/package=AER>

Kohara, J., Takeuchi, M., Hirano, Y., Sakurai, Y., Takahashi, T. (2018). Vector control efficacy of fly nets on preventing bovine leukemia virus transmission. *Journal of Veterinary Medical Science*, 18, 0199.

Laveissière, C., Grebaut, P. (1990). The trapping of tsetse flies (Diptera: Glossinidae). Improvement of a model: the Vavoua trap. *Tropical medicine and parasitology: Official organ of Deutsche Tropenmedizinische Gesellschaft and of Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ)*, 41(2), 185-192.

Lenth, R., Singmann, H., Love, J., Buerkner, P., Herve, M. (2020). Package "emmeans": estimated marginal means, aka least-squares means. R package version 1.3.0.

Lüdecke, D., Makowski, D., Waggoner, P. (2019) Package "performance".

Lysyk, T. J. (1998). Relationships between temperature and life-history parameters of *Stomoxys calcitrans* (Diptera: Muscidae). *Journal of Medical Entomology*, 35 (2) : 107-119.

Magnusson, A., Skaug, H., Nielsen, A., Berg, C., Kristensen, K. (2017). Package 'glmmTMB.' R Package Version 0.2. 0.

- Manet, G., Guilbert, X., Roux, A., Vuillaume, A., Parodi, A. L. (1989). Natural mode of horizontal transmission of bovine leukemia virus (BLV): the potential role of tabanids (*Tabanus* spp.). *Veterinary Immunology and Immunopathology*, 22:255-263.
- Mooring, M. S., Hart, B. L. (1992). Animal grouping for protection from parasites: selfish herd and encounter-dilution effects. *Behaviour*, 123 : 173–193.
- Moreki, J. C., Tjinyeka, K., Makore, J., Tlotleng, K., Moseki, M. I. (2022). The impact of stable flies (*Stomoxys calcitrans* L.) on small stock production in Bodibeng, Bothatogo and Sehithwa in the North West district, Botswana; A survey study. *Online Journal of Animal and Feed Research*, 12(2): 73-80.
- Mullens, B. A., Lij, K., Mao, Y., Meyer, J. A., Peterson, N. G., Szijj C. E. (2006). Behavioural responses of dairy cattle to *Stomoxys calcitrans* in an open field environment. *Medical and Veterinary Entomology*, 20(1): 122-137.
- Muller, G. C., Hogsette, J. A., Beier, J. C., Traore, S. F., Toure, M. B., Traore, M. M., Bah, S., Doumbia, S., Schlein, Y. (2012). Attraction of *Stomoxys* sp. to various fruits and flowers in Mali. *Medical and Veterinary Entomology*, 26, 178–187.
- Nakagawa, S., Schielzeth, H. (2013). A general and simple method for obtaining R² from generalized linear mixed-effects models. *Methods in Ecology and Evolution*, 4(2), 133-142.
- Ohshima, K., Okada, K., Numakunai, S., Yoneyama, Y., Sato, S., Takahashi, K. (1981). Evidence on Horizontal Transmission of Bovine Leukemia Virus due to Blood-sucking Tabanid Flies. *The Japanese Journal of Veterinary Science*, 43 (1) : 79-81.
- Ooshiro, M., Konnai, S., Katagiri, Y., Afuso, M., Arakaki, N., Tsuha, O., Murata, S., Ohashi, K. (2013). Horizontal transmission of bovine leukemia virus from lymphocytotic cattle, and beneficial effects of insect vector control. *Veterinary Record*, 173, 527.
- Panei, C. J., Larsen, A. E., Fuentealba, N. A., Metz, G. E., Echeverría, M. G., Galosi, C. M., Valera, A. R. (2019). Study of horn flies as vectors of bovine leukemia virus. *Open Veterinary Journal*, 9(1): 33–37.
- Ripley, R., Hornik, K., Gebhardt, A., Firth, D., 2011. MASS: support functions and datasets for Venables and Ripley's MASS. R Packag. version.
- Taylor, D. B., Moon, R. D., Mark, D. R. (2012). Economic impact of stable flies (Diptera: Muscidae) on dairy and beef cattle production. *Journal of Medical Entomology*, 49(1): 198-209.
- Taylor, D. B., Harrison, K., Zhu, J. J. (2020). Methods for Surveying Stable Fly Populations. *Journal of Insect Science*, 1; 20 (6): 17.
- Torr, S. J., Mangwiro, T. N. C., Hall, D. R. (2006). The effects of host physiology on the attraction of tsetse (Diptera: Glossinidae) and *Stomoxys* (Diptera: Muscidae) to cattle. *Bulletin of Entomological Research*, 96: 71 – 84.
- Win Chin, J. (2021). Caractérisation et distribution d'un champignon entomopathogène des stomoxes à La Réunion. Rapport de stage, Université Toulouse III, Paul Sabatier, France.
- Zambrano-Bigiarini, M.: Package hydroGOF. Goodness-of-fit Functions for Comparison of Simulated and Observed Hydrological Time Series.
- Zeileis, A., Kleiber, C., Jackman, S. (2008). Regression models for count data in R. *Journal of statistical software*, 27(8), 1-25.

