
Aide à l'élaboration d'un outil de détection automatisé des milans royaux (*Milvus milvus*) en Wallonie et au Luxembourg

Auteur : Cools, Louise

Promoteur(s) : Dufrêne, Marc

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : gestion des forêts et des espaces naturels, à finalité spécialisée

Année académique : 2020-2021

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/13090>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



**AIDE A L'ELABORATION D'UN OUTIL DE
DETECTION AUTOMATISE DES MILANS
ROYAUX (*MILVUS MILVUS*) EN WALLONIE
ET AU LUXEMBOURG**

LOUISE COOLS

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER BIOINGENIEUR EN GESTION DES FORETS ET DES ESPACES NATURELS**

ANNEE ACADEMIQUE 2020-2021

PROMOTEUR : MARC DUFRENE

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

**AIDE A L'ELABORATION D'UN OUTIL DE
DETECTION AUTOMATISE DES MILANS
ROYAUX (*MILVUS MILVUS*) EN WALLONIE
ET AU LUXEMBOURG**

LOUISE COOLS

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER BIOINGENIEUR EN GESTION DES FORETS ET DES ESPACES NATURELS**

ANNEE ACADEMIQUE 2020-2021

PROMOTEUR : MARC DUFRENE

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier Pauline Choquet et Virginie Mercier de Noveria Lux de m'avoir permis de découvrir et travailler sur le début d'un projet aussi intéressant que passionnant. Je les remercie également pour leur encadrement, conseils et aide apportés tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Je voudrais également remercier mon promoteur Marc Dufrêne pour ses nombreux conseils et sa disponibilité tout au long du travail.

La réalisation de ce travail n'aurait pas non plus été possible sans l'aide de Romain Baude et Jordan Ledig de la société APREX Solutions qui m'ont permis de découvrir et utiliser leur logiciel de détection et de tracking. Merci à eux d'avoir toujours été disponibles pour répondre à mes nombreuses questions.

Aussi, je remercie l'ensemble des personnes contactées dans ce projet :

- Yves Brostaux pour ses conseils statistiques
- Jean-Yves Paquet, Stef van Rijn ainsi que Katharina Klein pour les données fournies
- Jérémy Simar pour son expertise dans le domaine législatif

Pour finir, je remercie mes proches pour leur soutien indéfectible tout au long de ce projet. Merci à mon papa pour sa relecture et son aide apportée dans la mise en page. Merci aussi à Marion, Veronica, Chloé, Elodie, Nebila et Gaëlle pour ces cinq belles années.

RÉSUMÉ

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'un projet de développement d'un outil automatisé de détection, dont le but est de permettre de détecter le milan royal et d'arrêter les éoliennes afin d'éviter le risque de collision. Ce travail s'est fait en collaboration avec Noveria Lux et Apex Solutions. La première partie du projet a consisté à mettre en évidence les moments pendant lesquels le système devait fonctionner. Pour ce faire, des données GPS issues d'une balise posée sur un milan royal au Grand-Duché de Luxembourg par Natur&mwelt ont été utilisées. L'activité nocturne a été analysée afin de connaître les tranches horaires de fonctionnement de l'outil. Il en a été déduit que le milan se déplaçait déjà avant le lever du soleil. La distance de détection et de reconnaissance¹ a aussi été déterminée grâce à la vitesse de vol du milan et a été établie à minimum 400m. Ensuite, les conditions météorologiques ont été mises en lien avec le comportement de vol du milan. Différentes analyses de régression montrent que près de 30% de l'activité de vol de ce rapace est expliquée par certaines variables météorologiques telles que la vitesse du vent, les précipitations, la température, l'humidité relative, le rayonnement global et la pression atmosphérique. Cependant, ces variables ne pourront pas être utilisées pour justifier l'arrêt du système. En effet, aucune d'elles ne permet d'établir un seuil en dehors duquel nous pouvons nous assurer que le milan royal ne vole pas.

La deuxième partie s'est focalisée sur la différenciation entre différentes espèces d'oiseaux sur base de leur trajectoire de vol. Il est indispensable que le système créé puisse différencier les espèces afin de ne pas arrêter les éoliennes dès qu'un oiseau est présent à proximité. Pour ce faire, une phase de terrain s'est imposée pour filmer des buses variables, des milans royaux et des milans noirs en vol, les autres espèces pouvant aisément être différenciées par le logiciel utilisé. Ensuite, une analyse des vidéos a été effectuée et une intelligence artificielle a été utilisée. La base de données de vidéos étant trop faible (à raison de 225 trajectoires pour la buse variable, le milan noir et le milan royal confondus), cette approche n'a pas donné de résultats positifs. Toutefois, la méthodologie initiée et testée devrait permettre de bien identifier les espèces, avec quelques ajustements.

¹ Distance séparant l'oiseau et l'éolienne au moment de la détection et de la reconnaissance de l'espèce par l'outil de détection

ABSTRACT

This study is part of a project to develop an automated detection tool, with the aim to detect red kites and stop wind turbines in order to avoid the risk of collision. This work was done in collaboration with Noveria Lux and Aprex Solutions. The first part of the project consisted of identifying the times when the system should work. To do this, GPS data from a tag placed on a red kite in the Grand Duchy of Luxembourg by Natur&ëmwelt were used. The nocturnal activity was analysed in order to know the time slots in which the tool was operating. It was deduced that the kite was already moving before sunrise. The detection and recognition distance² was also determined from the flight speed of the kite and was set to at least 400m. Secondly, the weather conditions were related to the flight behaviour of the kite. Different regression analyses show that about 30% of the flight activity of this raptor is explained by certain meteorological variables such as wind speed, precipitation, temperature, relative humidity, global radiation and atmospheric pressure. However, these variables cannot be used to justify the shutdown of the system. Indeed, none of these variables allow us to establish a threshold outside of which we can ensure that the red kite does not fly.

The second part focused on the differentiation between different species of birds on the basis of their flight path. Indeed, it is essential that the system created can differentiate between species so that the turbines are not stopped as soon as a bird is present in the vicinity. In order to do this, a field phase was necessary to film common buzzards, red kites and black kites in flight, as the other species could easily be differentiated by the software used. Then, an analysis of the videos was carried out and artificial intelligence was used. As the video database was too small (225 trajectories for Common Buzzard, Black Kite and Red Kite combined) this approach did not yield positive results. However, the methodology initiated and tested should allow the species to be identified well, with some adjustments.

² Distance between the bird and the wind turbine at the time of detection and recognition of the species by the detection tool

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	i
Résumé	ii
Abstract.....	iii
Table des matières	iv
Table des figures	vi
Table des tableaux	viii
Liste des abréviations	ix
1. Introduction.....	1
1.1. Le Milan Royal	2
1.1.1. Caractéristiques morphologiques	2
1.1.2. Distribution.....	2
1.1.3. Alimentation et techniques de chasse	3
1.1.4. Habitat	3
1.1.5. Reproduction et cycle de vie	3
1.1.6. Protection	4
1.1.7. Bref historique et menaces	4
1.2. Les éoliennes.....	5
1.3. Enjeux	7
1.4. Solutions existantes.....	10
1.5. Noveria Lux	11
2. Matériel et méthode	13
2.1. Analyse des données GPS.....	13
2.1.1. Présentation des données	13
Zone d'étude	13
Données milans	14
Données météorologiques	15
2.1.2. Analyse des données	16
Utilisation du sol	16
Domaine vital	16
Activité de nuit.....	17
Hauteur de vol.....	17
Vitesse de vol.....	18
Analyse du temps de vol et de la distance parcourue	18
Lien entre chaque paramètre météo et le vol du milan.....	19
Activité de vol en fonction d'une combinaison de paramètres météorologiques	20
2.2. Trajectométrie	22
2.2.1. TRACK	22

2.2.2. Terrain	24
2.2.3. Analyses	26
Intelligence artificielle	26
Analyse des vitesses et accélérations	27
3. Résultats	28
3.1. Analyse des données GPS	28
Utilisation des sols	28
Domaine vital	30
Activité de nuit	32
Hauteur de vol	33
Vitesse de vol	34
Temps de vol	34
Distance parcourue	35
Lien entre chaque paramètre météo et le vol du milan	36
Activité de vol en fonction d'une combinaison de paramètres météorologiques	38
3.2. Trajectométrie	43
Intelligence artificielle	43
Analyse des vitesses et accélérations	45
4. Discussion	47
4.1. Analyse des données GPS	47
Utilisation des sols	47
Domaine vital	48
Activité de nuit	49
Hauteur de vol	49
Vitesse de vol	50
Temps de vol	50
Distance parcourue	51
Lien entre chaque paramètre météo et le vol du milan	53
Activité de vol en fonction d'une combinaison de paramètres météorologiques	53
4.2. Trajectométrie	55
Intelligence artificielle	55
Analyse des vitesses et accélérations	55
5. Conclusion	56
6. Perspectives	57
7. Bibliographie	58
Annexes	64
Annexe 1 : Lien entre chaque paramètre météo et le vol du milan	64
Annexe 2 : Distribution des résidus pour les différents modèles	70

TABLE DES FIGURES

<i>Figure 1: Milan royal</i>	2
<i>Figure 2: Distribution du milan royal en Europe</i>	2
<i>Figure 3 : Carte de la densité de puissance du vent en W/m²</i>	7
<i>Figure 4 : Représentation du potentiel de vent sur le territoire wallon</i>	8
<i>Figure 5 : Répartition du milan royal en Wallonie</i>	8
<i>Figure 6 : Zone d'étude</i>	13
<i>Figure 7: Diagramme ombrothermique de Clervaux</i>	14
<i>Figure 8 : Capture d'écran du logiciel TRACK</i>	22
<i>Figure 9 : Détection et tracking d'un milan royal via le logiciel TRACK</i>	23
<i>Figure 10 : Trajectoire d'un milan royal et détection d'entités individuelles</i>	23
<i>Figure 11 : Trajectoire isolé d'un milan royal</i>	24
<i>Figure 12 : Point d'observation à Hondelange</i>	25
<i>Figure 13 : Point d'observation à Mortinsart</i>	25
<i>Figure 14 : Représentation du nombre de points GPS par ha en fonction de l'occupation du sol</i>	29
<i>Figure 15 : Répartition du pourcentage des classes d'occupation du sol avant et après fauche</i>	29
<i>Figure 16 : Répartition du pourcentage d'occupation du sol en fonction du mois</i>	30
<i>Figure 17 : Représentations du domaine vital calculé avec la méthode MCP</i>	30
<i>Figure 18 : Représentations du domaine vital calculé avec la méthode Kernel</i>	31
<i>Figure 19 : Carte des différents types d'occupation du sol au sein du domaine vital (Kernel 95%)</i>	32
<i>Figure 20 : Répartition de l'activité de vol mis en évidence via les vitesses de vol</i>	33
<i>Figure 21 : Répartition de l'activité de vol mis en évidence via la distance parcourue</i>	33
<i>Figure 22 : Représentation de la répartition des hauteurs de vol</i>	33
<i>Figure 23 : Courbe de densité de la vitesse de vol (m/s)</i>	34
<i>Figure 24 : Pourcentage moyen de temps de vol sur une heure en fonction des heures</i>	34
<i>Figure 25 : Pourcentage moyen de temps de vol sur une heure en fonction des heures et de la période</i>	35
<i>Figure 26 : Distance moyenne parcourue sur une heure (km) en fonction des heures</i>	35
<i>Figure 27 : Distance moyenne parcourue sur une heure (km) en fonction des heures et de la période</i>	36
<i>Figure 28 : Distance parcourue sur une heure (km) et temps de vol (%) en fonction de la vitesse du vent (m/s)</i> 36	
<i>Figure 29 : Distance parcourue sur une heure (km) et temps de vol (%) en fonction de la pression atmosphérique (hPa)</i>	36
<i>Figure 30 : Distance parcourue sur une heure (km) et temps de vol (%) en fonction de l'humidité relative (%)</i> 37	
<i>Figure 31 : Distance parcourue sur une heure (km) et temps de vol (%) en fonction du rayonnement global (Wh/m²)</i>	37
<i>Figure 32 : Distance parcourue sur une heure (km) et temps de vol (%) en fonction de la température (°C)</i>	37
<i>Figure 33 : Distance parcourue sur une heure (km) et temps de vol (%) en fonction des précipitations (mm)</i>	37
<i>Figure 34 : Représentation des corrélations entre variables explicatives</i>	38
<i>Figure 35 : Résumé de la régression multiple choisie entre le temps de vol (%) et les différentes variables météorologiques</i>	39
<i>Figure 36 : Résumé de la régression multiple choisie entre la distance parcourue (km) et les différentes variables météorologiques</i>	39
<i>Figure 37 : Résumé de la régression multiple choisie entre le temps de vol (%) et les différentes variables météorologiques pour la période avant fauche</i>	41
<i>Figure 38 : Résumé de la régression multiple choisie entre la distance parcourue (km) et les différentes variables météorologiques pour la période avant fauche</i>	41
<i>Figure 39 : Résumé de la régression multiple choisie entre le temps de vol (%) et les différentes variables météorologiques pour la période après fauche</i>	42

<i>Figure 40 : Résumé de la régression multiple choisie entre la distance parcourue (km) et les différentes variables météorologiques pour la période après fauche</i>	42
<i>Figure 41 : Exemple de trajectoire d'une buse variable, d'un milan noir et d'un milan royal respectivement (position en X en fonction de position en Y).....</i>	43
<i>Figure 42 : Exemple de la vitesse en x en fonction du temps pour une buse variable, un milan noir et un milan royal respectivement</i>	43
<i>Figure 43 : Exemple de la vitesse en y en fonction du temps pour une buse variable, un milan noir et un milan royal respectivement</i>	43
<i>Figure 44 : Exemple de l'accélération en x en fonction du temps pour une buse variable, un milan noir et un milan royal respectivement</i>	44
<i>Figure 45 : Exemple de l'accélération en y en fonction du temps pour une buse variable, un milan noir et un milan royal respectivement</i>	44
<i>Figure 46 : Capture d'écran de TRACK en appliquant le modèle d'IA à une trajectoire de buse variable</i>	44
<i>Figure 47 : Capture d'écran de TRACK en appliquant le modèle d'IA à une trajectoire de milan royal</i>	45
<i>Figure 48 : Courbe de densité de la vitesse en x pour les trois espèces</i>	45
<i>Figure 49 : Courbe de densité de la vitesse en y pour les trois espèces</i>	46
<i>Figure 50 : Courbe de densité de l'accélération en x pour les trois espèces</i>	46
<i>Figure 51 : Courbe de densité de l'accélération en y pour les trois espèces</i>	46
<i>Figure 52 : Pourcentage du nombre de retours au nid au cours de la saison de reproduction.....</i>	51
<i>Figure 53 : Trajectoire effectuée par le milan royal le 11 juin 2020.....</i>	52
<i>Figure 54 : Prototype.....</i>	57

TABLE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1 : Données issues du GPS OrniTrack.....</i>	15
<i>Tableau 2 : Superficie (ha) en nombre de points GPS associés aux classes d'occupation du sol</i>	28
<i>Tableau 3: Superficie (ha) et rayon (km) des domaines vitaux calculés avec la méthode MCP.....</i>	31
<i>Tableau 4 : Surface (ha) des domaines vitaux calculés avec la méthode Kernel.....</i>	31
<i>Tableau 5 : Types d'occupation du sol dans le domaine vital calculé avec le Kernel 95%.....</i>	32
<i>Tableau 6 : Changements de variables</i>	40

LISTE DES ABREVIATIONS

CWEDD	Conseil Wallon de l'Environnement pour le Développement Durable
DEMNA	Département de l'Etude du Milieu Naturel et Agricole
DNF	Département de la Nature et des Forêts (en Wallonie)
IA	Intelligence Artificielle
IUCN	International Union for Conservation of Nature
MCP	Minimum Convex Polygon
MRAe	Mission Régionale de l'Autorité environnementale
MNT	Modèle Numérique de Terrain

1. INTRODUCTION

Cette étude s'inscrit dans un projet de Noveria Lux, une agence de consultance en énergie renouvelable au Grand-Duché de Luxembourg afin de prendre part aux premières étapes de la création d'un outil automatisé de détection du milan royal, une espèce menacée au niveau européen, à proximité des éoliennes. Cet outil permettrait, après détection de ce rapace, d'envoyer un signal aux éoliennes pour les arrêter et éviter une collision fatale. Le but est de mener les premières analyses sur la faisabilité de ce projet afin de faciliter la coexistence entre le milan royal et les éoliennes. L'étude s'est déroulée en deux étapes.

Premièrement, nous avons essayé de déterminer les périodes de fonctionnement de l'outil de détection grâce à des données GPS venant d'un milan royal. L'objectif est de déterminer les heures à partir desquelles le milan est actif et donc pendant lesquelles il faut pouvoir le détecter, mais aussi la distance à laquelle il doit être détecté. Cette distance dépend de la vitesse de vol et du temps nécessaire à l'arrêt d'une éolienne. Nous avons aussi examiné s'il était possible d'établir un lien suffisamment fort entre les variables météorologiques et le comportement de vol. En effet, si nous pouvons prouver qu'il y a moins de 5% de chances que le milan ne vole au-delà d'un certain seuil (par exemple, au-delà de 10 m/s de vent), nous pourrions couper la caméra tout en assurant le fonctionnement des éoliennes quand ce seuil est dépassé. Cette assurance est importante pour les promoteurs éoliens, afin d'assurer une certaine productivité.

Deuxièmement, nous avons essayé de voir s'il était possible de différencier différentes espèces sur base de leur trajectoire de vol. En effet, l'outil devrait être capable, grâce à des caméras reliées à un logiciel, de détecter le milan et de le reconnaître afin que les éoliennes ne s'arrêtent qu'en présence du milan royal et pas des autres espèces. Cela constituerait aussi une assurance pour les promoteurs éoliens de ne pas voir leurs éoliennes s'arrêter dès qu'un oiseau se trouve à proximité.

Par ce travail, j'ai tenté de répondre à deux questions de recherche :

- Est-il possible d'établir un lien entre les conditions météorologiques et le vol du milan royal ? Est-il possible d'identifier des seuils de préférence d'activité en lien avec ces conditions ? Si oui, ces seuils sont-ils favorables pour la continuité du développement de l'outil de détection automatisé ?
- Est-il possible de distinguer les espèces sur base d'une analyse par trajectométrie ? Si oui, quels sont les facteurs explicatifs les plus déterminants ?

1.1. Le Milan Royal

1.1.1. Caractéristiques morphologiques

Le milan royal (*Milvus milvus*) est un rapace diurne d'envergure comprise entre 145 et 165 cm pour une longueur variant de 59 à 66 cm. Il est caractérisé par une queue rousse échancrée, des fenêtres blanches sous les ailes, un plumage brun-roux et une tête grisâtre. Le mâle est plus léger que la femelle (800-1050g pour les mâles contre 950-1300g pour les femelles) [1] [2].



Figure 1: Milan royal

1.1.2. Distribution

Le milan royal est un rapace endémique à l'Europe et répandu du Sud de la Suède jusqu'au détroit de Gibraltar. Près de 90% de sa distribution mondiale se situe dans les cinq pays suivants : l'Allemagne (où nous retrouvons près de la moitié des couples nicheurs [3]), la France, l'Espagne, la Suisse ainsi que la Suède [4] [1]. Il vit principalement à de faibles altitudes, jusqu'à 1400m en Corse [5]. En Belgique, ce rapace se trouve principalement dans l'est de la Wallonie, dans les provinces de Liège et du Luxembourg. Elle abrite approximativement 1% de la population de milan royal et se retrouve au cœur de l'aire de répartition mondiale. Son importance dans la protection de cette espèce n'est donc pas à négliger [6]. En Wallonie, le nombre de couples entre 2001 et 2007 était estimé entre 150 et 180 [7] [8]. Pour ce qui est du Grand-Duché de Luxembourg, AVES (le pôle ornithologique de Natagora) a estimé qu'il y aurait une soixantaine de couples de milans royaux [9].

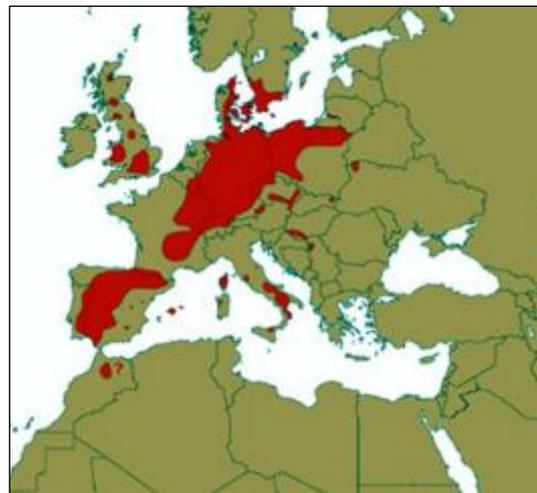


Figure 2: Distribution du milan royal en Europe
Source : [10]

1.1.3. *Alimentation et techniques de chasse*

Le milan royal est un oiseau opportuniste, se nourrissant principalement de campagnols terrestres (*Arvicola terrestris*), de campagnols des champs (*Microtus arvalis*) mais aussi d'oiseaux (passereaux et corvidés), d'invertébrés parfois même d'amphibiens et très rarement de poissons. Il peut également se nourrir de carcasses d'animaux morts. Il a tendance à voler proche de la surface pour repérer ses proies et il profite des colonnes d'air chaud pour prendre de la hauteur afin de repérer un animal mort. Il lui arrive de chasser au sol afin d'attraper des insectes [4].

1.1.4. *Habitat*

Le *Milvus milvus* privilégie les zones agricoles ouvertes, les prairies et les polycultures. La proximité avec des petits boisements ou des lisières d'espace agricole lui est essentielle pour sa reproduction. Il n'est pas considéré comme territorial, sauf à proximité immédiate de son nid. Son territoire de chasse pendant la période de reproduction se concentre dans un rayon de 2,5 km autour de son nid et privilégie les zones fraîchement fauchées, causant la mort de nombreux micromammifères [4].

1.1.5. *Reproduction et cycle de vie*

Le milan royal est un rapace semi migrateur. S'il ne migre pas, il passe souvent l'hiver en couple. C'est notamment le cas des milans qui vivent au Sud (en Espagne par exemple). A contrario, au Nord Est de l'Europe, les milans sont considérés comme migrants partiels et hivernent au Sud de la France ou en Espagne [11]. Lors de leur migration, le couple se sépare et se retrouve au retour. La migration commence entre le début du mois d'août et la fin du mois de novembre (date médiane du départ des milans belges : 14 octobre [12]), et le retour s'effectue entre fin février et avril. Ils reviennent souvent se reproduire là où ils sont nés.

Lors des retrouvailles, ils créent un nid en brindilles ou en remettent un en état dans un grand arbre. Ce nid a un diamètre de 60 à 90 cm pour une profondeur comprise entre 30 et 50 cm. Après, s'enchaîne une parade nuptiale. La ponte a lieu entre mi-mars et avril à raison de 2 à 3 œufs, exceptionnellement 4 [13], pondus à intervalle de 1 à 2 jours pour une couvaison de 31 jours [5]. C'est principalement la femelle qui couve, pendant que le mâle part chasser pour elle [5] [14]. Les jeunes sont alimentés pendant 40 à 60 jours et commencent à voler dès le 50^{ème} jour. Ils deviennent indépendants pendant le

mois de juillet mais restent souvent en famille pendant encore 3 à 4 semaines, si les ressources alimentaires le permettent. Ensuite, ils se dispersent. Les adultes deviennent sexuellement matures lors de leur 3^{ème} ou 4^{ème} année [4] [5]. La durée de vie du milan royal est de 26 ans à l'état sauvage, pour 38 en captivité [5].

Concernant le succès de reproduction, une étude au Royaume-Uni a montré qu'il diminuait dans les climats pluvieux, surtout quand ce climat est associé à un faible taux de nourrissage [2]. Une autre étude réalisée dans les Cantons de l'Est belges précise que le facteur prépondérant pour un bon succès de reproduction est la présence du campagnol terrestre (*Arvicola terrestris*). Comme facteurs secondaires, ils citent la précocité de la première fauche, la température moyenne ainsi que la pluviosité lors de la nidification [15].

1.1.6. *Protection*

Ce rapace est intégralement protégé en Belgique selon l'Article 2 de la Loi du 12 juillet 1973 de la Conservation de la nature. Il figure aussi à l'annexe 2 de la convention de Berne et dans l'annexe 1 de la Directive européenne CEE/79/409 [16] et fait l'objet d'un Plan d'action européen [17].

Le milan royal est une espèce figurant sur la liste rouge de l'IUCN. Elle est passée en 2020 de l'état presque menacé à un état de préoccupation mineure dans le monde notamment grâce aux différentes réintroductions de milan royal en Angleterre et en Ecosse [18]. Sa population est considérée comme en augmentation [19]. En Europe, son statut n'a pas (encore ?) été modifié [20].

1.1.7. *Bref historique et menaces*

L'existence du milan royal est avérée depuis l'Antiquité [6]. Très commun auparavant, son effectif a fortement diminué au cours du XIX et XX^{ème} siècle, à cause notamment de la chasse et des empoisonnements, avant de connaître une recrudescence vers les années septante notamment grâce à son statut de protection total [4] [6] et à la diminution de l'utilisation de pesticides organochlorés [21]. De nos jours, la population du milan royal est en déclin en France, en Allemagne et en Espagne [5]. Contrairement à nos voisins, la Belgique voit sa population augmenter depuis près de 30 ans [14] [15] [16]. On observe une densification de peuplement et une expansion vers l'Ouest [6].

Cette augmentation de la population de ce rapace en Belgique peut s'expliquer par la précocité de la fauche, positivement corrélée au succès de reproduction [15].

Malgré cela, de nombreuses menaces [4] continuent de peser sur cet oiseau, tel que la dégradation de l'habitat, la fermeture des décharges à ciel ouvert, le dérangement dû à l'activité forestière, les tirs, les collisions (sur le réseau routier, le réseau électrique ou les éoliennes) ainsi que la compétition interspécifique et la prédation.

Le plus gros danger reste cependant l'empoisonnement. Il peut être direct (détection des appâts pour rongeurs empoisonnés) ou indirect (consommation d'animaux empoisonnés) [5]. En Espagne, en 15 ans, 435 milans royaux ont été retrouvés morts empoisonnés. Le montant total serait estimé à 14.000 individus [5]. Par conséquent, ce problème, particulièrement récurrent en Espagne cause une diminution des populations nordiques de ce rapace, venues passées l'hiver au Sud [5].

1.2. Les éoliennes

Le nombre d'éoliennes est en augmentation à travers le monde [22]. En effet, ces dernières dizaines d'années ont donné lieu à une prise de conscience sur le rejet de gaz à effet de serre. Pour pallier cela, de nombreux pays tels que la Belgique, le Grand-duché de Luxembourg, l'Allemagne ou encore la France ont fait le choix de se tourner de plus en plus vers l'utilisation d'éoliennes. Cependant, même si leur avantage environnemental n'est plus à démontrer [12] [23] [24], elles ne sont pas sans conséquence pour la biodiversité, notamment pour l'avifaune [22] et les chiroptères [25] [8]. Elles posent différents problèmes, tels que la dégradation de l'habitat, un risque de collision, un déplacement dû aux perturbations et un effet de barrière [26] [27]. L'effet des éoliennes va tout de même dépendre de la topographie, de l'habitat autour ainsi que des espèces présentes [28]. Certains oiseaux vont être dérangés par les éoliennes et les fuir et d'autres ne vont pas être sensibles à cette perturbation et donc présenter un risque de collision important [25]. Le milan royal fait plutôt partie du deuxième groupe.

