
Application de la télédétection à la quantification de la ressource mellifère d'un paysage en relation avec la dynamique d'un rucher d'*Apis mellifera* L. Approche méthodologique

Auteur : Herman, Victor

Promoteur(s) : Francis, Frédéric

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : sciences et technologies de l'environnement, à finalité spécialisée

Année académique : 2020-2021

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/12971>

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.

Application de la télédétection à la quantification de la
ressource mellifère d'un paysage
en relation avec la dynamique d'un rucher d'*Apis*
mellifera L.
Approche méthodologique

<HERMAN VICTOR>

TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME
DE MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE
L'ENVIRONNEMENT

ANNÉE ACADEMIQUE 2020 - 2021

Promoteurs :

Pr. Frédéric Francis

Pr. Philippe Lejeune

Présidente de jury :

Pr. Catherine Charles

© 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 1de Gembloux Agro-Bio Tech. Le présent document n'engage que son auteur.

© Any reproduction of this document, by any means whatsoever, may only be made with the authorization of the author and the academic authority² of Gembloux Agro-Bio Tech. This document is the soleresponsibility of its author

1 L'autorité académique est représentée par le promoteur, membre du personnel enseignant de GxABT (M Frédéric Francis)

2 The academic authority is represented by the thesis supervisor, a member of the GxABT teaching staff (M Frédéric Francis)

Application de la télédétection à la quantification de la
ressource mellifère d'un paysage
en relation avec la dynamique d'un rucher d'*Apis*
mellifera L.
Approche méthodologique

<HERMAN VICTOR>

TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME
DE MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE
L'ENVIRONNEMENT

ANNÉE ACADEMIQUE 2020 - 2021

Promoteurs :

Pr. Frédéric Francis

Pr. Philippe Lejeune

Présidente de jury :

Pr. Catherine Charles

Remerciements :

Je voudrais tout d'abord remercier mes promoteurs M Francis et M Lejeune qui par leur encadrement au sein du département d'entomologie et du département de forêt m'ont permis de mettre en place le nécessaire pour la réalisation de ce travail de fin d'études.

Un grand merci à toi Greg qui dans un premier temps a accepté cette proposition de projet. Merci aussi pour le suivi régulier et précis que tu as fournis depuis le début jusqu'à la remise de ce travail. Tes conseils tout au long de ces derniers six mois m'ont fortement aiguillé et permis de prendre les bonnes directions. Merci également pour l'enthousiasme dont tu as pu témoigner à plusieurs reprises. Un grand merci également aux autres membres du département d'entomologie pour votre bonne humeur en pause-café.

Je voudrais également remercier le département forêt qui m'a plus que bien accueilli et qui m'a permis d'accéder à l'ensemble du matériel de télédétection nécessaire pour la bonne réalisation de ce projet. La confiance qui m'a été accordée pour le prêt du matériel et l'accès aux PC du département m'ont permis d'avancer considérablement dans ce travail.

Plus précisément, un grand merci à Cédric pour ta bonne humeur permanente et pour ta disponibilité sur le terrain malgré un emploi du temps bien chargé ! Un tout grand merci également à Samuel, véritable génie en informatique ! Tes conseils pour la mise à jour de mon Windows m'ont permis de gagner un temps précieux ! Blague à part, tes nombreux services pour résoudre mes multiples problèmes informatiques ou encore diminuer le temps de traitement des données m'ont été d'une aide considérable. Un grand merci également à Corentin qui m'a bien conseillé dans l'élaboration du code R de traitements d'images, ne comptant pas ses heures pour venir en aide à un TFiste en galère sur R!

Merci également à toutes les personnes qui m'ont aiguillées lors de la réalisation de ce travail par plusieurs entretiens. Je pense notamment à M Brostaux pour ses conseils statistiques, Léo Huylenbroeck, Alban Langlois et M Pierreux.

Evidement un tout grand merci à toutes les personnes chez qui j'ai pu installer les ruchers pour la réalisation de ce travail : Henry et Daphnée, Marc et Irène, Cyril, Céline, Marie et You ! Big up particulier pour mon parrain de baptême ! Content d'avoir toujours pu garder contact avec

vous notamment par l'installation des ruches ! De la part des abeilles, un tout grand merci pour la ressource abondante en nectar que votre magnifique potager leur procure ! Vous n'avez pas eu besoin de lire un travail comme celui-ci pour comprendre l'enjeu qu'il y a derrière tout ça ! Merci également à toutes les personnes qui m'ont permis de survoler leur terrain : M Van Eyck, M Geerts, M Bedoret, M van Deloïse, M Velthuis et les copains du Liroux.

Merci à mes proches pour leur soutien dans ce travail et leur relecture. Je pense évidemment à mes parents et mes frères et sœur. Enimie pour tes talents de mise en page (« *Enimie is the new LATEX* »). Un grand merci du fond du cœur à toi Fannie qui m'a permis de prendre d'incroyables bouffées d'air alors que j'étais parfois un peu trop préoccupé par ce projet. Merci pour tes conseils, ton soutien, ta motivation et ta confiance ! J'espère que le poulain a fini à une bonne place de la course !

Merci à toi Raph, cher coéquipier de rédaction de TFE qui m'a permis de relativiser en toute circonstance sur les échéances et les impératifs lié à ce dernier. Merci pour ces bonnes rigolades ! Merci également à tous les autres étudiants et Tfistes qui par leur présence permettait d'instaurer une ambiance de groupe et d'étude.

Merci aux potos du local de travail dont je ne citerai par le nom pour des raisons de confidentialité (mais qui rime fortement avec « poto »...), Matthieu, Noémie, Nico, Laurent (« *mouilléqđçatouche* »), Noé pour leur soutien et leur talent en informatique (la machine de R se reconnaîtra).

Merci également à la DREAM TEAM EPRES ! Audrey, Matthieu et Yannis ! Rien n'est à rajouter, tout est dans le nom ! Merci à vous Sam et Max pour les soirées détentes sympas qui font toujours du bien quand on est en TFE !

Merci à Tanguy dumortier et toute son équipe qui m'ont permis de prendre le soleil, le temps que ça tourne, lors d'une simulation de comptage de fleurs d'aubépines.

Merci également à mes chers kokoteurs de ce fameux kot de l'Eglise ! Une fameuse expérience !

Une petite pensée aussi à l'Agruche qui a éveillé en moi cette passion pour les abeilles !

Abstract

At European scale, the pollinating entomofauna is suffering from the negative externalities of the second agricultural revolution, in particular through the use of phytosanitary products and the drastic reduction of melliferous resources, both in abundance and diversity. This reduction, linked to the landscape homogenisation, can be considered as extremely worrying. Wallonia is not spared and more than 25% of higher plants are considered threatened or highly threatened. To consider environmental management adapted to the pollinating entomofauna, such as the implementation of restoration and conservation programmes aimed at a continuous nectariferous resource, it is essential to be able to quantify the melliferous resource at the landscape level.

While manual quantification is time-consuming and only allows small proportion sampling of the study area, this thesis presents a method for quantifying honey resources at the landscape scale using remote sensing. It is demonstrated in this thesis that it is possible, by elaborating discrimination indices resulting from the processing of aerial images acquired by drone and with a 3 cm resolution, to highlight and quantify the flowering of the main melliferous species of Wallonia in vernal season (rape, willows, dandelions, fruit trees, wild cherry trees, hawthorns). The study area consists of 3 zones of 2 km radius around experimental apiaries located in Loncée, Grand-Manil and Corroy-le-Château. Thanks to the work of Baude et. al (2016), the nectariferous resource of the sampled landscape classes is estimated by multiplying the number of floral units of a surveyed species (in the sampled class) by its own nectariferous production. Then the resource of the study area can be estimated by extrapolation. Environmental managers, biodiversity researchers and beekeepers may use the nectariferous quantification methodology developed in this work as a decision-making tool. In this thesis, consistent production data are obtained for the "orchard", "grassland" and "rape fields" landscape classes.

Over a period of 6 weeks, these nectar productions of the landscape are then related on a weekly time step to different variables measured on the 3 apiaries:

- The average hourly gain in nectar and pollen, determined from weight data acquired at regular 30-minute intervals
- The diversity of the collected pollen
- The average mortality

- The average varroa infestation

To take the bee colonies development into account, these variables are standardised for a quantity of 15,000 foragers and taken from records made on similar weather conditions days. The number of foraging bees leaving the hive each morning is determined by analysing the time derivative of the hive weight curve. The results of the comparison show several relationships between pollen gains and nectar production in the 'orchard' and 'meadow' classes, which would suggest that there is a link between the quantification of floral resources carried out with remote sensing and the floral resource actually present in the field. Furthermore, some relationships between 'rape' and 'orchard' nectar production and the biological traits of the *Apis mellifera* L. bee colonies can be assumed, especially concerning the number of foragers and the colonies' larval mortality.

Key words: *Apis mellifera* L.; Remote sensing; Honey resource; Quantitative assessment; Methodological approach, Population dynamics, Vernal Season, Belgium

Résumé

A l'échelle européenne, l'entomofaune pollinisatrice souffre des externalités négatives de la seconde révolution agricole, notamment par l'utilisation de produits phytosanitaires et par la diminution drastique tant en abondance qu'en diversité, des ressources mellifères. Cette diminution liée à l'homogénéisation du paysage peut être considérée comme extrêmement préoccupante. La Wallonie n'est pas épargnée et plus de 25% des plantes supérieures sont considérées comme menacées à très menacées. Afin d'envisager des gestions de l'environnement adaptées à l'entomofaune pollinisatrice, telle que la mise en place de programmes de restauration et de conservation visant une ressource nectarifère continue, il est primordial de pouvoir quantifier la ressource mellifère à l'échelle du paysage.

Alors que la quantification manuelle est chronophage et ne permet d'échantillonner qu'une faible proportion de la zone étudiée, ce travail de fin d'études présente une méthode de quantification des ressources mellifères à l'échelle du paysage via des moyens de télédétection. Il est démontré dans ce travail qu'il est possible, par l'élaboration d'indices de discrimination issus du traitement d'images aériennes acquises par drone et dotées d'une résolution de 3 cm, de mettre en évidence et de quantifier les floraisons des principales essences mellifères de Wallonie en phénosaison vernale (colza, saules, pissenlits, fruitiers, merisiers, aubépines). La zone d'étude se compose de 3 zones de 2 kms de rayon autour de ruchers expérimentaux situés à Loncée, Grand-Manil et Corroy-le-Château. Grâce aux travaux de Baude et. al (2016), la ressource nectarifère des classes de paysage échantillonnées est estimée en multipliant le nombre d'unités florales d'une essence recensée (dans la classe échantillonnée) par sa production nectarifère propre. Ensuite, la ressource de la zone d'étude peut être estimée par extrapolation. Les gestionnaires de l'environnement, les chercheurs en biodiversité ou encore les apiculteurs pourront utiliser la méthodologie de quantification nectarifère développée dans ce travail comme outil d'aide à la décision. Dans ce travail, des données cohérentes de production sont obtenues pour les vergers, les prairies et les champs de colza.

Sur une période de 6 semaines, ces productions nectarifères du paysage sont ensuite mises en relation selon un pas de temps hebdomadaire, avec différentes variables mesurées sur les 3 ruchers :

- Le gain horaire moyen en nectar et en pollen, déterminé à partir de données de poids acquises à intervalles réguliers de 30 minutes

- La diversité des rentrées en pollen
- La mortalité moyenne
- L'infestation moyenne au varroa

Afin de tenir compte du développement des colonies d'abeilles, ces variables sont standardisées pour une quantité de 15 000 butineuses et prélevées au départ d'enregistrements effectués pour des journées durant lesquelles les conditions météorologiques sont similaires. Le nombre d'abeilles butineuses sortant chaque matin de la ruche est déterminé par l'analyse de la dérivée temporelle de la courbe du poids de cette ruche. Les résultats de la comparaison mettent en évidence plusieurs relations, notamment entre les gains en pollen et la production nectarifère des classes « verger » et « prairie » du rucher « moyen », ce qui permettrait de supposer qu'il existe un lien entre la quantification des ressources florales réalisée par télédétection et la ressource florale réellement présente sur le terrain. De plus, certaines relations peuvent être supposées entre la production de nectar du colza et des vergers avec les traits biologiques des colonies d'abeilles *Apis mellifera L.*, notamment en ce qui concerne le nombre de butineuses et la mortalité larvaire des colonies.

Mots clés : *Apis mellifera L.* ; Télédétection ; Ressource mellifère ; Evaluation quantitative ; Approche méthodologique, Dynamique de population, Phénosaison Vernale, Belgique

Table des matières

1) Introduction.....	1
2) Etat de l'art.....	4
2.1) Evaluation des ressources nectarifères en paysage rural	4
2.1.1) Définition de la flore mellifère	4
2.1.2) L'intérêt apicole des fleurs	4
2.1.3) La qualité mellifère d'un paysage.....	5
2.1.4) Evolution de la qualité mellifère des paysages	5
2.1.4.1) Homogénéisation du paysage	6
2.1.4.2) Empoisonnement de l'environnement aux produits phytosanitaires	8
2.1.5) Impact de l'évolution du paysage sur l'entomofaune pollinisatrice	8
2.1.5.1) Impact sur l'ensemble de l'entomofaune	8
2.1.5.2) Importance de la diversité des essences mellifères pour l'entomofaune pollinisatrice	8
2.1.5.3) Influence de la répartition temporelle des floraisons (spectre phénologique) sur	
l'entomofaune pollinisatrice	9
2.1.5.4) Impact des produits toxiques sur l'entomofaune pollinisatrice.....	9
2.2) Quantification des ressources nectarifères dans l'environnement	10
2.2.1) Revue de la littérature.....	10
2.2.2) Identification des classes d'occupation du sol expliquant la majorité de la production	
nectarifère	11
2.2.3) Identification des essences expliquant la majorité de l'offre nectarifère de	
l'environnement.....	11
2.3) Télédétection et quantification des ressources nectarifères dans l'environnement	12
2.3.1) Introduction à la télédétection	12
2.3.2) Utilisation de la télédétection à différentes fins.....	13
3) Matériel et méthode	15
3.1) Objectif et mise en contexte générale de l'étude.....	15
3.1.1) Objectif de l'expérience	15
3.1.2) Localisation du site expérimental	15
3.1.3) Définition de la période d'étude :	16
3.1.4) Présentation des ruchers	16
3.1.5) Dynamique des colonies	16
3.2) Dispositif mis en place et matériel utilisé pour la gestion apicole.....	17
3.2.1) Dispositif mis en place pour la quantification des variables du rucher	17
3.2.1.1) Balance « Bee to Beep ».....	17

3.2.1.2) Trappes à pollen	18
3.2.1.3) Bac à abeilles mortes.....	18
3.2.1.4) Plateaux à varroas	19
3.2.3) Dispositif mis en place pour la quantification des variables météorologiques	19
3.3) Dispositif mis en place et matériel utilisé pour l'acquisition des données par télédétection	20
3.3.1) Définition de la zone d'étude.....	20
3.3.2) Définition et sélection des classes de paysages d'intérêt.....	20
3.3.2.1) Prairies et vergers	21
3.3.2.2) Champs de colza.....	21
3.3.2.3) Haies, habitats semi-naturels et forêts	21
3.3.2.4) Bordures de champs.....	22
3.3.3) Définition de la flore d'intérêt mellifère	23
3.3.4) Définition des zones de vol	24
3.3.5) Définition des plans de vol.....	27
3.3.6) Préparation du terrain : disposition et géoréférencement des cibles	27
3.3.7) Matériel d'acquisition des images aériennes.....	29
3.4) Protocole d'acquisition des variables apicoles	29
3.4.1) Relevé des données.....	29
3.4.1.1) Données de poids.....	29
3.4.1.2) Données de pollen	29
3.4.1.3) Données de mortalité.....	31
3.4.1.4) Données d'infestation au Varroa	31
3.4.1.5) Données de récolte de miel	32
3.5) Protocole de quantification de la floraison par télédétection.....	32
3.5.1) Définition de la fréquence d'échantillonnage.....	32
3.5.2) Sélection des jours et des tranches horaires de vol.....	33
3.5.3) Acquisition des images par drones	33
3.5.4) Quadra.....	34
3.5.5) Suivi de la floraison	36
3.6) Analyse et traitement des données apicoles (logiciel R)	37
3.6.1) Traitement des données de poids.....	37
3.6.1.1) Données journalières	37
3.6.1.2) Comparaison entre le gain brut et le gain net	40
3.6.1.3) Données hebdomadaires :	40
3.6.2) Traitement des données de pollen	40
3.6.3) Traitement des données de mortalité	40