Zumt, F. (1973). The Stomoxyine biting flies of the world (Diptera: Muscidae). Taxonomy, biology, economic importance and control measures. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag. 175p.

ANNEXES

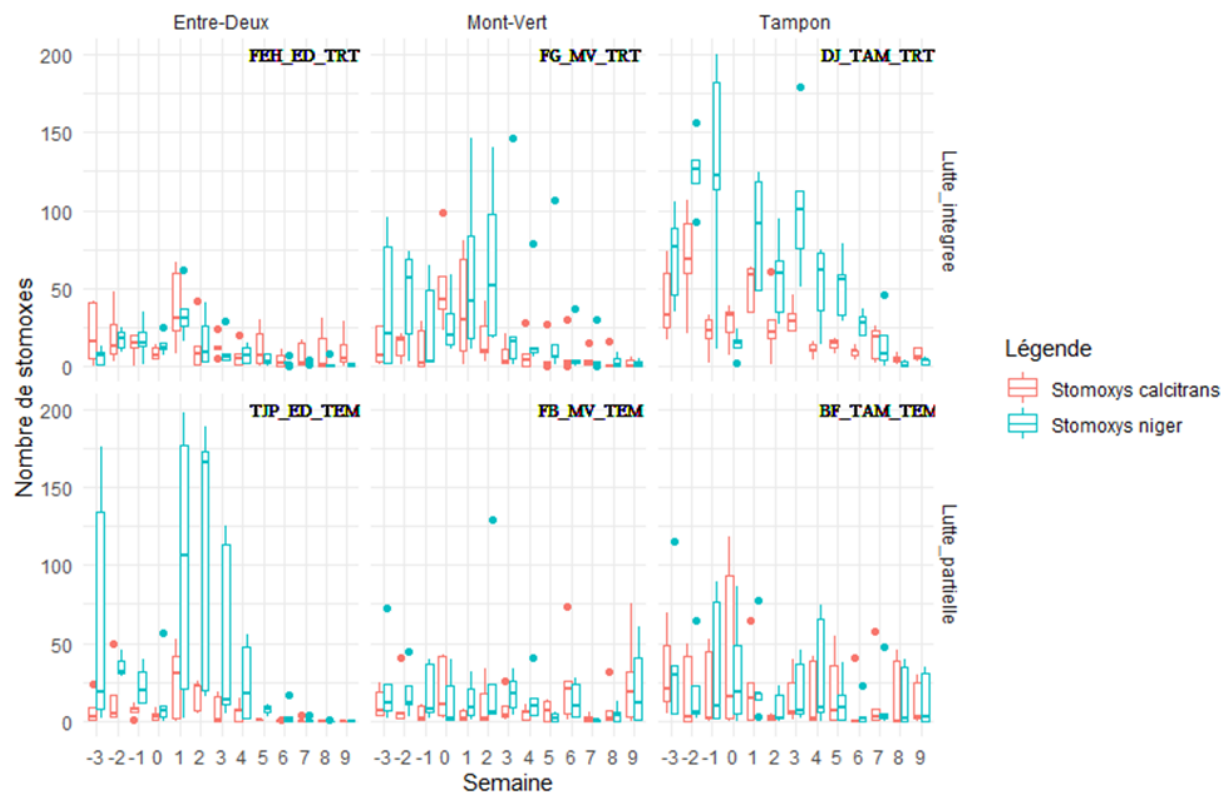


Figure annexe 1 : Diversité spécifique des stomoxes capturés par piège Vavoua au fil des semaines sur chaque exploitation.