Cependant les éoliennes ne représentent pas la plus grande cause anthropique de mortalité pour les oiseaux [29]. Une estimation a été réalisée lors d'une étude aux Etats-Unis et les éoliennes représenteraient moins de 0,01% de la mortalité annuelle des oiseaux (toutes espèces confondues) contre près de 60% pour les habitations (surtout à

cause des fenêtres [30]), 13.7% pour le réseau électrique et 10.6% pour les chats [29]. De plus, les éoliennes sont considérées comme moins dangereuses que les autres productions d'énergie [31]. Toutefois, bien que ce taux reste faible, il ne faut pas négliger qu'une espèce longévive, surtout quand elle est rare, est très sensible à une augmentation de mortalité, même si cette augmentation est faible [26] [32] [33]. Ensuite, l'effet d'accumulation des différentes installations joue également un rôle crucial [26]. Il a été démontré que la croissance démographique du milan diminue avec une augmentation du nombre d'éoliennes [34].

En Allemagne, le milan royal est le deuxième oiseau le plus à risque face aux éoliennes [35]. Selon une étude menée par Mammen et Dürr en 2006 [36], cité par Eichhorn et al. [37], ce serait même l'oiseau le plus souvent touché par les collisions avec les rotors des éoliennes. Une autre étude menée en Allemagne par Tobias Dürr (cité par Michel [28]) confirme cette hypothèse, avec 46 cadavres de milan royal, majoritairement adultes, découverts en 4807 visites sur 260 éoliennes, contre 29 pour la buse variable et 6 pour le milan noir.

En effet, le milan royal ne semble pas perturbé par la présence des éoliennes et ne les évite pas volontairement, ce qui rend le risque de collision non négligeable [32]. Plusieurs facteurs peuvent expliquer ce risque élevé. Dans un premier temps, les rapaces en activité de chasse sont souvent focalisés sur leurs proies et moins sur les obstacles potentiels, très peu présent à l'état naturel [38]. Ensuite, les éoliennes se retrouvent principalement dans des zones agricoles ouvertes, l'habitat primaire des milans royaux [37]. Ces derniers sont en plus attirés vers le pied des mâts car ils y trouvent des densités de proies intéressantes [27] [36] [37] ainsi que des chemins [36] et un espace ouvert [35]. Finalement, un autre facteur expliquant sa position élevée dans le classement des oiseaux à risque est sa hauteur de vol. En effet, les collisions ont lieu quand le milan vole à hauteur des pales des éoliennes, soit entre 50m et 150m de haut. Selon une étude menée en Allemagne, les milans voleraient environ 18,3% du temps à cette hauteur pendant la période de reproduction, alors que ce pourcentage augmenterait à près de 30% pendant la parade nuptiale [3]. Une autre étude indique que ces oiseaux se déplacent 30% de leur temps à cette hauteur, toute saison confondue [35].

Le risque de collision varie cependant également avec de nombreux autres facteurs. Il faut en effet aussi tenir compte de la météo [38], avec une augmentation des risques en cas de brouillard ou pluie, ainsi que lors de grand vent [26]. De plus, la saison a

également son importance [8]. En effet, ce risque diminuerait entre août et mars, suite à la faible présence du milan royal sur le territoire belge pendant l'hiver, la majorité des milans migrant vers le sud [4]. Il serait cependant maximal en mai et assez fort en juin puisque c'est à cette période que les milans nourrissent leurs jeunes et sont donc très actifs pour la recherche de nourriture [4]. Finalement, la distance entre les éoliennes et les nids de ces rapaces a aussi une importance. Plus elle augmente, plus le risque de collision diminue [34]. En effet, les milans sont réputés pour voler 50% du temps dans un rayon de 1km autour de leur nid [35] et 90% dans un rayon de 2 km [14] [35].

1.3. Enjeux

Pour les raisons expliquées ci-dessus, la coexistence entre le milan royal, et les oiseaux en général, et les éoliennes est compliquée. D'un côté, les éoliennes se présentent comme une solution face au changement climatique, une problématique de plus en plus médiatisée. De l'autre côté, la protection d'une espèce en voie de disparition fait aussi partie des priorités.

En Belgique, la vitesse du vent diminue de la côte vers les Ardennes à cause des frottements au niveau du sol, comme le montre la figure 3 [39].



Figure 3 : Carte de la densité de puissance du vent en W/m2

Même si la vitesse du vent est plus intéressante pour l'implantation de parcs éoliens en Flandre, la Wallonie, principalement à l'Est, représente également un certain intérêt, comme le montre la figure 4 [39]. Cette carte montre, en rouge, les zones où le potentiel de vent est le plus important en Wallonie. Ces mêmes zones indiquent donc les endroits

où implanter des éoliennes semble le plus intéressant en termes de productivité. Cependant, quand on compare cela à l'aire de répartition du milan royal en Wallonie (figure 5 [16]), où les points verts représentent les zones de présence de ce rapace, nous pouvons voir que ces aires se superposent. Il est donc important de trouver une solution afin de rendre la coexistence entre le milan royal et les éoliennes possible.

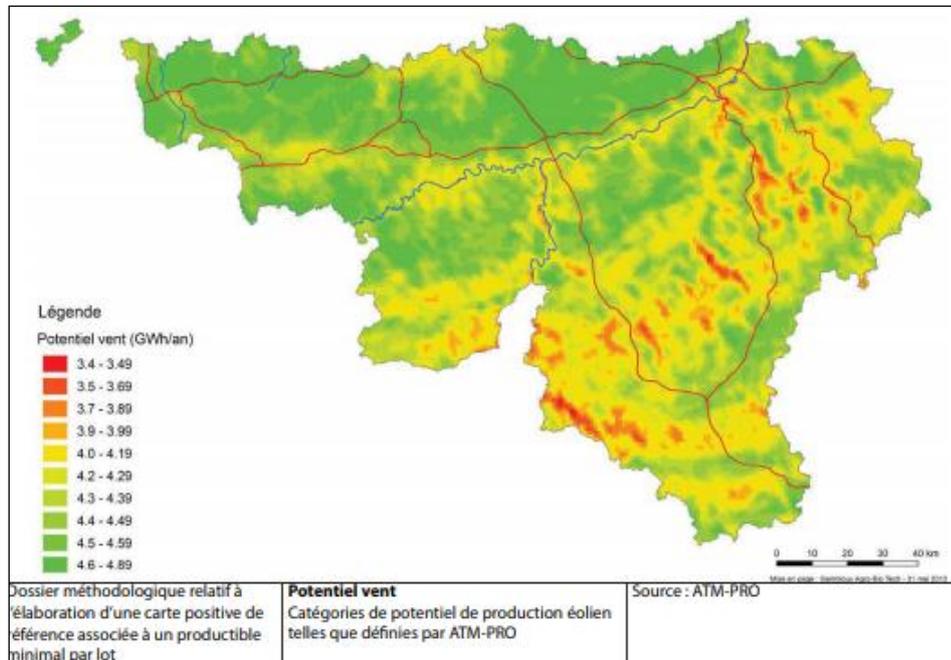


Figure 4 : Représentation du potentiel de vent sur le territoire wallon

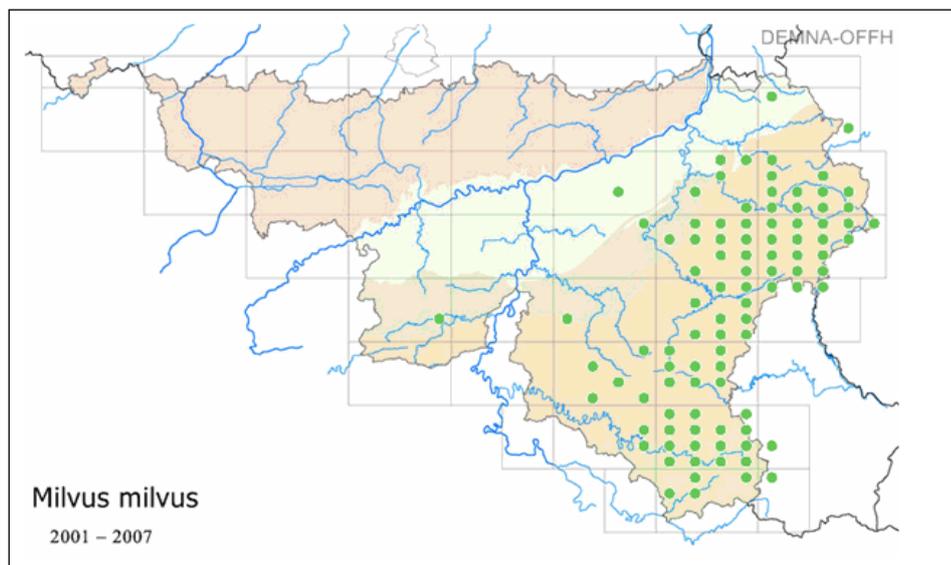


Figure 5 : Répartition du milan royal en Wallonie

A l'heure actuelle, en Wallonie, le DNF préconise certaines mesures afin de limiter l'impact des éoliennes sur ce rapace. Il est par exemple interdit d'implanter un site éolien à moins d'un kilomètre d'un nid de milan royal. De plus, les zones autour des éoliennes

doivent être rendues non attractives pour cet oiseau afin de limiter sa présence. Pour ce faire, il est recommandé de mettre en place des zones empierrées ou enherbées avec une fauche tardive en septembre ou alors de faire du pâturage intensif [35]. Dans nos pays voisins aussi, la législation impose plusieurs contraintes pour leur coexistence. Par exemple, au Grand-Duché de Luxembourg, ils conseillent une distance de deux km par rapport au nid ainsi qu'un arrêt complet des éoliennes pendant les périodes de fauche. En Allemagne, selon le ministère de l'environnement allemand, lorsqu'un nid (ou un site de repos) d'un milan royal est trouvé à moins de 1500 mètres dans les basses terres ou à 1000 m dans les hautes terres, une enquête est nécessaire sur les impacts potentiels de l'éolienne. Cette distance peut être étendue à 4000 mètres en cas d'utilisation intensive du site pour l'alimentation ou les couloirs de vol fréquemment utilisés.

Malgré cela, le DNF, et d'autres administrations équivalentes émettent des conditions dans leur avis sur certains permis éoliens voire en refusent à cause de la présence du milan royal. Certains parcs ont même été arrêtés après la collision avec cet oiseau.

En Wallonie par exemple, en 2012, le DNF a demandé la mise en place d'un suivi de l'impact post-implantation du parc à Messancy [40] sur l'avifaune nicheuse, les espèces migratrices et les chiroptères pendant trois années (ou cinq en cas d'impact) selon un protocole établi par le DEMNA. A Gouvy [41], le CWEDD a donné un avis défavorable pour le parc de 7 éoliennes car il craignait un impact important sur les populations nicheuses de milans royaux, sur la cigogne noire (*Ciconia nigra*) et la migration des grues cendrées (*Grus grus*). Un autre parc à Houffalize-Gouvy a aussi vu son permis refusé par le ministre de l'Environnement Carlo Di Antonio suite à un avis défavorable du DNF en matière d'avifaune [42].

Au Grand-Duché de Luxembourg, le parc éolien d'OekoStroum à Weiler, dans la commune de Wintrange, a été arrêté temporairement en 2019 par le ministre de l'Environnement luxembourgeois suite à une collision entre un milan royal et une éolienne [43]. Un incident similaire avait déjà eu lieu en 2018. Les installations doivent depuis être arrêtées pendant la première étape de la moisson.

En France aussi, le milan royal pose certains problèmes aux parcs éoliens. A Jura Vers-en-Montagne, un projet d'éoliennes a été abandonné par manque de vent mais aussi à cause de la présence du milan royal [44]. A Zondrange en Moselle, la préfecture de Moselle a imposé l'arrêt des éoliennes du 1^{er} mars au 30 septembre de 10h à 17h suite à la découverte d'un cadavre de milan royal au pied d'un mât en 2018 [45].

1.4. Solutions existantes

Depuis une dizaine d'années, plusieurs entreprises se sont penchées sur la question, et plusieurs outils ont été développés afin de concilier faune avicole et éoliennes. Parmi ces différentes technologies, nous pouvons citer ProBird par Sens of Life, SafeWind par Biodiv-Wind et DTBird par Liquen Consultoria Ambienta. Ces trois systèmes ont le même principe, notamment l'utilisation des caméras et la détection des oiseaux sur base de leur trajectoire. Si celle-ci est considérée comme dangereuse, des sons sont alors émis par des hauts parleurs afin de dissuader les oiseaux de s'approcher, ou du moins de les interpeller pour qu'ils soient attentifs. Les sons varient parfois avec l'espèce d'oiseau concernée et ne sont pas toujours identiques afin d'éviter le phénomène d'accoutumance. Si cela ne suffit pas, le système envoie un signal afin de ralentir, voire d'arrêter les éoliennes et d'ainsi éviter une potentielle collision. Cependant, leur efficacité n'est pas toujours démontrée.

Safe-Wind est une technologie développée par Biodiv-Wind. A l'heure actuelle, 172 éoliennes sont équipées de ce système en France, Allemagne, Finlande, Autriche et Islande. Elle permet la détection diurne et nocturne des oiseaux ainsi que celle des chiroptères [46].

Concernant DTBird, 300 unités sont installées dans 50 parcs éoliens différents de 14 pays, mais pas en Belgique [47]. Une étude a été réalisée en 2012 au parc éolien de Smøla en Norvège. Cette étude a précisé qu'il y avait 40% de faux positifs, c'est-à-dire le processus qui se déclenchait alors qu'aucun oiseau n'était présent. Les oiseaux n'étaient pas non plus toujours détectés et une distinction de l'espèce était difficilement envisageable, avec souvent juste une idée de la taille, voire du groupe (aigle, faucon, corvidés...) [48].

Finalement, ProBird [49] a été développé en 2014 et fonctionne de jour comme de nuit. Le système a été installé en 2016 dans 15 parcs éoliens en France, en Belgique et en Allemagne. Les plus grands oiseaux seraient détectés à plus d'un kilomètre, 800m pour les rapaces comme le milan royal, 400m pour les oiseaux de taille moyenne et 150m pour les plus petits. Cependant, les avis diffèrent [50]. Pour le projet éolien des Grands Buissons dans la commune de Jurnet en Nouvelle Aquitaine en France, ils prévoient d'utiliser cette technologie. Toutefois, la MRAe est dubitative et précise dans son rapport que l'efficacité n'a pas encore été démontrée pour réellement réduire le risque

de collision [51]. A Sacquenay, toujours en France, par contre le dispositif ProBird est indispensable et doit être actif, sans quoi les éoliennes ne sont pas autorisées à tourner [52].

Cependant, ces différents dispositifs n'ont pas encore été validés par l'administration wallonne et luxembourgeoise. En effet, pour qu'un permis éolien soit accepté en Wallonie, soit en première instance par les fonctionnaires, soit par la Région wallonne en deuxième instance, il doit être validé par le ministre de l'Aménagement du territoire, actuellement Willy Borsus et par la ministre de l'Environnement, Céline Tellier [53]. Dans le cas de cette problématique, c'est le ministère de l'environnement qui émet des réticences suite aux avis défavorables du DNF.

1.5. Noveria Lux

C'est dans ce contexte que Noveria Lux, une agence de consultance en énergie renouvelable basée au Grand-Duché de Luxembourg a décidé de se lancer dans la création de son propre outil de détection. En effet, ils étaient confrontés quotidiennement à la difficulté de la coexistence entre le milan royal et l'énergie éolienne. Le principe de l'outil serait sensiblement le même que les trois autres systèmes décrits ci-dessus. Cela consisterait en un système de 6 caméras placé sur le mât des éoliennes dans plusieurs directions qui détecterait le milan royal grâce à sa trajectoire de vol et enverrait un signal aux éoliennes afin de les arrêter si l'oiseau est détecté. Plusieurs points diffèrent de ce qui existe déjà sur le marché :

- Autre type de caméra et de logiciel
- Reconnaissance mono-spécifique du milan royal : c'est la présence de ce rapace qui pose majoritairement problème à Noveria Lux dans l'implantation des sites éoliens.
- Pas de système d'alarme sonore : Clélia Perrin a démontré en 2019 dans son mémoire de fin d'étude que l'efficacité de ces alarmes dépendaient de l'espèce d'oiseau concernée ainsi que de la variation des sons émis pour éviter le phénomène d'accoutumance [25]. En ce qui concernaient les milans royaux, elle en est venue à la conclusion qu'ils réagissaient peu, voire pas du tout à l'émission de sons, que ce soit aux cris de leur espèce ou aux bruits de notre vie quotidienne (alarme incendie, klaxon, sirène de véhicule...).

Pour que cet outil automatisé de détection puisse être accepté par le DNF, il faudrait que le milan royal soit détecté dans minimum 95% des cas et que les éoliennes puissent s'arrêter à temps pour éviter tout risque de collision.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODE

2.1. Analyse des données GPS

2.1.1. Présentation des données

Zone d'étude

La zone d'étude a été préalablement fixée à la partie Est de la Wallonie où le milan royal est présent (figure 5) ainsi qu'au Grand-Duché de Luxembourg. Elle a ensuite été affinée grâce au choix du milan royal étudié, présenté au point ci-après. Elle s'étend donc dans le canton de Clervaux au Grand-Duché de Luxembourg ainsi que partiellement dans la province du Luxembourg en Wallonie. La figure 6 représente la carte avec les localisations des points GPS du milan étudié en jaune et la zone d'étude en rouge. Les points bleus correspondent à 7 éoliennes.

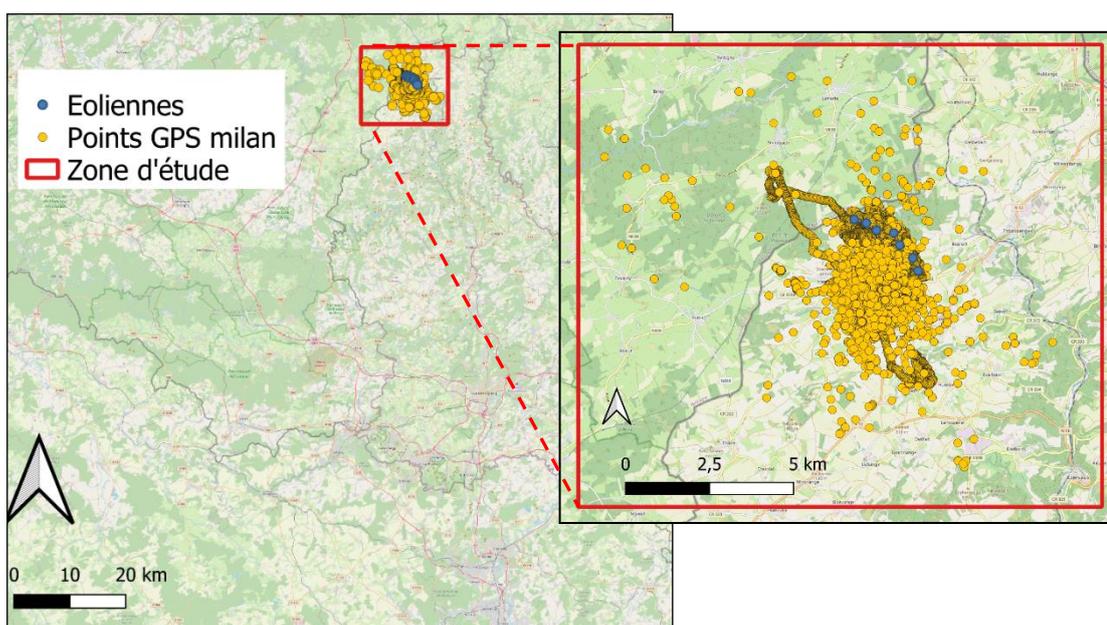


Figure 6 : Zone d'étude

L'altitude du canton de Clervaux varie entre 250 et 580m au-dessus du niveau de la mer. C'est un paysage de plateaux entrecoupés de vallées avec une matrice majoritairement agricole, composées de champs et de prairies avec quelques bosquets éparpillés ainsi que quelques villages. La zone d'étude comprend le parc OekoStroum de 7 éoliennes visibles à la figure 6. Le climat est considéré comme semi-continental, avec de faibles écarts saisonniers et des hivers doux et pluvieux. Comme le montre le diagramme

ombrothermique de Clervaux, présenté à la figure 7 [54], la température moyenne mensuelle oscille entre 0 et 17°C, pour une moyenne générale de 8.5°C. Les précipitations quant à elles s'élèvent à 944mm sur l'année, réparties de façon régulière au cours de l'année. Le sous-sol de la région est constitué de massif de schistes et de quartzites du dévonien inférieur.

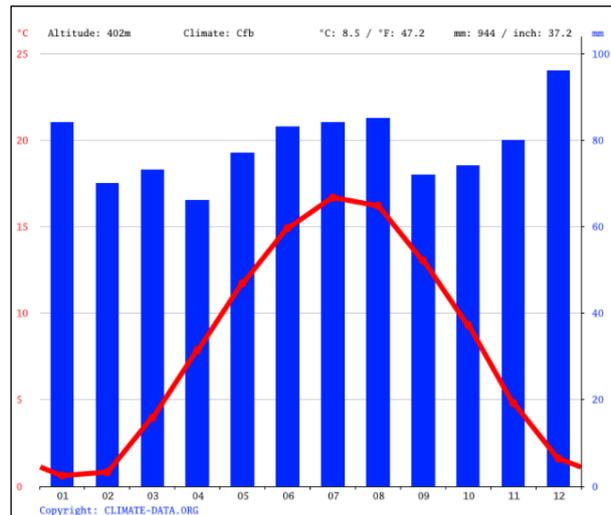


Figure 7: Diagramme ombrothermique de Clervaux

Données milans

Les données GPS ont été fournies par la centrale ornithologique de Natur&ëmwelt, une asbl œuvrant pour la sauvegarde de la biodiversité au Grand-Duché de Luxembourg. Plusieurs milans royaux et milans noirs ont été équipés de collier GPS de type OrniTrack [55] entre 2018 et 2020 dans le but d'en apprendre un peu plus sur leurs habitudes.

Les données GPS de plusieurs oiseaux ont été proposées. Différents critères ont été utilisés pour choisir l'individu le plus intéressant pour étudier le problème donné. Le premier critère de choix a été le sexe du milan royal. Un mâle a été préféré car les mâles sont plus actifs que les femelles pendant la saison de reproduction [5] [14] et les femelles présentent un territoire plus petit [3]. Les mâles sont donc plus à risque face aux éoliennes que les femelles. Ensuite, un milan pour lequel des données sur une saison entière de reproduction étaient disponibles a été choisi. Cette saison s'étend du 1^{er} mars au 31 août. En dehors de ces dates, les GPS ne sont plus actifs. Le dernier critère considéré a été la proximité du rapace avec une station météorologique ainsi que l'accès, la fréquence de récolte de données et les variables météorologiques disponibles.

Notre choix s'est donc porté sur un milan mâle (ID 180885) de la région de Weiler-Hachiville pour la saison de reproduction de 2020. Le collier GPS de ce milan a été posé le 19 juin 2018. La fréquence des données obtenues varie avec la batterie du GPS, celle-ci étant chargée grâce à l'énergie solaire. Elle a une précision moyenne de 5 minutes mais peut descendre jusqu'à 3 secondes lors du passage de l'individu dans une geofence,

une zone délimitée lors de la configuration du GPS. Les données reprises dans le tableau 1 peuvent être téléchargées en format csv.

Tableau 1 : Données issues du GPS OrniTrack

Variable	Détail
<i>device_id</i>	Identifiant unique du GPS Ornitrack
<i>UTC_datetime</i>	Date et heure UTC
<i>UTC_date</i>	Date
<i>UTC_time</i>	Heure
<i>satcount</i>	Nombre de satellites pendant la mesure
<i>U_bat_mV</i>	Charge de la batterie (mV)
<i>bat_soc_pct</i>	Charge de la batterie en pourcentage
<i>solar_I_mA</i>	Courant de charge de la batterie (mA)
<i>hdop</i>	Dilution horizontale de la précision du GPS
<i>Latitude</i>	Latitude en degrés décimaux
<i>Longitude</i>	Longitude en degrés décimaux
<i>Altitude_m</i>	Altitude par rapport au niveau de la mer (m)
<i>speed_km_h</i>	Vitesse par rapport au sol (km/h)
<i>direction_deg</i>	Direction du mouvement (degré)
<i>temperature_C</i>	Température interne (°C)
<i>light</i>	Intensité lumineuse (0-2047, sans unité)
<i>mag_x, mag_y, mag_z</i>	Mesure selon l'axe des x, y et z d'un magnétomètre
<i>acc_x, acc_y, acc_z</i>	Mesure selon l'axe des x, y et z d'un accéléromètre

Le fichier csv téléchargé contenait 63 793 points GPS, entre le 1^{er} mars et le 31 août 2020. 86 points ont été supprimés parce que, lors de certaines mesures, aucun satellite n'a pu être capté par le GPS et il a donc indiqué une latitude et longitude de 0. De plus, certains points étaient incohérents par rapport aux autres points, que ce soit au niveau de leur position ou de l'altitude.

Données météorologiques

Les données météorologiques utilisées sont issues d'un réseau d'une cinquantaine de stations et sont disponibles gratuitement sur le site de l'AgriMeteo [56]. La station choisie est celle de Reuler. Tous les points GPS du milan se trouvent à moins de 20 kilomètres de cette station. Ce sont des données horaires et plusieurs variables météorologiques ont pu être téléchargées. Parmi les plus importantes pour l'étude menée, nous pourrions citer la température moyenne à deux mètres du sol (°C), la vitesse du vent à 10 m du sol (m/s), la pression atmosphérique (hPa), l'humidité relative (%), le rayonnement global (Wh/m²) ainsi que les précipitations (mm). Toutes ces données sont des moyennes par heure, sauf pour les précipitations qui sont cumulées.

2.1.2. Analyse des données

Utilisation du sol

La couche « Utilisation du sol 2018 », disponible en libre téléchargement sur le géoportail du Grand-Duché de Luxembourg a été utilisée pour définir les différents types d'utilisation des terres [57]. Ceux-ci ont été regroupés dans les catégories suivantes :

- Terres arables ;
- Prairies ;
- Autres cultures (verger, vignoble...) ;
- Forêts de résineux ;
- Forêts feuillues ;
- Forêts mixtes ;
- Jeunes forêts et coupes ;
- Zones naturelles (milieux rocheux, marécages, prairies, zones broussailleuses) ;
- Bâtiments, Industries ;
- Eaux stagnantes.

Avec le logiciel QGIS, les points GPS du milan ont pu être superposés à la couche afin de définir en chaque point le type d'utilisation du sol que l'oiseau survolait. Pour chaque catégorie, nous avons ensuite calculé la superficie comme étant la somme des surfaces de chaque parcelle individuelle de la zone d'étude définie précédemment ainsi que le nombre de points GPS pour la saison de reproduction et par mois. Une distinction entre l'avant et l'après fauche a aussi été réalisée. Pour ce faire, la date du 15 juin a été considérée comme la limite entre ces deux périodes, la fauche étant interdite avant cette date pour les prairies permanentes (les zones classifiées comme prairies depuis au moins 6 ans) au Grand-Duché de Luxembourg pour avoir accès à une aide financière [58]. Une comparaison entre les prairies et les prairies permanentes a été réalisée sur QGIS et toutes les prairies de la région avaient le statut de prairies permanentes en 2020.