3.6.4) Traitement des données d'infestation au varroa.....	41
3.7) Analyse, traitement des images et mise en évidence des fleurs d'intérêt (logiciel R)	41
3.7.1) Construction des cartes avec Agisoft	41
3.7.2) Discrimination et mise en évidence des pixels d'intérêt à l'aide d'indices construits à partir des bandes RGB.....	41
3.7.3) Traitement des zones quadras	42
3.7.3.1) Identification des zones quadras sur les cartes via QGIS.....	42
3.7.3.2) Détermination d'un facteur de conversion par méthode de mise en évidence.....	43
3.7.4) Traitement de l'entièreté des cartes.....	43
3.7.5) Extrapolation de la ressource en nectar à l'ensemble de la zone d'étude pour chaque semaine	44
3.8) Evaluation des relations entre la production de nectar de l'environnement et les variables apicoles observées (logiciel R).....	45
4) Présentation des résultats.....	45
4.1) Description du jeu de données	45
4.2) Quantification de la ressource nectarifère	46
4.2.1) Présentation des résultats d'analyse d'image :	46
4.2.1.1) Mise en évidence des essences mellifères d'intérêt.....	46
4.2.1.2) Mise en évidence de plusieurs essences mellifères d'intérêts sur les zones.....	49
4.2.1.3) Mise en évidence de l'évolution de la floraison de colza durant la période d'expérimentation.....	50
4.2.2) Dynamique hebdomadaire des densités de productions de nectar (kg/ha) par classe de paysage.....	52
4.2.3) Dynamique hebdomadaire des productions de nectar par classe de paysage	53
4.3) Résultat des relevés de données apicoles.....	54
4.3.1) Dynamique du nombre de butineuses.....	54
4.3.2) Dynamique des différents indicateurs de gains de nectar.....	54
4.3.3) Dynamique de la récolte de pollen	57
4.3.4) Dynamique de la diversité des pollens récoltés.....	57
4.3.5) Dynamique de la mortalité	58
4.3.6) Dynamique de l'infestation au varroa.....	60
4.3.7) Récoltes de miel réalisées sur chacun des ruchers	61
4.3.8) Analyse des miels des trois zones d'études	61
4.4) Présentation des résultats de l'étude de la relation entre la production de nectar du paysage et les variables quantifiées sur les ruches.	61
4.4.1) Présentation des coefficients de détermination linéaires de Pearson (R^2) entre l'ensemble des variables apicoles observées et les productions nectarifères environnementales (par classe de paysage).....	61

4.4.1.1) Coefficient de détermination linéaires de Pearson (R^2) : Rucher de Corroy-le-Château	62
4.4.1.2) Coefficient de détermination linéaires de Pearson (R^2) : Rucher de Grand-Manil	62
4.4.1.3) Coefficient de détermination linéaires de Pearson (R^2) : Rucher de Lonzée	63
4.4.1.4) Coefficient de détermination linéaires de Pearson (R^2) : Rucher moyen.....	64
4.4.2) Illustration des relations retenues parmi les 3 ruchers et le rucher moyen.....	65
4.4.2.1) Relations mises en évidence pour le rucher de GM	65
4.4.2.2) Relations mises en évidence pour le rucher de Lonzée	66
4.4.2.3) Relations mises en évidence pour le rucher moyen	67
5) Discussion et perspectives	68
5.1) Avantages et limites de l'échantillonnage par télédétection	68
5.1.1) Avantage de l'échantillonnage par télédétection.....	68
5.1.2) Limites de l'échantillonnage par télédétection	69
5.1.3) Limites des variables utilisées pour quantifier la dynamique des ruchers	69
5.3) Discussion des résultats de relevés.....	70
5.4) Discussion des résultats de production de nectar	71
5.5) Discussion de l'étude des relations entre les variables apicoles et la production nectarifère de l'environnement.....	73
5.6) Limitations de ce travail	75
5.7) Perspectives	76
6) Conclusion	78
7) Bibliographie.....	80
Annexes (Figures)	87
Annexes (Dossiers)	118

Table des Tableaux

Tableau 1 Fréquence d'acquisition des variables apicoles.....	16
Tableau 2 : Répartition de la zone d'étude dans les classes de paysages d'intérêt.....	22
Tableau 3 : Répartition des surfaces survolées dans les classes de paysage d'intérêt.....	25
Tableau 4 : Proportion de surface survolée pour la zone de butinage de Grand Manil.....	25
Tableau 5 : Proportion de surface survolée pour la zone de butinage de Corroy-le-Château.....	26
Tableau 6 : Proportion de surface survolée pour la zone de butinage de Lonzée.....	26
Tableau 7 : Proportion de surface survolée pour la zone de butinage reprenant les 3 ruchers.....	26
Tableau 8 : Répartition de surfaces survolées de la zone d'étude dans les classes de paysages d'intérêt.....	27
Tableau 9 : Dynamique de floraison des essences d'intérêt durant les semaines d'expérimentation.	36
Tableau 10 : Facteur de conversion moyen pour chaque unité florale d'intérêt.....	43
Tableau 11 : Production nectarifères journalières renseignées par Baude (2016) pour les essences d'intérêt en μg par Unité Florale.....	44
Tableau 12 : Production nectarifère ($\text{kg}/\text{ha} \cdot \text{h}$) hebdomadaire par classe de paysage.....	53
Tableau 13 : Production nectarifère (kg/h) par classe de paysage pour la zone de butinage de Grand-Manil.....	54
Tableau 14 : Evolution hebdomadaire du nombre de butineuses pour le rucher de Grand-Manil.....	54
Tableau 15 : Identification des essences mellifères par l'analyse des miels des différents ruchers....	61
Tableau 16 : Coefficients de détermination linéaires de Pearson pour le rucher de Corroy-le-Château. Relation modérée ($R^2 > 0,75$) en rouge / Relation forte ($R^2 > 0,9$) en jaune/ Relation très forte ($R^2 > 0,95$) en vert.....	62
Tableau 17: Coefficients de détermination linéaires de Pearson pour le rucher de Grand-Manil. Relation modérée ($R^2 > 0,75$) en rouge / Relation forte ($R^2 > 0,9$) en jaune/ Relation très forte ($R^2 > 0,95$) en vert.....	63
Tableau 18: Coefficients de détermination linéaires de Pearson pour le rucher de Lonzée Relation modérée ($R^2 > 0,75$) en rouge / Relation forte ($R^2 > 0,9$) en jaune/ Relation très forte ($R^2 > 0,95$) en vert.....	64
Tableau 19: Coefficients de détermination linéaires de Pearson pour le rucher « moyen ». Relation modérée ($R^2 > 0,75$) en rouge / Relation forte ($R^2 > 0,9$) en jaune/ Relation très forte ($R^2 > 0,95$) en vert.....	65
Tableau 20 : Production de nectar en avril ($\text{g}/\text{h} \cdot \text{jour}$).....	72
Tableau 21 : Relations retenues pour le rucher de Grand-Manil.....	73
Tableau 22 : Relations retenues pour le rucher de Lonzée.....	73
Tableau 23: Relations retenues pour le rucher "moyen".....	73

Table des Figures

Figure 1 : Zone d'étude (Le point jaune correspond au rucher tandis que les cercles rouges correspondent à la zone d'étude d'un rayon de deux km. Logiciel « QGIS version 3.16.5 » (QGIS Development Team, 2019).....	15
Figure 2 : Balance Beetobeeep installée sur le rucher de Grand-Manil (Photo : Herman V.)	17
Figure 3 : Trappe à pollen installée sur le rucher de Grand-Manil (Photo : Herman V.).....	18
Figure 4 : Bac à abeilles mortes installés au rucher de Loncée (Photo : Herman V.).....	19
Figure 5 : Tablettes à Varroas installées sur le rucher de Grand-Manil (Photo : Herman V.)	19
Figure 6 : Zone d'étude d'intérêt mellifère divisée en 5 classes : Arbres Hors Forêt (AHF), Champs de colza, Forêts, Prairies, Vergers. Logiciel « QGIS version 3.16.5 » (QGIS Development Team, 2019)....	23
Figure 7 : Répartition des zones de vol Logiciel « QGIS version 3.16.5 » (QGIS Development Team, 2019).....	27
Figure 8 : Disposition des cibles et géoréférencement (Photo : Herman V.).....	28
Figure 9 : Drone DJI Phantom 4 RTK (Photo : Herman V.)	29
Figure 10 : a) Mesure du poids du pollen récolté b) Quantification de la diversité des delotes de polle c) Redistribution du pollen aux abeilles (Photo : Herman V.)	31
Figure 11 : Comptage des abeilles morte au rucher de Loncée (Photo : Herman V.)	31
Figure 12 : Quantification des chutes de varroas par comptage (Photo : Herman V.)	32
Figure 13 : Récolte de miel (Photo : Herman V.).....	32
Figure 14 : Echantillonnage par vol de drone (Photo : Herman V.)	34
Figure 15 : Réalisation de quadras selon le premier mode opératoire (Photo : Herman V.)	35
Figure 16 : Optimisation du processus de comptage par « bouquet ». Le bouquet de la figure contient 9 unités florales (Photo : Herman V.).....	36
Figure 17 : Courbe théorique journalière de l'évolution du poids ; t1 = lever du soleil ; t2 = départ des butineuses ; t3 = retour des butineuses ; t4 = coucher du soleil ; GB = Gain Brut ; GN = Gain net ; NB = Nombre de butineuses.....	38
Figure 18 : Identification d'une zone de référence sur carte.....	43
Figure 19 : Résultat de mise en évidence des fleurs de pissenlits en prairie.....	46
Figure 20 : Résultat de mise en évidence des pissenlits en verger.....	47
Figure 21 : Résultat de mise en évidence du colza.....	47
Figure 22 : Résultat de mise en évidence des saules.....	47
Figure 23 : Résultat de mise en évidence des fruitiers.....	48
Figure 24 : Résultat de mise en évidence de l'aubépine.....	48
Figure 25 : Résultat de mise en évidence des merisiers blancs.....	48
Figure 26 : Résultat de mise en évidence des merisiers roses.....	49
Figure 27 : Résultat de la mise en évidence des floraisons mellifère (Saules et Pissenlits) sur la zone 3 lors de la deuxième semaine d'expérimentation.....	49
Figure 28 : Résultat de la mise en évidence des floraisons mellifère (pissenlits, merisiers et saules) sur la zone 11 lors de la deuxième semaine d'expérimentation	50
Figure 29 : Résultat de la mise en évidence des floraisons mellifère (fruitiers) sur la zone 5 lors de la première semaine d'expérimentation	50
Figure 30 : Résultat de la mise en évidence de la floraison du colza la première semaine (zone 12) ..	51
Figure 31 : Résultat de la mise en évidence de la floraison du colza la deuxième semaine (zone 12)	51
Figure 32 : Résultat de la mise en évidence de la floraison du colza la troisième semaine (zone 12).	51
Figure 33 : Résultat de la mise en évidence de la floraison du colza la quatrième semaine (zone 12)	52
Figure 34 : Résultat de la mise en évidence de la floraison du colza la cinquième semaine (zone 12)	52
Figure 35 : Evolution hebdomadaire des quantités de nectar produites par heure pour une surface d'un ha pour la zone de butinage de Grand Manil.....	52

Figure 36 : Evolution hebdomadaire de la production nectarifère (kg/h) de l'environnement pour la zone de butinage de Grand-Manil.....	53
Figure 37 : Evolution hebdomadaire du gain journalier brut moyen par heure (dont la température maximale est supérieure à 12°C) pour 15 000 butineuses pour le rucher de Grand Manil.	55
Figure 38 : Evolution hebdomadaire du gain journalier net par heures (dont la température maximale est supérieure à 12°C) pour le rucher de Grand Manil.	56
Figure 39 : Evolution hebdomadaire du gain journalier net moyen par heure de vol de butinage, standardisé pour 15 000 butineuses pour le rucher de Grand Manil.	56
Figure 40 : Evolution hebdomadaire des rentrées en pollen par heure dont la température maximale est supérieure à 12°C et pour 15 000 butineuses pour le rucher de Grand-Manil.....	57
Figure 41 : Evolution hebdomadaire de la diversité chromatique des rentrées en pollen pour le rucher de Grand-Manil	58
Figure 42: Evolution hebdomadaire de la mortalité adulte par heure pour 15 000 butineuses pour la ruche expérimentale du rucher de Grand-Manil	58
Figure 43 : Evolution hebdomadaire de la mortalité adulte moyenne par heure et écart type pour le rucher de Grand-Manil.....	59
Figure 44 : Evolution hebdomadaire de la mortalité larvaire par heure et pour 15 000 butineuses pour la ruche expérimentale du rucher de Grand-Manil.....	59
Figure 45 : Evolution hebdomadaire de la mortalité larvaire moyenne par heure et écart type pour le rucher de Grand-Manil.....	59
Figure 46 : Evolution hebdomadaire de l'infestation au Varroa pour la ruche expérimentale du rucher de Grand-Manil	60
Figure 47 : Evolution hebdomadaire de l'infestation au Varroa moyenne par heure et écart type pour le rucher de Grand-Manil.....	60

Table des Annexes

Annexe 1 : Sélection des jours dont la Température maximale est supérieure à 12°C et dont les précipitations cumulées sur la journée sont inférieures à 1mm. La courbe relate la dynamique temporelle de poids de la ruche expérimentale de Lonzée.....	87
Annexe 2 : Dynamique temporelle du poids de la ruche expérimentale du rucher considéré (semaine 1). Les points jaunes indiquent le départ des butineuses (dérivées négative maximale) et les points vers le retour des butineuses à la ruche (poids journalie	87
Annexe 3 : Courbes de régression permettant d'estimer le nombre de butineuses pour chacun des ruchers lorsqu'il n'est pas directement quantifiable par l'analyse des courbes.....	88
Annexe 4 : Conditions à respecter pour rentrer dans les boucles de discriminations (voir Diagramme de discrimination).....	89
Annexe 5 : Algorithme de mise en évidence des essences en floraison	90
Annexe 6 : Processus de discrimination des essences d'intérêt	91
Annexe 7 : Evolution hebdomadaire de la production nectarifère de l'environnement pour la zone de butinage de Corroy-le-Château.	93
Annexe 8 : Evolution hebdomadaire de la production nectarifère de l'environnement pour la zone de butinage de Lonzée.	93
Annexe 9 : Evolution hebdomadaire du nombre de butineuses pour le rucher de Corroy le Château	93
Annexe 10 : Evolution hebdomadaire du nombre de butineuses pour le rucher de Lonzée	94
Annexe 11 : Evolution hebdomadaire du gain journalier brut moyen par heure (dont la température maximale est supérieure à 12°C) pour 15 000 butineuses pour le rucher de Corroy-le-Château.	94
Annexe 12 : Evolution hebdomadaire du gain journalier brut moyen par heure (dont la température maximale est supérieure à 12°C) pour 15 000 butineuses pour le rucher de Lonzée	94
Annexe 13 : Evolution hebdomadaire du gain journalier net par heures (dont la température maximale est supérieure à 12°C) pour le rucher de Corroy-le-Château	95
Annexe 14 : Evolution hebdomadaire du gain journalier net par heures (dont la température maximale est supérieure à 12°C) pour le rucher de Lonzée	95
Annexe 15 : Evolution hebdomadaire du gain journalier net moyen par heure de vol de butinage, standardisé pour 15 000 butineuses pour le rucher de Corroy-le-Château	96
Annexe 16 : Evolution hebdomadaire du gain journalier net moyen par heure de vol de butinage, standardisé pour 15 000 butineuses pour le rucher de Lonzée.....	96
Annexe 17 : Evolution hebdomadaire des rentrées en pollen par heure dont la température maximale est supérieure à 12°C et pour 15 000 butineuses pour le rucher de Corroy-le-Château.....	96
Annexe 18 : Evolution hebdomadaire des rentrées en pollen par heure dont la température maximale est supérieure à 12°C et pour 15 000 butineuses pour le rucher de Corroy-le-Château.....	97
Annexe 19 : Evolution hebdomadaire de la diversité chromatique des rentrées en pollen pour le rucher de Corroy-le-Château.....	97
Annexe 20 : Evolution hebdomadaire de la diversité chromatique des rentrées en pollen pour le rucher de Lonzée.....	97
Annexe 21 : Evolution hebdomadaire de la mortalité adulte par heure pour 15 000 butineuses pour la ruche expérimentale du rucher de Corroy-le-Château.....	98
Annexe 22 : Evolution hebdomadaire de la mortalité adulte par heure pour 15 000 butineuses pour la ruche expérimentale du rucher de Lonzée.	98
Annexe 23 : Evolution hebdomadaire de la mortalité adulte moyenne par heure et écart type pour le rucher de Corroy-le-Château.....	98
Annexe 24 : Evolution hebdomadaire de la mortalité adulte moyenne par heure et écart type pour le rucher de Lonzée.....	99