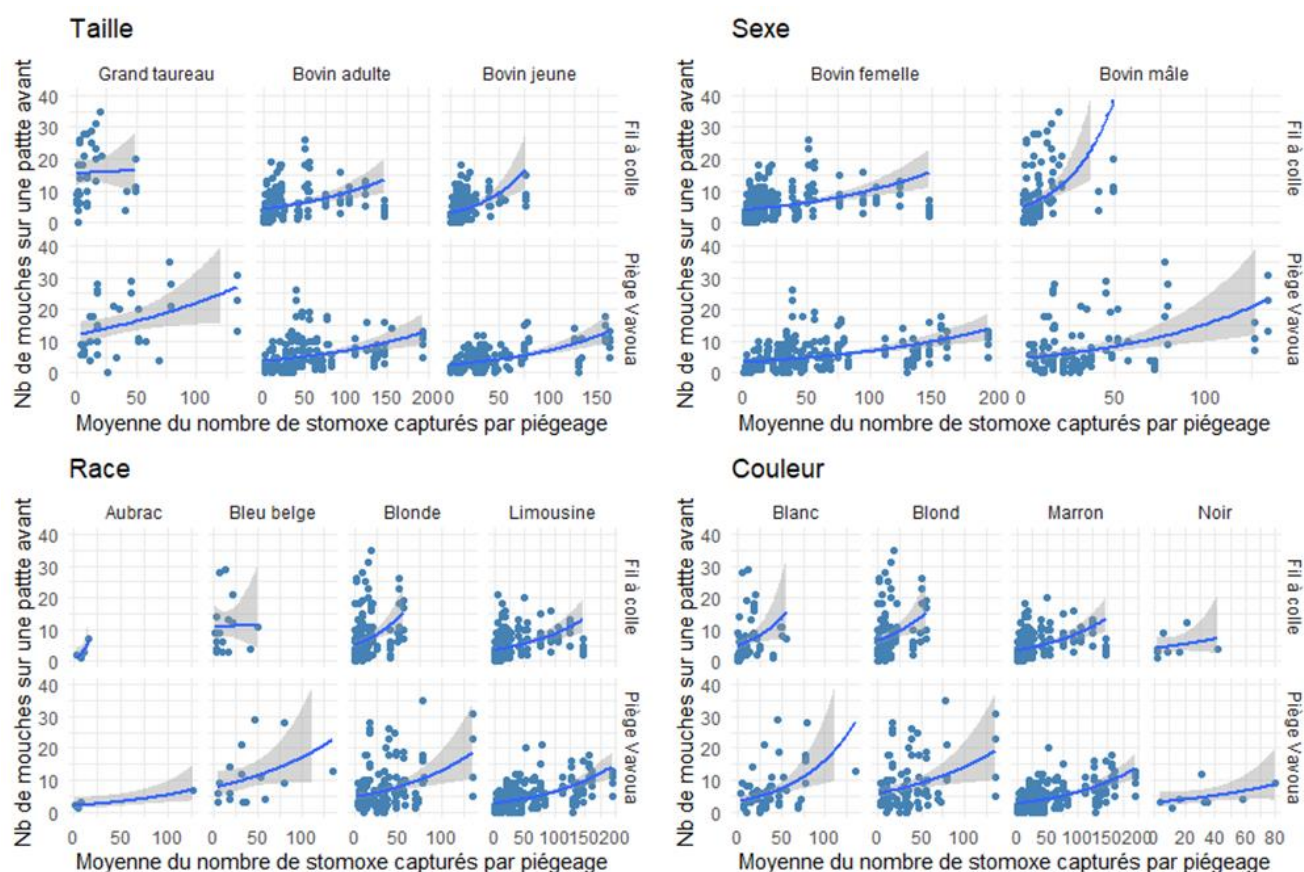


Figure annexe 2 : Nombre de mouches sur la patte avant d'un bovin en fonction de la DAP de stomoxes observé sur fil à colle ou par piège Vavoua selon les différentes caractéristiques des bovins. Une fonction de lissage suivant une régression binomiale négative (courbe en bleu) avec son intervalle de confiance à 95% (bande grise) a été appliquée.