Domaine vital

Le domaine vital du milan balisé de Weiler a été estimé via deux méthodes différentes sur R (packages `adehabitatHR` et `sp`) dans un premier temps et puis à l'aide de QGIS pour la visualisation. Pour ce faire, 63 707 données ont été utilisées, réparties sur 184 jours. La méthode du MCP a tout d'abord été utilisée. Cette méthode estime la surface

de l'aire délimitée par la position des points les plus distants du nuage de points [59]. Un MCP de 100%, 95%, 75% et 50% ont été calculés, 95% étant le domaine vital composé de 95% des localisations GPS.

La méthode de Kernel a elle aussi été appliquée. Elle représente la courbe d'isoprobabilité de présence du milan et est donc moins sensible aux valeurs extrêmes. Le Kernel 100%, 95%, 75% et 50% ont été calculés [59].

Le calcul du domaine vital pour l'avant et l'après fauche a été réalisé avec la méthode de Kernel 95%.

Activité de nuit

Bien que le GPS ne fonctionnait presque pas pendant la nuit, quelques points ont tout de même été enregistrés. Ces données ont été examinées afin de déterminer à partir de quand le milan commençait à se déplacer. Les données GPS ont donc été mises en relation avec les heures de lever et coucher du soleil ainsi que les heures de l'aube et du crépuscule au Grand-Duché de Luxembourg [60]. Les données situées après le coucher du soleil et avant le lever ont été isolées. Pour chacune d'entre elles, la vitesse de vol a pu être déterminée directement grâce au GPS. La distance entre deux données successives a été obtenue via la formule de calcul de distance entre deux points :

$$\sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2}$$

Seules les distances supérieures à 100m ont été retenues pour l'analyse, afin que le déplacement ne soit pas dû à une imprécision du GPS et que le déplacement puisse potentiellement représenter un risque de collision. En effet, les déplacements entre deux arbres d'un même bosquet ne sont pas considérés ici comme des déplacements significatifs.

Hauteur de vol

La hauteur de vol est un paramètre important. En effet, les éoliennes ne représentent un risque de collision qu'à hauteur de pâles, soit entre 50 et 150m. L'altitude a directement été fournie par le GPS, qui mesurait la hauteur par rapport au niveau de la mer. Pour avoir la hauteur de vol, une séparation a été effectuée entre les points GPS du milan en Belgique et les points au Luxembourg. Les couches MNT (belges et luxembourgeoises)

ont été utilisées afin de connaître l'altitude en chaque point. Ensuite, la fonction « extract » du package « raster » sur R a permis d'extraire l'altitude de chaque coordonnée GPS. Après avoir fait une jointure avec les données GPS, l'altitude a pu être extraite de la donnée obtenue par le GPS afin de ne garder que la hauteur de vol. 40 183 Points GPS ont cependant été laissés de côté pour cette analyse car le milan était au repos ou les hauteurs de vol obtenues étaient irréalistes. Les points du suivi dont la vitesse mesurée par le GPS était inférieure à 10 km/h ont été considérés comme au repos, comme il est admis dans la littérature [3].

Vitesse de vol

La vitesse de vol est également un paramètre important dans le cadre de ce projet. En effet, nous avons besoin d'avoir une idée de la distribution de la vitesse de vol afin d'estimer la distance minimale à laquelle le milan doit être détecté pour avoir le temps d'arrêter les éoliennes en cas de besoin. Une analyse a été réalisée grâce au logiciel R. Les données GPS considérées comme de nuit grâce à l'analyse précédente ont été enlevées de la base de données. Les données où le milan était au repos ont été mises de côté. La distribution des vitesses a ainsi été représentée.

Analyse du temps de vol et de la distance parcourue

Pour pouvoir étudier le lien entre le comportement de vol et les variables météorologiques, plusieurs problèmes se sont posés. En effet, les données météo sont disponibles par heure alors que l'intervalle de temps entre les données du milan est variable et dépend du niveau de batterie. Or, ce dernier est lui-même dépendant de l'énergie solaire et donc des conditions météorologiques. De plus, l'intervalle de temps entre ces données se réduit aussi lors de la traversée d'une géofence et donc dans des conditions de vol favorables.

Pour limiter l'influence de la météo sur le nombre de données GPS disponibles, nous avons travaillé avec le pourcentage de temps de vol, ainsi qu'avec la distance parcourue par heure. Pour avoir une précision suffisante afin d'estimer au mieux ces deux paramètres, nous avons estimé qu'il fallait au minimum 10 données sur l'heure. Avant cela, les données météorologiques des heures qui allaient être supprimées ont été vérifiées afin de s'assurer que cette méthode n'allait pas supprimer toutes les données

extrêmes, nécessaires pour la suite de l'analyse. Afin d'essayer de garder un maximum de données pour les futures analyses, une agrégation des données par temps de 2 heures au lieu d'une a été testée. Cependant, pour garder une précision suffisante (15 à 20 données par deux heures), plus de données ont été éliminées. L'agrégation des données par heure a été préférée, en éliminant donc 1 007 données. Au final, 2 605 heures de données ont été exploitées, entre le 1^{er} mars et le 31 août, sans les données de nuit.

Temps de vol

Comme expliqué ci-dessus, nous avons donc considéré tous les points avec une vitesse inférieure à 10 km/h comme étant au repos. Ensuite, l'intervalle de temps entre deux points a été calculé. Si le milan était en vol au point A, nous avons fait l'hypothèse qu'il était en vol pendant l'intervalle du point A au point B. Par contre, si le milan était au repos au point B, il a été considéré comme au repos entre ce point et le point C. Cette hypothèse ne permet pas une estimation réelle du temps de vol mais permet de comparer les différentes heures entre elles. Puis, les données ont été agrégées par heure et un pourcentage de temps passé en vol pendant cette heure-là a été calculé. Une comparaison des temps de vol en fonction de la période (avant/après fauche) a aussi été réalisée.

Distance parcourue

La distance parcourue par heure a été déterminée en calculant la distance séparant deux points successifs grâce à la même formule que celle utilisée pour la détermination de l'activité de nuit. Cette distance a aussi été comparée avec la matrice de distance créée directement avec QGIS. Nous avons fait l'hypothèse que le milan volait en ligne droite entre les différents points, ce qui sous-estime donc la distance réellement parcourue. Cette hypothèse ne permet pas d'avoir une estimation réelle de la distance parcourue mais permettra de comparer les différentes distances entre elles. Ensuite, les distances obtenues ont été sommées par heure. Une comparaison entre les distances parcourues avant et après fauche a également été réalisée.

Lien entre chaque paramètre météo et le vol du milan

Afin d'avoir une première idée de la distribution des temps de vol et distances parcourues par heure en fonction de la météo, chaque paramètre météorologique a d'abord été étudié indépendamment des autres. Les paramètres étudiés sont :

- Les précipitations (mm) ;
- Le rayonnement global (Wh/m²) ;
- La température (°C) ;
- La vitesse du vent (m/s) ;
- L'humidité relative (%) ;
- La pression atmosphérique (hPa).

Cette première étape permettra de voir si un seuil pour une des variables météorologiques peut être mis en évidence. Ce seuil représente une valeur au-delà ou en deçà de laquelle le milan a moins de 5% de chance de voler.

Différentes régressions simples ont ensuite été réalisées avec la variable à expliquer étant soit le pourcentage de temps de vol sur une heure, soit la distance parcourue (km) sur une heure. Les variables explicatives étaient donc les variables météorologiques. Les deux variables à expliquer ont été conservées toutes les deux pour trois raisons principales. Premièrement, bien que fortement corrélées, ces deux variables ne sont pas identiques suite aux différentes hypothèses émises lors de leur création. Alors que la distance parcourue sera plutôt sous-estimée, le temps de vol ne le sera pas forcément. Deuxièmement, le milan ne vole pas toujours à la même vitesse et pourrait voler plus vite, donc plus loin sans augmenter le temps de vol. Finalement, l'analyse des deux variables séparément va permettre de voir si les mêmes conclusions peuvent être tirées.

Pour chaque couple variable explicative/variable à expliquer, trois régressions ont été réalisées : une régression linéaire sans changement de variable, une régression polynomiale et une régression avec transformation logarithmique. La meilleure régression a été sélectionnée pour chacun de ces couples sur base de différents critères :

- La maximisation du coefficient de détermination (R^2) qui représente le pourcentage de variance de la variable dépendante expliquée par le modèle ;
- La maximisation du score F, qui représente la part de variance de la variable dépendante expliquée par les variables indépendantes ;
- La significativité de chaque paramètre de l'équation.

Activité de vol en fonction d'une combinaison de paramètres météorologiques

Bien que les différentes régressions donnent une idée générale du lien qui peut exister entre ces différents paramètres, il est important de ne pas oublier que les paramètres

météorologiques ne sont pas indépendants les uns des autres et qu'il faut les considérer ensemble. Pour ce faire, plusieurs régressions multiples ont été essayées afin de déterminer le meilleur modèle possible. Comme précédemment, la variable à expliquer est soit le pourcentage de temps de vol sur une heure, soit la distance parcourue (m) sur une heure.

Dans un premier temps, un test de corrélation entre les différentes variables a été réalisé. En effet, selon Dormann et al. [61], si la corrélation entre les variables n'excède pas 0.7 en valeur absolue, l'interaction entre ces variables n'aurait pas d'impact significatif sur le modèle. Cette corrélation a été représentée sur R grâce au package Ggally.

Différents modèles ont donc été testés. Il existe communément trois méthodes pour le choix des variables explicatives à intégrer dans le modèle : la méthode backward, forward et stepwise. La sélection descendante, ou backward, rassemble toutes les variables dans le modèle dans un premier temps et puis élimine petit à petit les variables moins associées à la variable à expliquer jusqu'à ce que toutes les variables restantes du modèle aient une contribution significative [62]. A l'inverse, la sélection ascendante ou forward ajoute les variables explicatives une à une en débutant par celles qui augmentent le plus la valeur du F (expliqué plus haut). Cette dernière s'arrête donc lorsque toutes les variables significatives ont été ajoutées au modèle [62]. La sélection stepwise permet de faire un mélange des deux autres [62]. Dans un premier temps, une régression linéaire multiple avec la méthode stepwise a été réalisée sans transformation des variables. Ensuite, un deuxième modèle utilisant aussi la méthode stepwise a été créé en transformant les variables selon les critères établis au point précédent.

La même procédure a été réalisée pour les périodes avant et après fauche, afin de voir s'il existait un changement du comportement de vol. Au préalable, chaque paramètre météorologique a été étudié indépendamment afin de déterminer la meilleure transformation possible (linéaire, polynomiale ou logarithmique).

2.2. Trajectométrie

Cette partie permettra de répondre à la deuxième question de recherche, à savoir s'il est possible de différencier plusieurs espèces d'oiseaux grâce à leurs trajectoires de vol.

2.2.1. TRACK

Pour pouvoir faire une étude des trajectoires, Noveria Lux s'est associé à APREX Solutions, une société française spécialisée dans le développement d'algorithmes et de logiciels pour des applications de développement, d'optimisation, de contrôle et de sécurisation de procédés dans des installations industrielles. Ils ont développé un logiciel nommé TRACK (figure 8) qui permet de suivre la trajectoire d'une entité se déplaçant au cours du temps dans une vidéo. Différents filtres sur la vidéo doivent d'abord être appliqués afin d'isoler l'entité recherchée. Ces filtres sont appliqués en temps réel, permettant d'ajuster au mieux les différents paramètres, rendant l'outil à la portée de tous. Ensuite, en ajustant des paramètres comme le nombre de pixels (minimum et maximum) de l'entité à isoler, le logiciel est capable de détecter les mouvements. Puis, il peut tracer sa trajectoire en faisant le lien entre les images au temps t et $t+1$. Pour ce faire, différents paramètres peuvent encore être ajustés tels que la distance maximale entre deux détections ou le temps pendant lequel l'objet peut être dissimulé (et dès lors ne pas être détecté) sans pour autant perdre la trajectoire. Les algorithmes sous-jacents permettent de prédire la trajectoire quand la détection est perdue. La figure 9 montre la détection du milan royal qui est entouré en bleu. Les points roses qui le précèdent sont les points qui représentent la trajectoire que le milan vient d'effectuer. Le cadre vert indique simplement la partie de la vidéo qui a été analysée.

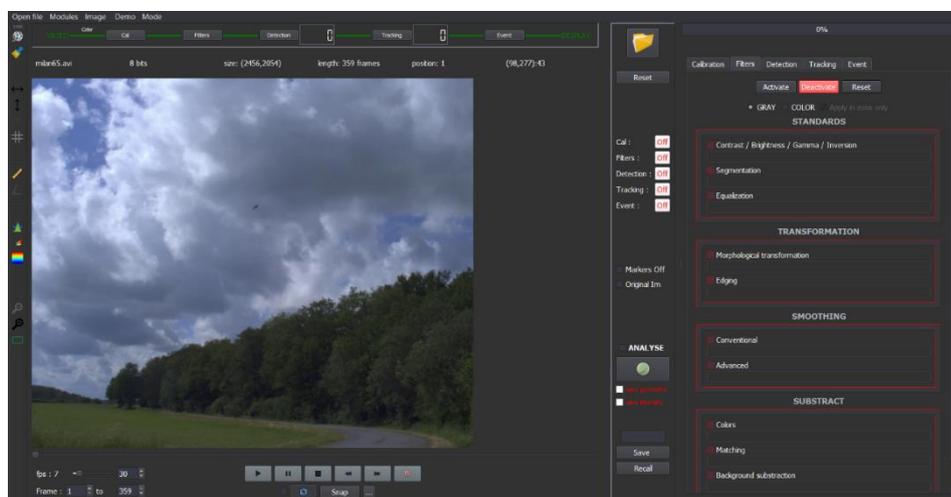


Figure 8 : Capture d'écran du logiciel TRACK



Figure 9 : Détection et tracking d'un milan royal via le logiciel TRACK

Les détections et trajectoires mises en évidence lors de l'analyse peuvent alors être isolées (figure 10). Sur cette figure, la trajectoire de l'oiseau est représentée en bleu. Les autres points de couleurs constituent des éléments que le logiciel a détectés comme étant en mouvement. Ces points ne sont pas de la même couleur parce qu'étant trop éloignés entre deux images successives, le logiciel ne les a pas assimilés à une seule et même trajectoire. Cela permettra donc de filtrer les petits oiseaux et insectes afin qu'ils ne déclenchent pas l'arrêt des éoliennes. En modifiant le nombre minimal de points composant la trajectoire, le logiciel peut isoler celle de l'oiseau (figure 11).

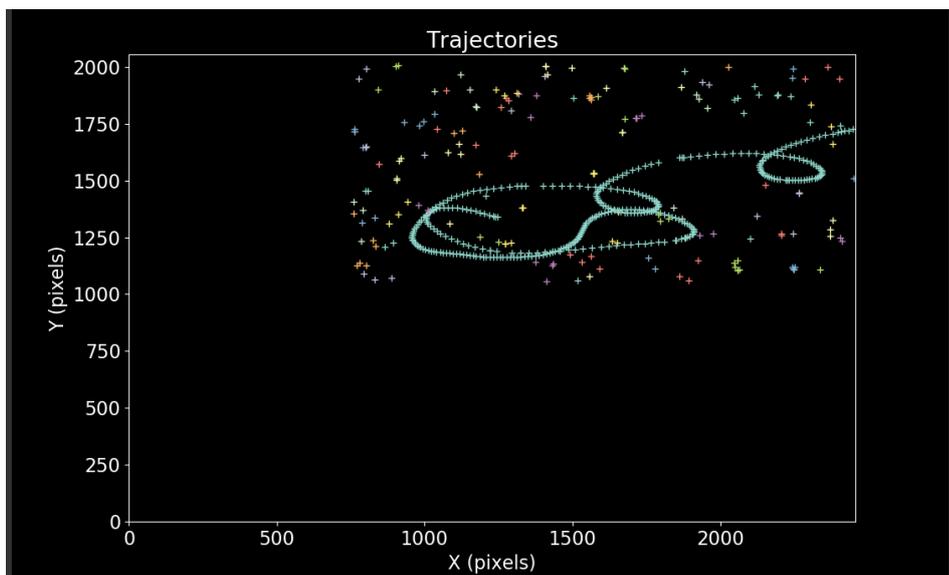


Figure 10 : Trajectoire d'un milan royal et détection d'entités individuelles



Figure 11 : Trajectoire isolé d'un milan royal

2.2.2. Terrain

Pour déterminer si les trajectoires de différentes espèces d'oiseaux peuvent être dissociées, il a tout d'abord fallu filmer ces oiseaux. Une caméra IDS UI-3280CP-C-HQ Rev2, d'une résolution de 5 mégapixels avec un objectif Kowa 12,5 mm a été utilisée et reliée au logiciel TRACK.

Toutes les espèces d'oiseaux n'ont pas été filmées. En effet, le logiciel TRACK permet de ne pas tenir compte des plus petits oiseaux et insectes en définissant une taille de pixel minimum à détecter. Même s'ils s'approchent de l'objectif (et ont donc une taille apparente dans le seuil de détection), la distance entre le temps t et $t+1$ des détections sera telle que le logiciel ne les assimilera pas comme une trajectoire mais juste comme des points. Trois espèces d'oiseaux ont été ciblées pour cette étude : la buse variable (*Buteo buteo*), le milan noir (*Milvus migrans*) et le milan royal (*Milvus milvus*). En effet, ces rapaces voient leur distribution spatiale se recouvrir partiellement, ont un comportement de vol très proche et une taille globalement similaire.

Pour optimiser les chances d'observer ces espèces et de les filmer, un protocole de terrain a été mis en place. Le site observations.be [63] a été utilisé pour mettre en évidence des zones propices à leur observation dans les environs proche d'Arlon, pour des raisons logistiques. Lorsqu'une zone était jugée intéressante, une visite sur le terrain s'est imposée. Lors de cette visite, une brève analyse visuelle de l'utilisation du sol a été opérée afin de mettre en évidence des cultures/prairies propices ainsi que des arbres isolés ou regroupés en bosquet [13] qui pourraient être occupés par ces oiseaux. Ensuite, nous avons fait plusieurs visites afin de s'assurer de la présence de ces oiseaux et deux sites ont retenu notre attention à Hondelange et Mortinsart (figures 12 et 13).



Figure 12 : Point d'observation à Hondelange



Figure 13 : Point d'observation à Mortinsart

Cette phase s'est déroulée entre fin mai et mi-juillet, à raison d'une à deux visites de trois heures sur le terrain. En effet, le logiciel TRACK étant particulièrement consommateur en ressources, la batterie de l'ordinateur portable ne permettait pas d'y passer plus de temps. Cette période a aussi été choisie pour aller sur le terrain parce qu'elle correspond à l'envol des jeunes pour le milan royal et maximise donc les chances d'en observer [13].

Les prospections ont été réalisées à différentes heures de la journée. Les rapaces étaient souvent observés sur le temps de midi et vers 16h, sauf pendant les fortes chaleurs. Ces

jours-là, la prospection s'effectuait tôt le matin, vers 6-7 heures, et en fin d'après-midi. Le matériel utilisé ne résistant pas à la pluie, aucune observation n'a été effectuée par temps pluvieux. Ce travail constitue la première phase du projet et le matériel utilisé à terme aura une protection étanche pour permettre de filmer dans toutes les conditions. A noter aussi que les journées sèches ont été préférées pour maximiser les chances de détection du milan.

Plusieurs données comme le point d'observation, la météo globale, l'espèce et la distance estimée entre l'oiseau et l'observateur ont également été notées. A la fin de cette étape, le nombre de vidéos des différentes espèces s'élevait à 41 pour la buse variable, 79 pour le milan royal et 121 pour le milan noir.

2.2.3. *Analyses*

Intelligence artificielle

Une intelligence artificielle de type « classifieur » a ensuite été utilisée pour déterminer si des différences de trajectoires pouvaient être mises en évidence entre ces trois espèces. Le type « classifieur » a été choisi afin que l'IA utilise des arbres de décisions complexes pour reconnaître l'espèce, après un entraînement au préalable.

Dans un premier temps, il a fallu créer la base de données à lui soumettre. Pour ce faire, les vidéos ont été analysées dans le logiciel TRACK pour en sortir la trajectoire de chaque oiseau, en modifiant certains paramètres de détection et de tracking. Les paramètres les plus souvent modifiés étaient la taille minimale en pixels de l'oiseau sur la vidéo ainsi que la distance en pixels entre deux détections successives. 41 trajectoires de buses variables, 108 de milan noir et 76 de milan royal ont pu être tirées de l'analyse des vidéos³. Pour chaque trajectoire, un fichier csv a pu être extrait de TRACK contenant différentes données :

- L'identifiant : chaque trajectoire détectée correspond à un identifiant précis ;
- Le numéro de l'image dans la vidéo analysée ;
- La position en X ;
- La position en Y ;
- La vitesse en X ;

³ Certaines vidéos n'ont pas pu être exploitées (pas de détection de l'oiseau, vidéo surexposée ou trop sombre...) alors que sur d'autres vidéos, plusieurs trajectoires ont pu être exportées parce que plusieurs individus étaient présents.

- La vitesse en Y ;
- L'accélération en X ;
- L'accélération en Y.

De ces fichiers, cinq graphiques ont été sortis : la position de Y en fonction de X, la vitesse en X et en Y au cours du temps ainsi que l'accélération en X et en Y en fonction du temps. Ces graphiques, réalisés avec R ont été produits de telle sorte que la seule chose qui les distingue soit la trajectoire, la vitesse ou l'accélération. Pour finir, ces graphiques ont été envoyés à APREX Solutions afin d'entraîner et d'évaluer l'intelligence artificielle sur leur logiciel dédié.

Analyse des vitesses et accélérations

Finalement, une brève observation des distributions des vitesses et accélérations sur R a été réalisée afin de voir si une différence entre les trois espèces pouvait être mise en évidence.

3. RÉSULTATS

3.1. Analyse des données GPS

Cette partie permettra d'analyser les données GPS et d'établir le lien qui peut exister entre le comportement de vol du milan royal et les variables météorologiques. Ce lien définira si, au-delà d'un seuil pour certaines variables, nous pouvons considérer qu'il y a moins de 5% de chance que le milan se déplace.

Utilisation des sols

Chaque point GPS a été associé à une certaine utilisation du sol comme défini dans la méthode. Le tableau 2 reprend un résumé des superficies en hectare ainsi que le nombre de points GPS des différentes classes d'occupation du sol pour toute la saison de reproduction (de mars à août). Le nombre de points par hectare a aussi été calculé pour pouvoir comparer les différentes classes.

Tableau 2 : Superficie (ha) en nombre de points GPS associés aux classes d'occupation du sol

Occupation du sol	Superficie (ha)	# de points GPS	# de points/ha
<i>Terres arables</i>	4 551,86	16 167	3,55
<i>Prairies</i>	3 067,16	24 740	8,066
<i>Forêts de résineux</i>	965,95	10 407	10,77
<i>Forêts feuillues</i>	596,92	6 973	11,68
<i>Bâtiments, industries</i>	561,23	1 455	2,59
<i>Jeunes forêts et coupes</i>	383,23	860	2,24
<i>Zones naturelles</i>	136,56	2 669	19,54
<i>Forêts mixtes</i>	85,14	2	0,02
<i>Autres cultures</i>	18,71	43	2,30
<i>Eaux stagnantes</i>	6,86	15	2,19
Total	10 373,62	63 331	/

Il faut toutefois noter que les données de nuit sont beaucoup moins conséquentes que les données diurnes et que cela a impacté certaines classes d'occupation du sol, notamment les zones forestières qui auraient probablement vu leur nombre de points GPS augmenter [4].

Le nombre de points par hectare entre les différentes classes d'utilisation du sol a été mis en graphique à la figure 14. Ce diagramme en bâton représente donc l'intérêt que le milan a porté à certaines classes d'occupation en tenant compte de la superficie de chaque classe. Sur ce graphique, les zones naturelles ont été particulièrement survolées,

malgré leur faible superficie dans la zone d'étude. Au contraire, les terres arables qui constituent près de 50% de la zone d'étude ont eu moins d'intérêt.

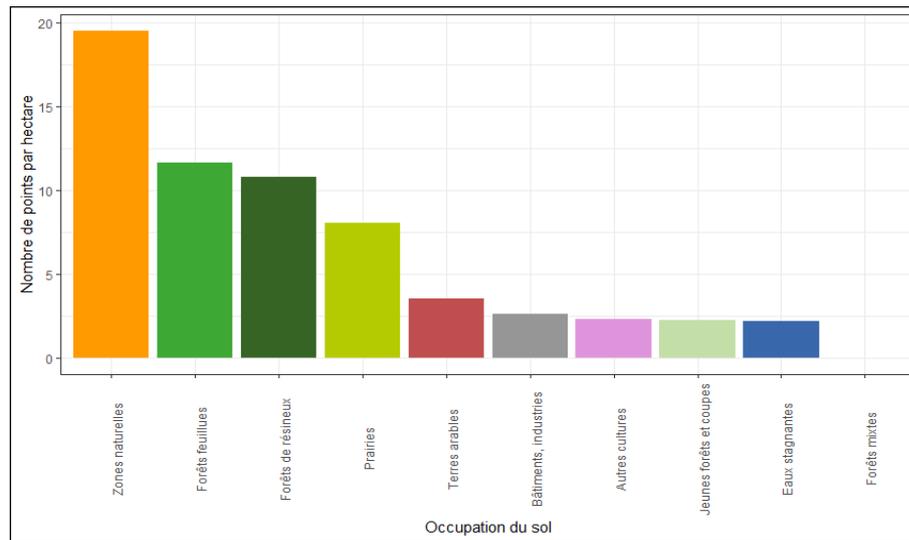


Figure 14 : Représentation du nombre de points GPS par ha en fonction de l'occupation du sol

La figure 15 représente la répartition de l'occupation du sol avant et après la fauche. Les pourcentages ont été utilisés afin de pouvoir comparer ces deux périodes qui n'ont pas le même nombre de données. Seules les classes d'occupation du sol jugées pertinentes ont été représentées sur le diagramme en bâtonnet. Les prairies ont été beaucoup plus survolées et leur part dans les points GPS est passé de 29 à 56%. En revanche, les terres arables semblent moins attractives pour le milan lors de la période après fauche. L'intérêt du milan pour les forêts résineuses et feuillues paraît également diminuer dans cette période. L'intérêt porté aux zones naturelles, par contre, ne semble pas impacté.

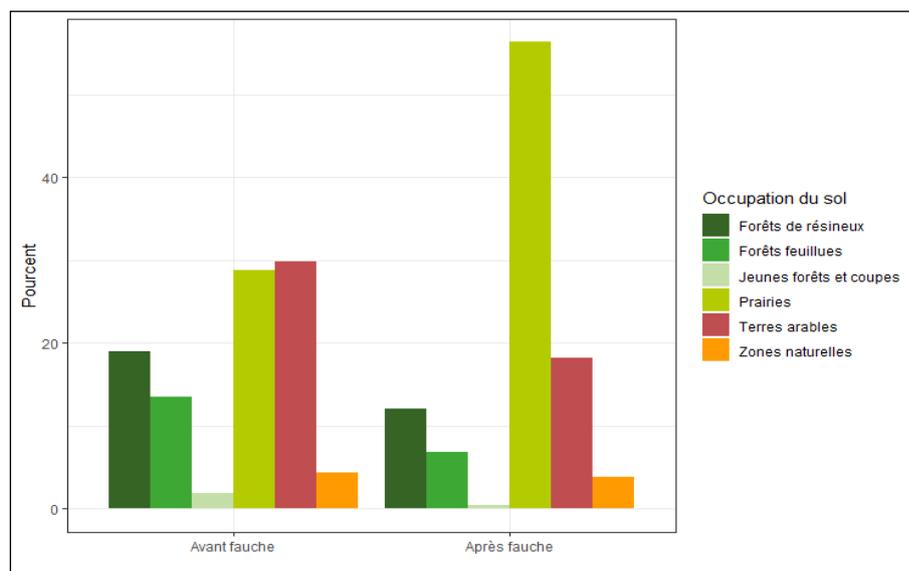


Figure 15 : Répartition du pourcentage des classes d'occupation du sol avant et après fauche

Ces constatations se confirment lorsque nous regardons la répartition par mois à la figure 16, sauf pour les forêts de résineux où de nombreux points ont été détectés en juin.