Annexe 25 : Evolution hebdomadaire de la mortalité larvaire par heure et pour 15 000 butineuses pour la ruche expérimentale du rucher de Corroy-le-Château.....	99
Annexe 26 : Evolution hebdomadaire de la mortalité larvaire par heure et pour 15 000 butineuses pour la ruche expérimentale du rucher de Lonzée	99
Annexe 27: Evolution hebdomadaire de la mortalité larvaire moyenne par heure et écart type pour le rucher de Corroy-le-Château.....	100
Annexe 28 : Evolution hebdomadaire de la mortalité larvaire moyenne par heure et écart type pour le rucher de Lonzée	100
Annexe 29 : Evolution hebdomadaire de l'infestation au Varroa pour la ruche expérimentale du rucher de Corroy-le-Château.....	100
Annexe 30 : Evolution hebdomadaire de l'infestation au Varroa pour la ruche expérimentale du rucher de Lonzée.....	101
Annexe 31 : Evolution hebdomadaire de l'infestation au Varroa moyenne par heure et écart type pour le rucher de Corroy-le-Château	101
Annexe 32: Evolution hebdomadaire de l'infestation au Varroa moyenne par heure et écart type pour le rucher de Lonzéeel	101
Annexe 33 : Ensemble des droites de régressions pour les relations étudiées présentant un R ² supérieurs à 0,75	102
Annexe 34 : Illustration de la présence de "faux-positifs"(peupliers) lors de la mise en évidence des saules.....	113
Annexe 35: Illustration de la présence de "faux-positifs" (arbres nus) lors de la mise en évidence des merisiers.....	113
Annexe (Dossier) 1 Suivi des opérations de terrain	118

1) Introduction

A l'échelle européenne, l'entomofaune pollinisatrice souffre des externalités négatives de la seconde révolution agricole (Guerriat, 2017; Potts et al., 2010), notamment par l'utilisation de produits phytosanitaires (Baude et al., 2016) et suite à la diminution drastique tant en abondance qu'en diversité des ressources mellifères (Baude et al., 2016; Goulson et al., 2015). Cette diminution due à l'homogénéisation du paysage (Baude et al., 2016; DAVAINÉ, 2012; Melin, 2015; Tew et al., 2020) peut être considérée comme extrêmement préoccupante (Baude et al., 2016; Goulson et al., 2015; Guerriat, 2017; Langlois et al., 2020; Moquet et al., 2017; Potts et al., 2010; Resasco et al., 2017; Tew et al., 2020).

La Wallonie n'est pas épargnée par ce constat et plus de 25% des plantes supérieures sont considérées comme menacées à très menacées (Melin, 2015). Afin de conserver et de restaurer les populations de pollinisateurs, le maintien d'habitats avec des phénologies de floraisons complémentaires est la clé pour une offre de nectar constante dans le temps (Timberlake et al., 2019). Ainsi, des espèces mellifères « intermédiaires » doivent être l'objet d'une attention toute particulière car elles jouent un rôle de relais temporel essentiel entre les grands pics de floraisons (Béguin, 1994) et peuvent être intégrées au paysage pour combler ces manques de ressources (Timberlake et al., 2019).

Afin d'envisager des gestions de l'environnement adaptées à l'entomofaune pollinisatrice, comme la mise en place de programmes de restauration et de conservation visant une ressource nectarifère continue, il est primordial de pouvoir quantifier la ressource mellifère à l'échelle du paysage (Baude et al., 2016; Langlois et al., 2020; Pierpont, n.d.; Somme et al., 2016; Tew et al., 2020).

La cartographie des ressources mellifères d'un paysage revêt de multiples intérêts, tels que :

- La localisation et la protection des sites à haut potentiel mellifère (Janssens, 2005)
- La gestion de l'environnement, des contours urbains et des aménagements du territoire rural en considérant la ressource nectarifère indispensable pour la biodiversité
- La planification précise de plans d'aménagements du territoire afin de compléter les carences en ressources mises en évidence

- La prise en considération de la ressource nectarifère d'un environnement avant l'implantation d'un rucher pour que cette dernière ne perturbe pas l'équilibre de la biodiversité (Bruneau, 2020). Avant l'installation de ruches, il est nécessaire d'évaluer l'offre en ressources d'un paysage (Mallinger et al., 2017). Le nombre de ruches doit être déterminé sur base des périodes durant lesquelles les ressources sont rares (Geldmann & González-Varo, 2018).

Il n'existe pas de méthodologie précise et unique pour la quantification des ressources florales d'un paysage (Szigeti et al., 2016). Alors que la quantification manuelle est chronophage et ne permet d'échantillonner qu'une faible proportion de la zone étudiée (Langlois, 2019; Szigeti et al., 2016), l'approche de quantification par télédétection permet de réaliser des relevés fiables en un temps record, quasi instantanément. En effet, la dynamique temporelle des paysages sur de grandes étendues peut être captée très finement. De plus, la télédétection permet une quantification efficace, précise et non destructive de la floraison. Même si plusieurs auteurs s'interrogent sur la faisabilité d'une telle opération à grande échelle (Frankl et al., 2005), la télédétection via drones à caméras multispectrales peut considérablement améliorer la quantification de la ressource nectarifère d'un paysage (Szigeti et al., 2016).

Ce travail de fin d'études mené au sein de l'unité fonctionnelle et évolutive d'entomologie de *Gembloux Agro Bio Tech (Uliège)* s'inscrit dans une démarche pionnière de quantification des ressources mellifères à l'échelle d'un paysage complexe pour chaque unité florale via des moyens de télédétection. Cette méthodologie innovante de quantification est très prometteuse dans les années à venir.

Le premier objectif de ce travail est la mise en évidence de la floraison des essences mellifères principales du paysage gembloutois en phénosaison vernale à partir d'images aériennes RGB (RED GREEN BLUE) d'une résolution de 3 cm. Ces essences mellifères principales sont le colza, les saules, les pissenlits, les fruitiers, les merisiers, et les aubépines. Elles permettent d'expliquer la majorité de la production nectarifère gembloutoise en phénosaison vernale.

Le second objectif est la quantification de la production horaire nectarifère de l'ensemble d'une zone d'étude de 3343 ha en phénosaison vernale à l'aide d'images aériennes RGB.

Le troisième objectif est la quantification du gain nectarifère horaire journalier, standardisé pour 15 000 butineuses à partir de données de poids de ruches acquises à intervalles réguliers de 30 minutes et avec une précision de 100 g. Afin de remplir cet objectif, le nombre de butineuses sortant de la ruche chaque matin doit pouvoir être quantifié.

Enfin, l'objectif final consiste en l'étude à l'échelle de la semaine pour une durée de 6 semaines, de la relation entre la dynamique de production nectarifère de l'environnement et la dynamique de multiples variables étudiées sur les ruches : le gain horaire moyen en nectar et en pollen, la diversité des rentrées en pollen, la mortalité moyenne et l'infestation moyenne au varroa. Mis à part la diversité des rentrées en pollen, l'ensemble des variables sont standardisées pour 15 000 butineuses.

2) Etat de l'art

2.1) Evaluation des ressources nectarifères en paysage rural

2.1.1) Définition de la flore mellifère

La flore mellifère d'un paysage se définit comme l'ensemble des essences végétales du paysage fournissant une ressource nectarifère et pollinifère (Melin, 2015). Le butinage de cette flore par les abeilles mellifères est à l'origine de la production de miel.

2.1.2) L'intérêt apicole des fleurs

La ressource nectarifère et pollinifère offerte par une plante caractérise l'intérêt apicole de celle-ci. En Belgique, il existe un total de 1600 plantes à fleur (Spermatophytes) parmi la flore indigène, dont 600 sont nectarifères et 400 pollinifères (Melin, 2015). Parmi toutes ces espèces de plantes mellifères, 30 contribuent significativement à la miellée (Van Daele, 2011). Plusieurs auteurs ont réalisé des classements de ces plantes par potentiel mellifère (Baude et al., 2016) et par période de floraison pour une région géographique (Feltin & Hummel, 2016; Guerriat, 2017; Melin, 2015; Van Daele, 2011). La quantité de sucre sécrétée par jour et par fleur est déterminée à partir de la quantité de nectar sécrétée par la fleur et de la concentration en sucre de cette dernière (Guerriat, 2017). Quelques remarques sont à considérer lors de l'utilisation de ces documents.

Tout d'abord, les périodes de floraison projetées sur le calendrier civil correspondent rarement à la réalité (Van Daele, 2011) car elles ne se déclenchent pas un jour précis du calendrier et dépendent fortement des conditions météorologiques (Guerriat, 2017). Afin de capter la dynamique temporelle de l'environnement (Guerriat, 2017), la notion de « phénosaison » est mieux adaptée. C'est la période durant laquelle l'environnement est caractérisé par certaines floraisons remarquables (Béguin, 1994; Guerriat, 2017). De la fin de l'hiver au début de l'automne, quatre phénosaisons majeures se distinguent (Pré-vernale, Vernale, Estivale, Estivo-Automnale).

Ensuite, la sécrétion nectarifère peut varier en fonction de l'heure du jour (Herrera, 1990), des conditions climatiques (humidité relative, température, ensoleillement) et édaphiques (Guerriat, 2017), de l'âge, de la maturité de la plante, de la position des fleurs sur celle-ci et de la variété

cultivée considérée. Une différence d'un facteur 10 et d'un facteur 3 sont respectivement observées pour le colza (DAVAINE, 2012) et pour le tournesol (Cerrutti & Pontet, 2016).

Enfin, ces tableaux récapitulatifs ne renseignent pas au sujet de la notion d'attractivité d'un secteur floral. Cette notion est fonction de la distance la séparant du rucher, de l'espèce mellifère présente sur le secteur, du taux de recouvrement de l'espèce et du potentiel mellifère de cette dernière (Janssens, 2005; MARDEN & WADDINGTON, 1981; Seeley et al., 1991). L'abondance et le nombre de fleurs que porte la plante influent aussi sur l'attrait de l'essence (Van Daele, 2011).

2.1.3) La qualité mellifère d'un paysage

Le potentiel mellifère d'un paysage estime l'offre pollinifère et nectarifère par unité de surface. Il se définit par l'ensemble des occupations du sol à caractère mellifère (prairies, cultures mellifères, arbres, arbustes) contenu dans le paysage (Guerriat, 2017). La qualité mellifère d'un paysage est fonction du potentiel mellifère de celui-ci, de la diversité des essences mellifères et de la répartition temporelle des floraisons. Ces deux derniers critères sont tout aussi fondamentaux que le potentiel mellifère pour définir l'offre mellifère d'un environnement (Timberlake et al., 2019).

2.1.4) Evolution de la qualité mellifère des paysages

Dans la première partie du 20^{ème} siècle, les exploitations agricoles étaient diversifiées et de type « polycultures-élevage ». La gestion d'un rucher faisait souvent partie des activités de la ferme. Dans les décennies d'après-guerre, l'agriculture européenne a subi une importante modernisation. Elle s'est intensifiée afin de garantir la sécurité alimentaire (Baude et al., 2016; Gaia et al., 2015; Hardman, 2016). Les rendements à l'hectare ont considérablement augmenté notamment grâce à l'utilisation de produits phytosanitaires et de fertilisants (DAVAINE, 2012; Krebs et al., 1999; Stoate et al., 2009).

Depuis le début de la seconde révolution agricole, les ressources mellifères du paysage rural ont drastiquement diminué, à la fois en abondance et en diversité (Baude et al., 2016; Goulson et al., 2015). Quantitativement, la production nectarifère actuelle est inférieure à celle connue avant les années 1930 et qualitativement, il y a un important manque de diversité (Baude et al.,

2016). Aujourd'hui 50% des provisions de nectar anglaises s'expliquent seulement par 4 espèces florales (Baude et al., 2016). En Angleterre et au Pays de Galles, la disponibilité en ressource nectarifère a subi une diminution de 32% entre 1930 et 1978 (Baude et al., 2016; Robinson & Sutherland, 2002; Timberlake et al., 2019). A l'échelle de la Région wallonne, le potentiel mellifère des paysages diminue et plus de 25% des plantes supérieures sont considérées comme menacées à très menacées (Melin, 2015). Par conséquent, les essaims naturels deviennent de plus en plus rares en Belgique car il leur est impossible de boucler leur cycle annuel en se basant sur les ressources naturelles de l'environnement (Guerriat, 2017).

L'appauvrissement de l'environnement en ressources mellifères de qualité est fortement lié aux externalités négatives de la révolution agricole sur l'environnement, à savoir l'homogénéisation du paysage (Baude et al., 2016; DAVAINÉ, 2012; Melin, 2015; Tew et al., 2020) et un empoisonnement de l'environnement aux produits phytosanitaires (Baude et al., 2016). Ces facteurs sont d'autant plus pesants que l'agriculture recouvre plus de la moitié du territoire en Europe (Stoate et al., 2009) dans des proportions de 70,8% pour le Royaume-Uni et 45% pour la Belgique (Pierpont, n.d.). Selon Stoate (2009) et Krebs (1999), l'intensification de l'agriculture menace l'écologie des agroécosystèmes, notamment en réduisant la diversité biologique des paysages agricoles. D'autres facteurs tels que l'urbanisation (DAVAINÉ, 2012; Melin, 2015) contribuent à cet appauvrissement.

2.1.4.1) Homogénéisation du paysage

L'homogénéisation du paysage comprend la simplification des occupations du sol et du relief, la diminution de la diversité des variétés cultivées par la modification du parcellaire agricole et l'augmentation de la taille des parcelles. Les services écosystémiques de pollinisation et de régulation des bio agresseurs en souffrent (Tilman et al., 2002) et avec la fragmentation des habitats, elle est à l'origine de la diminution de la biodiversité (Holzschuh et al., 2007).

Une simplification des occupations du sol et du relief

La simplification du paysage est une conséquence directe de l'intensification de l'agriculture (Guerriat, 2017; Melin, 2015). Les éléments semi-naturels du paysage (haies, bois, talus, bordures enherbées) sont abattus afin d'augmenter la taille des parcelles (Hardman, 2016; Stoate et al., 2009; Tricault, 2010) alors qu'ils représentent un grand intérêt mellifère (source de nectar diversifiée et non négligeable) (DECOURTYE et al., 2007). En Belgique, près de

75% des haies auraient disparu depuis la seconde moitié du 20^{ème} siècle (de Roissart, 2019). Pour réagir face à cette diminution inquiétante, le plan de la Déclaration de Politique Régionale (DPR) du gouvernement wallon 2019-2024 a pour objectif la plantation de 4000 km de haies en Wallonie.

Une diminution de la diversité des variétés cultivées par la modification du parcellaire agricole

En France, une diminution de 25% des STH (surfaces toujours en herbes) a été observée entre 1950 et 2009, principalement au profit des surfaces cultivées et de l'urbanisation (DAVAINE, 2012). Les prairies à flore variée ont été remplacées par des prairies artificielles plus productives. Or, si ces dernières étaient gérées afin de contribuer à l'offre mellifère, elles pourraient avoir un impact à l'échelle nationale (Baude et al., 2016). Actuellement en France, près de 90% de la surface agricole utile est exclusivement occupée par des grandes cultures et des cultures fourragères, ce qui induit une réduction des ressources mellifères à la fois dans le temps et dans l'espace (DAVAINE, 2012).