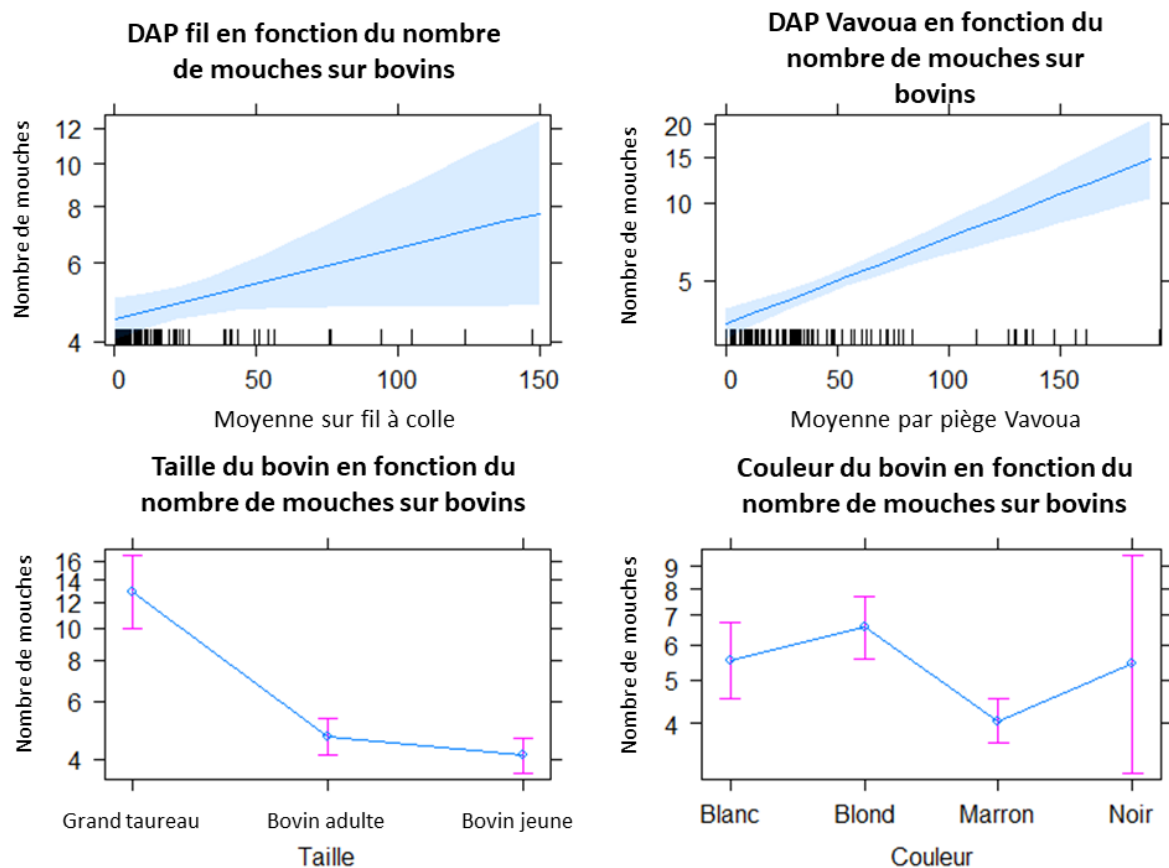


Figure annexe 3 : Variables explicatives de la relation entre le nombre de mouches sur la patte avant d'un bovin et la densité apparente de stomoxes.