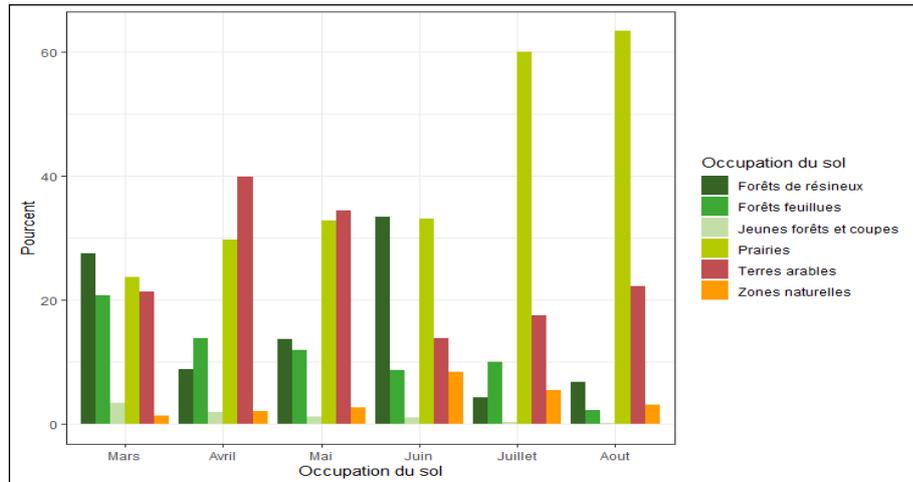


Figure 16 : Répartition du pourcentage d'occupation du sol en fonction du mois

Domaine vital

Pour l'étude du domaine vital, deux méthodes ont été utilisées. Dans un premier temps, les MCP 100%, 95%, 75% et 50% ont été générés. La figure 17 permet de visualiser ces domaines vitaux (en bleu clair) et les coordonnées des points GPS des milans (en brun) et le tableau 3 reprend l'aire du domaine vital en hectare ainsi que le rayon (km) auquel cela correspond.

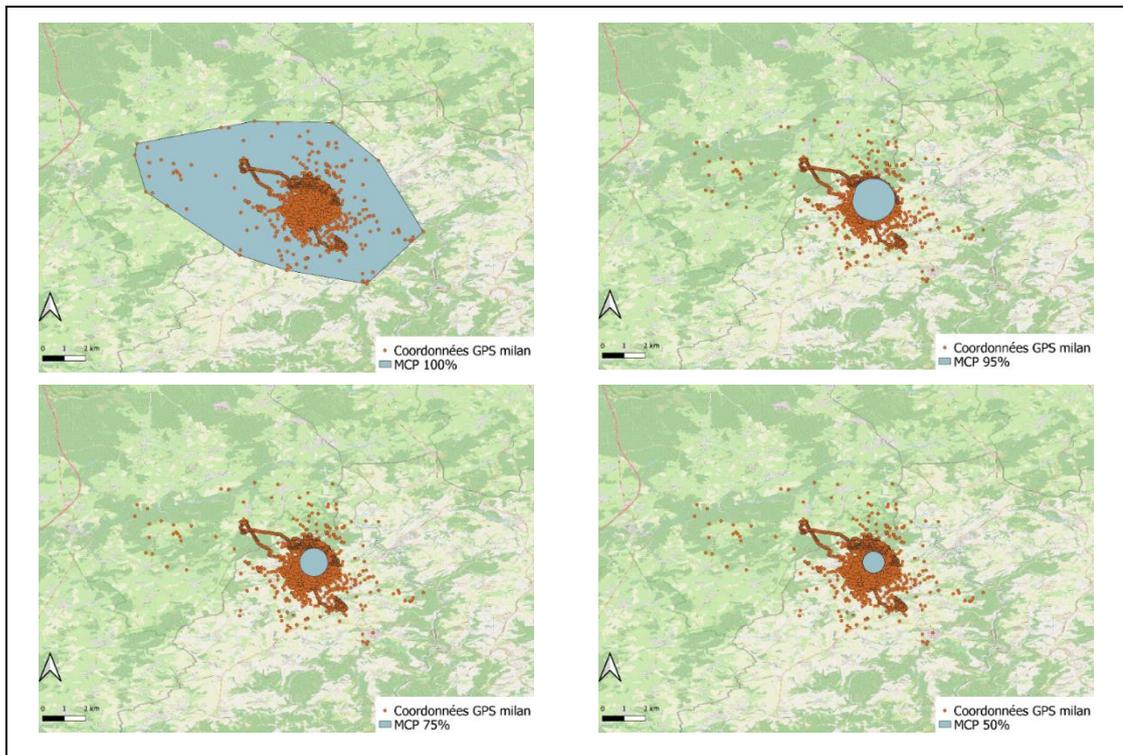


Figure 17 : Représentations du domaine vital calculé avec la méthode MCP

Tableau 3: Superficie (ha) et rayon (km) des domaines vitaux calculés avec la méthode MCP

% MCP	Aire (ha)	Rayon (km)
100%	10 439,26	5,76
95%	476,02	1,23
75%	212,42	0,82
50%	124,25	0,63

Les mêmes analyses ont été réalisées avec la méthode de Kernel. Les domaines vitaux générés sont présentés à la figure 18. Sur ces cartes, les points GPS du milan sont représentés en brun et le domaine vital en bleu. Le tableau 4 reprend un résumé de la superficie des différents domaines vitaux.

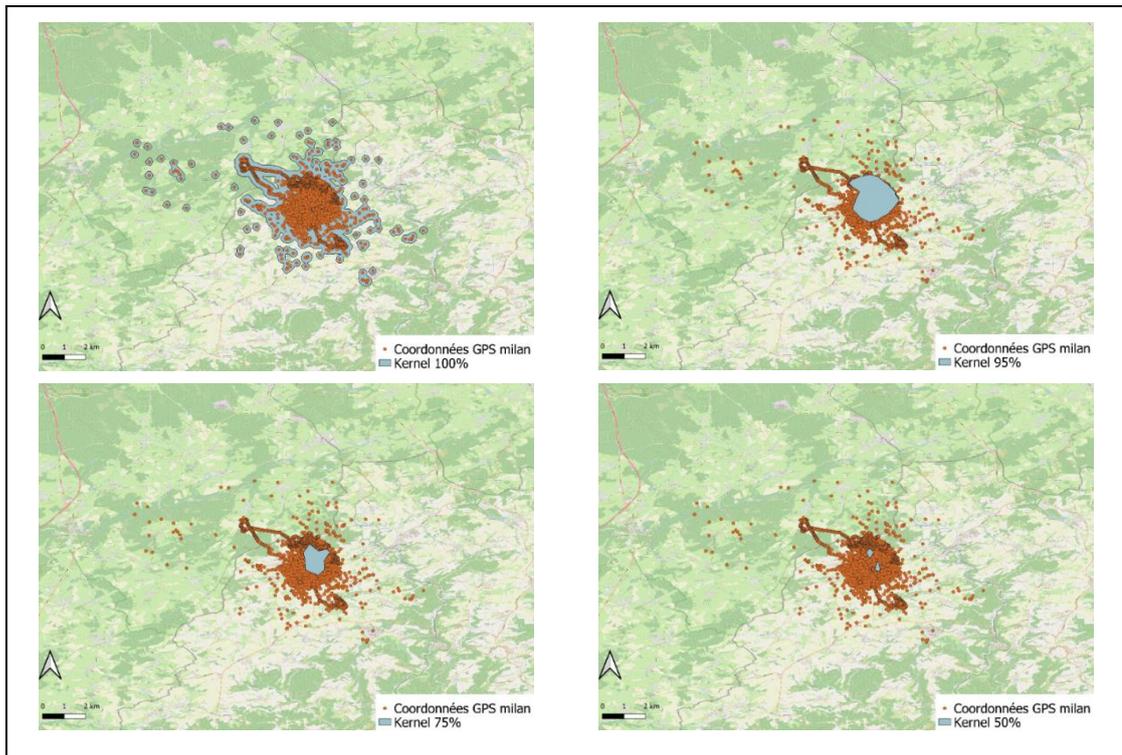


Figure 18 : Représentations du domaine vital calculé avec la méthode Kernel

Tableau 4 : Surface (ha) des domaines vitaux calculés avec la méthode Kernel

% Kernel	Surface (ha)
100%	3 757,05 ha
95%	521,05
75%	171,09
50%	23,43

Pour le Kernel 95%, nous avons aussi regardé les différents types d'occupation du sol qui sont présents dans cette zone. Le tableau 5 reprend un résumé de ces informations et la carte se trouve à la figure 19.

Tableau 5 : Types d'occupation du sol dans le domaine vital calculé avec le Kernel 95%

Occupation du sol	Aire (ha)	Pourcentage (%)
<i>Prairies</i>	208,569	40,02
<i>Terres arables</i>	181,756	34,88
<i>Forêts de résineux</i>	65,67	12,60
<i>Forêts feuillues</i>	20,79	3,99
<i>Jeunes forêts et coupes</i>	16,39	3,14
<i>Bâtiments, industries</i>	15,27	2,93
<i>Zones naturelles</i>	10,62	2,04
<i>Eaux stagnantes</i>	1,43	0,28
Total	521,05	/

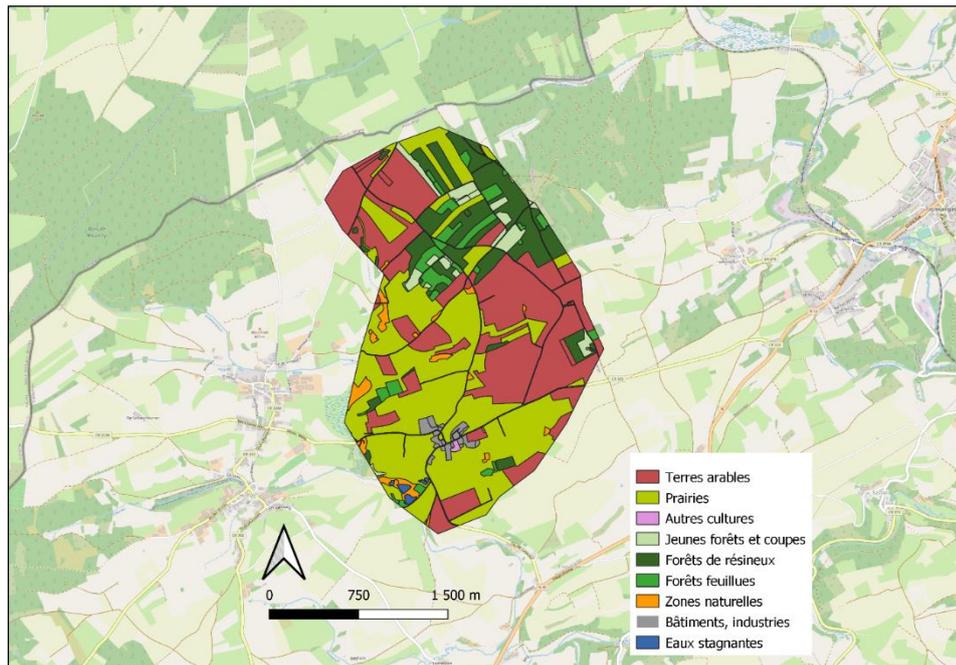


Figure 19 : Carte des différents types d'occupation du sol au sein du domaine vital (Kernel 95%)

Pour la distinction entre l'avant et l'après fauche, nous avons aussi examiné l'aire du domaine vital grâce au Kernel 95%. Alors qu'avant la fauche l'aire valait 476,04 hectares, après la fauche la surface du domaine vital a diminué à 349,08 hectares.

Activité de nuit

Dans un premier temps, les vitesses de vol ont été utilisées pour examiner l'activité nocturne du milan royal. Pendant 37,5% des nuits, une activité a été détectée avant le lever du soleil ou après le coucher du soleil. Cependant, elle a toujours été détectée après l'aube ou avant le crépuscule. Cette répartition est représentée à la figure 20. Les zones rouges représentent les moments où une vitesse de vol supérieure à 10 km/h a été détectée.

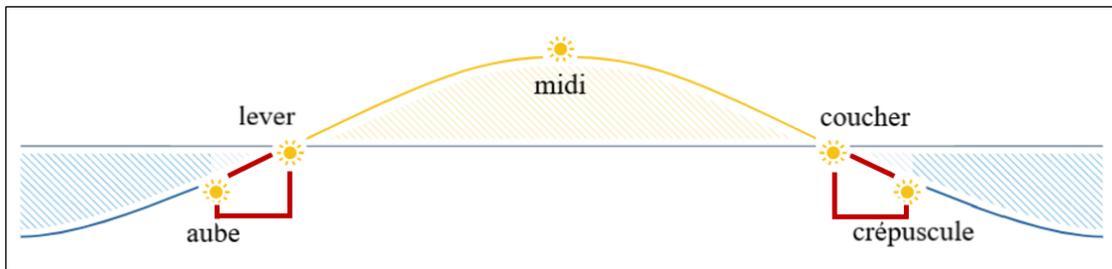


Figure 20 : Répartition de l'activité de vol mis en évidence via les vitesses de vol

Dans un second temps, en utilisant les distances entre les points GPS, 139 déplacements nocturnes ont été observés avec parfois plusieurs déplacements au cours de la même nuit. Environ 80% des déplacements ont eu lieu après l'aube ou avant le crépuscule. Pour les 20% restants, l'intervalle de temps entre deux points successifs ne permettait pas d'affirmer que le déplacement avait bien eu lieu avant l'aube ou après le crépuscule. La figure 21 représente cette répartition, avec en rouge les 80% des déplacements et en vert les 20% restants.

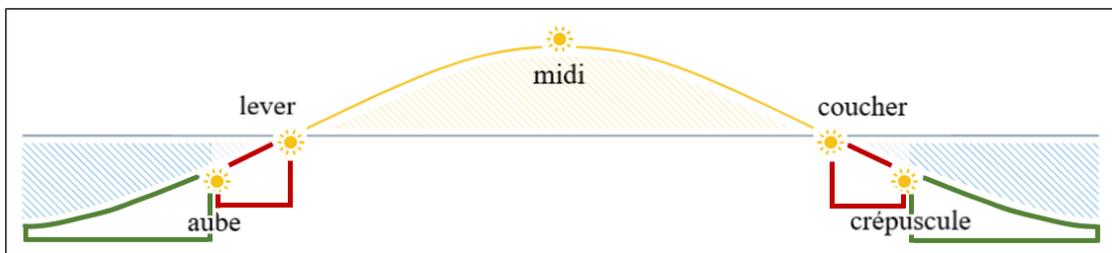


Figure 21 : Répartition de l'activité de vol mis en évidence via la distance parcourue

Hauteur de vol

L'altitude de vol est un indicateur important pour déterminer le pourcentage de temps de vol où le rapace a un risque de collision avec une éolienne. Dans notre étude, le milan royal passerait 28% de son temps de vol à une altitude considérée comme dangereuse (entre 50 et 150m). La figure 22 montre la distribution de l'altitude de vol.

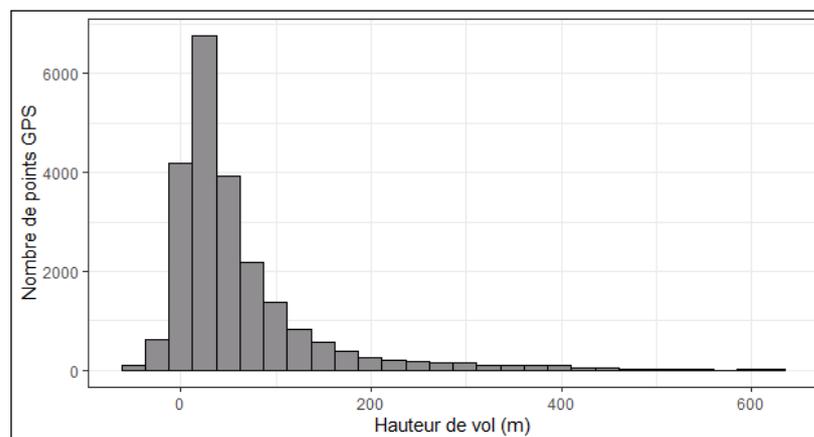


Figure 22 : Représentation de la répartition des hauteurs de vol

Vitesse de vol

Les vitesses de vol ont été brièvement analysées afin d'avoir une idée de la distance de détection nécessaire pour la suite du projet. En effet, plus l'oiseau se déplace rapidement, plus il doit être détecté tôt afin d'avoir assez de temps pour arrêter l'éolienne en cas de danger.

La figure 23 représente la courbe de densité de la vitesse du vol du milan (m/s). La moyenne est représentée en trait pointillé rouge et la médiane en bleu.

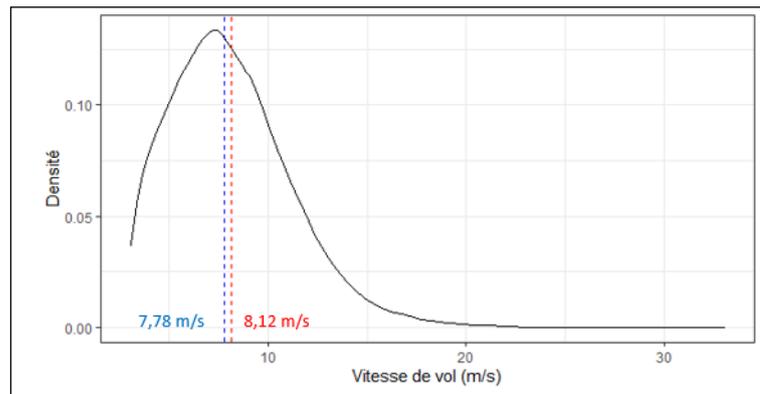


Figure 23 : Courbe de densité de la vitesse de vol (m/s)

Temps de vol

Le temps de vol est un paramètre qui a été calculé car il est utile pour la suite des analyses. La Figure 24 montre le pourcentage moyen de temps de vol sur une heure en fonction des heures de la journée. Sur ce graphique, nous pouvons voir que, en moyenne, le milan vole 40% de l'heure entre 11h et midi, soit 24 minutes. L'activité de vol du milan semble augmenter jusque 14h et diminuer après. Le pourcentage de temps de vol est considéré comme nul entre 22h et 4h du matin compris parce que les données de nuits ont été écartées pour cette analyse.

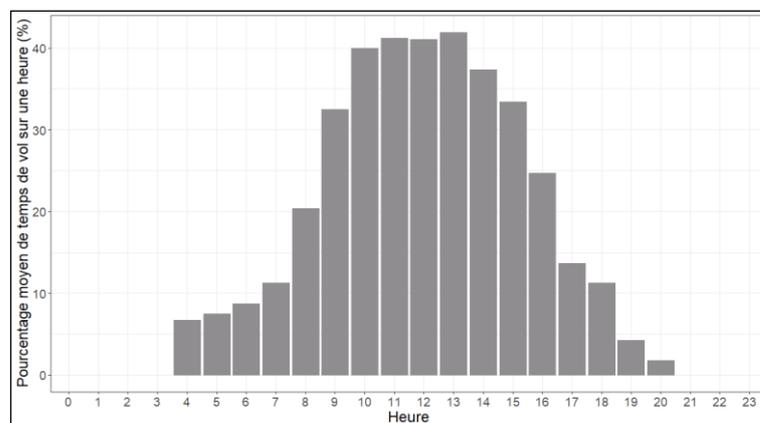


Figure 24 : Pourcentage moyen de temps de vol sur une heure en fonction des heures

Une distinction entre l'avant et l'après fauche a été réalisée. Pour rappel, la date séparant ces deux périodes a été fixée au 15 juin. La figure 25 représente le pourcentage moyen de temps de vol sur une heure en fonction des heures et de la période. Une nette différence est observée entre les deux. Le milan semble passer moins de temps en vol après la fauche.

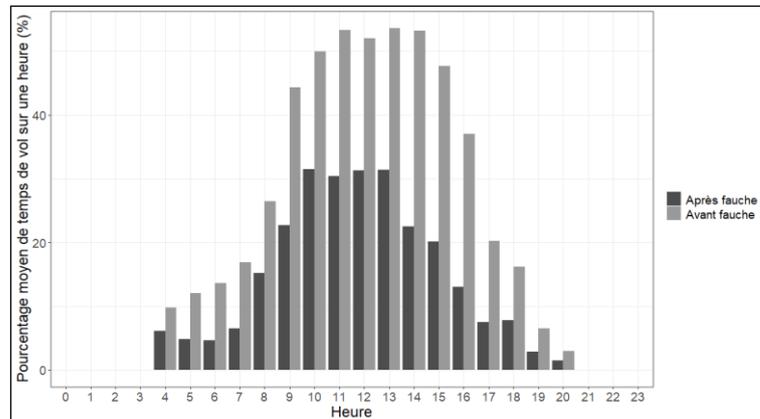


Figure 25 : Pourcentage moyen de temps de vol sur une heure en fonction des heures et de la période

Distance parcourue

Comme pour le point précédent, ce paramètre a été calculé et vérifié avant de poursuivre les analyses. Le graphique de la figure 26 montre le lien entre la distance parcourue en moyenne sur une heure (km) et les heures de la journée. Encore une fois, les données de nuit ont été enlevées pour cette analyse. Cette distance augmente aussi jusque 13h avant de diminuer.

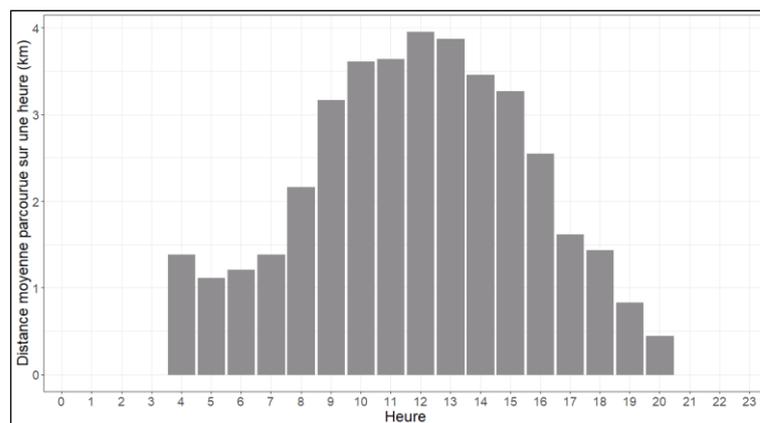


Figure 26 : Distance moyenne parcourue sur une heure (km) en fonction des heures

Pour ce qui est de la différence entre les périodes avant/après fauche, présentée à la figure 27, nous pouvons observer une diminution très notable de la distance parcourue après la fauche.

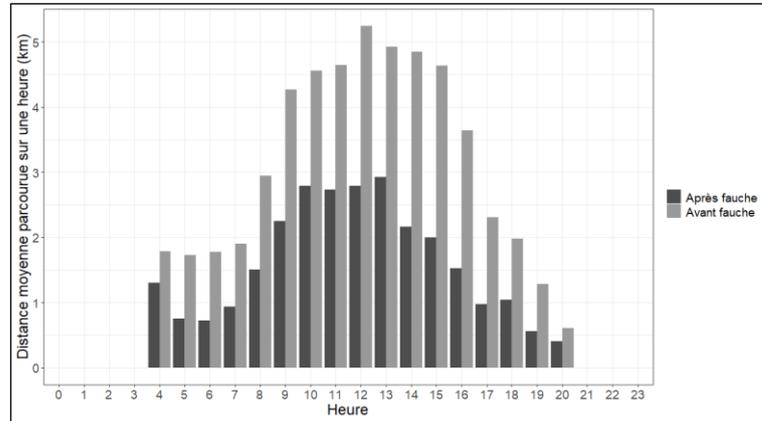
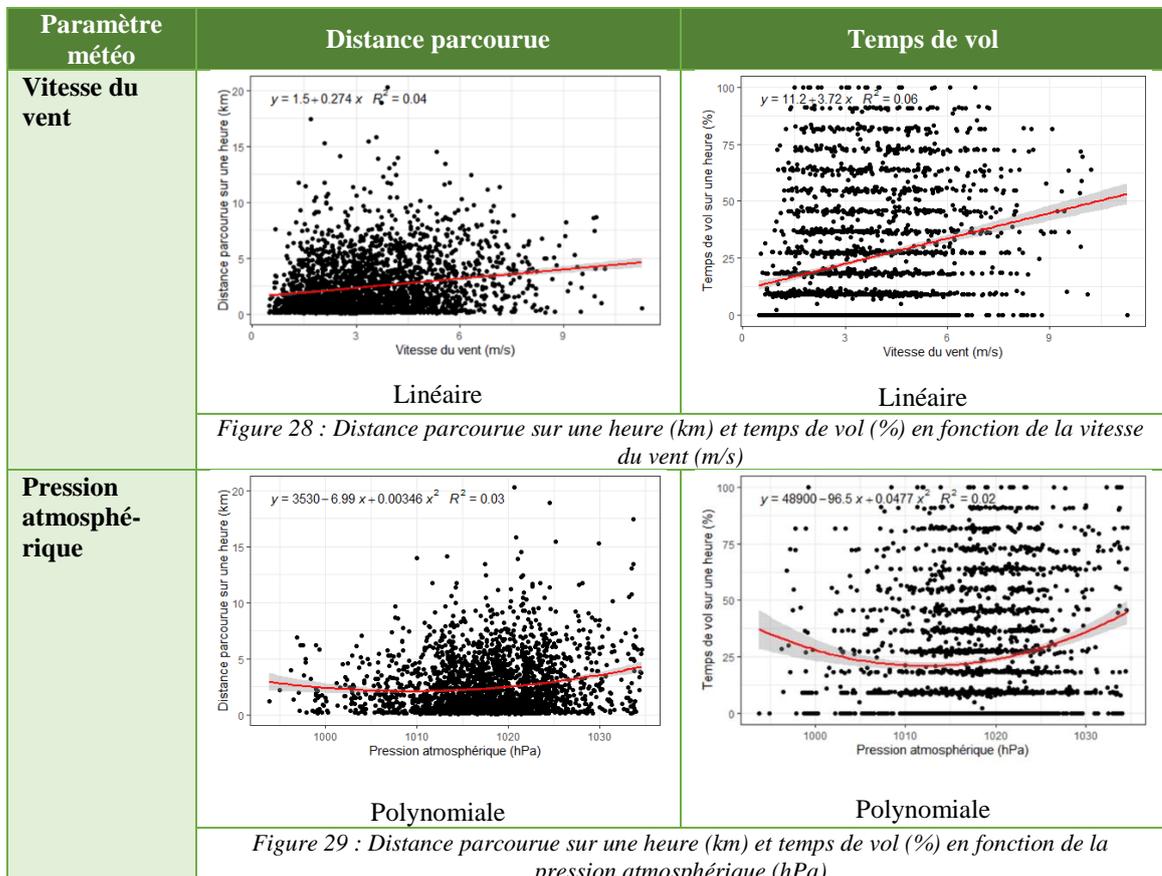
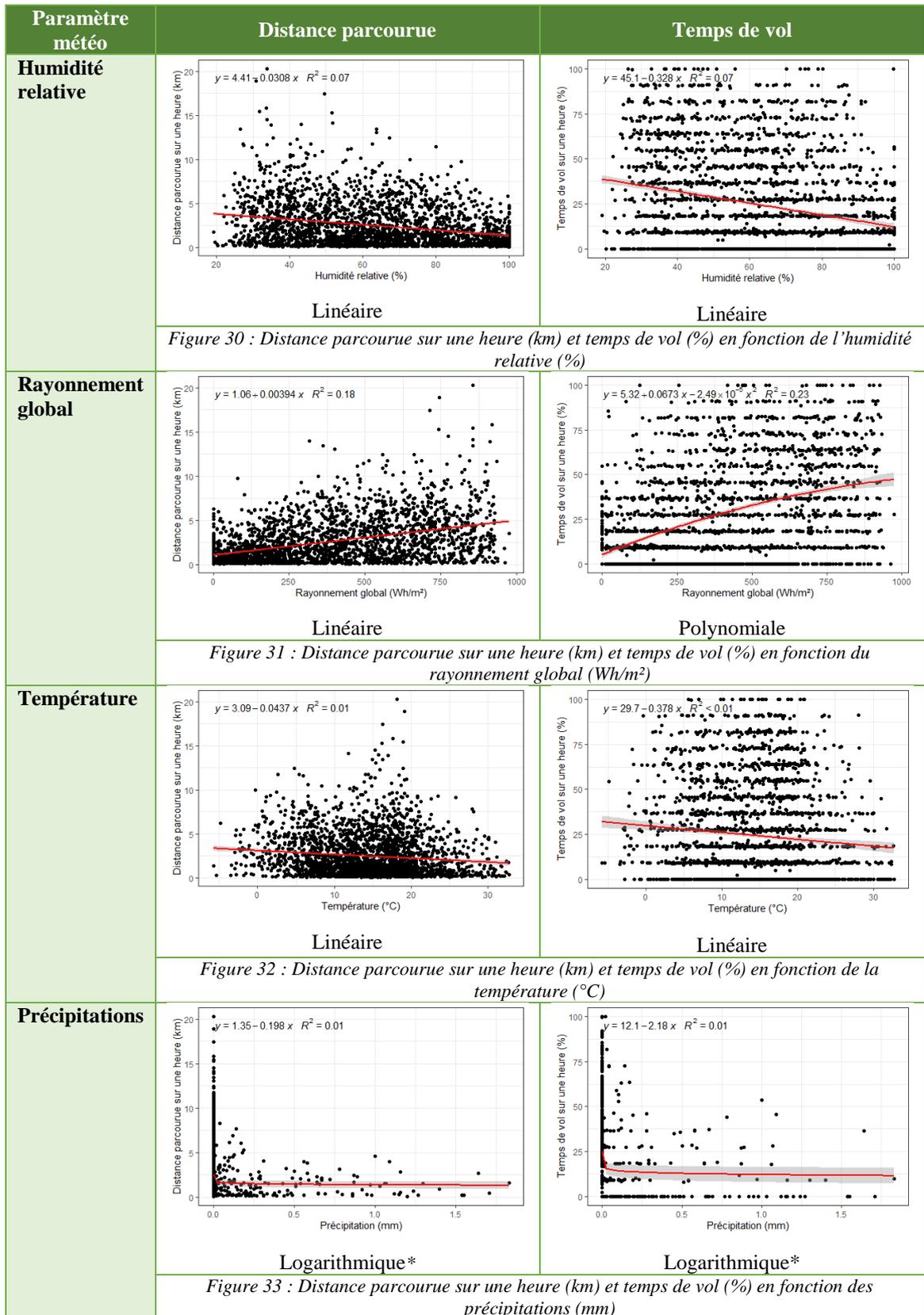