En Wallonie et malgré une diminution de 15,2 % entre 1990 et 2019, la proportion moyenne de SAU (Surface Agricole Utile) dédiée aux prairies permanentes s'élève à 42,1% en 2019 avec un total de 309 180 ha³. Les surfaces sous jachère, bénéfiques pour l'entomofaune pollinisatrice (DECOURTYE et al., 2007), ont également connu une forte diminution avant qu'elles ne soient réintroduites en 1992 suite à des réformes de la PAC. En Belgique, les prairies de luzerne utilisées dans l'alimentation du bétail comme source de protéines ont été remplacées par le maïs. L'augmentation des monocultures d'espèces mellifères (ex : colza) depuis plusieurs années est à l'avantage des abeilles (DAVAINE, 2012) mais ne représente qu'une ressource éphémère de nectar.

Une augmentation de la taille des parcelles et des exploitations

Depuis la seconde moitié du 20^{ème} siècle, la taille moyenne des exploitations agricoles est en augmentation constante (Gaia et al., 2015). De nombreux espaces de « non-culture » ont disparu pour permettre l'agrandissement des terrains cultivés (Holzschuh et al., 2007). Ces dernières sont de plus faibles productrices de nectar en termes de diversité et de quantité (Baude et al., 2016).

³ <http://etat.environnement.wallonie.be/contents/indicatorsheets/AGRI%201.html>

2.1.4.2) Empoisonnement de l'environnement aux produits phytosanitaires

Les ressources mellifères sous forme de grandes cultures telles que le colza, font l'objet de traitements aux produits phytosanitaires (même en période de floraison), ce qui porte préjudice aux abeilles malgré la présence d'une législation afin de limiter leurs impacts néfastes (DAVAINE, 2012).

2.1.5) Impact de l'évolution du paysage sur l'entomofaune pollinisatrice

2.1.5.1) Impact sur l'ensemble de l'entomofaune

L'entomofaune pollinisatrice souffre des externalités négatives de la seconde révolution agricole (Guerriat, 2017; Potts et al., 2010) évoquées aux points précédents. L'homogénéisation du paysage (impliquant une diminution des habitats semi naturels, une réduction de la diversité des ressources mellifères, une floraison discontinue et une fragmentation de l'habitat), l'exposition aux produits phytopharmaceutiques et à de nombreuses nouvelles maladies importées par l'homme sont les 3 principales causes du déclin de l'ensemble des abeilles (DAVAINE, 2012; DECOURTYE et al., 2007; Goulson et al., 2015). Parmi les multiples pressions auxquelles les insectes pollinisateurs doivent faire face, la diminution des ressources florales peut être considérée comme la plus inquiétante (Baude et al., 2016; Goulson et al., 2015; Guerriat, 2017; Moquet et al., 2017; Potts et al., 2010; Resasco et al., 2017; Tew et al., 2020). L'urbanisation est aussi tenue pour responsable de la disparition des populations d'abeilles mais son effet reste nuancé lorsque les jardins bénéficiant d'une certaine gestion peuvent constituer un réel habitat pour l'entomofaune (Goulson et al., 2015). La transformation des habitats semi naturels en cultures est une cause majeure du déclin de l'entomofaune (Goulson et al., 2015; Moquet et al., 2017)

2.1.5.2) Importance de la diversité des essences mellifères pour l'entomofaune pollinisatrice

Le système agraire actuel, principalement construit sur des monocultures offre peu de ressources et de diversités à l'entomofaune pollinisatrice (DECOURTYE et al., 2007; Goulson et al., 2015). Or, la qualité et la diversité en pollen influencent la longévité des colonies d'abeilles, leur physiologie et leur résistance aux pathogènes (DAVAINE, 2012; Goulson et al., 2015; Keller et al., 2005; Maurizio & Hodges, 2015). Une alimentation en pollen peu diversifiée

et de faible qualité affecte négativement l'immunité collective des colonies d'abeilles mellifères (Alaux et al., 2010; Di Pasquale et al., 2013) et diminue leur résistance individuelle aux agents pathogènes (COLIN et al., 2008). La qualité du pollen varie suivant l'essence végétale (Goulson et al., 2015). Le nectar contient également divers nutriments et d'autres composés en concentration inconnue mais particulièrement bénéfiques au bon développement des colonies (Goulson et al., 2015).

2.1.5.3) Influence de la répartition temporelle des floraisons (spectre phénologique) sur l'entomofaune pollinisatrice

Idéalement, l'environnement doit pouvoir offrir les ressources nécessaires au bon développement de l'entomofaune pollinisatrice qu'il abrite, tout au long de la période d'activité de celle-ci (Menz et al., 2011). Le maintien des populations pollinisatrices dépend d'une offre continue en nectar et en pollen (Goulson et al., 2015; Guerriat, 2017; Holzschuh et al., 2007). Des périodes de carence fortement liées à la simplification des paysages (Timberlake et al., 2019) augmentent le risque de maladies (toxines, pathogènes) chez les abeilles (DAVAINE, 2012; Goulson et al., 2015). Une absence de ressources florales de plus de 15 jours peut porter préjudice aux colonies d'abeilles qui n'ont pas accumulé assez de réserves pour y faire face (Requier et al., 2017) ainsi qu'aux insectes solitaires dont la courte période de vol correspond à la période d'absence de floraison (Timberlake et al., 2019). Lorsque l'environnement n'offre pas une ressource alternative après les floraisons abondantes mais éphémères, typiques de l'agriculture intensive, les colonies d'abeilles (et l'ensemble de l'entomofaune pollinisatrice) doivent soudain faire face à une pénurie brutale de ressources (DAVAINE, 2012).

2.1.5.4) Impact des produits toxiques sur l'entomofaune pollinisatrice

Les grandes cultures, bien qu'elles puissent présenter une source de nectar importante, font souvent l'objet de traitements phytosanitaires. Or, la combinaison de plusieurs stress peut avoir un impact supérieur à la somme des impacts de ces stress. Par exemple, une exposition aux fongicides augmente la toxicité des insecticides et la présence d'insecticides dans l'environnement diminue la résistance des abeilles aux maladies et pathogènes (Goulson et al., 2015).

2.2) Quantification des ressources nectarifères dans l'environnement

2.2.1) Revue de la littérature

Plusieurs auteurs se sont intéressés au processus complexe de l'estimation de la production de miel (Balayer, 1990; Béguin, 1994; Briane & Cabrol, 1986; Janssens, 2005). Cette dernière est un bon indicateur de la disponibilité nectarifère de l'environnement mais varie aussi en fonction des conditions climatiques permettant les fenêtres de vol (Crane, 1975; Janssens, 2005), des caractéristiques génétiques de la colonie (Janssens, 2005) et des préférences de butinage des colonies d'abeilles mellifères privilégiant les ressources à rendement maximal (MARDEN & WADDINGTON, 1981).

D'autres auteurs se sont intéressés à l'estimation de l'offre en ressources mellifères d'un paysage rural (Baude et al., 2016; de Roissart, 2019; Langlois, 2019; Timberlake et al., 2019) ou encore de paysages urbains (Baldock et al., 2015; Hicks et al., 2016; Lowenstein et al., 2019; Matteson et al., 2013; Tew et al., 2020) par des relevés de terrain de la flore mellifère environnante. L'estimation de l'offre spatio-temporelle en nectar dans un environnement est une information importante à la fois pour les apiculteurs (Balayer, 1990; Béguin, 1994; Briane & Cabrol, 1986; Janssens, 2005) mais aussi pour les naturalistes soucieux du maintien de la biodiversité de l'entomofaune pollinisatrice (Baldock et al., 2015; Baude et al., 2016; de Roissart, 2019; Hardman, 2016; Hicks et al., 2016; Langlois, 2019; Lowenstein et al., 2019; Matteson et al., 2013; Tew et al., 2020; Timberlake et al., 2019). Timberlake et al. (2019) ainsi qu'Ausseuil et al. (2018) ont modélisé la dynamique de l'offre nectarifère dans le paysage, respectivement à des échelles temporelles très fines (3-4 jours) à plus grossières (mensuelles). En apiculture, cette information présente un intérêt socio-économique pour une meilleure exploitation des ressources, notamment pour les procédés de transhumance (Béguin, 1994; Briane & Cabrol, 1986).

Pour la plupart des méthodes d'évaluation de la production mellifère d'une région, la végétation mellifère est recensée dans un premier temps (Guerriat, 2017; Langlois et al., 2020; Pierpont, n.d.; Tew et al., 2020). Ce recensement est réalisé par occupation du sol. Béguin et al. (1994) en distinguent trois types : linéaires (haies), étendues (champs, bois, prairies fleuries) et ponctuelles (arbres isolés). Dans un second temps, l'abondance des essences florales mellifères est évaluée pour chaque occupation du sol d'intérêt (Guerriat, 2017). Enfin, la valeur mellifère

de la zone de butinage est estimée en multipliant les essences recensées par leur valeur mellifère par unité de surface (kg/ha) (Baude et al., 2016; Timberlake et al., 2019).

2.2.2) Identification des classes d'occupation du sol expliquant la majorité de la production nectarifère

En Belgique, les occupations du sol qui constituent les principales ressources nectarifères de l'environnement varient au cours du temps. Il s'agit des haies et des lisières de forêts pour le mois d'avril, des prairies et des cultures à floraison massive pour le mois de mai et enfin, des prairies extensives et des cultures biologiques pour le mois de juin (Langlois et al., 2020). Selon une étude réalisée au Royaume-Uni, les pâtures permanentes et les forêts renferment la majorité de la ressource nectarifère des milieux agricoles étant donné leur importante couverture du paysage (Timberlake et al., 2019). En termes de production nectarifère surfacique, ce sont les éléments linéaires (haies et bordures de champs) qui fournissent la plus grande quantité de nectar (Timberlake et al., 2019).

2.2.3) Identification des essences expliquant la majorité de l'offre nectarifère de l'environnement

Dans les études menées par Timberlake (2019) et Baude (2016) au Royaume-Uni, la moitié de l'offre nectarifère de l'environnement peut s'expliquer par 4 espèces végétales ou moins. Ces espèces sont *Allium ursinum*, *Cirsium arvense* et *Trifolium repens* et d'autre part *Trifolium repens*, *Calluna Vulgaris*, *Cirsium palustre* et *Erica cinerea* respectivement selon les travaux de Timberlake (2019) et de Baude (2016). Selon Tew (2020), les espèces mellifères qui expliquent la grande majorité de l'offre nectarifère au Royaume-Uni sont *Fuchsia regia* et *Trifolium repens* en milieu urbain, *Trifolium repens*, *Brassica spp* et *Cirsium palustre* en milieu agricole et *Calluna vulgaris* en milieu naturel.

En Belgique, plusieurs études mettent en évidence les essences expliquant la majorité de l'offre nectarifère dans l'environnement (Langlois et al., 2020; Pierpont, n.d.). Ces dernières sont *Prunus spp* et *Salix spp* en avril ainsi que *Brassica napus* et *Taraxacum agg* en mai (Langlois et al., 2020). Les essences mises en évidence par Pierpont (2020) pour les différentes occupations du sol sont *Lamium album*, *Taraxacum agg*, *Lamium purpureum* et *Salix spp*.

2.3) Télédétection et quantification des ressources nectarifères dans l'environnement

2.3.1) Introduction à la télédétection

La télédétection est « l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci » (Pellecuer, 2017). Elle est l'application phare des drones (Pellecuer, 2017) mais elle peut aussi être réalisée par des satellites ou des avions. La résolution acquise avec des vols de drone est, la plupart du temps, beaucoup plus fine que la résolution obtenue via satellite (Librán-Embido et al., 2020; Pellecuer, 2017), ce qui permet d'avoir une connaissance détaillée de l'environnement survolé. De plus, la résolution temporelle est meilleure via les drones que via les satellites (Librán-Embido et al., 2020). Les informations captées par drone permettent d'observer la dynamique des espèces végétales (Pellecuer, 2017). Le rayonnement enregistré par le capteur est le rayonnement réfléchi par l'objet, à savoir le rayonnement incident diminué du rayonnement absorbé et ayant traversé l'objet. L'information reçue par le capteur dépend donc des caractéristiques intrinsèques de l'élément photographié (caractéristiques physico-chimiques, physiologiques et physiques).

Chaque élément du paysage possède une signature spectrale (réponse spectrale) qui lui est propre. A titre d'exemple, les pigments de chlorophylle présents dans les végétaux absorbent la couleur rouge et bleu du rayonnement incident alors qu'ils reflètent la couleur verte. Sur base de l'analyse des signatures spectrales et des bibliothèques de signatures spectrales (Herold et al., 2004), il est donc possible de différencier les éléments du paysage.

La qualité d'une donnée de télédétection peut être définie selon les notions de résolutions spatiales, temporelles et spectrales. La résolution spatiale augmente lorsque la taille des pixels diminue et la résolution temporelle dépend de la fréquence d'acquisition des images. La résolution spectrale est définie selon le nombre et la largeur des bandes spectrales captées (Pellecuer, 2017). On distingue les images selon leur résolution spectrale respectivement dans un ordre décroissant du nombre de longueurs d'ondes captées : images ultraspectrales, images hyperspectrales et les images multispectrales. Les capteurs multispectraux fonctionnent selon une approche de bandes spectrales. Ils captent l'intensité du rayonnement réfléchi pour un certain intervalle de longueur d'ondes. Ainsi, dans le visible, on peut distinguer les bandes rouge (630-700nm), verte (500-550 nm) et bleu (400-480 nm). Les images de types RGB (Red

Green Blue) sont constituées de ces 3 bandes. Certains capteurs possèdent une bande en plus hors du visible, la bande infrarouge proche « NIR » (700-1600 nm).

Le traitement des données acquises par télédétection permet de faire ressortir l'information qu'elles contiennent. De nombreux indices ont été développés pour déchiffrer l'information⁴. Un indice consiste en une opération arithmétique simple entre les valeurs prises par plusieurs bandes enregistrées par le capteur et leur construction est souvent le fruit d'observations empiriques (Pellecuer, 2017).

La télédétection présente plusieurs avantages par rapport aux observations faites sur le terrain : elle remplace les relevés de terrain souvent chronophages en permet une estimation précise de l'environnement en un temps record (Galbraith et al., 2015). Elle est assez efficace et relativement peu coûteuse car elle devient de plus en plus abordable avec son développement (Galbraith et al., 2015). Enfin, la télédétection ne nécessite pas la destruction du matériel observé ; les mesures radiométriques prises par drones ne sont pas destructives contrairement aux mesures faites en laboratoire (Pellecuer, 2017).

2.3.2) Utilisation de la télédétection à différentes fins

La télédétection est utilisée dans de multiples circonstances (Pellecuer, 2017; Pettorelli et al., 2014). Depuis plusieurs années, l'agriculture se base sur l'analyse d'images satellitaires comme aide à la décision (Fang et al., 2016; Librán-Embid et al., 2020; Pellecuer, 2017). Les données acquises renseignent sur l'état de santé et le développement des plantes mais peuvent aussi renseigner sur la phénologie des plantes comme les périodes de croissance, de floraison, de feuillaison et de fructification (Galbraith et al., 2015; Nelson & Papuga, 2009). La télédétection permet aussi la mise en évidence de plantes d'intérêt (Adam & Mutanga, 2009; Fauvel et al., 2020; Miyoshi et al., 2020; Pu, 2009) ou de plantes invasives (Bradley, 2014; de Sá et al., 2018; Glenn et al., 2005; He et al., 2011; Huang & Asner, 2009; Lass et al., 2005; Pellecuer, 2017). Dans certaines études, les données acquises par télédétection sont utilisées pour quantifier et capter la dynamique des floraisons (Carl et al., 2017; B. Chen et al., 2019; J. Chen et al., 2009; Horton et al., 2017; Sulik & Long, 2015). Lorsqu'il s'agit d'arbres fruitiers, ces données

⁴ <https://www.indexdatabase.de/db/i.php>

permettent d'estimer la production fruitière (Aggelopoulou et al., 2011; Xiao et al., 2014). Si le drone a survolé des zones mellifères, ces données peuvent aussi être utilisées pour quantifier la ressource mellifère de l'environnement, jusqu'à évaluer la récolte en miel pour des ruches se situant dans l'environnement survolé (Abdel-Rahman et al., 2015; Arundel et al., 2016; Blomstedt, 2013; T. Campbell & Fearn, 2018; Tristan Campbell, 2020; Landmann et al., 2015; Makori et al., 2020; Nightingale et al., 2008). La majorité de ces études évaluent la ressource mellifère ou la production de miel pour des environnements simples tels que des champs de monocultures ou des forêts ne présentant qu'une seule espèce végétale mellifère (T. Campbell & Fearn, 2018).