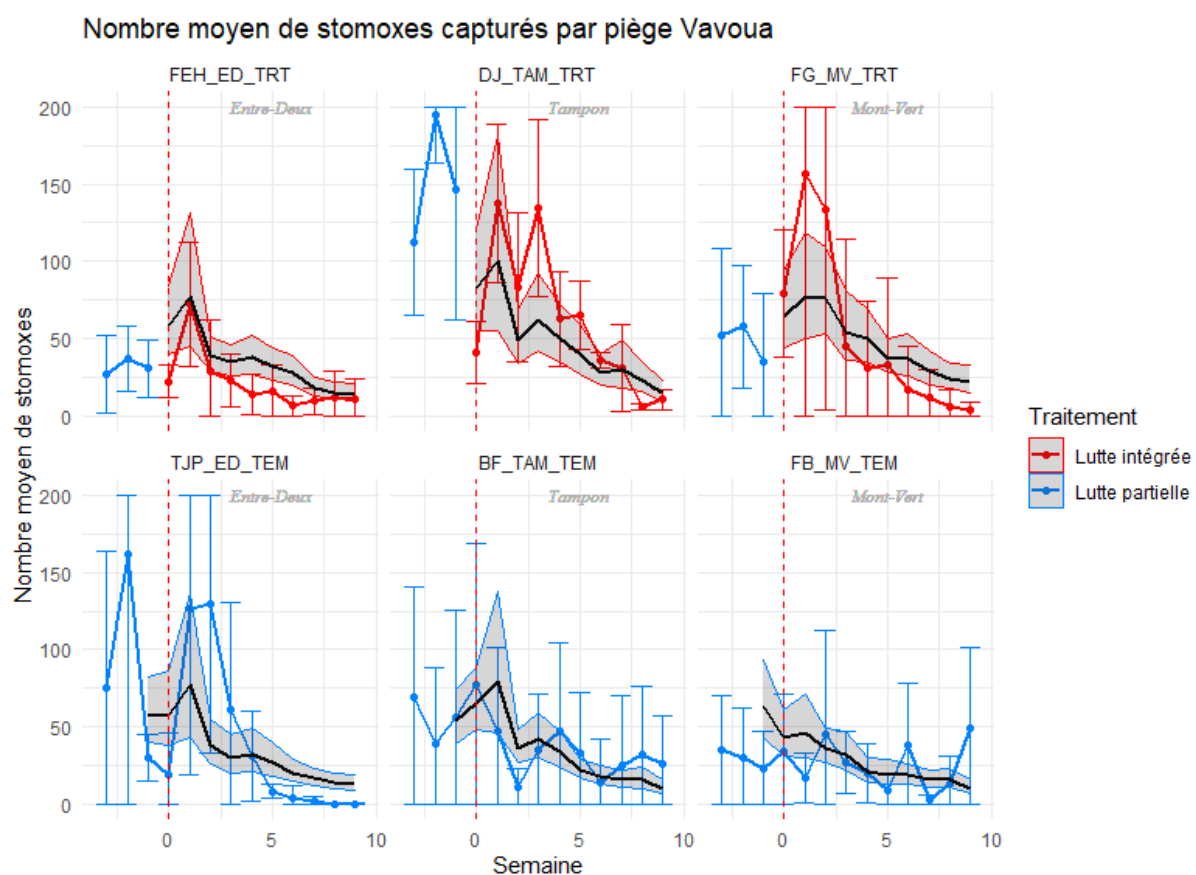


Figure annexe 4 : Nombre moyen de stomoxes capturés par piège Vavoua. Les courbes noires représentent les prédictions de notre modèle et la bande grise autour de la courbe représente leurs intervalles de confiance à 95%.