Figure 27 : Distance moyenne parcourue sur une heure (km) en fonction des heures et de la période

Lien entre chaque paramètre météo et le vol du milan

Pour chaque paramètre météorologique, trois régressions ont été réalisées pour montrer le lien avec le temps de vol et avec la distance parcourue. Un résumé des différentes régressions est repris à l'annexe 1. Elles ont été utilisées afin de voir si un seuil pouvait être établi au-delà duquel le milan a moins de 95% de chance de voler. Les figures 28 à 33 représentent la dispersion des données ainsi que la droite de régression, son équation et le R^2 qui y est associé, pour les modèles considérés comme les plus adaptés.





*Comme cette transformation ne fonctionne pas avec des données nulles, les précipitations nulles ont été au préalable transformées en 0,000001mm.

Activité de vol en fonction d'une combinaison de paramètres météorologiques

Afin de déterminer le meilleur modèle pour expliquer le comportement de vol en fonction de tous les paramètres météorologiques disponibles (et pertinents), une étude des corrélations a d'abord été réalisée. La représentation des coefficients se trouve à la figure 34.

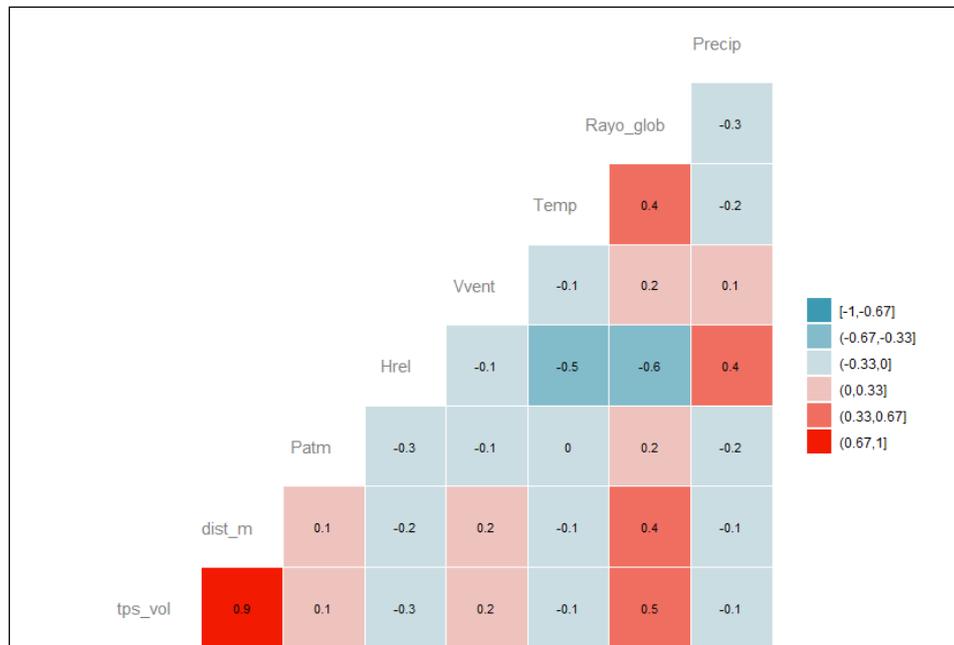


Figure 34 : Représentation des corrélations entre variables explicatives

Comme nous pouvons le voir à la figure 35, la corrélation est de 0.9 entre le temps de vol et la distance parcourue sur une heure. Cette corrélation élevée est plutôt rassurante pour l'utilisation de ces deux variables. De plus, aucun autre coefficient de corrélation ne dépasse 0.7 en valeur absolue et toutes les variables météorologiques peuvent donc être utilisées pour le modèle.

Plusieurs modèles ont été testés avec la méthode stepwise. Les deux modèles sélectionnés pour chaque variable à expliquer sont les modèles avec changement de variables. Le choix des changements à effectuer s'est basé sur les régressions effectuées sur les pages précédentes. Pour chaque modèle, il y a trois conditions d'application : la distribution normale des résidus, la variance homogène des résidus et leur indépendance. La première condition a été vérifiée pour tous les modèles. Pour les autres, nous avons fait l'hypothèse qu'elles étaient vérifiées ou qu'elles ne poseraient pas de problèmes pour l'interprétation. La distribution des résidus de tous les modèles qui vont suivre est visible en annexe 2.

Pour le **temps de vol**, la méthode stepwise a sélectionné les variables suivantes :

- La pression atmosphérique (hPa) élevée au carré ;
- L'humidité relative (%) ;
- La vitesse du vent (m/s) ;
- La température (°C) ;
- Le rayonnement global (Wh/m²) élevé au carré ;
- Le logarithme des précipitations (mm).

Le coefficient R² s'élève à 0,2938. Cela signifie que près d'un tiers du comportement de vol peut être expliqué par ces variables météorologiques. Le F-score vaut 180 ce qui signifie que 180 fois plus de variance est expliquée par les variables sélectionnées que par des variations aléatoires résiduelles entre les points.

Enfin, la figure 35 reprend les différentes variables indépendantes ainsi que les estimations et les p-valeurs associées.

Coefficients:					
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	8.069e+01	4.016e+01	2.009	0.044610	*
Patm2	-5.455e-05	3.807e-05	-1.433	0.151993	
Hrel	-1.082e-01	3.007e-02	-3.599	0.000326	***
Vvent	2.345e+00	2.728e-01	8.594	< 2e-16	***
Temp	-1.158e+00	8.122e-02	-14.256	< 2e-16	***
Rayo_glob2	5.430e-05	2.398e-06	22.646	< 2e-16	***
pluie_log	-8.097e-01	3.290e-01	-2.461	0.013904	*

Figure 35 : Résumé de la régression multiple choisie entre le temps de vol (%) et les différentes variables météorologiques

Concernant la **distance parcourue**, les variables suivantes ont été choisies :

- L'humidité relative (%) ;
- La vitesse du vent (m/s) ;
- La température (°C) ;
- Le rayonnement global (Wh/m²).

Le R² vaut 0,2844 pour un F-score de 258,2. La figure 36 ci-dessous reprend les différentes variables explicatives ainsi que leur p-valeur.

Coefficients:					
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	3173.4517	287.8510	11.025	< 2e-16	***
Hrel	-11.6129	2.6647	-4.358	1.36e-05	***
Vvent	87.7632	24.9244	3.521	0.000437	***
Temp	-130.3610	7.4902	-17.404	< 2e-16	***
Rayo_glob	4.4679	0.2025	22.059	< 2e-16	***

Figure 36 : Résumé de la régression multiple choisie entre la distance parcourue (km) et les différentes variables météorologiques

Que ce soit pour la distance parcourue ou le temps de vol sur une heure, les deux modèles obtenus sont très similaires. Tout d'abord, l'humidité relative ainsi que les températures ont un effet significatif négatif sur les deux variables à expliquer. Au contraire, la vitesse du vent et le rayonnement global influencent positivement l'activité de vol. Les précipitations par contre influencent négativement de façon significative uniquement le temps de vol. Pour les deux modèles, le R^2 est proche de 0,3 ce qui signifierait que près d'un tiers du temps de vol et de la distance parcourue est expliqué par ces paramètres météorologiques.

Ensuite, deux modèles ont aussi été calculés pour la période avant et après fauche. Pour chacun, plusieurs modèles ont été testés et la méthode stepwise a été sélectionnée. Les modèles avec changement de variables ont été préférés, sauf pour le modèle de la distance parcourue après fauche, où le changement de variable n'a pas mené à une amélioration du modèle. Pour ce qui est des conditions d'application, elles sont identiques aux deux premiers modèles créés et seront vérifiées de la même façon.

Le changement de variable a été décidé de la même manière que pour le modèle de l'année globale et est résumé dans le tableau 6.

Tableau 6 : Changements de variables

	Avant fauche		Après fauche	
	Temps de vol	Distance	Temps de vol	Distance
<i>Précipitations (mm)</i>	Logarithmique	Logarithmique	Logarithmique	Logarithmique
<i>Rayonnement global (Wh/m²)</i>	Polynomiale	Linéaire	Linéaire	Linéaire
<i>Vitesse du vent (m/s)</i>	Logarithmique	Logarithmique	Logarithmique	Logarithmique
<i>Humidité relative (%)</i>	Linéaire	Linéaire	Linéaire	Linéaire
<i>Pression atmosphérique (hPa)</i>	Linéaire	Linéaire	Linéaire	Linéaire
<i>Température (°C)</i>	Linéaire	Linéaire	Polynomiale	Polynomiale

Avant fauche

En ce qui concerne le **temps de vol**, le meilleur modèle obtenu a été celui sans changement de variable sauf pour les précipitations. Les variables retenues sont les suivantes :

- Pression atmosphérique (hPa) ;
- Humidité relative (%) ;
- Vitesse du vent (m/s) ;
- Température (°C) ;
- Rayonnement global (Wh/m²) ;
- Logarithme des précipitations (mm).

Le R^2 de ce modèle vaut 0,3767 et le F-score 141.2. La figure 37 reprend les différents paramètres sélectionnés ainsi que leur p-valeur.

Coefficients:				
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-1.946e+02	9.183e+01	-2.119	0.03427 *
Patm	1.692e-01	8.953e-02	1.890	0.05902 .
Hrel	2.533e-01	4.386e-02	5.775	9.46e-09 ***
vvent	3.040e+00	3.582e-01	8.485	< 2e-16 ***
Temp	-3.909e-01	1.295e-01	-3.020	0.00258 **
Rayo_glob	6.941e-02	3.032e-03	22.892	< 2e-16 ***
pluie_log	-1.456e+00	4.667e-01	-3.120	0.00184 **

Figure 37 : Résumé de la régression multiple choisie entre le temps de vol (%) et les différentes variables météorologiques pour la période avant fauche

Pour le modèle de la **distance parcourue**, la méthode stepwise a été utilisée avec changement de variable. Celles sélectionnées sont :

- Pression atmosphérique (hPa) ;
- Humidité relative (%) ;
- Logarithme de la vitesse du vent (m/s) ;
- Température (°C) ;
- Rayonnement global (Wh/m²) ;
- Logarithme des précipitations (mm).

Le R^2 vaut 0,2856 et le F-score 93,43. La figure 38 reprend un résumé du modèle.

Coefficients:				
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-2.036e+04	9.334e+03	-2.181	0.0293 *
Patm	2.013e+01	9.103e+00	2.211	0.0272 *
Hrel	9.782e+00	4.464e+00	2.191	0.0286 *
vent_log	1.450e+03	2.784e+02	5.206	2.22e-07 ***
Temp	-6.627e+01	1.290e+01	-5.139	3.16e-07 ***
Rayo_glob	5.528e+00	3.094e-01	17.869	< 2e-16 ***
pluie_log	-1.002e+02	4.762e+01	-2.103	0.0356 *

Figure 38 : Résumé de la régression multiple choisie entre la distance parcourue (km) et les différentes variables météorologiques pour la période avant fauche

Après fauche

Pour déterminer au mieux le **temps de vol** en fonction des paramètres météorologiques, la méthode stepwise a été sélectionnée avec transformation de variable. Les suivantes ont été sélectionnées :

- Pression atmosphérique (hPa) ;
- Humidité relative (%) ;
- Rayonnement global (Wh/m²) ;
- Logarithme des précipitations (mm).

Le R^2 vaut 0,2039 et le F-score 76,13. La figure 39 résume le modèle choisi.

Coefficients:					
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	663.097614	124.452892	5.328	1.19e-07	***
Patm	-0.665618	0.122417	-5.437	6.56e-08	***
Hrel	0.144121	0.031631	4.556	5.74e-06	***
Rayo_glob	0.037940	0.002404	15.779	< 2e-16	***
pluie_log	-0.915385	0.364586	-2.511	0.0122	*

Figure 39 : Résumé de la régression multiple choisie entre le temps de vol (%) et les différentes variables météorologiques pour la période après fauche

Pour le modèle de la **distance parcourue** (km), la méthode stepwise a aussi été utilisée mais les variables n'ont pas été transformées. Les variables météorologiques suivantes ont été sélectionnées :

- Pression atmosphérique (hPa) ;
- Humidité relative (%) ;
- Rayonnement global (Wh/m²) ;
- Précipitations (mm).

Le R² vaut 0,1671 et le F-score 59,66. La figure 40 reprend un résumé du modèle.

Coefficients:					
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	41077.2717	11372.9469	3.612	0.000317	***
Patm	-40.6507	11.1748	-3.638	0.000287	***
Hrel	10.7361	2.8254	3.800	0.000152	***
Rayo_glob	3.0857	0.2196	14.053	< 2e-16	***
Precip	-188.1094	97.3175	-1.933	0.053480	.

Figure 40 : Résumé de la régression multiple choisie entre la distance parcourue (km) et les différentes variables météorologiques pour la période après fauche

Avant la fauche, toutes les variables météorologiques sont significatives pour les deux modèles, sauf pour la pression atmosphérique dans le modèle du temps de vol (dont la p-valeur est très proche des 5%). Le R² frôle encore les 30% pour la distance parcourue et monte jusqu'à 37% pour le temps de vol. Pour ce qui est de l'impact des variables météorologiques, il y a un effet positif sur le temps de vol et la distance parcourue de la pression atmosphérique, la vitesse de vent et le rayonnement global. Les températures et précipitations ont donné lieu à un effet négatif sur l'activité de vol. De façon plutôt étonnante, l'humidité relative influencerait cette fois positivement le vol du milan.

Après la fauche par contre, les R² des modèles sur le temps de vol et la distance parcourue sont de 0,2 et de 0,17 respectivement. Pour ce qui est des variables explicatives significatives, la pression atmosphérique influence négativement le vol alors que le rayonnement global et l'humidité relative l'influence positivement. Notons que pour la distance parcourue, les précipitations ne sont pas significatives parce que la p-valeur est juste au-dessus de 5%.

3.2. Trajectométrie

Pour rappel, cette partie est destinée à répondre à la deuxième question de recherche portant sur la différence de trajectoires entre différentes espèces. Pour ce faire, une intelligence artificielle a été utilisée.

Intelligence artificielle

Pour utiliser l'intelligence artificielle, différents graphiques ont été créés. Les figures 41-45 reprennent un exemple pour chaque type de graphique, 225 trajectoires ayant été utilisées et 1125 graphiques créés. Pour rappel, les axes avaient été supprimés de ces graphiques pour le bon fonctionnement de l'intelligence artificielle mais tous les graphiques du même type ont exactement la même échelle.



Figure 41 : Exemple de trajectoire d'une buse variable, d'un milan noir et d'un milan royal respectivement (position en X en fonction de position en Y)

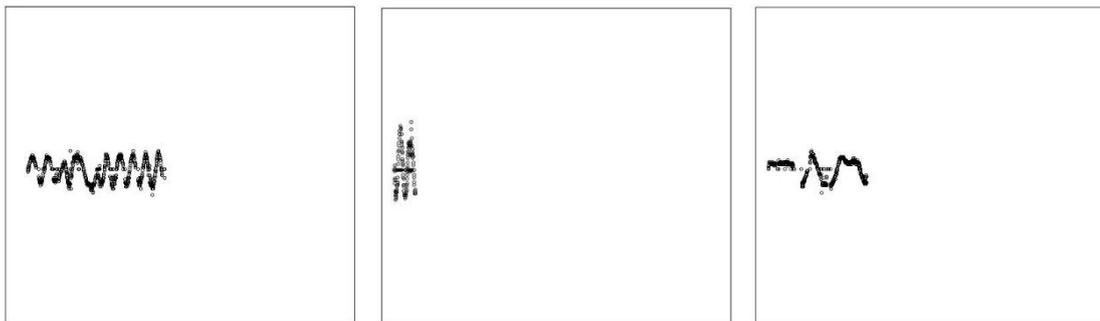


Figure 42 : Exemple de la vitesse en x en fonction du temps pour une buse variable, un milan noir et un milan royal respectivement

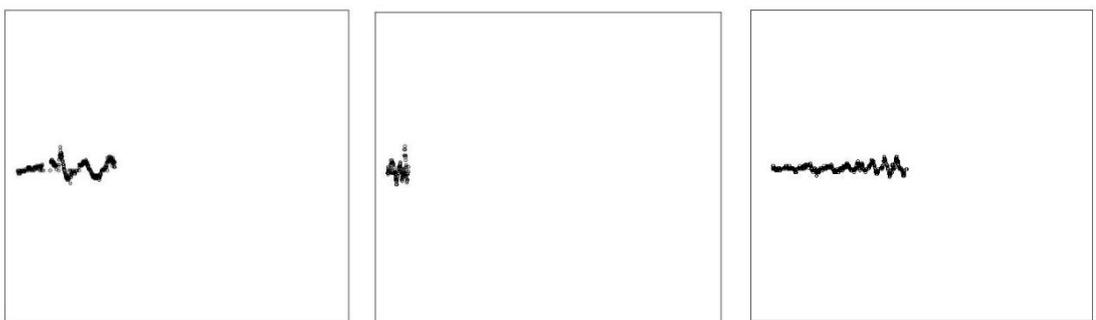


Figure 43 : Exemple de la vitesse en y en fonction du temps pour une buse variable, un milan noir et un milan royal respectivement

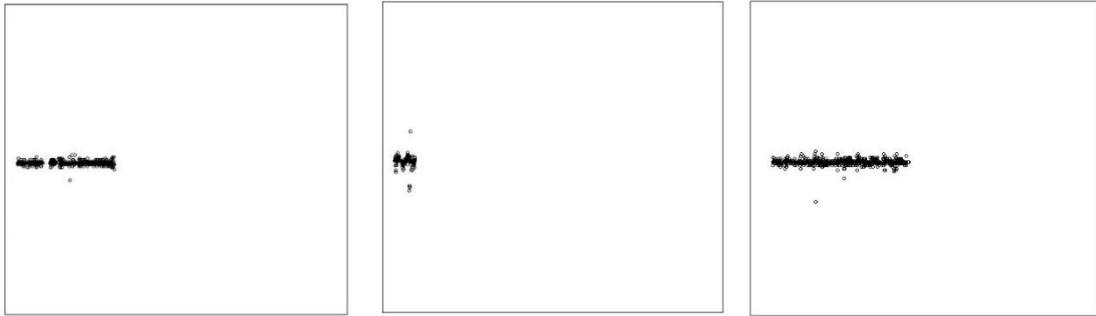


Figure 44 : Exemple de l'accélération en x en fonction du temps pour une buse variable, un milan noir et un milan royal respectivement

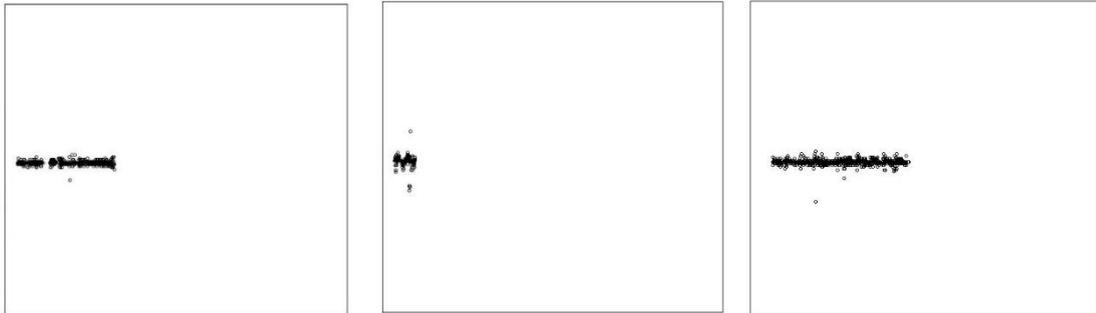


Figure 45 : Exemple de l'accélération en y en fonction du temps pour une buse variable, un milan noir et un milan royal respectivement

En ce qui concerne l'intelligence artificielle, elle n'a pas permis de faire la différence entre les différentes espèces. La figure 46 montre une capture d'écran du logiciel lors de l'utilisation de l'IA. Nous pouvons y voir que la buse variable (en jaune en haut à gauche de l'écran) a été détectée comme étant un milan noir (au milieu à droite de l'écran). Notons que sur les captures d'écran ci-dessous, le modèle est dit « figé », c'est-à-dire qu'il n'apprend plus et se contente de faire des prédictions sur des images à l'aide de ce qu'il a déjà appris.

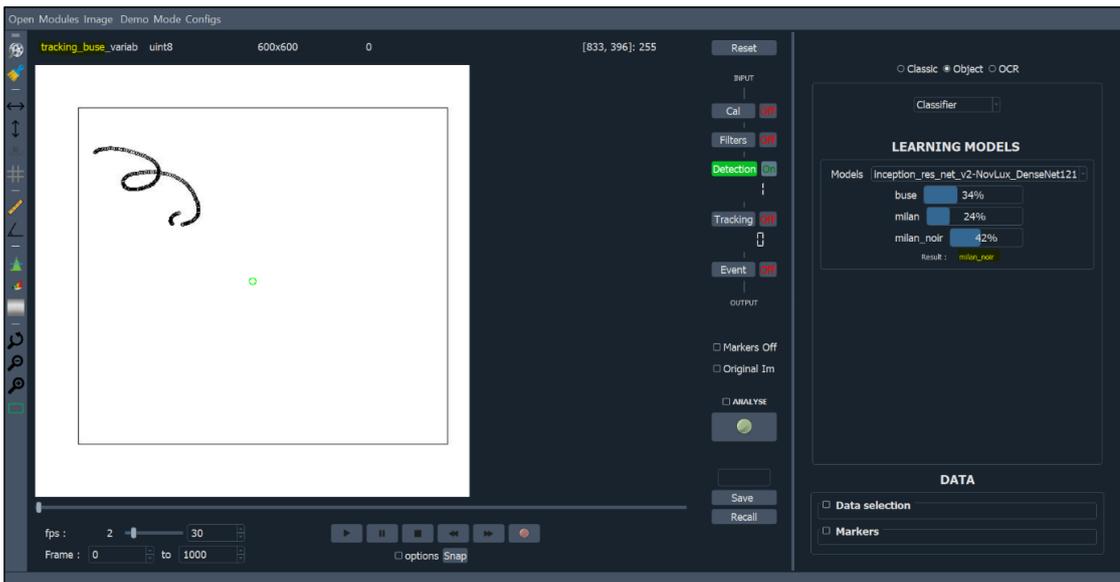


Figure 46 : Capture d'écran de TRACK en appliquant le modèle d'IA à une trajectoire de buse variable

Pour une autre trajectoire (figure 47), l'IA a bien reconnu le milan royal (noté ici milan) mais les pourcentages présents à droite montrent que la certitude du modèle n'excède pas 30%.

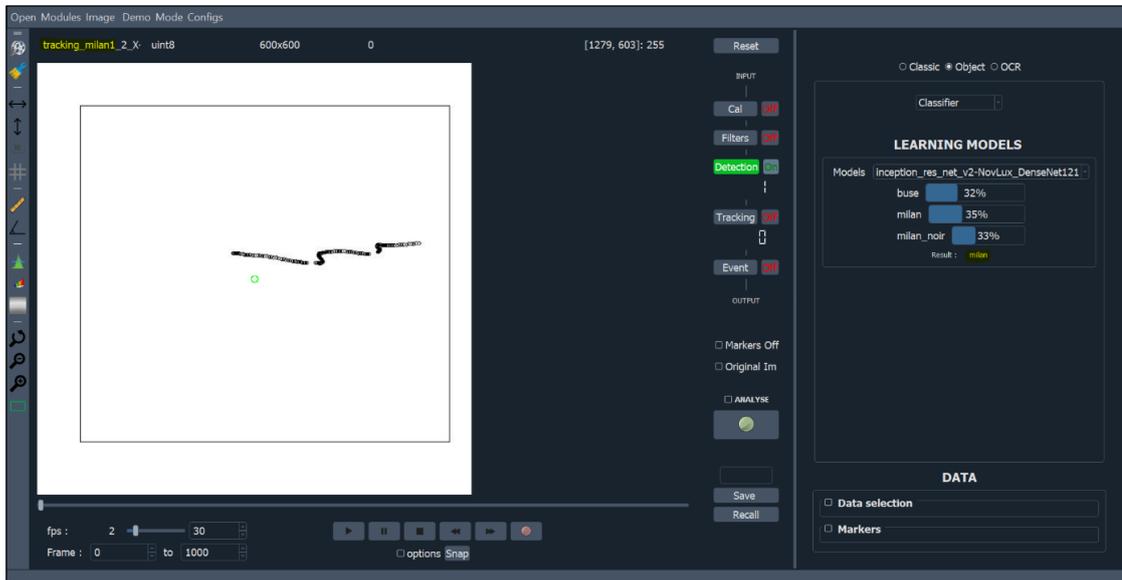


Figure 47 : Capture d'écran de TRACK en appliquant le modèle d'IA à une trajectoire de milan royal

Analyse des vitesses et accélérations

Une analyse visuelle sur base des différences de vitesses en x, en y et des accélérations en x et y a été réalisée avec les données issues de l'analyse de trajectoires. Les différents graphiques sont présentés aux figures 48-51. Comme on peut le voir sur les différents graphiques, aucune différence significative ne peut être observée entre les trois espèces pour ces quatre paramètres.