3) Matériel et méthode

3.1) Objectif et mise en contexte générale de l'étude

3.1.1) Objectif de l'expérience

L'objectif principal de ce travail est l'étude de la dynamique du développement des colonies d'abeilles *Apis mellifera* L., en fonction de la ressource nectarifère présente dans leur environnement, par des moyens de télédétection.

3.1.2) Localisation du site expérimental

La zone d'étude se situe en région wallonne dans la province de Namur et plus précisément dans les environs de Gembloux (lat : 50.5667, long : 4.6833). Elle recouvre une surface totale de 3 343 ha comprenant 3 zones de butinages. Ces dernières sont définies par des cercles de 2 km de rayon autour des ruchers d'intérêt situés dans les villages de Corroy-le-Château, Grand-Manil et Loncée. Ces 3 ruchers se situant à un peu moins de 4 km les uns des autres, les zones de butinages se recouvrent légèrement (Figure 1).

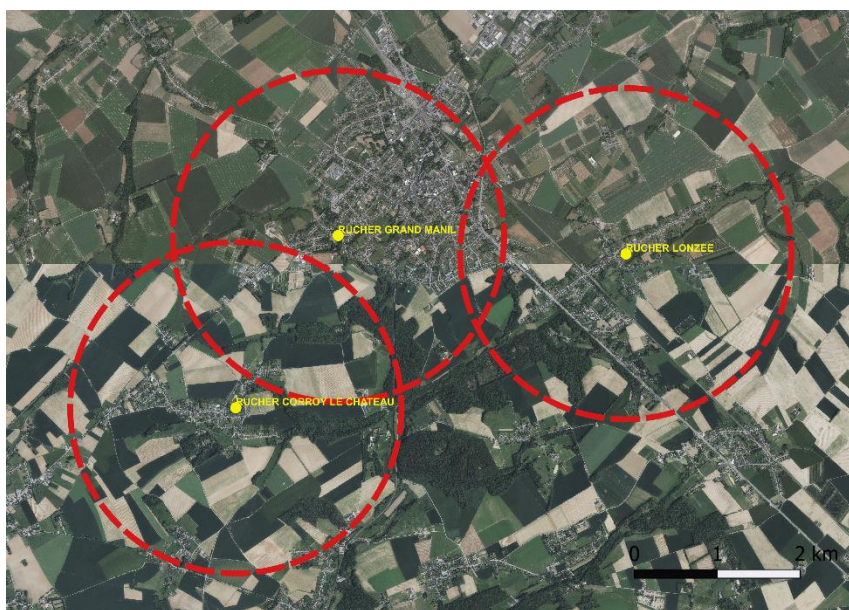


Figure 1 : Zone d'étude (Le point jaune correspond au rucher tandis que les cercles rouges correspondent à la zone d'étude d'un rayon de deux km. Logiciel « QGIS version 3.16.5 » (QGIS Development Team, 2019)

3.1.3) Définition de la période d'étude :

La période d'étude spécifique de ce travail concerne la phénosaison vernale. Celle-ci présente toutefois une grande variabilité de la dynamique de floraison, avec un pic vers le mois de mai. En 2021, la phénosaison vernale commence vers le 10 avril, mais étant donné que des températures maximales inférieures à 12 degrés sont rencontrées jusqu'au 19 avril, l'acquisition effective des données de ce travail a réellement commencé à partir de cette dernière date, sur une période de 6 semaines consécutives, soit jusqu'au 30 mai 2021.

3.1.4) Présentation des ruchers

L'ensemble des ruchers sont installés durant l'année 2020 chez des particuliers désireux d'en apprendre plus sur l'apiculture. Le suivi de ces derniers est entièrement assuré depuis leur installation par un même apiculteur, Herman Victor. Aucune perte hivernale n'est observée et lors de la première visite de la saison en mars 2021, ces trois ruchers comptent 2, 3 et 5 colonies en ruche de type « Dadant 10 cadres ». Toutes les reines sont des hybrides et sont les descendantes de reines issues d'élevages réalisés par M Leclercq (Leclercq et. al 2017). De génération en génération, la fécondation n'est pas contrôlée. Bien qu'il est supposé que ces abeilles proviennent majoritairement des sous espèces mellifera et carnica, il est impossible de déterminer leur patrimoine génétique précisément. Pour chaque rucher, une ruche expérimentale est sélectionnée après l'évaluation des colonies. Cette dernière se base sur la taille du couvain, la douceur et l'impression générale de la colonie ; ce sont celles-ci qui reçoivent les dispositifs de collecte des différentes variables.

3.1.5) Dynamique des colonies

Afin de quantifier la dynamique du développement des colonies, différentes variables sont mesurées durant la période d'expérimentation selon une fréquence spécifique :

Tableau 1 Fréquence d'acquisition des variables apicoles

Variable apicole	Fréquence d'acquisition
Poids [kg] de la colonie	30 minutes
Suivi des rentrées en pollen [g]	Hebdomadaire
Suivi de la mortalité des colonies [nombre d'abeilles mortes]	Hebdomadaire
Suivi de l'infestation au varroa [nombre de varroas]	Hebdomadaire

3.2) Dispositif mis en place et matériel utilisé pour la gestion apicole

3.2.1) Dispositif mis en place pour la quantification des variables du rucher

Afin de quantifier les variables d'intérêt relatives à la dynamique de développement des colonies, de multiples dispositifs sont mis en place.

3.2.1.1) Balance « Bee to Beep »

Les balances « Bee to Beep » sont des balances connectées permettant d'acquérir les données de poids à 100 g près. Un signal contenant l'information de poids est envoyé toutes les 30 minutes via un réseau Sigfox sur la plateforme en ligne « Bee to beep » où les données de poids sont directement consultables et téléchargeables (sous format csv). La balance ne se connecte au réseau Sigfox que lors de l'envoi des informations, ce qui permet de réduire l'influence néfaste que pourraient avoir les ondes électromagnétiques sur le développement de la colonie. La balance se compose de 4 coussinets disposés aux quatre coins de la ruche et reliés à un boîtier fixé à côté de celle-ci (Figure 2), celui-ci permettant la connexion au réseau.



Figure 2 : Balance Beetobeeep installée sur le rucher de Grand-Manil (Photo : Herman V.)

Etant donné le coup non négligeable de ces balances, seule la ruche expérimentale de chacun des ruchers est équipée d'un tel dispositif. Au total, l'évolution du poids de trois colonies est suivie durant toute la durée de l'expérimentation.

3.2.1.2) Trappes à pollen

Les trappes à pollen sont construites en PVC et se fixent devant l'entrée de la ruche. Une trappe à pollen (peigne relevé) est installée sur chacune des 3 ruches expérimentales, trois jours avant le début de la période d'expérimentation, ceci afin de permettre une bonne acclimatation des abeilles à cette nouvelle disposition d'entrée de la ruche.

Les trappes se composent d'un peigne à pollen à trous trapézoïdaux permettant la récolte des pelotes de pollen (Figure 3). Ces dernières tombent dans le bac récolteur situé en dessous de la trappe, lors du passage des butineuses, au travers du peigne et sont ensuite récoltées. Afin de permettre le passage des faux-bourdon lors des périodes d'application du peigne, un orifice est prévu sur le côté de la trappe à pollen. Lorsque la récolte de pollen n'est pas d'application, le peigne peut facilement être relevé afin de laisser libre passage aux butineuses.



Figure 3 : Trappe à pollen installée sur le rucher de Grand-Manil (Photo : Herman V.)

3.2.1.3) Bac à abeilles mortes

Les bacs permettant la récolte des abeilles mortes mesurent 1,2m de longueur sur 50 cm de largeur. Ils sont disposés en contre-bas de toutes les ruches (Pérez et al., 2015; Porrini et al., 2003) (Figure 4). Afin d'éviter tout problème d'humidité, ces bacs sont surélevés sur des blocs de 10 cm de hauteur.

Les matériaux utilisés pour la construction de ces bacs sont des planches de bois contreplaqués ainsi que du grillage en acier galvanisé dont les mailles font 12,7mm de large. Cette taille de maille permet la récolte des abeilles mortes lorsqu'elles sont jetées hors de la ruche par les ouvrières tout en empêchant certains prédateurs de venir les prélever. Il est à noter que cette

taille de maille ne facilite pas la sortie des abeilles vivantes tombées dans le bac par inadvertance.



Figure 4 : Bac à abeilles mortes installés au rucher de Lonzée (Photo : Herman V.)

3.2.1.4) Plateaux à varroas

Afin d'effectuer le suivi du niveau de parasitisme des colonies, le taux d'infestation des colonies par l'acarien *Varroa destructor* est déterminé par le comptage des chutes naturelles de ces derniers sur des plateaux en plastiques situés en dessous du plancher grillagé de la ruche (Giovenazzo & Dubreuil, 2011) (Figure 5).



Figure 5 : Tablettes à Varroas installées sur le rucher de Grand-Manil (Photo : Herman V.)

3.2.3) Dispositif mis en place pour la quantification des variables météorologiques

Une station de mesures météo du département de physique de Gembloux Agro Bio tech (BIODYNE) située à Lonzée mesure les précipitations cumulées, grâce au pluviomètre TrwS415 de MPS System fournissant une résolution de 0,01 mm, ainsi que les températures moyennées à l'échelle de la demi-heure.

3.3) Dispositif mis en place et matériel utilisé pour l'acquisition des données par télédétection

3.3.1) Définition de la zone d'étude

La distance de butinage d'une colonie peut varier en fonction de la structure du paysage, de la saison et de la colonie (Steffan-Dewenter & Kuhn, 2003). La distance médiane est estimée entre 1,2km (Steffan-Dewenter & Kuhn, 2003) et 6,1km (Beekman & Ratnieks, 2000). Les butineuses d'une colonie exploitent les ressources de nourriture jusqu'à une distance maximale de 12 km (Melin, 2015). Dans un objectif permanent d'optimisation de rendement, il est considéré que 80 à 90 % des butineuses travaillent à moins de 1,5 km du nid et que très peu d'entre elles s'éloignent à plus de 3 km lorsque les ressources sont abondantes (Melin, 2015). Enfin, étant donné que la distance moyenne de butinage en Belgique en phénosaison vernale est estimée à 2km (Api, n.d.; Guerriat, 2017), une zone de butinage de 2km de rayon autour de chaque rucher est considérée dans ce travail.

3.3.2) Définition et sélection des classes de paysages d'intérêt

Les classes de paysages constituant les principales ressources mellifères de l'environnement sont dans un premier temps défini selon la littérature. Ces dernières sont les prairies (Langlois et al., 2020; Timberlake et al., 2019), les arbres y compris les arbres fruitiers (Guerriat, 2017), les champs de cultures mellifères tels que le colza (Hardman, 2016; Langlois et al., 2020), les haies (Hardman, 2016; Langlois et al., 2020; Timberlake et al., 2019), les habitats semi-naturels (Hardman, 2016), les lisières de forêts (Langlois et al., 2020; Timberlake et al., 2019) et les bordures de champs (Timberlake et al., 2019).

Dans un second temps et d'un point de vue pratique, seules les zones d'intérêt mellifères présentant les deux conditions suivantes sont retenues. Elles doivent pouvoir être mises en évidence grâce à différents outils cartographiques et être adaptées à la méthode d'échantillonnage par drone.

Par conséquent, les classes de paysages retenues dans ce travail sont les prairies, les vergers, les champs de colza, les forêts, les haies et les habitats semi-naturels. Ces 2 dernières classes sont reprises sous l'appellation d « arbres hors forêt » (Figure 6).

3.3.2.1) Prairies et vergers

Les prairies et les vergers sont identifiés grâce au parcellaire agricole de 2019 du Service Public de Wallonie, en libre accès sur le Géoportail de la Wallonie. L'hypothèse émise est que ces parcelles restent constantes sur une période de 2 ans. Cette affirmation, après avoir été vérifiée sur le terrain, est parfaitement exacte pour les vergers et se rapproche fortement de la réalité en ce qui concerne les prairies.

3.3.2.2) Champs de colza

Afin de connaître quelques emplacements de champs de colza de l'année 2021 avant la floraison de ce dernier, différents agriculteurs de la région sont consultés. Une fois la floraison terminée, l'ensemble des champs est identifié et localisé par le traitement d'images aériennes satellites issues de la fusion d'images PLANET à 2,5 m de résolution avec des images Sentinel-2 à 10 et 20 m de résolution. Etant donné les mauvaises conditions météorologiques durant la pleine floraison, les seules images disponibles sont prises en début et en fin de floraison. Dès lors, les champs de colza ne sont pas directement identifiables visuellement et un indice expérimental d'identification se basant sur certaines bandes spectrales des images (Formule ci-dessous) est conçu.

$$I = B8 + B8A + B7$$

Les bandes B8A et B7 sont issues du jeu de données à 20 m de résolution alors que la bande B8 provient du jeu de données à 10m de résolution.

Dans un premier temps, l'ensemble des champs (toutes cultures confondues) de la zone d'étude sont sélectionnés à partir du parcellaire agricole de 2019. Ensuite, l'indice est appliqué uniquement à l'ensemble des pixels sélectionnés. Il apparaît que les pixels situés sur les champs de colza connus présentent une valeur d'indice supérieure (>700) aux autres champs, ce qui permet de sélectionner un certain nombre de champs de colza potentiels qui sont ensuite vérifiés sur le terrain. Cette mise en évidence est réalisée par le logiciel « QGIS version 3.16.5 ».

3.3.2.3) Haies, habitats semi-naturels et forêts

Les haies, les habitats semi-naturels ainsi que les forêts sont définies selon un algorithme de traitement de données LIDAR (acquises en 2014) mis en place par Bolyn et al (2019). Cet algorithme permet de recenser les forêts ainsi que les éléments ligneux situés hors forêt (AHF).

Cette dernière classe du paysage inclut l'ensemble des haies et des habitats semi-naturels. Il est à noter que, par des contrôles effectués lors des premières constructions de cartes, la mise en évidence de ces classes du paysage via cet algorithme reste tout à fait fiable en 2021.

3.3.2.4) Bordures de champs

Les bordures de champs trop éparées ne sont pas adaptées à l'échantillonnage par drone. Elles ne sont pas considérées dans ce travail. In fine, une surface totale de 926 ha sur 3343 ha est répartie dans les classes d'intérêt et ainsi sélectionnée pour la suite de ce travail. La répartition de cette surface dans les différentes classes est reprise ci-dessous (Tableau 2 : Répartition de la zone d'étude dans les classes de paysages d'intérêt Tableau 2).