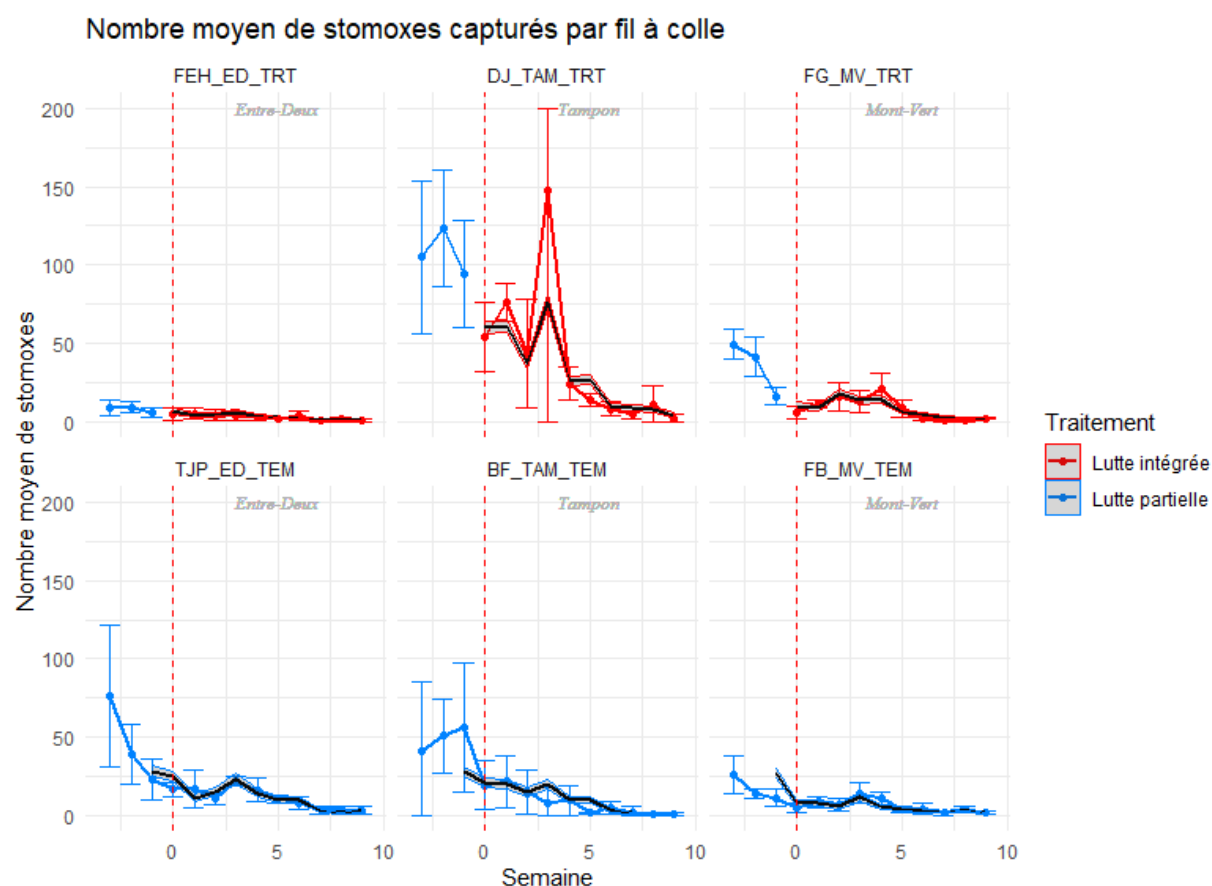


Figure annexe 5 : Nombre moyen de stomoxes capturés par fil à colle. Les courbes noires représentent les prédictions de notre modèle et la bande grise autour de la courbe représente leurs intervalles de confiance à 95%.

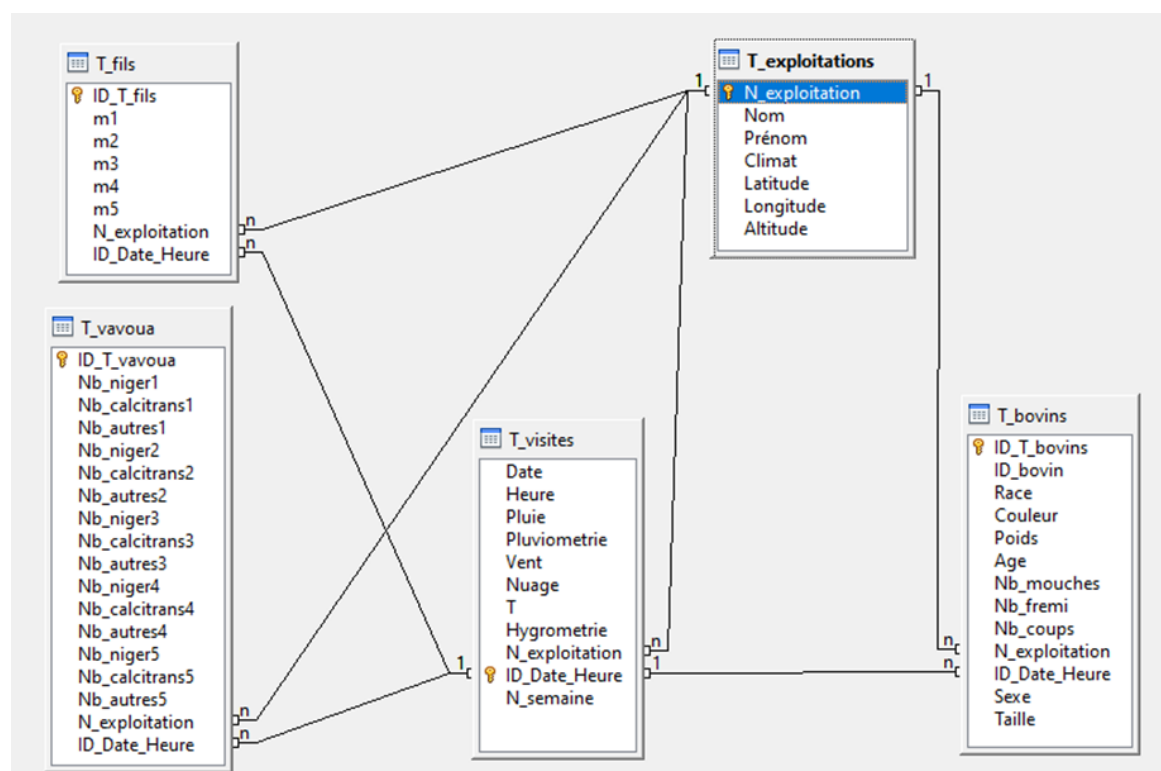


Figure annexe 6 : Schéma UML de la base de données utilisé.