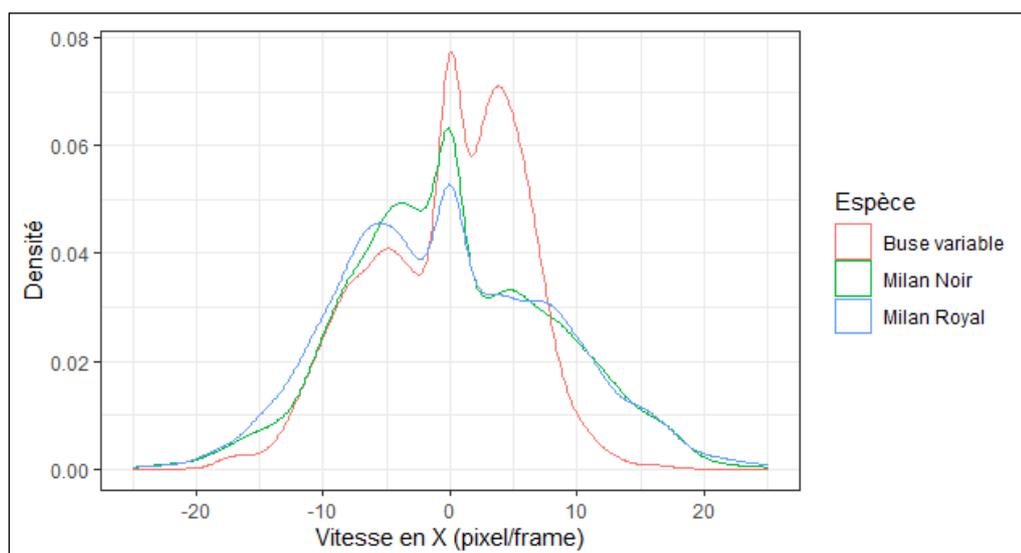


Figure 48 : Courbe de densité de la vitesse en x pour les trois espèces

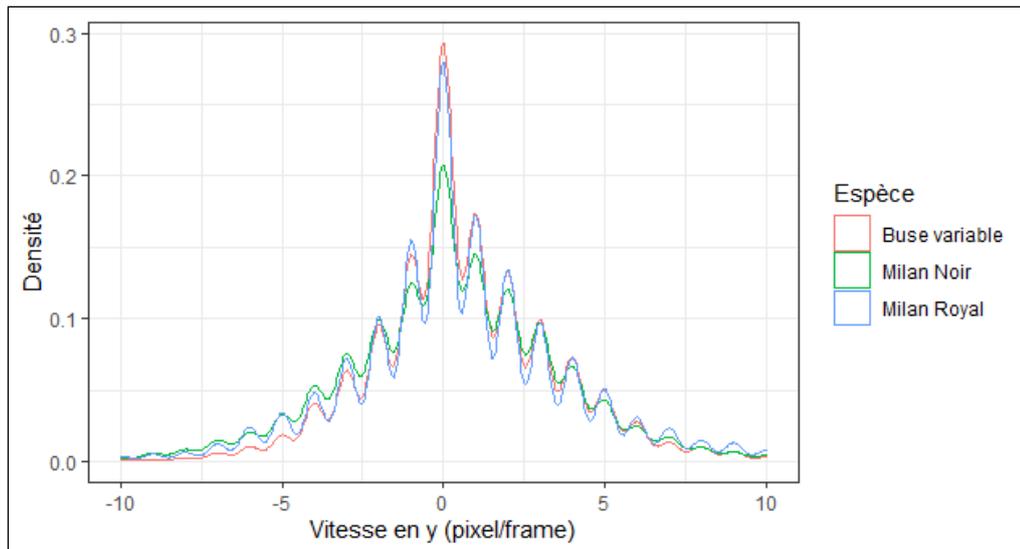


Figure 49 : Courbe de densité de la vitesse en y pour les trois espèces

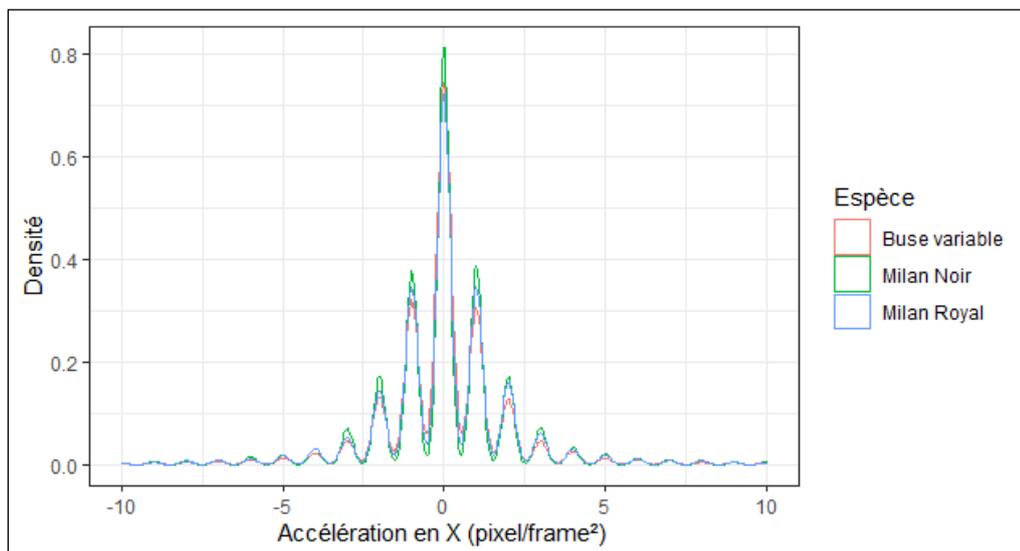


Figure 50 : Courbe de densité de l'accélération en x pour les trois espèces

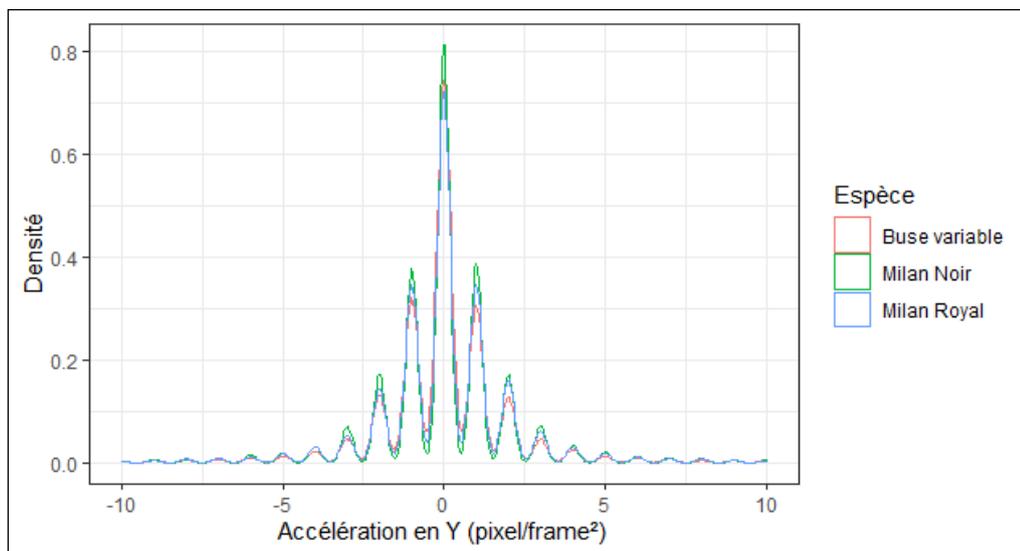


Figure 51 : Courbe de densité de l'accélération en y pour les trois espèces

4. DISCUSSION

4.1. Analyse des données GPS

Avant de commencer la discussion, il est important de noter que toutes ces conclusions se sont basées uniquement sur un individu. Les résultats donnent donc un aperçu global mais pourraient diverger avec d'autres individus.

Utilisation des sols

Dans un premier temps, nous allons analyser l'occupation du sol au cours de la saison de reproduction. Comme le montre le tableau 2, les types d'occupation du sol survolés sont diversifiés et cette diversité dans le paysage constitue un habitat adéquat pour le milan royal [21]. En effet, cela augmente le nombre de lisières, de petits éléments du paysage et de cultures qui, même s'ils ne permettent pas à ce rapace d'y chasser directement, représentent un habitat important pour les petits rongeurs qui seront chassés dans les zones ouvertes adjacentes (Weber 2002, cité par Heuck et al. [21]).

Nous pouvons également constater au tableau 2 que près de la moitié de la superficie de la zone d'étude est composée de terres arables. Malgré cela, la majorité des points GPS ont été observés au-dessus des prairies. Quand nous observons le nombre de points GPS par hectare, nous pouvons voir que ce sont les zones naturelles qui ont été le plus densément visitées. Des prairies sont aussi comprises dans ces zones naturelles, ainsi que des zones broussailleuses ce qui pourrait expliquer l'attrait important de ces zones. Concernant les terres arables, elles sont moins densément visitées, à raison de 3,55 points GPS par hectare. Ceci pourrait être expliqué par leur grande superficie en bordure de zone d'étude, où les points GPS sont moins présents. Cependant, cela montre tout de même le moindre intérêt qu'a eu ce milan envers ce type d'occupation du sol. Un test X^2 d'ajustement a été réalisé afin de tester la significativité des préférences en termes d'habitat pour ce milan. Pour ce faire, nous avons rassemblé les forêts dans la même catégorie, excepté les jeunes forêts et coupes. La p-valeur du test est inférieure à 0,0001. Nous pouvons donc affirmer que le nombre de points GPS observé est différent de celui attendu et donc que ce n'est pas par hasard que le milan a plus ou moins visité certaines occupations du sol. Le test montre aussi qu'il a eu moins d'attrait pour les terres arables,

autres cultures, jeunes forêts et eaux stagnantes. Au contraire, il a survolé les zones naturelles et les forêts.

Les cultures ne constituent pas leur zone de chasse de prédilection car les terres fréquemment labourées ne permettent pas aux petits mammifères, leur source de nourriture principale, de construire des grandes populations, contrairement aux prairies [21]. Malgré cela, les cultures constituent un élément du paysage recherché par ces oiseaux [4], surtout quand elles sont diversifiées et de hauteurs différentes au cours de l'année pour augmenter la disponibilité et l'accessibilité des proies [21].

Nous pouvons aussi voir que les forêts mixtes sont beaucoup moins survolées que les forêts de résineux ou les forêts feuillues. Cette affirmation a été vérifiée par un test X^2 d'ajustement. Ce test dont la p-valeur est inférieure à 0,0001 montre que le milan a préféré les forêts feuillues et de conifères et a moins visité qu'attendu les jeunes forêts et coupes ainsi que les forêts mixtes. La moindre exploitation de ces dernières pourrait s'expliquer par le côté plus disparate au sein de la zone d'étude. Un dernier test a été effectué uniquement entre les forêts de résineux et les forêts feuillues. Le résultat, lui aussi significatif, indique que le milan a préféré survoler les forêts feuillues. Une étude en Allemagne menée par Heuck et al. [21] a montré que le milan royal avait même tendance à éviter les forêts de résineux, ce qui n'est pas le cas ici.

Avec la différenciation entre les périodes avant et après fauche, nous pouvons constater une nette augmentation de l'utilisation des prairies. Cela confirme donc l'importance de la fauche pour la chasse du milan royal [4]. Toutes les autres occupations du sol semblent perdre de l'importance après la fauche, au profit des prairies sauf les zones naturelles qui gardent le même intérêt pour le milan. Les mêmes conclusions peuvent être tirées pour la différenciation entre les mois de la saison de reproduction. Les prairies sont nettement plus survolées en juillet et août.

Domaine vital

Le premier constat réalisé est la différence qui existe entre la méthode du MCP et celle de Kernel dans l'estimation du domaine vital. La méthode de Kernel propose presque systématiquement un domaine vital plus petit que la méthode du MCP. Ce dernier est moins utilisé comme estimation du domaine vital parce qu'il surestime sa superficie [59]. La méthode de Kernel est donc considérée comme plus représentative pour estimer ce paramètre.

Un autre phénomène marquant est la faible superficie des domaines vitaux. Comme nous pouvons le voir au tableau 4, 95% des observations se situent dans une zone de 520 hectares, ce qui pourrait être assimilé à un cercle de 1,2 km de rayon. Dans la littérature, il est souvent considéré que le milan royal passe près de 95% de son temps dans un cercle de rayon de moins de 2 km [14] [8].

Une brève analyse de l'occupation du sol du domaine vital a été réalisée. Le Kernel 95% a été choisi pour les raisons expliquées ci-dessus. Comme nous pouvons le voir au tableau 5, les prairies et les terres arables représentent à elles-seules près de 75% du domaine vital du rapace. Cela montre encore une fois l'attrait important que représente ces types d'occupation du sol.

Activité de nuit

Au vu des résultats et malgré la faible base de données, nous pouvons conclure que le milan royal se déplace également avant le lever du soleil ainsi qu'après son coucher. Cependant, une activité avant l'aube ou après le crépuscule n'a pas pu être mise en évidence avec ces analyses. Pour ces raisons, nous n'avons gardé que les données GPS situées entre l'aube et le crépuscule pour les analyses suivantes.

De plus, il semble raisonnable de dire que les caméras qui seront utilisées pour la détection du milan royal doivent être fonctionnelles avant le lever du soleil et après son coucher, au moins à partir de l'aube et jusqu'au crépuscule.

Hauteur de vol

Pour ce paramètre, nous avons conclu que le milan étudié passait près de 28% de son temps de vol entre 50 et 150m du sol, à des altitudes considérées comme à risque face aux éoliennes [25]. Ce paramètre constitue une estimation. Plusieurs imprécisions qui n'ont pas été prises en compte ici peuvent venir modifier ce résultat. Par exemple, la mesure de l'altitude par rapport au niveau de la mer, prise par le GPS, pourrait être quelque peu imprécise, de même que la localisation exacte des points GPS. Comme l'altitude des points a été enlevée de la mesure du GPS, ces deux imprécisions s'accumulent. Cela se voit par exemple avec des hauteurs de vol négatives. Cependant, cette estimation reste cohérente avec la littérature et donne une idée globale du risque encouru par le milan royal [3] [35]. Aussi, il vole plus souvent en-dessous qu'au-dessus

des pâles des éoliennes, ce qui confirme l'hypothèse d'un vol relativement bas pour ce rapace [3] [64].

Vitesse de vol

Le milan étudié volait principalement entre 6 et 8 m/s et a rarement dépassé les 20 m/s. Pour Bruderer & Boldt [65], la vitesse de vol moyenne obtenue était légèrement plus importante avec 10,5 m/s. Cependant, les zones d'étude ne sont pas comparables et les données n'ont pas été prétraitées de la même manière. Toujours est-il qu'en considérant qu'il faut en moyenne 30 secondes [66] pour arrêter une éolienne et que le milan vole 95% de son temps à une vitesse inférieure à 13,61 m/s, il faudrait pouvoir détecter le milan royal au plus tard à 400 m de distance pour pouvoir éviter la collision. Notons que plus tôt il est détecté, plus la marge de manœuvre est grande.

Temps de vol

Pour ce paramètre, rappelons que le calcul du temps de vol n'est pas une estimation exacte au vu des hypothèses choisies pour le déterminer. Cependant, la même méthode a été utilisée pour toutes les heures et une précision minimale de 10 données GPS par heure a été imposée. De ce fait, nous pouvons comparer les différentes valeurs obtenues au cours d'une journée. Comme nous pouvons le voir à la figure 25, le milan est plus actif aux alentours de midi, où il passe environ 40% de son temps en vol. Avant 8h du matin, il passe moins de 10% de l'heure en vol, soit environ 6 minutes par tranche d'une heure. Malgré les différentes données utilisées, cette même conclusion a été observée par Heuck et al. [3] quant à l'augmentation de l'activité sur le temps de midi.

Avec la distinction entre l'avant et l'après fauche, nous pouvons constater que le temps de vol par heure reste maximal vers midi. Cependant, ce temps diminue drastiquement après la fauche. Cette diminution peut être mise en lien avec la réduction du domaine vital après la fauche. Plusieurs hypothèses peuvent se poser. Le milan a peut-être besoin de voler moins longtemps pour trouver de la nourriture. En effet, la chasse est plus efficace quand l'herbe est moins haute [67]. Cependant, quelques jours après la fauche, une grande partie des micromammifères quittent la zone coupée, sauf certains qui vont y rester car ils y trouvent de la nourriture ou par pression territoriale dans les zones non fauchées [67].

Une autre hypothèse pourrait être le fait qu'il ne devait plus beaucoup nourrir ses jeunes après la fauche, ces derniers devenant indépendants dans le courant du mois de juillet [4] [5]. Toutefois, nous ne savons pas si l'individu étudié s'est reproduit cette année-là. Pour essayer de le savoir, nous avons observé les points GPS obtenus pendant la nuit et identifié la zone la plus probable pour l'installation du nid. Ensuite, nous avons déterminé, avec les données GPS fournies, le nombre de fois que cet oiseau revenait dans cette zone afin de voir s'il y avait une différence au cours de la saison de reproduction. Pour finir, nous avons regroupé ces données en deux périodes : de mars à juin, où les jeunes sont encore dans le nid nourris par leurs parents et de juillet à août, où les jeunes se sont généralement envolés, même s'ils ne sont pas tout de suite indépendants [1]. Nous avons ensuite réalisé un test de comparaison de pourcentage entre le nombre de retours au nid et le nombre de données GPS et la différence est fortement significative : $X^2(1, N = 63707) = 237,0884$, p-valeur $< 0,00001$. Le nombre de retours au nid diminue considérablement pendant la période juillet/août comme le montre la figure 52. Même si nous ne pouvons pas être certains de la reproduction de ce milan royal cette année-là, il est fortement probable, au vu de ces résultats qu'il ait eu des jeunes.

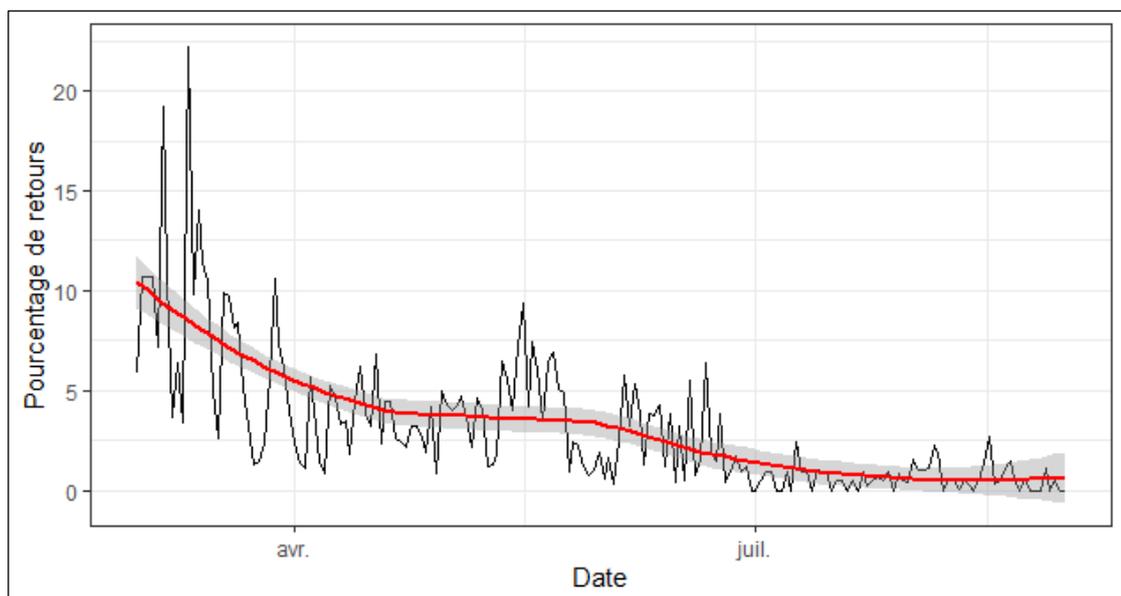


Figure 52 : Pourcentage du nombre de retours au nid au cours de la saison de reproduction

Distance parcourue

Pour rappel, lors du calcul de la distance parcourue entre deux points, nous avons fait l'hypothèse que le milan se déplaçait par le chemin le plus court entre ces deux points. Il est bien entendu peu probable que ce soit le cas, surtout avec des données espacées de

5-6 minutes. La distance parcourue en moyenne par heure est donc sous-estimée par rapport à la distance réelle mais, pour les mêmes raisons que le temps de vol, permet une comparaison entre les différentes heures et périodes. A la figure 26, nous pouvons voir aussi que la distance parcourue en moyenne sur une heure augmente en matinée pour diminuer en début d'après-midi, ce qui est donc cohérent avec le temps de vol. Quand nous additionnons les valeurs des différentes heures, nous pouvons voir que le milan parcourt près de 40 kilomètres en moyenne en une journée. Comparativement, un milan royal adulte parcourt en moyenne $134,2 \pm 37,1$ km par jour en période de migration [68].

Cette distance élevée pendant la période de reproduction est à mettre en relation avec le domaine vital où 95% des points GPS se trouvent dans un cercle de rayon d'1,2 km. Nous avons donc examiné plus en détail une journée prise au hasard. La seule condition était d'avoir minimum 10 données pour les heures allant de 5 à 21h. La figure 53 représente le domaine vital (Kernel 95%) en bleu clair ainsi que les points GPS de toute la journée du 11 juin. Les traits orange indiquent la trajectoire effectuée par le milan. Au total sur cette journée, le milan a parcouru près de 60 km et moins de 10% des points GPS se situent en dehors de ce domaine vital.

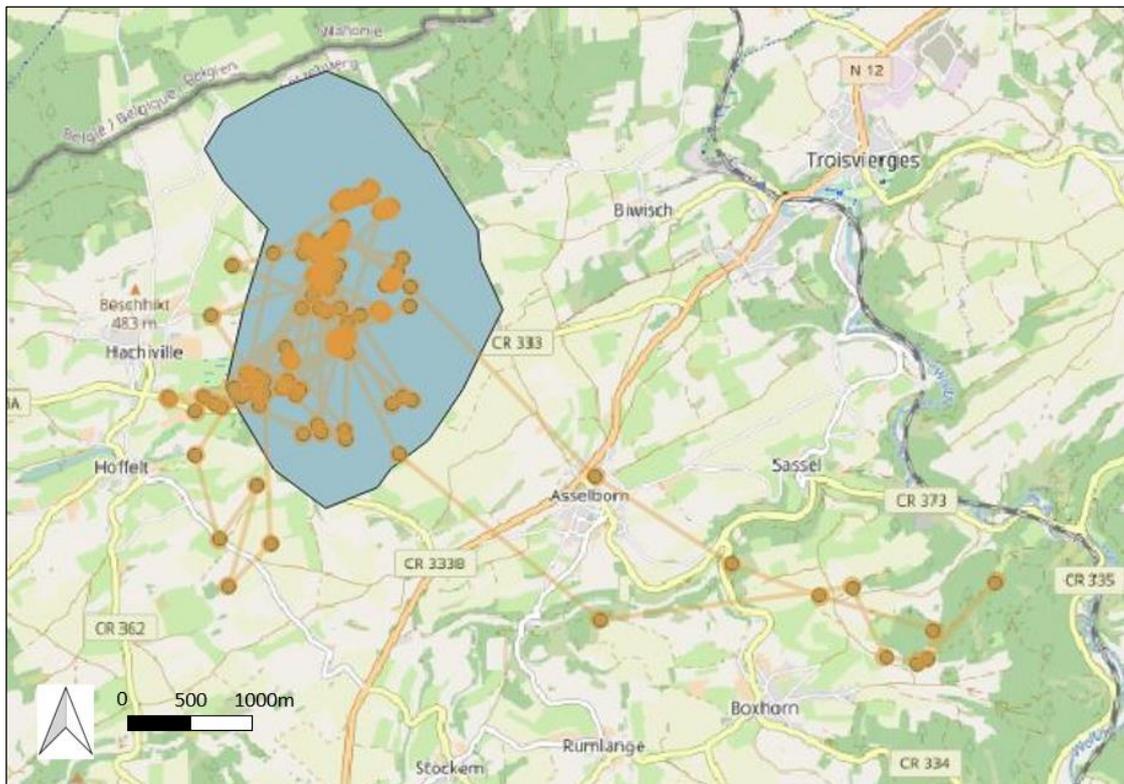


Figure 53 : Trajectoire effectuée par le milan royal le 11 juin 2020

Après la fauche, comme observé pour le temps de vol, la distance parcourue en moyenne sur une heure diminue fortement. Nous pouvons donc supposer les mêmes hypothèses que celles présentées au point précédent.

Lien entre chaque paramètre météo et le vol du milan

En analysant les graphiques présents aux figures 28 à 33, nous pouvons voir que chacun de ces paramètres météorologiques pris indépendamment les uns des autres a un impact sur le comportement de vol, que ce soit sur le temps de vol ou la distance parcourue. Cependant, aucun seuil ne peut être déterminé au-delà duquel le milan ne vole pas dans 95% des cas pour aucun de ces paramètres. L'outil de détection ne pourra donc pas être associé à des capteurs et devra fonctionner peu importe les conditions météorologiques.

En passant en revue chacun des paramètres, nous pouvons constater que la vitesse du vent ainsi que le rayonnement global ont tendance à influencer positivement l'activité du milan alors que peu de conclusions peuvent être tirées concernant la pression atmosphérique. L'humidité relative tout comme la température et les précipitations quant à eux auraient plutôt un impact négatif sur le comportement de vol. Notons encore une fois que ces variables ne sont pas indépendantes les unes des autres [69], ce pourquoi les différents modèles de régressions multiples ont été réalisés au point suivant.

Activité de vol en fonction d'une combinaison de paramètres météorologiques

Des régressions multiples ont été réalisées sur le temps de vol et la distance parcourue pour l'année entière en fonction des paramètres météorologiques (avec transformation de variables) et la méthode stepwise a à chaque fois été utilisée.

Les deux modèles réalisés pour la période de reproduction entière ont eu des résultats similaires, avec un effet négatif de l'humidité relative et de la température sur le comportement de vol et un effet positif de la vitesse du vent et du rayonnement global. Pour ce qui est des précipitations, elles n'ont impacté significativement que le temps de vol, mais pas la distance parcourue.