Tableau 2 : Répartition de la zone d'étude dans les classes de paysages d'intérêt

Classe	Surface [ha]	Surface relative [%]
Prairie	326,456	35,25
Forêt	325,979	35,20
Arbre Hors Forêt	219,341	23,69
Verger	28,707	3,10
Champ de colza	25,99	2,80
Total	926,467	100

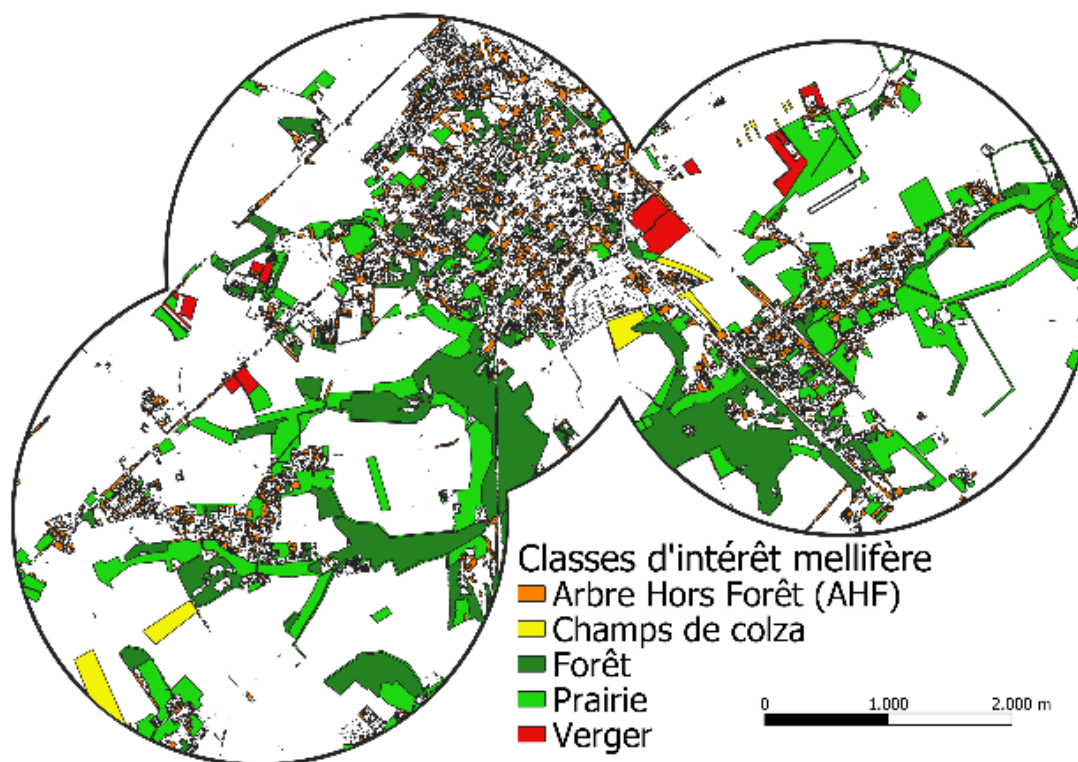


Figure 6 : Zone d'étude d'intérêt mellifère divisée en 5 classes : Arbres Hors Forêt (AHF), Champs de colza, Forêts, Prairies, Vergers. Logiciel « QGIS version 3.16.5 » (QGIS Development Team, 2019)

3.3.3) Définition de la flore d'intérêt mellifère

Les essences d'intérêt mellifère considérées dans ce travail pour représenter la ressource nectarifère de l'environnement sont sélectionnées parmi l'ensemble de la flore mellifère wallonne selon les critères suivants :

- 1) Elles fleurissent durant la période d'étude (phénosaison vernale) et dans les zones surveillées.
- 2) Elles présentent une production nectarifère qualifiée de moyenne à excellente selon Guerriat et al (2017). Cette démarche de sélection des essences les plus productives est appliquée dans de nombreux travaux similaires de quantification de la ressource mellifère à l'échelle du paysage (Pierpont, n.d.).
- 3) Elles peuvent être mises en évidence grâce au processus de traitement d'images. Cela signifie que la taille des fleurs ou des patchs floraux doit être telle qu'il est possible de les identifier à partir d'images de 3 cm de résolution. De plus, elles présentent une couleur caractéristique afin de les mettre en évidence par rapport à leur environnement.

Dès lors, parmi l'ensemble des plantes mellifères florissant en phénosaison vernale et dont la production nectarifère est qualifiée de moyenne à importante, les essences suivantes sont sélectionnées pour caractériser la ressource nectarifère de l'environnement :

- Colza (*Brassica napus L.*)
- Fruitiers (poiriers et pommiers) (*Pyrus communis L., Malus domestica L.*)
- Merisiers (blanc et rose) (*Prunus avium L.*)
- Saules (*Salix spp L.*)
- Aubépines (*Crataegus monogyna J.*)
- Pissenlits (*Taraxacum officinale W.*)
- Pruneliers (*Prunus spinosa L.*)

Il est à noter que les pruneliers ne sont pas considérés dans la suite de ce travail. Leur floraison se terminant lors du début de la phase de terrain, la réalisation de quadras n'est pas possible. L'ensemble de ces essences retenues prend l'appellation de « flore d'intérêt mellifère » pour la suite de ce travail.

3.3.4) Définition des zones de vol

Les zones de vol (Figure 7) sont définies sur base des critères suivants :

- 1) Les surfaces survolées sont majoritairement composées de classes d'intérêt mellifère afin de rentabiliser un maximum le vol de drone.
- 2) Les zones de vol s'organisent de manière à éviter de survoler des zones habitables ou des groupements de personnes.
- 3) Les zones de vol se situent en dehors des zones sous conditions mentionnées par le site internet « drone guide » (<https://map.droneguide.be/>).
- 4) Les zones de vol, dans la mesure du possible, s'organisent autour de parcelles dont les propriétaires sont connus et mis au courant du projet expérimental.
- 5) Les zones de vol s'organisent de telle sorte que le drone reste constamment en visuel (règle pour le permis drone en catégorie open A1/A3). Une distance maximale de 500 m entre le pilote et le drone lors de conditions optimales de vol est d'application.
- 6) Le nombre de zones à survoler est défini selon les contraintes pratiques de temps. Afin de parcourir aisément l'entièreté des zones de vol en 2 jours de travail pour chaque semaine d'expérimentation et en tenant compte des éventuelles interruptions dues à des conditions

météorologiques défavorables, un maximum de 12 zones de vol est retenu. En effet, il est déconseillé de réaliser des vols de drones à une altitude de 120m lorsque la vitesse des rafales de vent est supérieure à 40 km/h et par temps pluvieux.

- 7) Selon les calculs réalisés par Szigeti et al (2016), grâce aux méthodes de Kupper et Hafner, dans le cadre de quantification de ressources nectarifères, une proportion de 6,3% de la zone d'étude doit être échantillonnée pour obtenir un échantillonnage représentatif. Dans ce travail, une surface minimale de 5 % de chaque classe d'intérêt mellifère est survolée afin d'optimiser les contraintes logistiques et temporelles de l'échantillonnage (Tableau 3).

Tableau 3 : Répartition des surfaces survolées dans les classes de paysage d'intérêt

Classe de paysage d'intérêt	Surface dans la zone d'étude [ha]	Surface survolée [ha]	Proportion de surface survolée [%]
Prairie	326,456	36,99	11,33
Forêt	325,979	25,65	7,80
Arbre Hors Forêt	219,341	11,02	5,02
Verger	28,707	6,29	21,91
Champ de colza	25,990	5,68	21,85
TOTAL	926,473	85,63	9,24

Dans le cadre de ce travail, les 3 sites étudiés sont considérés comme suivant la même dynamique temporelle de floraison étant donné leur proximité géographique. Cette hypothèse a pu être vérifiée sur le terrain durant les différentes périodes de floraison. Dès lors, la surface échantillonnée totale n'est pas répartie équitablement entre les trois zones de butinage. De plus, étant donné des conditions de paysage similaires même en dehors de la zone d'étude, une zone d'échantillonnage est externe à celle-ci (Figure 7). La répartition des classes de paysage d'intérêt pour chacune des zones de butinage figure ci-dessous.

Tableau 4 : Proportion de surface survolée pour la zone de butinage de Grand Manil

Classe de paysage	Surface dans la zone d'étude [ha]	Surface survolée [ha]	Proportion de surface survolée [%]
Prairie	89.5126	4.967	5.548939479
Forêt	135.436	7.385	5.452759975
Arbre Hors Forêt	114.4584	5.529	4.830576
Verger	13.1616	0.027	0.205142232
Champ de colza	5.9776	5.685	95.10505889
TOTAL	358.5462	23.593	6.580184088

Tableau 5 : Proportion de surface survolée pour la zone de butinage de Corroy-le-Château

Classe de paysage	Surface dans la zone d'étude [ha]	Surface survolée [ha]	Proportion de surface survolée [%]
Prairie	128.1924	2.272	1.772335958
Forêt	132.0604	2.541	1.92411957
Arbre Hors Forêt	52.6012	0.389	0.739526855
Verger	6.4437	0	0
Champ de colza	14.8567	0	0
TOTAL	334.1544	5.202	1.556765376

Tableau 6 : Proportion de surface survolée pour la zone de butinage de Lonzée

Classe de paysage	Surface dans la zone d'étude [ha]	Surface survolée [ha]	Proportion de surface survolée [%]
Prairie	158.9369	28.047	17.6466258
Forêt	112.9426	9.841	8.713275593
Arbre Hors Forêt	73.665	6.348	8.617389534
Verger	21.1558	6.294	29.75070666
Champ de colza	11.1332	5.685	51.06348579
TOTAL	377.8335	56.215	14.87824664

Tableau 7 : Proportion de surface survolée pour la zone de butinage reprenant les 3 ruchers

Classe de paysage	Surface dans la zone d'étude [ha]	Surface survolée [ha]	Proportion de surface survolée [%]
Prairie	326.456	36.99	11.33
Forêt	325.979	25.65	7.8
Arbre Hors Forêt	219.341	11.02	5.02
Verger	28.707	6.29	21.91
Champ de colza	25.99	5.68	21.85
TOTAL	926.473	85.63	9.24

Le faible taux d'échantillonnage de la zone de butinage de Corroy le château (

Tableau 5 : Proportion de surface survolée pour la zone de butinage de Corroy-le-Château

Tableau 5) s'explique par les restrictions de vol pour cette zone du territoire. Aussi, la zone de Grand-Manil présente une densité d'habitation assez importante. Pour ces raisons, la majorité des échantillonnages sont réalisés dans la zone de butinage de Lonzée.

Pour l'ensemble de la zone d'étude, l'hétérogénéité de la floraison dans la classe d'intérêt est également prise en compte. Plus elle est faible, moins la surface de vol dédiée à cette surface est importante. A titre d'exemple, seulement 6.63% de la surface totale survolée sont consacrés aux champs de colza dont la floraison est considérée comme fortement homogène. Ainsi, sur un total de 85,64 ha échantillonnés, la répartition des surfaces échantillonnées par classe de paysages est la suivante (Tableau 8).

Tableau 8 : Répartition de surfaces survolées de la zone d'étude dans les classes de paysages d'intérêt

Classe de paysages d'intérêt	Surface survolée [ha]	Surface survolée relative [%]
Prairie	36,99	43,20
Forêt	25,65	29,95
Arbre Hors Forêt	11,02	12,87
Vergers	6,29	7,35
Champs de colza	5,68	6,63

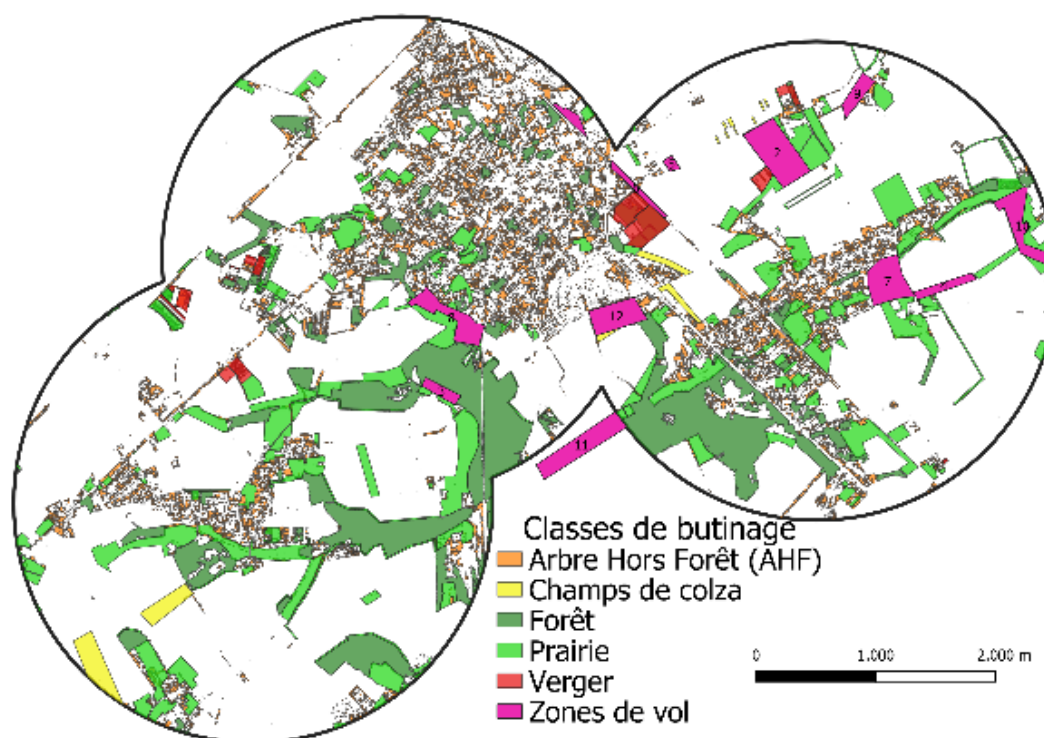


Figure 7 : Répartition des zones de vol Logiciel « QGIS version 3.16.5 » (QGIS Development Team, 2019)

3.3.5) Définition des plans de vol

Les plans de vol sont définis à l'avance sur l'application « Drone Deploy ». Afin de permettre un bon alignement des photos lors de la construction des cartes, un « side overlap de 75% » est retenu. Les plans de vols sont définis de manière à optimiser le temps de vol.

3.3.6) Préparation du terrain : disposition et géoréférencement des cibles

Afin de géoréférencer les photos prises par drone lors de la construction des cartes, deux types de cibles sont placées au sol sur les zones survolées (Figure 8). Le premier type de cible consiste

en des carrés rigides de 50 cm de côté et de couleurs noire et blanche. Le second type de cible se compose d'un carré en plastique de 40 cm de côté et de deux bandes diagonales d'environ 1m de long. Le tout est fixé au sol au moyen de sardines. Une moyenne de 4 cibles sont disposées par zone de vol.

La pose des cibles, dans la mesure du possible, respecte les recommandations suivantes :

- 1) Les cibles sont placées à des emplacements bien dégagés et visibles du ciel tout au long de la durée de l'expérimentation en tenant compte de la croissance de la végétation environnante.
- 2) Elles sont positionnées à des endroits qui ne perturberont pas les propriétaires des terrains, notamment pour les travaux agricoles.
- 3) Elles sont positionnées dans des endroits discrets peu fréquentés, là où elles ne risquent pas d'être retirées suite à des actes de vandalisme.
- 4) L'ensemble des cibles n'est pas disposé sur un même axe, ce qui complique la construction des cartes.
- 5) Lorsque les cibles sont posées dans des prairies avec bétail, il est préférable d'opter pour des cibles rigides sans quoi les cibles en plastique sont détruites par le piétinement du bétail.
- 6) Le propriétaire du terrain est informé de la pose des cibles durant toute la durée de l'expérimentation, de sorte qu'elles ne soient pas retirées.

Une fois les cibles installées, la position de ces dernières est relevée à l'aide d'un GPS de précision (Emlid Reach RS+) (Figure 8).



Figure 8 : Disposition des cibles et géoréférencement (Photo : Herman V.)

3.3.7) Matériel d'acquisition des images aériennes

Le drone utilisé dans le cadre de ce travail est le « DJI Phantom 4 RTK » équipé d'une caméra RGB. Le choix d'une caméra RGB et non multispectrale se justifie par une meilleure résolution à 120m d'altitude de la caméra RGB, respectivement de 3cm de résolution pour le capteur RGB et de 8 cm de résolution pour le capteur multispectral. Pour une résolution équivalente en caméra multispectrale, une hauteur de vol inférieure est requise, ce qui ne permet pas d'échantillonner l'ensemble des zones d'intérêt pour une même consommation d'énergie. L'autonomie de vol du drone est de 15 minutes environ pour une batterie. Un lot de 10 batteries est à disposition pour assurer l'ensemble des vols. Le drone est commandé par la télécommande du même modèle dont l'interface visuelle est une tablette Samsung branchée sur l'application « Drone Deploy » (Figure 9).



Figure 9 : Drone DJI Phantom 4 RTK (Photo : Herman V.)

3.4) Protocole d'acquisition des variables apicoles

3.4.1) Relevé des données

3.4.1.1) Données de poids

Les données de poids sont directement enregistrées sur le site internet de Beetobeeep. Aucune manipulation particulière n'est à effectuer durant la période d'expérimentation.