Tableau annexe 1: Modèle négatif binomial simple des variables associées aux occurrences des frémissements peauciers

Variables	Coeff.	ES	IRR	IC 95%	Valeur du t-statistique	p-value
Intercept	0.302865	0.205762	1.353732	0.9125946 - 2.008536	1.472	0.14104
Sexe-Mâle	0.253504	0.092743	1.288532	1.0773447 - 1.544901	2.733	0.00627 **
Taille-Bovins adultes	0.795082	0.175297	2.214622	1.5837704 - 3.092150	4.536	5.74e-06 ***
Taille-Bovins jeunes	0.901859	0.183126	2.464180	1.7500439 - 3.465123	4.925	8.44e-07 ***
Nombres de mouches sur la patte avant	0.109761	0.007302	1.116012	1.0976185 - 1.135240	15.032	< 2e-16 ***

Tableau annexe 2 : Modèle négatif binomial simple des variables associées aux occurrences des coups de patte

Variables	Coeff.	ES	IRR	IC 95%	Valeur du t-statistique	p-value
Intercept	-1.61277	0.37024	0.1993342	0.09735185 - 0.4008918	-4.356	1.32e-5 ***
Taille-Bovins adultes	0.86341	0.30828	2.3712251	1.29075559 - 4.4005968	2.801	0.0051 **
Taille-Bovins jeunes	0.96884	0.31776	2.6348737	1.42535896 - 4.9288643	3.049	0.0023 **
Couleur-Blond	-0.16152	0.23256	0.8508494	0.53309602 - 1.3543037	-0.695	0.4873
Couleur-Marron	0.21949	0.20573	1.2454455	0.82203729 - 1.8868305	1.067	0.2860
Couleur-Noir	-1.31844	0.79356	0.2675516	0.03802861 - 1.1785094	-1.661	0.966
Nombres de mouches sur la patte avant	0.14056	0.01345	1.1509140	1.11492710 - 1.1899368	10.454	< 2e-16 ***

Tableau annexe 3 : Modèle négatif binomial des variables associées au nombre moyen de stomoxes par piège Vavoua

Variab	Co	ES	IRR	IC 95%	Valeur du t-statistique	p-value
Intercept	-5.803250	1.982250	0.003017731	9.410673e-05 - 0.1032006	-2.928	0.003416 **
Vent-Faible et fort	-0.277689	0.220406	0.757532138	4.851440e-01 - 1.1494922	-1.260	0.207706
Température minimum sur 7 jours	0.147445	0.056338	1.158870059	1.038626 - 1.2923508	2.617	0.008866 **
Précipitation sur 7 jours	0.002880	0.001828	1.002884554	9.996198e-01 - 1.0065372	1.576	0.085135
Hygrométrie sur 14 jours	0.072469	0.019628	1.075158978	1.036774 - 1.1153321	3.692	0.000222 ***

Tableau annexe 4 : Modèle négatif binomial mixte des variables associées au nombre moyen de stomoxes par fil à colle (avec l'exploitation comme effet aléatoire)

Variab	Co	ES	IRR	IC 95%	Valeur du t-statistique	p-value
Intercept	-1.327e+01	1.876	1.718109e-06	4.344826e-08 - 6.794058e-05	-7.075	1.50e-12
Vent-Faible et fort	6.813e-02	1.742e-01	1.070505	7.608017e-01 - 1.506282	0.391	0.6958
Température au relevé	7.592e-02	2.951e-02	1.078879	1.018242 - 1.143126	2.573	0.0101 *
Température maximum sur 7 jours	3.855e-01	6.963e-02	1.470337	1.282765 - 1.685336	5.536	3.09e-08 ***
Hygrométrie sur 7 jours	5.733e-02	2.226e-02	1.059001	1.013784 - 1.106234	2.575	0.0100 *
Précipitation sur 14 jours	-6.669e-04	9.044e-04	9.993333e-01	9.975634e-01 - 1.001106	-0.737	0.4609