La comparaison entre l'avant et l'après fauche a aussi donné des résultats intéressants. Avant la fauche, les R^2 des deux modèles se situent aux alentours de 0,3/0,4 mais descend à 0,2 après la fauche. Cela voudrait dire que, après la fauche, d'autres paramètres sont plus importants pour déterminer l'activité de vol. Une hypothèse pourrait être l'attractivité que représentent les parcelles fraîchement fauchées pour cette

espèce [4]. Aussi, les variables explicatives significatives ne sont pas identiques ni au modèle sur la période de reproduction complète ni entre ces deux périodes. Après la fauche, la vitesse de vent ainsi que la température n'ont pas d'impact significatif sur le déplacement du milan et la pression atmosphérique aurait un impact négatif, contrairement à avant la fauche.

Parmi ces résultats, différents paramètres sont interpellant. Tout d'abord, l'humidité relative influence négativement le vol l'année entière mais positivement quand l'année est séparée en deux périodes alors que les précipitations influencent toujours l'activité du milan négativement. Ensuite, la pression atmosphérique influence positivement le vol avant la fauche alors qu'elle l'influence négativement pour les autres modèles. En reprenant les paramètres individuellement, la pression atmosphérique avant fauche seule a un impact positif mais qui n'est pas significatif. Cependant, pour l'humidité relative, la droite de régression linéaire est toujours descendante et la variable a un impact significatif. Dès lors, rien ne semble expliquer les résultats obtenus pour cette variable dans les modèles avant et après fauche. Il est possible que les conditions d'application ne soient en réalité pas respectées et que les modèles fournis ne soient pas valides pour les périodes avant et après fauche.

Un modèle globalement similaire a été réalisé par Heuck et al. [3] lors d'une étude en Allemagne pour comparer l'activité de vol de milans royaux sur une période de reproduction avec certains paramètres météorologiques. Ils ont trouvé qu'une durée d'ensoleillement longue, l'instabilité de l'air ainsi qu'une vitesse de vent élevée favoriseraient le comportement de vol. Au contraire, une augmentation de température et de précipitations seraient négativement corrélées au vol du milan royal. Les variables météorologiques utilisées ne sont pas tout à fait similaires mais les mêmes conclusions ont ici été trouvées pour la vitesse de vent, les températures et précipitations, même si le R^2 de leur modèle se situait autour de 0,15.

4.2. Trajectométrie

Intelligence artificielle

Avec les différents graphiques créés et soumis à l'intelligence artificielle, cette dernière n'a pas convergé et ne permet pas de déterminer l'espèce sur base des trajectoires. La raison majeure est probablement la faible base de données qui a été créée en un mois et demi à raison de 225 trajectoires dont 41 de buses variables, 108 de milans noirs et 76 de milans royaux. Il faudrait beaucoup plus de données pour pouvoir entraîner correctement l'IA afin de lui permettre de différencier ces espèces.

Le fait de standardiser la prise de vidéos pourrait aussi aider à les différencier. Ici, nous allions sur le terrain, majoritairement à deux endroits différents, et nous déplaçons l'angle de l'objectif et la caméra entre presque chaque vidéo. De plus, une caméra un peu plus performante pourrait aussi améliorer la situation. En effet, certaines vidéos n'ont pas pu être exploitées parce que l'oiseau n'y était pas détecté car il était trop loin par rapport à la résolution de la caméra.

Une distinction au moins entre groupe d'oiseaux (faucon, aigle, corvidés...) sur base de la trajectoire est possible et fonctionnelle avec l'outil DTBird [48]. Avec une base de données plus conséquente et une standardisation des prises de vidéos, nous pourrions arriver à faire la différence entre les milans (noirs et royaux) et les autres espèces.

Analyse des vitesses et accélérations

Sur base des quelques graphiques présentés aux figures 48 à 51, il est très difficile de mettre en évidence des différences significatives de vitesses et d'accélérations entre ces trois espèces. Ce sont donc des paramètres qui ne vont pas être utilisés pour la suite du projet, au profit de la trajectoire. Travailler en trois dimensions plutôt qu'en deux pourrait aussi permettre de mettre en évidence des différences sur l'utilisation de l'espace.

5. CONCLUSION

Dans le cadre de ce projet, deux questions de recherche ont été formulées. Dans un premier temps, nous avons analysé le lien qu'il pouvait y avoir entre les paramètres météorologiques et le comportement de vol du milan. Le but final était d'établir des potentiels seuils au-delà desquels le dispositif de détection pouvait être éteint parce que le milan royal avait moins de 5% de chance de voler dans ces conditions. Aucun seuil n'a pu être établi, même s'il existe un lien entre ces variables puisque près de 30% de l'activité de vol pendant la saison de reproduction peut être expliquée par la météo. Le deuxième objectif était de voir si une différence de trajectoire pouvait être détectée entre certaines espèces d'oiseaux, dans le but de reconnaître le milan royal et de ne pas arrêter les éoliennes pour une autre espèce. La base de données créée à l'occasion est encore trop limitée pour pouvoir faire cette différence. Cependant, une différence avec les oiseaux de petite taille et gros insectes est possible grâce au logiciel TRACK.

6. PERSPECTIVES

Cette étude s'inscrit dans le début d'un long projet. Plusieurs étapes sont déjà prévues pour tenter de réaliser cet outil de détection capable de reconnaître le milan royal et d'arrêter les éoliennes afin de limiter les collisions et de favoriser la coexistence entre les deux. Dans un premier temps, une base de données vidéo beaucoup plus importante doit être créée afin de tester à nouveau l'intelligence artificielle. Pour ce faire, un prototype a été réfléchi par la société APREX (figure 54). Cela permettra aussi d'avoir des vidéos standardisées, trois caméras au lieu d'une avec en plus une protection étanche.

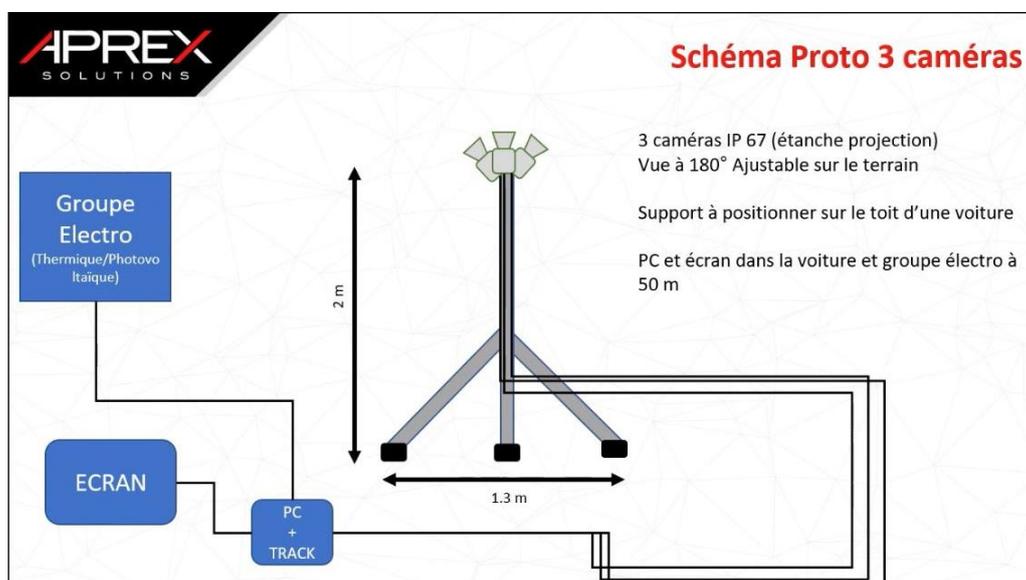


Figure 54 : Prototype
(Source : APREX Solutions)

Par la suite, si les résultats sont satisfaisants, des tests seront effectués sur le terrain avec cette fois 6 caméras disposées autour des éoliennes. Cependant, si l'étude des trajectoires venait à ne pas aboutir, d'autres options peuvent être envisagées. Nous pourrions utiliser plusieurs caméras afin d'analyser en trois dimensions la trajectoire mais aussi les vitesses et accélérations. Cela permettrait vraiment de voir comment les oiseaux occupent l'espace aérien. Une reconnaissance faciale en vol pourrait être une solution même si elle nécessiterait des caméras beaucoup plus performantes et donc plus coûteuses et que la distance de détection pourrait se voir diminuer. Sinon, une analyse des conséquences que pourrait avoir le fait de ne pas distinguer certains groupes d'oiseaux (et donc d'arrêter plus souvent les éoliennes) sur la production des éoliennes pourrait être réalisée. Dans ce cas, cela permettrait aussi de protéger plusieurs espèces face aux collisions.

7. BIBLIOGRAPHIE

- [1] LPO Alsace. (2013). Milan royal. *Etudes et Protection*. <http://alsace.lpo.fr/index.php/le-milan-royal>
- [2] Seoane, J., Viñuela, J., Díaz-Delgado, R., & Bustamante, J. (2003). The effects of land use and climate on red kite distribution in the Iberian peninsula. *Biological Conservation*, 111(3), 401–414. [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(02\)00309-9](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(02)00309-9)
- [3] Heuck, C., Sommerhage, M., Stelbrink, P., Höfs, C., Geisler, K., Gelpke, C., & Koschkar, S. (2019). *Untersuchung des Flugverhaltens von Rotmilanen in Abhängigkeit von Witterung und Landnutzung unter besonderer Berücksichtigung vorhandener Windenergieanlagen im Vogelschutzgebiet Vogelsberg*. 116. https://landesplanung.hessen.de/sites/landesplanung.hessen.de/files/FlugverhaltenRotmilan_Abschlussbericht_190923.pdf
- [4] Caillet L., Rovera G. & Schoeneich P. (2012). *Le Milan royal : un souverain menacé*.
- [5] Mougeot, F., Garcia, J. T., & Viñuela, J. (2011). Breeding biology, behaviour, diet and conservation of the red kite (*Milvus milvus*), with particular emphasis on Mediterranean populations. *Ecology and Conservation of European Dwelling Forest Raptors and Owls, November*, 190–204.
- [6] De Broyer, A., Jacob, J. P., Dujardin, R., Lampertz, S., Leirens, V., van Rijn, S., Voskamp, P., & Paquet, J. (2019). Développement de l'effectif et de la répartition du Milan royal *Milvus milvus* et du Milan noir *Milvus migrans* en Wallonie. *Aves*, 56(1), 3–27.
- [7] DGARNE/DNF. *Catalogue des espèces et habitats des sites Natura 2000 de la région wallonne : Milan royal*. http://biodiversite.wallonie.be/servlet/Repository/a074_milan_royal.pdf?ID=13026 (consulté le 10/02/2021)
- [8] van Rijn, S., & Paquet, J.-Y. (2015). *Prise en compte du risque pour l'avifaune du développement des éoliennes en Wallonie : étude de mesures appropriées concernant le Milan royal*. 32(0), 38.
- [9] AVES. *Recherche hivernale du Milan royal*. <https://www.aves.be/index.php?id=1660> (consulté le 10/02/2021)
- [10] Leblanc.G, Perrin.V, Dauverné.L, S. . (2014). Le Milan royal Plan Régional d'Actions Lorraine 2014-2024. *LOANA / Coordination Lorraine LPO / DREAL Lorraine : 101 Pages*.
- [11] Maciorowski, G., Kosicki, J., Polakowski, M., Urbańska, M., Zduniak, P., & Tryjanowski, P. (2019). Autumn migration of immature red kites *Milvus milvus* from

- a central European population. *Acta Ornithologica*, 54(1), 45–50.
<https://doi.org/10.3161/00016454AO2019.54.1.004>
- [12] ADEME. (2016). *Les avis de l'ADEME : l'énergie éolienne*. 1–10.
- [13] De Broyer, P. (2016). *Enquête Milans nicheurs de Wallonie 2015-2016 : guide de l'observateur. février 2015*.
- [14] Paquet, J., & van Rijn, S. (2015). *Premiers enseignements sur les déplacements et l'utilisation de l'espace par le Milan royal *Milvus milvus* en Haute-Ardenne*. 183–187.
- [15] Bordes, M., & Paquet, J. Y. (2019). *Régime alimentaire du Milan royal *Milvus milvus* dans les cantons de l'Est (Belgique) : impact sur la reproduction*. 29–48.
- [16] Wallonie.be. *Milan royal (*Milvus milvus*)*.<http://biodiversite.wallonie.be/fr/milvus-milvus.html?IDD=50334091&IDC=312> (consulté le 10/02/2021)
- [17] Knott, J., Newbery, P., & Barov, B. (2009). Species Action Plan for the red kite (*Milvus milvus*) in the European Union. *RSPB & BirdLife International*, 1–56.
- [18] BirdLife International. 2021. *Red List update: how we brought the Red Kite home to the UK*. <https://www.birdlife.org/worldwide/news/red-list-update-how-we-brought-red-kite-home-uk> (consulté le 10/02/2021)
- [19] BirdLife International. 2020. *Milvus milvus. The IUCN Red List of Threatened Species 2020*: e.T22695072A181651010. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2020-3.RLTS.T22695072A181651010.en> (consulté le 10/02/2021)
- [20] BirdLife International. 2015. *Milvus milvus. The IUCN Red List of Threatened Species 2015*: e.T22695072A60114427. (consulté le 10/02/2021)
- [21] Heuck, C., Brandl, R., Albrecht, J., & Gottschalk, T. K. (2013). The potential distribution of the Red Kite in Germany. *Journal of Ornithology*, 154(4), 911–921.
<https://doi.org/10.1007/s10336-013-0955-2>
- [22] De Lucas, M., Janss, G. F. E., Whitfield, D. P., & Ferrer, M. (2008). Collision fatality of raptors in wind farms does not depend on raptor abundance. *Journal of Applied Ecology*, 45(6), 1695–1703. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2008.01549.x>
- [23] Crawford, R. H. (2009). Life cycle energy and greenhouse emissions analysis of wind turbines and the effect of size on energy yield. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2653–2660. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.008>
- [24] Hötter, H., Mammen, K., Mammen, U., & Rasran, L. (2017b). Wind Energy and Wildlife Interactions. *Wind Energy and Wildlife Interactions*.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-51272-3>
- [25] PERRIN, C. (2019). *Étude des comportements des rapaces face aux parcs éoliens dans plusieurs départements de France Résumé*.

- [26] Drewitt, A. L., & Langston, R. H. W. (2006). Assessing the impacts of wind farms on birds. *Ibis*, 148(SUPPL. 1), 29–42. <https://doi.org/10.1111/j.1474-919X.2006.00516.x>
- [27] Jana, S., & Pogačnik, M. (2008). The impacts of wind farms on animal species. *Acta Veterinaria*, 58(5–6), 615–632. <https://doi.org/10.2298/AVB0806615S>
- [28] Michel, L. (2012). *Plan régional d'actions pour l'étude et la conservation du Milan royal Milvus milvus en Bourgogne*. 50.
- [29] Erickson, W. P., Johnson, G. D., & Young, D. P. J. (2002). A summary and comparison of bird mortality from anthropogenic causes with an emphasis on collisions. *Third International Partners in Flight Conference*, 1029–1042.
- [30] Derouaux, A., Everaert, J., Brackx, N., Driessens, G., Martin Gil, A., & Paquet, J.-Y. (2012). *Reducing bird mortality caused by high- and very-high voltage power lines in Belgium*. October, 56. http://www.aves.be/fileadmin/Aves/Colloque50ans/Bird_and_Powerlines_Aves_Final_Report_2012.pdf
- [31] Barrios, L., & Rodríguez, A. (2004). Behavioural and environmental correlates of soaring-bird mortality at on-shore wind turbines. *Journal of Applied Ecology*, 41(1), 72–81. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2004.00876.x>
- [32] Bellebaum, J., Korner-Nievergelt, F., Dürr, T., & Mammen, U. (2013). Wind turbine fatalities approach a level of concern in a raptor population. *Journal for Nature Conservation*, 21(6), 394–400. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2013.06.001>
- [33] Schaub, M. (2012). Spatial distribution of wind turbines is crucial for the survival of red kite populations. *Biological Conservation*, 155, 111–118. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2012.06.021>
- [34] Hötter, H., Mammen, K., Mammen, U., & Rasran, L. (2017a). *Red Kites and Wind Farms — Telemetry Data from the Core Breeding Range*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-51272-3>
- [35] Silmar, J. & al. (2012). *Projets éoliens/Note de référence pour la prise en compte de la biodiversité*. 134. <http://biodiversite.wallonie.be/servlet/Repository/28103.pdf?ID=28103>
- [36] Mammen, U. (2016). *Milan royal & éolien : Problèmes et solutions l'expérience allemande*. October.
- [37] Eichhorn, M., Johst, K., Seppelt, R., & Drechsler, M. (2012). *Model-Based Estimation of Collision Risks of Predatory Birds with Wind*. 17(2).
- [38] Madders, M., & Whitfield, D. P. (2006). Upland raptors and the assessment of wind farm impacts. *Ibis*, 148(SUPPL. 1), 43–56. <https://doi.org/10.1111/j.1474-919X.2006.00506.x>

- [39] PNPE.2018. *LE DÉVELOPPEMENT DES PARCS ÉOLIENS sur le territoire du Parc naturel des Plaines de l'Escaut et de Tournai*.
http://plainesdelescaut.be/wikipnpe/files/LeDeveloppementDesParcsEoliensSurLeTerr_fichier_caap_outil-eolien_5-nov-2018.pdf (consulté le 18/04/2021)
- [40] Arrêté du conseil d'état, section du contentieux administratif.2012.<http://www.raadvst-consetat.be/Arrets/220000/200/220204.pdf#xml=http://www.raadvst-consetat.be/apps/dtsearch/getpdf.asp?DocId=22054&Index=c%3a%5csoftware%5cdts%5csearch%5cindex%5ccarrets%5ffr%5c&HitCount=65&hits=dd+111+20b+23b+396+3a4+40f+5cb+5e2+611+61d+635+667+688+6c8+6f4+76b+782+7b0+7bb+7d2+804+826+857+86d+8b2+8de+13af+13e7+14b0+14c7+14cb+1511+1525+154c+1567+15b2+15d4+16aa+16b4+1741+1855+19dc+19df+1bd3+1c33+1c6a+1c6e+1d00+1d02+1d2c+1d9c+1dee+1e50+1e66+1e9c+1eb5+1eb7+1f25+2145+21e1+2303+2331+24af+2655+&411582021208> (consulté le 15/05/2021)
- [41] Arrêté du conseil d'état, section du contentieux administratif.2013. <http://www.raadvst-consetat.be/Arrets/224000/300/224362.pdf#xml=http://www.raadvst-consetat.be/apps/dtsearch/getpdf.asp?DocId=24269&Index=c%3a%5csoftware%5cdts%5csearch%5cindex%5ccarrets%5ffr%5c&HitCount=46&hits=ff+1e0+23c+2d2+2df+39a+3f7+497+4b8+4d8+4e9+577+59e+5ab+5cc+62b+69b+6b1+750+783+7bd+839+84b+860+87b+9fc+a10+a1d+a70+ac0+ac4+af2+b04+b15+b1f+b39+bd8+c69+d1c+d2f+d40+e2c+1077+111f+120c+13a3+&611582021208> (consulté le 15/05/2021)
- [42] DH.2015. *Éoliennes Houffalize-Gouvy : le ministre a refusé le permis !*.
<https://www.dhnet.be/regions/namur/eoliennes-houffalize-gouvy-le-ministre-a-refuse-le-permis-55e6e741357097678970722d> (consulté le 15/05/2020)
- [43] The World News.2019. *Au Luxembourg- Un milan royal a été tué par une éolienne*.
<https://theworldnews.net/lu-news/au-luxembourg-un-milan-royal-a-ete-tue-par-une-eolienne> (consulté le 15/05/2021)
- [44] Vent de raison.2018. *Jura : Des milans royaux et pas assez de vent : le projet d'éoliennes abandonné*. <https://ventderaison.org/index.php/dossiers/a-propos-de-l-eolien/41-biodiversite-environnement/1621-jura-des-milans-royaux-et-pas-assez-de-vent-le-projet-d-eoliennes-abandonne> (consulté le 15/05/2021)
- [45] Le Républicain Lorrain.2020. *La mort d'un rapace bride le parc éolien de Zondrange*.
<https://www.republicain-lorrain.fr/economie/2020/10/07/la-mort-d-un-rapace-bride-le-parc-eolien-de-zondrange> (consulté le 15/05/2021)
- [46] Safe Wind. Détecter et réduire les risques de collision de la faune volante sur les éoliennes. <https://www.biodiv-wind.com/> (consulté le 04/03/2021)
- [47] dtbird. *Bird Smart & Transparent Wind Power*. <https://dtbird.com/index.php/fr/> (consulté le 04/03/2021)
- [48] May, R., Hamre, Ø., Vang, R., & Nygard, T. (2012). Evaluation of the DTBird video-system at the Smøla wind-power plant behaviour. In *Detection Capabilities for Capturing Near-turbine Avian Behaviour*. NINA Report (Vol. 910, Issue July 2016).

- [49] Sens of Life. *Solutions de Protection des Chauves-Souris et des Oiseaux pour le Secteur Eolien*. <http://www.sensoflife.com/?lang=fr> (consulté le 04/03/2021)
- [50] Lagrange, H., Rico, P., Cosnard, C. (n.d.) *PROBIRD*, poster. https://erc.drealnfdc.fr/wp-content/uploads/2020/01/PosterVF_rencontresERC_SensOfLife.jpg (consulté le 04/03/2021)
- [51] MRAe. *Avis de la Mission régionale d'autorité environnementale de la région Nouvelle-Aquitaine sur le projet éolien des Grands Buissons sur la commune de Journet (86)*. 2020. http://www.mrae.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/p_2020_9388_eolien_des_grands_buissons_86_mrae_signe.pdf (consulté le 04/03/2021)
- [52] Les sources du Mistral. *Autour du parc éolien*. <https://sourcesdumistral.eoliencnr.fr/autour-du-parc/> (consulté le 04/03/2021)
- [53] Wallonie.be. *Demander un permis d'environnement ou un permis unique pour un établissement de classe 1 ou 2*. <https://www.wallonie.be/fr/demarches/demander-un-permis-denvironnement-ou-un-permis-unique-pour-un-etablissement-de-classe-1-ou-2> (consulté le 05/07/2021)
- [54] Climate-data. *Climat Clervaux*. <https://fr.climate-data.org/europe/luxembourg/district-diekirch/clervaux-58246/>
- [55] Ornitela. 2016. *Ornithology and Telemetry Applications*. <https://www.ornitela.com/> (consulté le 17/03/2021)
- [56] Agrimeteo. *Wetterdaten*. <https://www.agrimeteo.lu/Internet/AM/inetcntrLUX.nsf/cuhome.xsp?src=9970IUD8M1&p1=NI3U4PD5WB&p3=DH43PY041Q&p4=6B0G8RP4G8> (consulté le 28/03/2021)
- [57] Le Gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg. *Le géoportail national du Grand-Duché de Luxembourg*. <https://geoportal.lu/fr/> (consulté le 11/05/2021)
- [58] Le Gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg. 2017. *Règlement grand-ducal du 24 mai 2017 instituant des régimes d'aide en faveur de méthodes de production agricole respectueuses de l'environnement*. <https://legilux.public.lu/eli/etat/leg/rgd/2017/05/24/a545/jo> (consulté le 15/07/2021)
- [59] Nilsen, E. B., Pedersen, S., & Linnell, J. D. C. (2008). Can minimum convex polygon home ranges be used to draw biologically meaningful conclusions? *Ecological Research*, 23(3), 635–639. <https://doi.org/10.1007/s11284-007-0421-9>
- [60] DateAndTime.Info. *Le lever et le coucher du Soleil, la durée du jour à Luxembourg, Luxembourg*. <https://dateandtime.info/fr/citysunrisesunset.php?id=2960316&month=8&year=2020> (consulté le 28/03/2021)

- [61] Dormann, C. F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., Marquéz, J. R. G., Gruber, B., Lafourcade, B., Leitão, P. J., Münkemüller, T., McClean, C., Osborne, P. E., Reineking, B., Schröder, B., Skidmore, A. K., Zurell, D., & Lautenbach, S. (2013). Collinearity: A review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, 36(1), 27–46. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x>
- [62] Nally, R. Mac. (2000). Regression and model-building in conservation biology, biogeography and ecology: The distinction between – and reconciliation of – “predictive” and “explanatory” models. *Biodiversity and Conservation*, 9, 655–671.
- [63] Observations.be. *Milan royal*. https://observations.be/species/12/maps/?start_date=2016-02-02&interval=157680000&end_date=2021-01-31&map_type=grid1k (consulté le 26/05/2021)
- [64] Blanco, J. C., Hiraldo, F., & Heredia, B. (1990). Variations in the diet and foraging behaviour of a wintering red kite (*Milvus milvus*) population in response to changes in food availability. *Ardeola*, 37, 267–278.
- [65] Bruderer, B., & Boldt, A. (2001). Flight characteristics of birds: I. Radar measurements of speeds. *Ibis*, 143(2), 178–204. <https://doi.org/10.1111/j.1474-919x.2001.tb04475.x>
- [66] Eolienne pour particulier. *Systemes de sécurité pour désactiver une éolienne*. <https://www.eolienne-particulier.info/systemes-securite-eolienne/> (consulté le 15/07/2021)
- [67] Garratt, C. M., Minderman, J., & Whittingham, M. J. (2012). Should we stay or should we go now? What happens to small mammals when grass is mown, and the implications for birds of prey. *Annales Zoologici Fennici*, 49(1–2), 113–122. <https://doi.org/10.5735/086.049.0111>
- [68] García-Macía, J., Vidal-Mateo, J., De La Puente, J., Bermejo, A., Raab, R., & Urios, V. (2021). Seasonal differences in migration strategies of Red Kites (*Milvus milvus*) wintering in Spain. *Journal of Ornithology*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s10336-021-01918-5>
- [69] Kennedy, R. J. (1970). Direct effects of rain on birds: a review. *British Birds*, 63(10), 401–414.