3.4.1.2) Données de pollen

Les trappes à pollen sont activées (rabattement du peigne) uniquement durant les journées permettant le vol des butineuses (sans prévision de pluies et dont la température est majoritairement supérieure à 12°C). L'activation de la trappe à pollen débute à partir du moment où le peigne à pollen est rabattu. La durée maximum d'activation est de trois jours (Sponsler et al., 2020). Au-delà, les butineuses confectionnent des pelotes de plus petite taille afin de les faire passer à travers le peigne, ce qui fausse les relevés en termes de quantités (Guerriat, 2017). Le pollen peut être récolté prématurément s'il est prévu que la météo se dégrade. Cela permet d'éviter qu'il ne s'humidifie, ce qui pourrait engendrer une mauvaise conservation. De plus, l'activation de la trappe à pollen lors de conditions météorologiques néfastes ne présente aucun intérêt. Une récolte de pollen (de durée variable en fonction de la météo) est effectuée chaque semaine sur chaque ruche expérimentale de chaque rucher. Les détails de la récolte de pollen sont précisés dans les annexes de ce document (Annexe (Dossier 1)).

Une fois le pollen prélevé, la quantité récoltée par ruche expérimentale est pesée à l'aide d'une balance de précision, dans les conditions de température et d'humidité ambiantes du laboratoire (Figure 10). La diversité des grains de pollen est également quantifiée par une évaluation chromatique des pelotes de pollen selon une méthode utilisée lors d'une initiative internationale de recherche « CSI pollen » (Magneraud, 2015). Cette dernière vise à classer les différentes couleurs de grains de pollen selon 3 classes d'abondance relative de chacune de ces couleurs dans un échantillon de 20 g. Ces 3 classes sont « couleur abondante », « couleur rare » et « couleur très rare » respectivement pour un nombre de pelotes d'une même couleur supérieur à 20 pelotes, compris entre 3 et 20 pelotes et inférieur à 2 pelotes (Figure 10). Les échantillons de pollen de 20g sont ensuite conservés dans un congélateur à -80°C. Le reste du pollen est redistribué aux abeilles sur le dessus des cadres après avoir été mélangé avec une faible quantité d'eau (Figure 10).



Figure 10 : a) Mesure du poids du pollen récolté b) Quantification de la diversité des delotes de colle c) Redistribution du pollen aux abeilles (Photo : Herman V.)

3.4.1.3) Données de mortalité

Les bacs à abeilles mortes sont inventoriés en début de chaque semaine en prenant soin de séparer les imagos des larves. Le bac est ensuite vidé pour réinitialiser le comptage de la semaine suivante (Figure 11).



Figure 11 : Comptage des abeilles morte au rucher de Lonzée (Photo : Herman V.)

3.4.1.4) Données d'infestation au Varroa

Une tablette est installée par-dessous le plancher en chaque début de semaine. Après un certain laps de temps de minimum 3 jours, la tablette est retirée. Les varroas tombés de la ruche et récoltés sur la tablette sont dénombrés. Une méthode de comptage par quadrillage est réalisée afin de limiter les erreurs d'imprécision (Figure 12). La tablette est ensuite nettoyée avant d'être réinstallée en début de semaine suivante.



Figure 12 : Quantification des chutes de varroas par comptage (Photo : Herman V.)

3.4.1.5) Données de récolte de miel

Lors de la récolte de miel, les miels en provenance des différents ruchers sont extraits séparément. La quantité récoltée est ensuite pesée avec une balance « pèse personne ».



Figure 13 : Récolte de miel (Photo : Herman V.)

3.5) Protocole de quantification de la floraison par télédétection

3.5.1) Définition de la fréquence d'échantillonnage

Selon Szigeti et al (2016), la fréquence d'échantillonnage doit être adaptée en fonction du cycle de vie du pollinisateur étudié et des variations temporelles de la ressource. Les fréquences d'échantillonnage renseignées dans la littérature sont de l'ordre de la semaine (Timberlake et al., 2019) ou supérieures à la semaine pour la plupart (Langlois et al., 2020; Szigeti et al., 2016). Etant donné que la phénosaison vernale s'étend sur un ensemble de 8 semaines (Guerriat, 2017),

l'échantillonnage à l'échelle de la semaine est tout à fait pertinent. Cette fréquence d'échantillonnage permet de suivre de manière très rapprochée l'évolution des floraisons tout en limitant la quantité de données à traiter par la suite. D'un point de vue botanique, une fréquence d'échantillonnage hebdomadaire augmente la certitude de la quantification des pics de floraison des essences mellifères d'intérêt étant donné que la floraison de l'ensemble de ces dernières s'étale au minimum sur 2 semaines (Guerriat, 2017). D'un point de vue pratique, il est déconseillé d'échantillonner à l'aide d'un drone à une fréquence supérieure à la semaine étant donné les incertitudes météorologiques qui peuvent compromettre les vols de drones. Dans ce travail, l'ensemble des données est rapporté à l'échelle de la semaine, peu importe le moment quand ces données ont été acquises dans la semaine.

3.5.2) Sélection des jours et des tranches horaires de vol

Comme mentionné au point précédent, une acquisition d'images par drone est réalisée pour chaque zone de vol chaque semaine. Les jours de vol potentiels pour une semaine lambda sont sélectionnés en fin de semaine précédente en fonction des prévisions météorologiques. Aucun vol n'est planifié lorsque des précipitations ou des rafales de vent de plus de 40km/h sont annoncées.

Les acquisitions d'images par drones nécessitent également de bonnes conditions de luminosité et l'ouverture des fleurs. De ce fait, les journées d'acquisitions ne commencent pas avant 9h et se terminent vers 17h. Sur le terrain, il a pu être observé que cette tranche horaire correspondait bien aux heures d'ouverture de la flore d'intérêt.

3.5.3) Acquisition des images par drones

Une fois sur la zone de vol (Figure 14), le matériel est monté et différents paramètres tels que l'ISO sont réglés en fonction des conditions météorologiques rencontrées (ex : nébulosité, luminosité, etc.). Une nouvelle batterie est installée pour chaque nouveau vol et toute l'installation est ensuite vérifiée avant le décollage. Lors de l'acquisition des images, le drone est méticuleusement suivi du regard jusqu'à l'atterrissage avant d'être démonté et rangé.



Figure 14 : Echantillonnage par vol de drone (Photo : Herman V.)

3.5.4) Quadra

Les observations de terrain sont absolument nécessaires pour interpréter et remettre dans leur contexte les images acquises par drones (Pellecuer, 2017). Ce travail de comptage de fleurs sur des surfaces prédéfinies et repérables sur les cartes issues du traitement d'images permet d'établir une relation entre le nombre de pixels recensés par l'algorithme de mise en évidence et le nombre d'unités florales réellement présentes sur le terrain.

Dès lors un minimum de 1 à 6 quadra(s) est réalisé par essence d'intérêt en fonction du temps de comptage nécessaire pour l'ensemble des unités florales. La notion d'unité florale est définie selon la perspective de l'insecte comme une ou plusieurs fleur(s) qu'une petite abeille (d'une longueur d'un centimètre) peut butiner à la suite sans devoir voler (Carvalho et al., 2008). Ainsi, l'inflorescence est définie comme une unité florale pour les Asteraceae (pissenlits) alors qu'il s'agit de la fleur unique pour les Rosaceae (fleur de pommier) (Carvalho et al., 2008). Il est à noter que cette définition d'une unité florale correspond parfaitement à ce qui est détectable par drone. Deux modes opératoires de comptage sont envisagés dans ce travail.

Le premier s'applique aux essences dont l'entière des unités florales est dénombrable, telles que les essences au sol ou les fruitiers basses-tiges. Une zone de comptage est délimitée au sol par quatre piquets en bois surmontés d'une balle de tennis peinte en rouge (Figure 15). La quantité d'unités florales présentes dans la zone délimitée est ensuite dénombrée. Afin de représenter au mieux la réalité, différentes densités d'unités florales par surface délimitée sont prises en compte. En ce qui concerne les cultures de colza, trois opérations de comptage de 3

quadrats chacune sont réalisées à intervalles réguliers de 2 semaines sur l'ensemble de la période d'expérimentation. Cela permet également de tenir compte des variations de densité des fleurs de colza au cours de la saison.



Figure 15 : Réalisation de quadrats selon le premier mode opératoire (Photo : Herman V.)

Le deuxième mode opératoire s'applique aux essences principalement ligneuses dont l'entièreté des unités florales n'est pas accessible, souvent à partir d'une hauteur supérieure à 2m, pour des raisons de visibilité (Tew et al., 2020). Ce mode opératoire s'inspire fortement des méthodes développées par Langlois et. Al (2020), Baude et.al (2016) et Hardman et.al (2016). Le nombre d'unités florales est compté sur un volume délimité et accessible d'un mètre cube, souvent dans les zones extérieures du feuillage (Baude et al., 2016). La quantité de fleurs du houppier est ensuite obtenue par extrapolation du nombre d'unités florales contenues dans le volume échantillonné à l'ensemble du volume du houppier. Les dimensions du houppier nécessaires au calcul de son volume sont mesurées sur place pour la mesure du rayon et obtenue via le modèle numérique de terrain pour la hauteur (une fois le traitement d'images effectué). La mesure du rayon s'obtient par la moyenne des rayons mesurés aux 4 points cardinaux. Le volume du houppier est estimé par une forme géométrique simple (de Roissart, 2019) telle qu'une sphère pour les merisiers roses, un parallélépipède rectangle pour les aubépines et un cylindre pour les merisiers blancs et les saules.

Afin d'optimiser le processus de comptage lorsque les unités florales sont présentes sous forme de bouquets (poiriers, merisiers, colza), le nombre d'unités florales par « bouquet d'unités florales » est compté dans un premier temps sur 10 bouquets pour ensuite calculer la moyenne d'unités florales par bouquet (Figure 16). In fine, le nombre moyen d'unités florales par bouquet

est multiplié par le nombre de bouquets recensés sur un mètre cube de l'essence ligneuse d'intérêt.



Figure 16 : Optimisation du processus de comptage par « bouquet ». Le bouquet de la figure contient 9 unités florales
(Photo : Herman V.)

Enfin, la localisation GPS du quadra (issue de Google Map) ainsi que l'essence recensée et le nombre d'unités florales, sont encodés peu importe le mode opératoire considéré.

3.5.5) Suivi de la floraison

Les opérations de terrain permettent le suivi très précis de la dynamique de floraison des essences d'intérêt. Ainsi, les durées de floraison des essences d'intérêt sont encodées dans un tableau excel (Tableau 9). Plusieurs photos prises lors de la floraison de ces essences permettent de suivre visuellement l'évolution des floraisons et constituent une ligne du temps de haute importance lors du traitement des images.

Tableau 9 : Dynamique de floraison des essences d'intérêt durant les semaines d'expérimentation

	Colza	Fruitier	Merisier blanc	Merisier rose	Saule	Aubépine	Pissenlit
Sem 1	En fleur	En fleur	En fleur	/	En fleur	/	En fleur
Sem 2	En fleur	En fleur	En fleur	En fleur	En fleur	/	En fleur
Sem 3	En fleur	En fleur	En fleur	En fleur	/	/	En fleur
Sem 4	En fleur	/	/	En fleur	/	En fleur	/
Sem 5	En fleur	/	/	/	/	En fleur	/
Sem 6	En fleur	/	/	/	/	En fleur	/

3.6) Analyse et traitement des données apicoles (logiciel R)

3.6.1) Traitement des données de poids

Les données de poids enregistrées entre le 19 avril 2021 et le 30 mai 2021 sont directement téléchargées depuis la plateforme de « Beetobeep ». Elles sont ensuite traitées via le logiciel R Studio. Les principaux packages utilisés pour le traitement de données sont « dplyr », « lubridate » et « ggplot2 ».

3.6.1.1) Données journalières

Le calcul du gain journalier en nectar et du nombre de butineuses est uniquement réalisé lorsque les conditions météorologiques permettent le vol des butineuses, à savoir :

- 1) La température maximale de la journée entre le lever et le coucher du soleil doit être supérieure à 12°C (Guerriat, 2017)
- 2) La somme des précipitations de la journée enregistrées entre le lever et le coucher du soleil doit être inférieure à 1 mm. L'idéal aurait été de le fixer à 0 mm mais ce choix aurait compromis la disponibilité de données pour certaines semaines.

Une sélection des jours respectant ces conditions est effectuée (Annexe 1). Les sélections sont identiques pour les 3 ruchers étant donné qu'elles se basent sur un même jeu de données météo, acquis par le département de physique de Gembloux Agro Bio tech (BIODYNE) sur le site expérimental de Loncée. A partir de celui-ci, il est possible de calculer le nombre d'heures à plus de 12°C par jour.

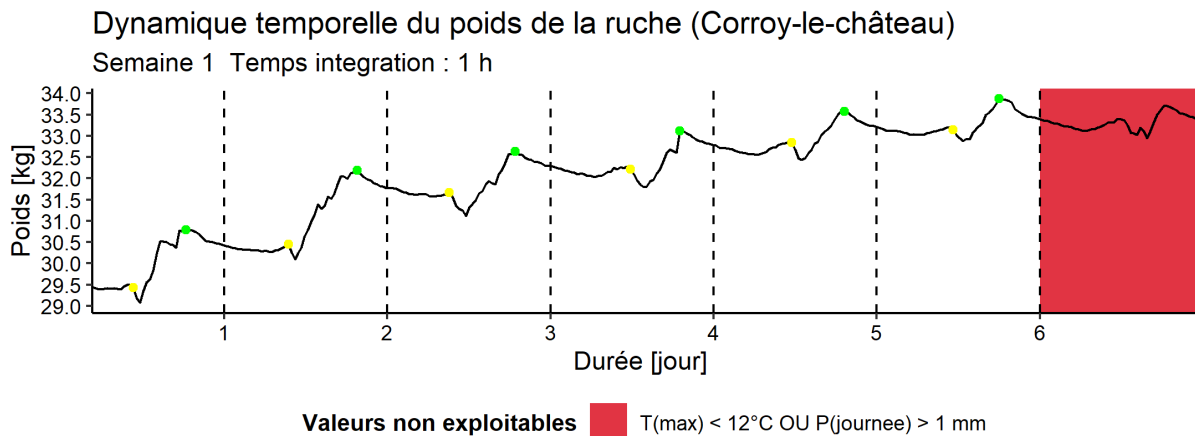
A partir des données de poids sélectionnées sur base des conditions météorologiques, il est possible d'identifier différents moments caractéristiques de la courbe de poids (Meikle et al., 2018) (Figure 17) : Courbe théorique journalière de l'évolution du poids ; t1 = lever du soleil ; t2 = départ des butineuses ; t3 = retour des butineuses ; t4 = coucher du soleil ; GB = Gain Brut ; GN = Gain net ; NB = Nombre de butineuses):

- 1) Les moments de lever et de coucher du soleil. Pour chaque semaine, une heure moyenne de lever et de coucher du soleil est fixée sur base des éphémérides.

Les moments de départ et de retour des butineuses à la ruche. Le calcul de la dérivée temporelle de la courbe de poids permet de mettre en évidence une chute de poids quasi instantanée (dérivée temporelle minimum) qui correspond au moment de départ des

butineuses. Le poids maximum journalier indique le retour des butineuses à la ruche. Une analyse de sensibilité afin de trouver le temps d'intégration adéquat pour mettre en évidence le moment de départ des butineuses a été réalisée pour l'ensemble des ruchers. Le temps d'intégration défini pour les ruchers est de 3.5, 2 et 1 heure(s) respectivement pour les ruchers de Grand-Manil, Lonzée et Corroy-le-Château (

Annexe 2 : Dynamique temporelle du poids de la ruche expérimentale du rucher considéré (semaine 1). Les points jaunes indiquent le départ des butineuses (dérivées négative maximale) et les points vers le retour des butineuses à la ruche (poids journalie



2)).

3) Les moments de poids journalier minimum et maximum.