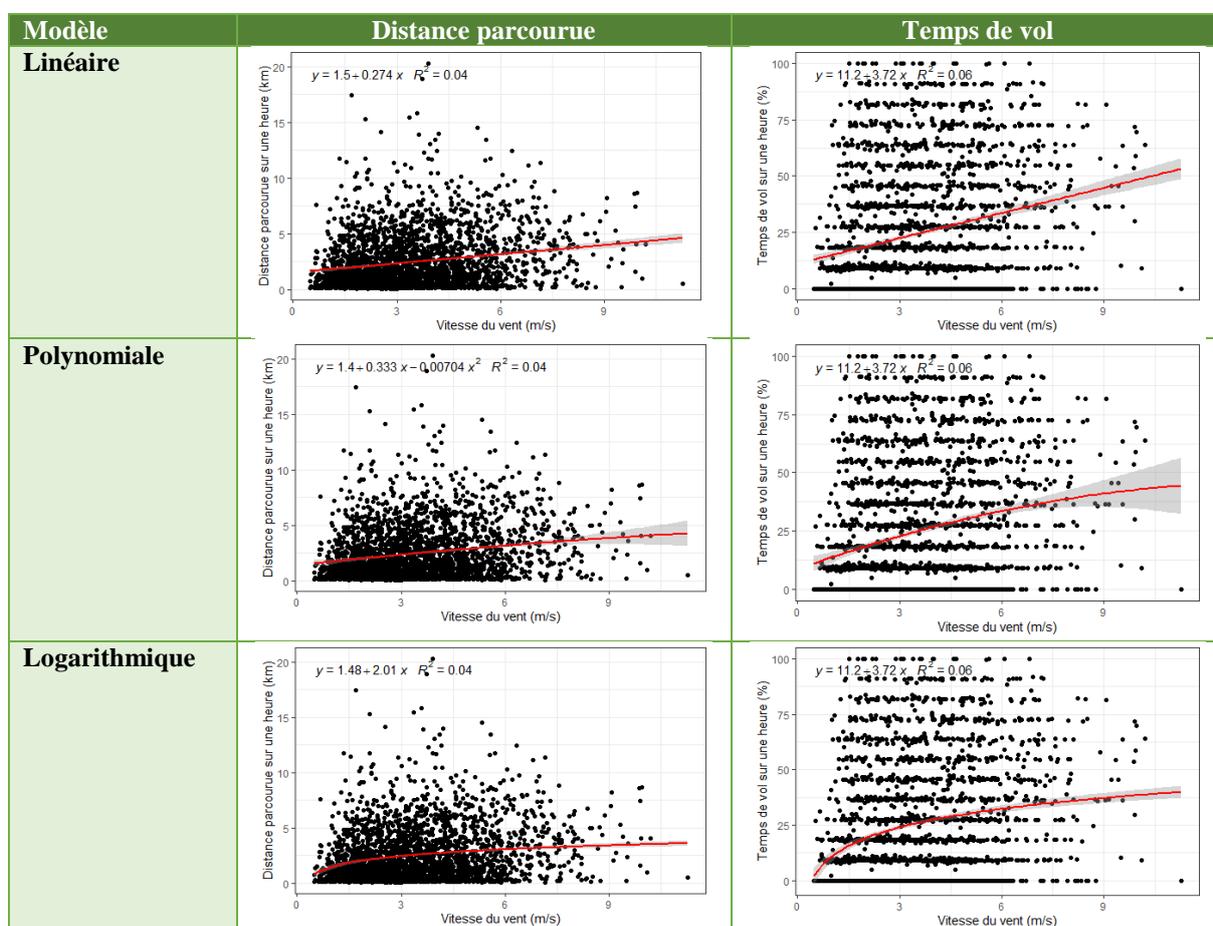
ANNEXES

Annexe 1 : Lien entre chaque paramètre météo et le vol du milan

« Oui » dans la colonne « significativité » indique que tous les paramètres de la régression sont significatifs.

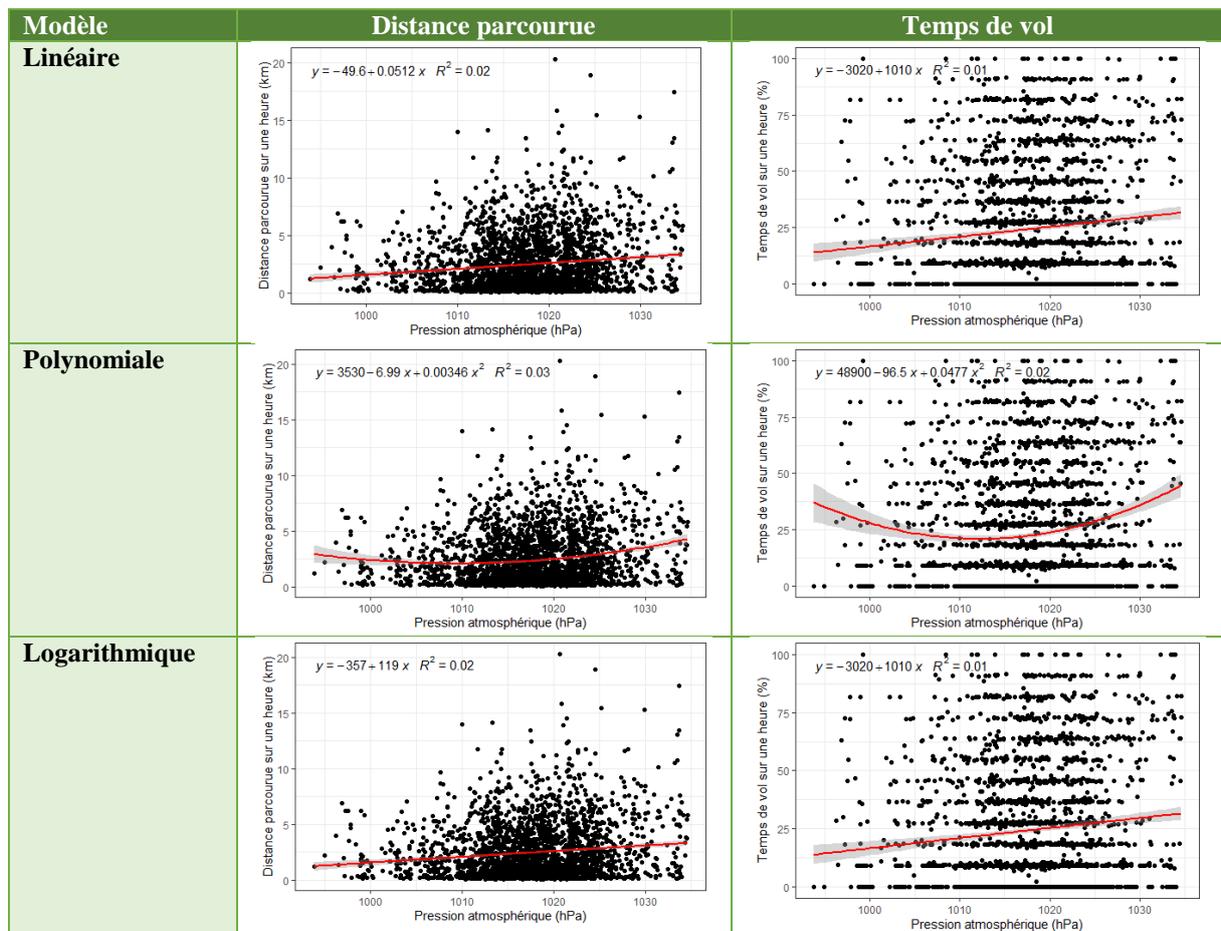
La vitesse de vent

	Modèle	Equation	R ²	F	Significativité
Distance parcourue	Linéaire	dist_km ~ Vvent	0.03597	96.28	Oui
	Polynomiale	dist_km ~ Vvent + I(Vvent^2)	0.03611	48.31	Non
	Logarithmique	dist_km ~ log10(Vvent)	0.03511	93.89	Oui
Temps de vol	Linéaire	Vol_pourcent ~ Vvent	0.05786	158.5	Oui
	Polynomiale	Vol_pourcent ~ Vvent + I(Vvent^2)	0.05874	80.47	Non
	Logarithmique	Vol_pourcent ~ log10(Vvent)	0.05811	159.2	Oui



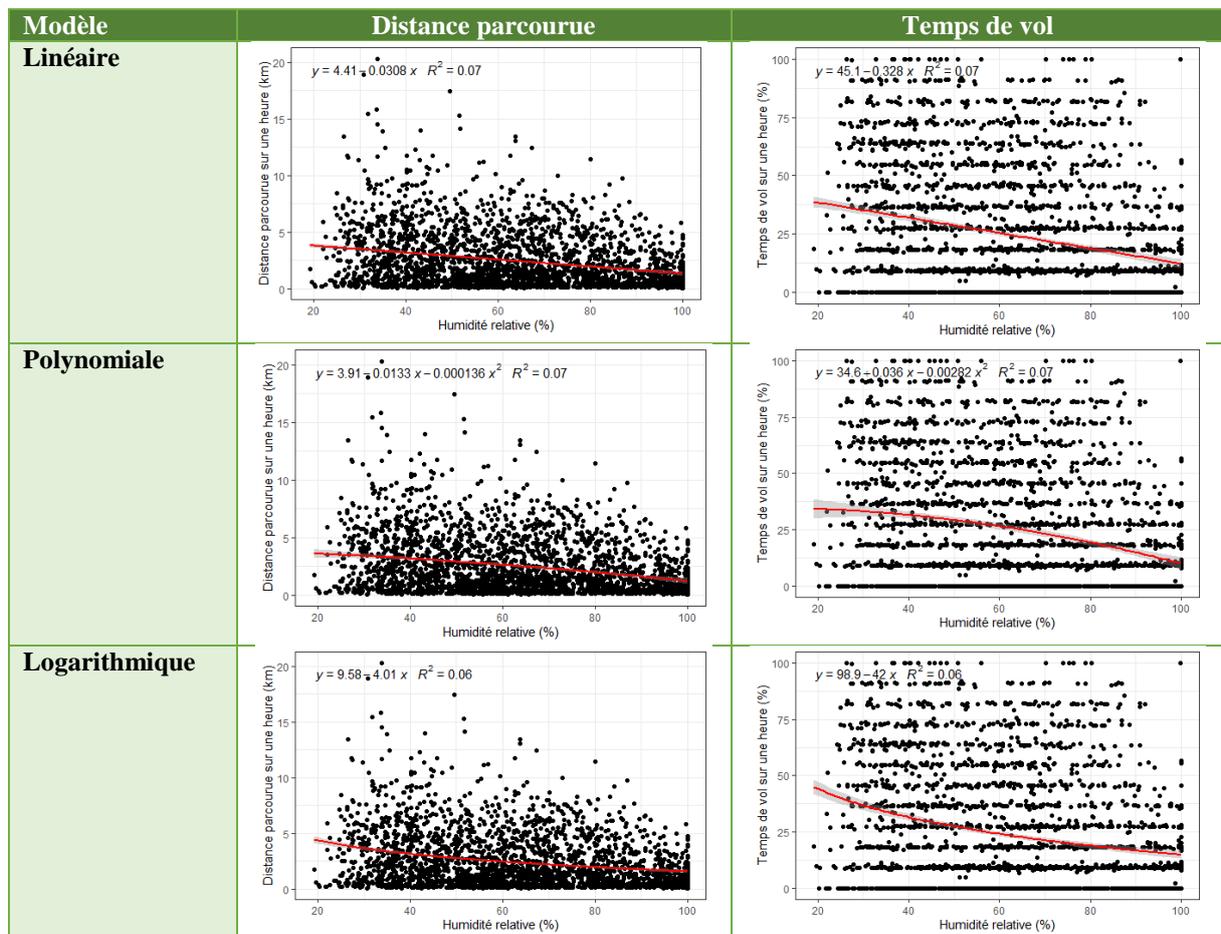
La pression atmosphérique

	Modèle	Equation	R ²	F	Significativité
Distance parcourue	Linéaire	dist_km ~ Patm	0.01686	44.24	Oui
	Polynomiale	dist_km ~ Patm + I(Patm^2)	0.02536	33.56	Oui
	Logarithmique	dist_km ~ log10(Patm)	0.01673	43.91	Oui
Temps de vol	Linéaire	Vol_pourcent ~ Patm	0.01064	27.76	Oui
	Polynomiale	Vol_pourcent ~ Patm + I(Patm^2)	0.02472	32.69	Oui
	Logarithmique	Vol_pourcent ~ log10(Patm)	0.01052	27.43	Oui



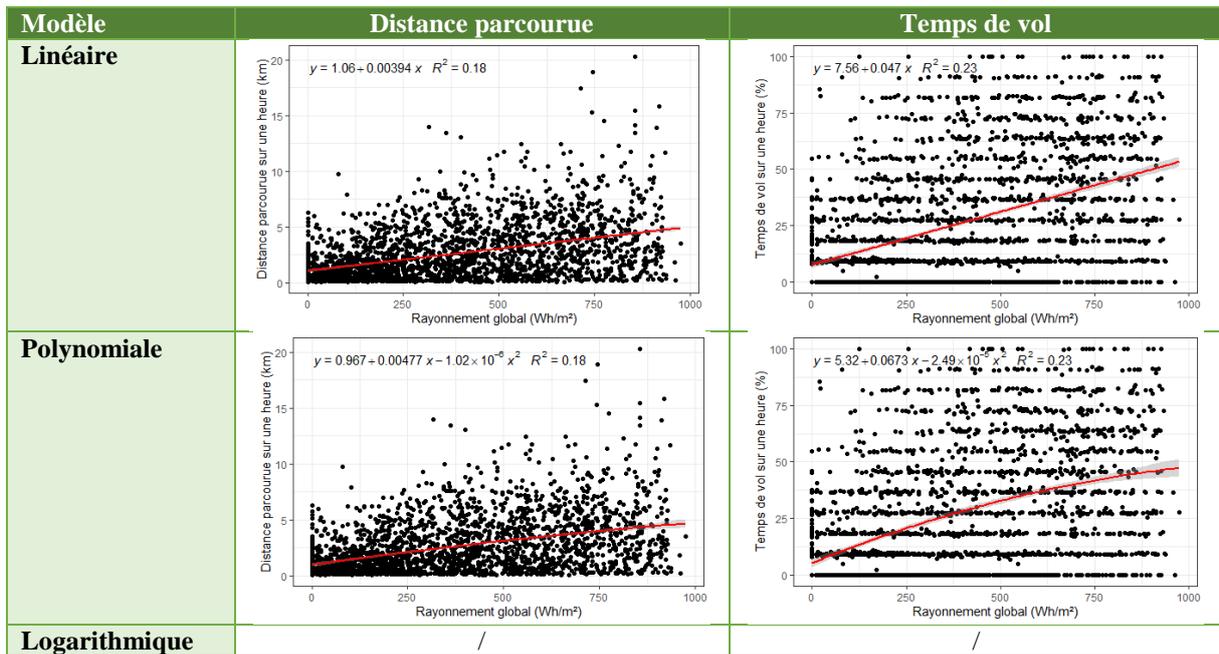
L'humidité relative

	Modèle	Equation	R ²	F	Significativité
Distance parcourue	Linéaire	dist_km ~ Hrel	0.06871	190.4	Oui
	Polynomiale	dist_km ~ Hrel + I(Hrel^2)	0.06928	95.99	Non
	Logarithmique	dist_km ~ log10(Hrel)	0.06427	177.2	Oui
Temps de vol	Linéaire	Vol_pourcent ~ Hrel	0.06798	188.2	Oui
	Polynomiale	Vol_pourcent ~ Hrel + I(Hrel^2)	0.07015	97.28	Non
	Logarithmique	Vol_pourcent ~ log10(Hrel)	0.06166	169.5	Oui



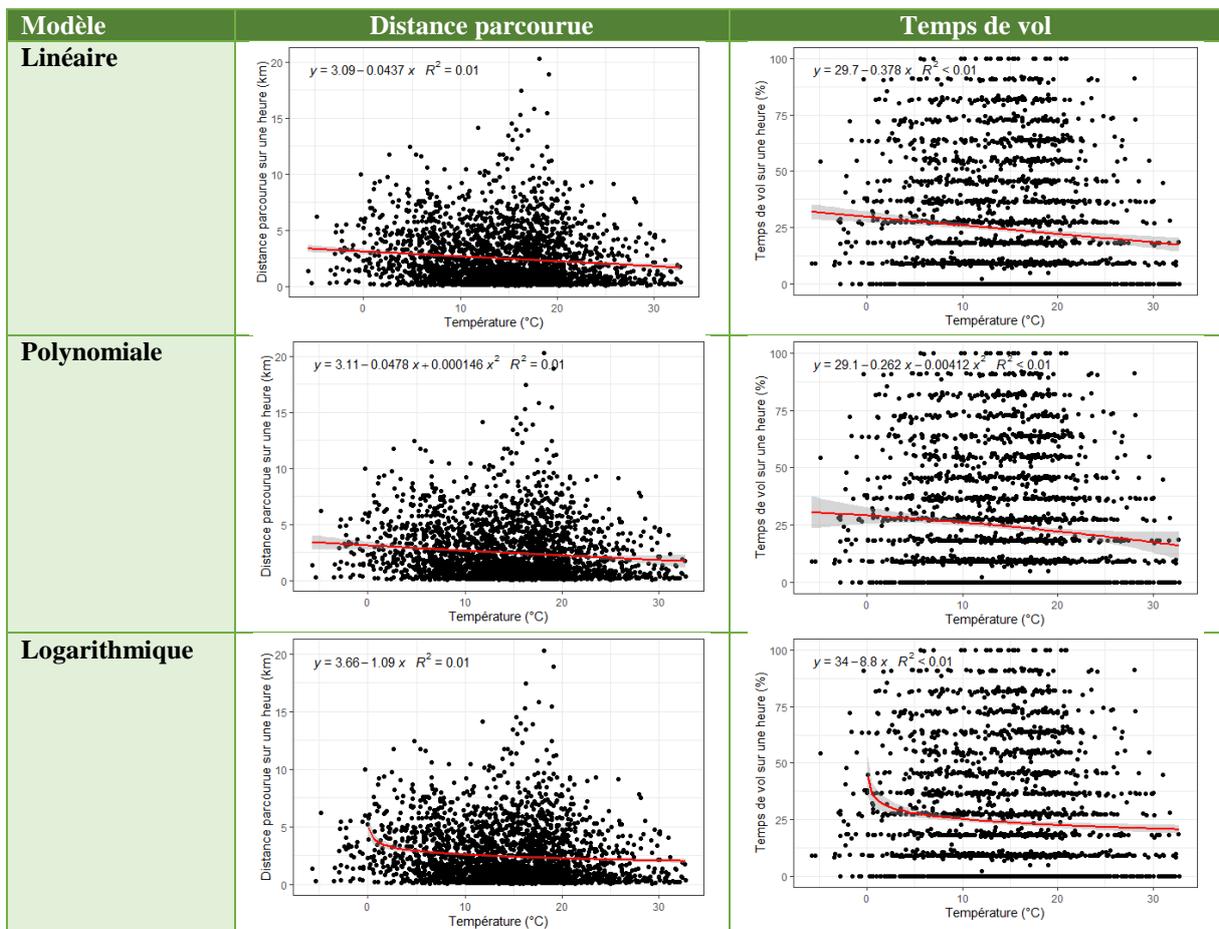
Le rayonnement global

	Modèle	Equation	R ²	F	Significativité
Distance parcourue	Linéaire	dist_km ~ Rayo_glob	0.183	578	Oui
	Polynomiale	dist_km ~ Rayo_glob + I(Rayo_glob^2)	0.1837	290.3	Non
	Logarithmique	/	/	/	/
Temps de vol	Linéaire	Vol_pourcent ~ Rayo_glob	0.2275	759.6	Oui
	Polynomiale	Vol_pourcent ~ Rayo_glob + I(Rayo_glob^2)	0.2312	387.9	Oui
	Logarithmique	/	/	/	/



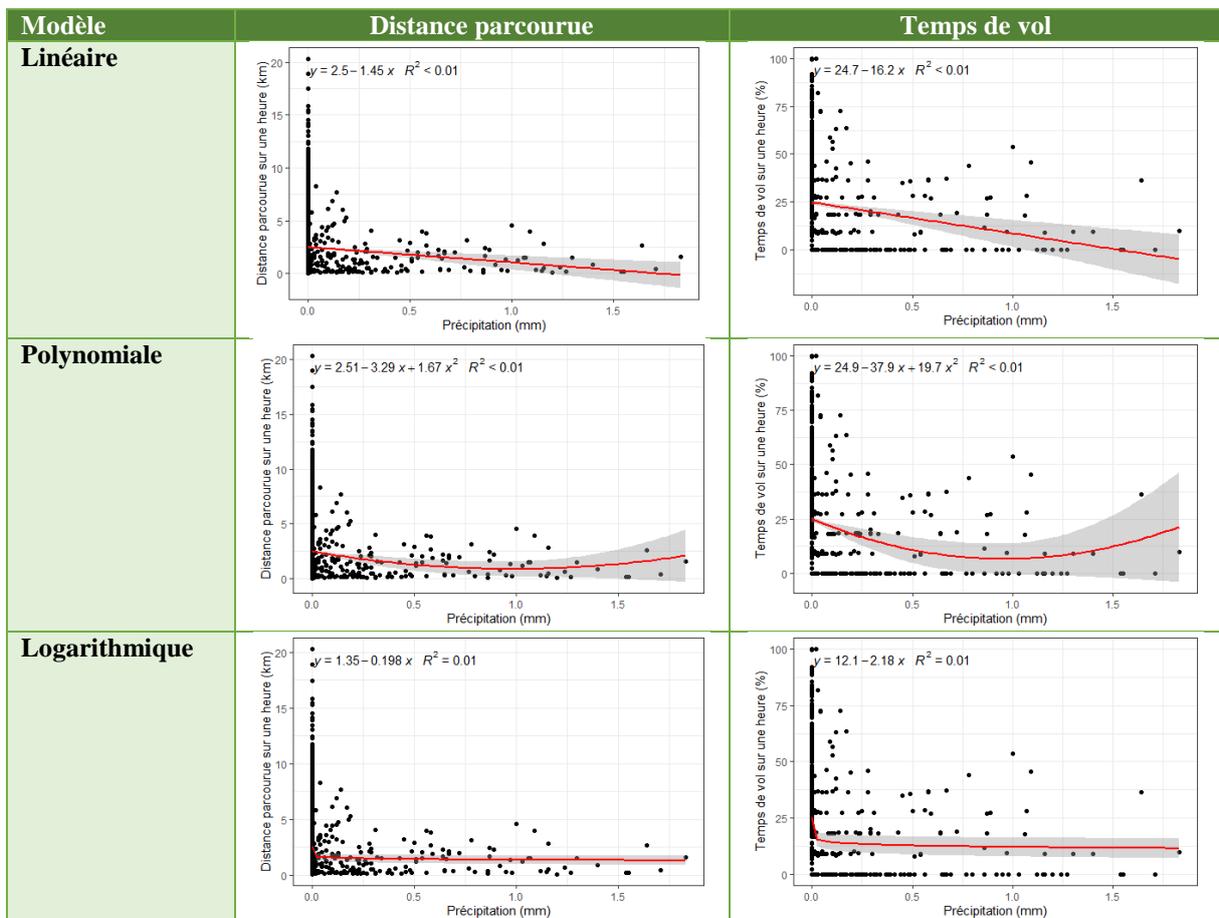
La température

	Modèle	Equation	R ²	F	Significativité
Distance parcourue	Linéaire	dist_km ~ T_2m	0.01276	33.36	Oui
	Polynomiale	dist_km ~ T_2m + I(T_2m^2)	0.01278	16.69	Non
	Logarithmique	dist_km ~ log10(T_2m)	0.01401	36.12	Oui
Temps de vol	Linéaire	Vol_pourcent ~ T_2m	0.008347	21.72	Oui
	Polynomiale	Vol_pourcent ~ T_2m + I(T_2m^2)	0.00843	10.96	Non
	Logarithmique	Vol_pourcent ~ log10(T_2m)	0.00792	20.29	Oui

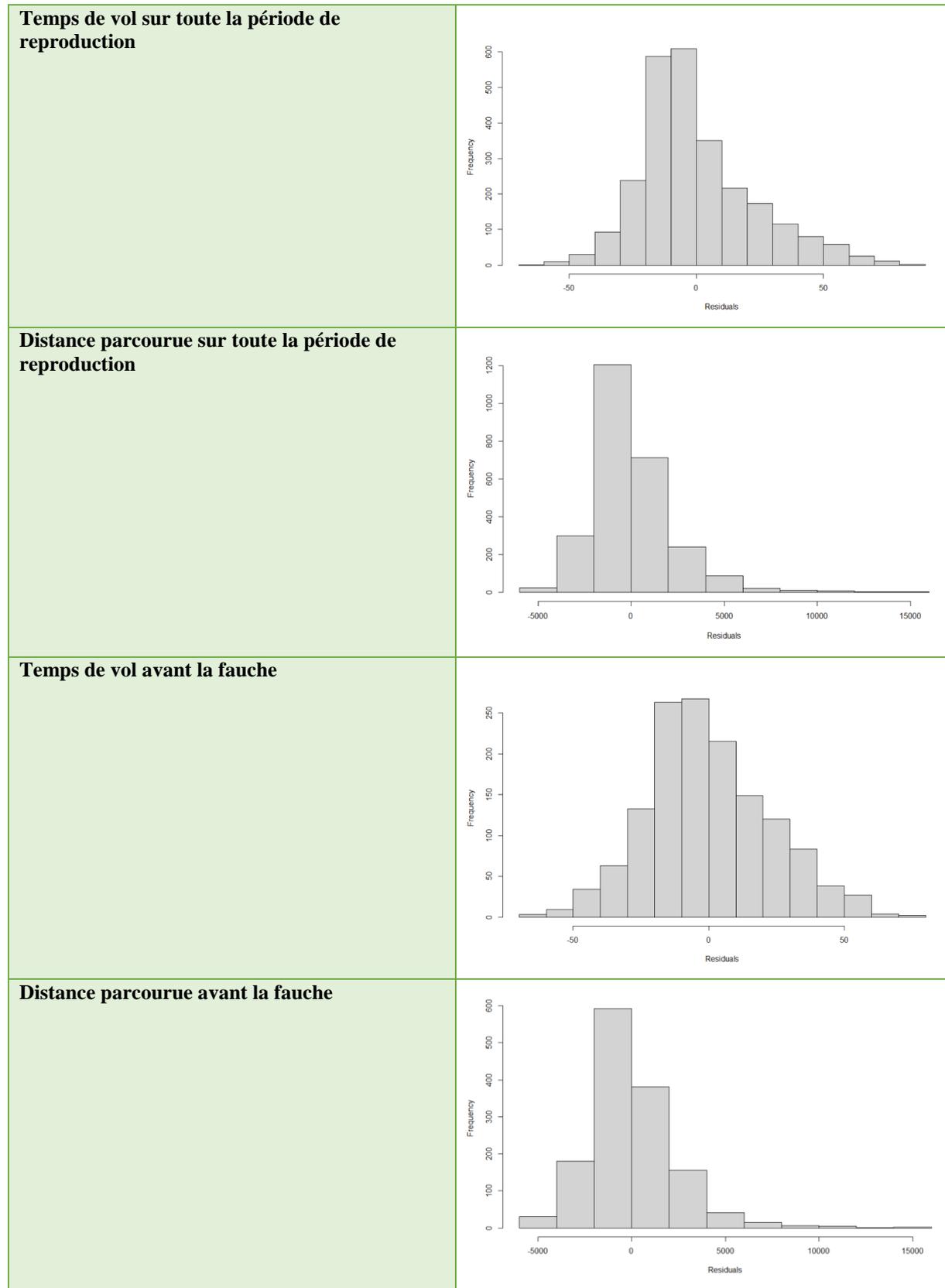


Les précipitations

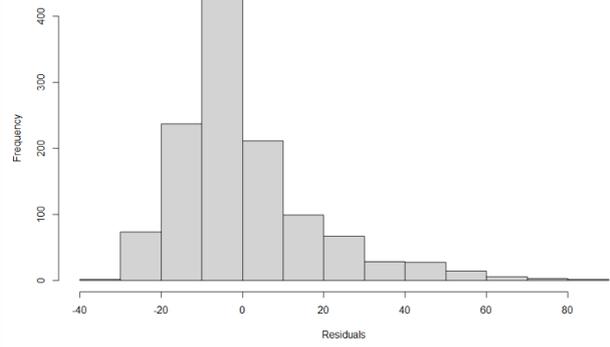
	Modèle	Equation	R ²	F	Significativité
Distance parcourue	Linéaire	dist_km ~ precip	0.006965	18.1	Oui
	Polynomiale	dist_km ~ precip + I(precip^2)	0.008761	11.4	Oui
	Logarithmique	dist_km ~ log10(precip)	0.0123	32.13	Oui
Temps de vol	Linéaire	Vol_pourcent ~ precip	0.007622	19.81	Oui
	Polynomiale	Vol_pourcent ~ precip + I(precip^2)	0.00979	12.75	Oui
	Logarithmique	Vol_pourcent ~ log10(precip)	0.01304	34.08	Oui



Annexe 2 : Distribution des résidus pour les différents modèles



Temps de vol après la fauche



Distance parcourue après la fauche