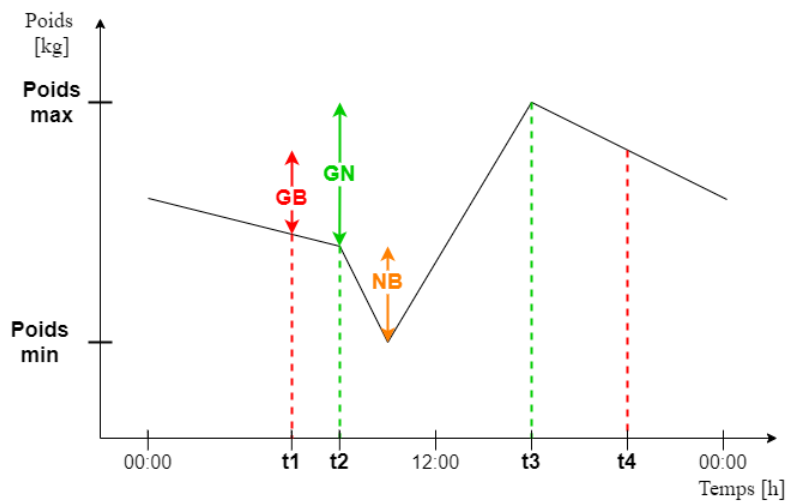


Figure 17 : Courbe théorique journalière de l'évolution du poids ; t1 = lever du soleil ; t2 = départ des butineuses ; t3 = retour des butineuses ; t4 = coucher du soleil ; GB = Gain Brut ; GN = Gain net ; NB = Nombre de butineuses

Une fois ces informations connues, il est possible de quantifier (Figure 17):

- La durée de vol des butineuses qui se définit comme la période entre le retour et le départ des butineuses.

- La quantité de butineuses qui partent de la ruche qui se définit comme la différence de poids entre le poids de la ruche au moment du départ des butineuses et le poids minimum journalier de la ruche divisé par le poids d'une butineuse (approximé à 0,1g (Schubnel et al., 2019)).
- Le gain brut qui correspond à la différence de poids entre le poids au coucher du soleil et le poids au lever du soleil.
- Le gain net qui correspond à la différence de poids de la ruche entre le départ des butineuses et leur retour à la ruche.

Afin de permettre la comparaison des données de gain d'une semaine à l'autre alors que la taille des colonies d'abeilles ainsi que les conditions météorologiques varient, les variables suivantes sont calculées :

- 1) Le gain journalier brut divisé par le nombre d'heure(s) à plus de 12°C pour une quantité de 15 000 butineuses.
- 2) Le gain journalier net divisé par le nombre d'heure(s) à plus de 12°C pour une quantité de 15 000 butineuses.
- 3) Le gain journalier net divisé par le nombre d'heure(s) de vol pour une quantité de 15 000 butineuses.

La standardisation par le nombre de butineuses fait sens étant donné que la proportion d'abeilles butineuses par rapport au nombre total d'abeilles de la colonie peut être considérée comme constante (Schubnel et al., 2019). Ce paramètre indique la force de la colonie.

Il est à noter que la courbe de poids journalière ne reproduit pas systématiquement le schéma ci-dessus. Le calcul du nombre de butineuses et de la durée de vol n'est donc pas réalisable pour chaque semaine (lorsqu'aucun jour de la semaine ne présente l'allure théorique, ou que seules des pertes de poids sont observées). Dès lors, afin de disposer d'un nombre de butineuses pour chaque semaine, ce dernier est estimé pour les semaines où il est impossible de le calculer directement. L'estimation se réalise grâce à une équation de régression linéaire construite sur les valeurs connues. Il est à noter que l'estimation par une droite linéaire fait sens étant donné que la croissance des colonies d'abeilles à cette période de l'année peut facilement être associée à une droite. Les droites de régression sont disponibles en annexe (Annexe 3).

3.6.1.2) Comparaison entre le gain brut et le gain net

Le gain net présente l'avantage d'être indépendant de la consommation d'énergie lorsque les butineuses rentrent à la ruche, contrairement au gain brut. Cependant, le gain brut reste une valeur plus accessible pour quantifier les gains pour l'ensemble des semaines, indépendamment de l'allure des courbes de poids. C'est pour cette raison que les gains nets ne seront pas utilisés dans ce travail comme indicateurs des gains journaliers en nectar.

3.6.1.3) Données hebdomadaires :

Les données hebdomadaires s'obtiennent en calculant la moyenne des gains journaliers appartenant à une même semaine. Afin de disposer de données pour chaque semaine et de tenir compte des conditions météorologiques, la moyenne des gains bruts par nombre d'heures à plus de 12°C est calculée pour chaque semaine.

Afin de disposer d'un nombre de butineuses moyen pour chaque semaine même lorsque qu'aucun jour de la semaine ne suit l'allure théorique de la courbe de poids, une extrapolation se basant sur le nombre de butineuses moyen des semaines disposant de d'une courbe journalière théorique est réalisée (via une régression linéaire). Ainsi, un nombre moyen de butineuses est obtenu pour chaque semaine et il est possible de calculer le gain hebdomadaire brut divisé par le nombre d'heure(s) à plus de 12°C pour une quantité de 15 000 butineuses. C'est cet indicateur de gain qui sera pris en compte pour la suite de ce travail.

3.6.2) Traitement des données de pollen

Les données quantitatives de pollen résultent des mesures des récoltes hebdomadaires réalisées lors de l'expérimentation. De la même manière que pour les gains en nectar, les gains hebdomadaires en pollen sont divisés par le nombre d'heure à plus de 12°C et standardisés pour un nombre de 15000 butineuses. Le nombre de 15 000 butineuses correspond à un nombre moyen de butineuses pour une ruche en bonne santé en phénosaison vernale (Guerriat, 2017).

3.6.3) Traitement des données de mortalité

Les données de mortalité sont obtenues suite au comptage hebdomadaire du nombre d'abeilles mortes dans les bacs situés devant les ruches. Afin de tenir compte de l'expansion de la colonie qui, in fine, mène à une croissance de mortalité, le nombre d'abeilles mortes est divisé par le nombre de butineuses pour chaque semaine. En effet, l'évolution du nombre d'abeilles butineuses peut être comparée au nombre d'abeilles que contient la colonie (Schubnel et al., 2019). Un premier indicateur de mortalité pour chaque rucher est obtenu en considérant uniquement le bac de la ruche expérimentale standardisée pour 15 000 butineuses. Un second indicateur est calculé par la moyenne des mortalités de l'ensemble des bacs d'un même rucher.

3.6.4) Traitement des données d'infestation au varroa

Les données d'infestation au varroa sont obtenues suite au comptage hebdomadaire du nombre de varroas tombés de la ruche et interceptés sur la tablette en dessous du plancher. De la même manière que pour le nombre d'abeilles mortes, le nombre de varroas est divisé par le nombre moyen de butineuses de chaque semaine afin de tenir compte de l'expansion de la colonie et de pouvoir comparer les taux d'infestation entre les différentes semaines. Dans la même logique que pour les données de mortalité, deux indicateurs sont calculés : l'un pour la ruche expérimentale de chaque rucher et l'autre pour l'ensemble des ruches d'un même rucher.

3.7) Analyse, traitement des images et mise en évidence des fleurs d'intérêt (logiciel R)

3.7.1) Construction des cartes avec Agisoft

Pour chaque acquisition d'image, une ortho image ainsi qu'un modèle numérique de terrain sont construits grâce au logiciel Agisoft Metashape Professional (1.5.5.9057). Afin de faciliter l'assemblage des images et le géoréférencement des cartes produites, l'ensemble des cibles présentes sur les photos sont localisées. Lors de la construction des ortho images, l'option « mosaic » est à préféré sur l'option « average » lorsque les cartes sont utilisées à des fins de mise en évidence de pixels fins et éparses tels que des fleurs.

3.7.2) Discrimination et mise en évidence des pixels d'intérêt à l'aide d'indices construits à partir des bandes RGB.

Le traitement des cartes est réalisé à l'aide du logiciel R Studio version 4.0.2 (de Micheaux et al., 2014; Team, 2020) ainsi que gdal et otb. Les principaux packages utilisés sont « raster » et « terra ». L'ensemble des indices créés dans ce travail sont établis expérimentalement en s'inspirant de la littérature (B. Chen et al., 2019) et de la base de données IDB (Index Data Base) (<https://www.indexdatabase.de/>). Le processus de mise en évidence des pixels par discrimination pour chacune des essences recensées est illustré en annexe à l'aide de diagrammes (Annexe 6). Au total, 6 procédures de mises en évidence sont utilisées dans ce travail :

- a. Mise en évidence des pissenlits en prairie
- b. Mise en évidence des pissenlits en verger
- c. Mise en évidence du colza
- d. Mise en évidence des saules
- e. Mise en évidence des fruitiers
- f. Mise en évidence des aubépines
- g. Mise en évidence des merisiers blancs
- h. Mise en évidence des merisiers roses

3.7.3) Traitement des zones quadras

3.7.3.1) Identification des zones quadras sur les cartes via QGIS

Pour chaque zone de quadra effectuée sur le terrain, un polygone géolocalisé à la position exacte du quadra et recouvrant la même superficie, est créé via « QGIS version 3.16.5 ». Ce polygone contient la date d'acquisition du quadra, l'essence étudiée et le nombre d'unités florales dénombrées. Afin d'identifier les zones de quadras, un indice de mise en évidence des pixels rouges dont la formule consiste à soustraire la bande verte à la bande rouge est appliqué à la carte, comme illustré ci-dessous (Figure 18).



Figure 18 : Identification d'une zone de référence sur carte

3.7.3.2) Détermination d'un facteur de conversion par méthode de mise en évidence

Pour chaque quadra effectué, un certain nombre de pixels est mis en évidence selon les différentes méthodes évoquées ci-dessus. Un facteur de conversion est calculé par le rapport du nombre d'unités florales comptées sur le terrain à l'intérieur du quadra et le nombre de pixels mis en évidence par l'algorithme à l'intérieur de cette même zone. Ce facteur permet de faire le lien entre le nombre de pixel mis en évidence par l'algorithme et le nombre d'unités florales présentes sur le terrain. L'ensemble des facteurs de conversion calculés pour une même essence, pour une même semaine (si plusieurs opérations de comptage ont été réalisées pour une même essence) et pour une même méthode de mise en évidence, sont rassemblés pour obtenir un facteur moyen de conversion par essence et par semaine. Les facteurs de conversion obtenus sont repris dans le tableau ci-dessous :

Tableau 10 : Facteur de conversion moyen pour chaque unité florale d'intérêt

Essence mise en évidence	Facteur de conversion moyen (fc)
Pissenlit (prairie)	0.323
Pissenlit (verger)	1.538
Colza (semaine 2)	3.719
Colza (semaine 4)	1.850
Colza (semaine 6)	7.098
Saule	5.668
Fruitier	5.287
Aubépine	56.038
Merisier blanc	1376.064
Merisier rose	13.827

3.7.4) Traitement de l'entièreté des cartes.

Chaque carte construite suite à l'échantillonnage de la zone d'étude est segmentée selon les limites des classes de paysages qui la composent. Chaque entité délimitée est qualifiée d'un numéro de semaine et d'une classe de paysage. Cette combinaison détermine les procédures de mises en évidence à travers desquelles l'entité est traitée.

Pour chaque procédure de mise en évidence appliquée à une entité, un certain nombre de fleurs, une production de nectar et une densité de ressources en nectar sont déterminés. La production de nectar s'obtient en multipliant le nombre d'unités florales de l'essence mise en évidence par la quantité de nectar produite par une unité florale de cette essence pendant une heure. Ces données sont tirées des travaux de Baude et al. (2016) réalisés dans la région du sud-ouest du Royaume-Uni ce qui est comparable avec notre zone d'étude. Elles compilent une liste de 297 espèces végétales accompagnées d'une valeur de rendement journalier de sucres par unité florale (UF) exprimée en $\mu\text{g}/\text{UF}/\text{jour}$. Les valeurs sélectionnées pour la production des essences d'intérêt sont présentées ci-dessous (Tableau 11).

Tableau 11 : Production nectarifères journalières renseignées par Baude (2016) pour les essences d'intérêt en μg par Unité Florale

Essence	Production de nectar [$\mu\text{g}/\text{fleur}/24\text{h}$] (Baude2016)
Colza (<i>Brassica napus</i> L.)	310.493
Fruitiers (poiriers et pommiers) (<i>Pyrus communis</i> L., <i>Malus domestica</i> L.)	118.402
Merisiers (blanc et rose) (<i>Prunus avium</i> L.)	353.451
Saules (<i>Salix</i> spp L.)	36.029
Aubépines (<i>Crataegus monogyna</i> J.)	77.886
Pissenlits (<i>Taraxacum officinale</i> W.)	36.076

La densité en ressources en nectar s'obtient en divisant la quantité de nectar de l'entité par sa surface. L'ensemble de ces valeurs sont enregistrées. Lorsque l'entièreté des classes de paysages d'une même carte est traitée, la carte suivante est analysée. Le processus se termine lorsque l'ensemble des cartes sont traitées. Toutes ces étapes de traitement sont résumées dans le diagramme présenté en annexe (Annexe 4 et Annexe 5). Enfin, la densité moyenne de ressources en nectar est calculée par classe de paysages pour chaque semaine.

3.7.5) Extrapolation de la ressource en nectar à l'ensemble de la zone d'étude pour chaque semaine

Pour chaque semaine, la ressource en nectar d'une classe de paysages de la zone d'étude est obtenue en multipliant la densité moyenne de ressources en nectar de cette classe de paysages par la surface qu'elle représente (Jachuła et al., 2021). De cette manière, une production en

nectar pour chaque classe de paysages est calculée chaque semaine. La production hebdomadaire de nectar de l'ensemble de la zone d'étude peut être obtenue en sommant l'ensemble des productions de nectar d'une même semaine. La dynamique de l'offre en nectar de la zone d'étude s'obtient par la succession des productions hebdomadaires.

3.8) Evaluation des relations entre la production de nectar de l'environnement et les variables apicoles observées (logiciel R)

Pour l'ensemble des combinaisons possibles entre les différentes variables apicoles observées sur les ruches et la production nectarifère de chaque classe de la zone de butinage ainsi que la production totale, un coefficient linéaire de Pearson est calculé. Cette manipulation est réalisée pour l'ensemble des 3 ruchers et pour un rucher « moyen » qui reprend les valeurs moyennes de l'ensemble des variables apicoles des 3 ruchers. Les ressources de la zone de butinage du rucher moyen s'obtiennent également par la moyenne des production nectarifères des 3 ruchers. Parmi toutes les relations, seules celles présentant un coefficient linéaire de Pearson supérieur à 0,75 sont retenues. Elles sont qualifiées de « modérées », de « forte » ou de « très forte » lorsque le R^2 est respectivement supérieur à 0,75, 0,9 et 0,95. Pour l'ensemble de ces relations retenues, une droite de régression linéaire est dessinée. Toutes ces manipulations de données sont réalisées via R Studio.

4) Présentation des résultats

4.1) Description du jeu de données

Le plan expérimental de cette étude est construit pour couvrir une période de 6 semaines consécutives. Etant donné l'impossibilité de vol dû à de mauvaises conditions météorologiques durant la cinquième semaine de l'expérimentation, aucune carte n'a pu être créée pour cette période. Pour l'acquisition des données de télédétection, 12 zones de vol sont déterminées. Un total de 120 cartes est généré suite au traitement d'images acquises sur 5 semaines (12 ortho images et de 12 modèles numériques de terrain par semaine).

En ce qui concerne les données acquises sur les ruchers, plus de 2000 mesures de poids de la ruche expérimentale de chaque rucher sont effectuées durant l'intégralité de la période

d'expérimentation. Les rentrées en pollen, la mortalité des abeilles et l'infestation au varroa sont également quantifiées à fréquence hebdomadaire. Parmi l'intégralité des résultats de quantification de la ressource nectarifère et des relevés des données apicoles, seuls les résultats relatifs au rucher de GM sont illustrés dans cette section afin d'alléger cette dernière. Néanmoins, l'ensemble des résultats y sont discutés. Les illustrations relatives aux ruchers de Loncée et de Corroy-le-Château sont présentés en annexe.

4.2) Quantification de la ressource nectarifère

4.2.1) Présentation des résultats d'analyse d'image :

4.2.1.1) Mise en évidence des essences mellifères d'intérêt

Les images résultant du traitement de discrimination (Figure 19 - Figure 26) attestent de la possibilité de mise en évidence des essences mellifères d'intérêt à partir d'image aériennes RGB d'une résolution de 3 cm. L'image de gauche illustre la situation réelle en couleur RGB tandis que l'image de droite représente les pixels issus du traitement de discrimination. Les pixels sélectionnés sont de couleur blanche et ont une valeur unitaire tandis que le reste des pixels sont de couleur noire et ont une valeur nulle. Afin de calculer le nombre de pixels mis en évidence, la somme des valeurs de l'intégralité des pixels de l'image est réalisée.

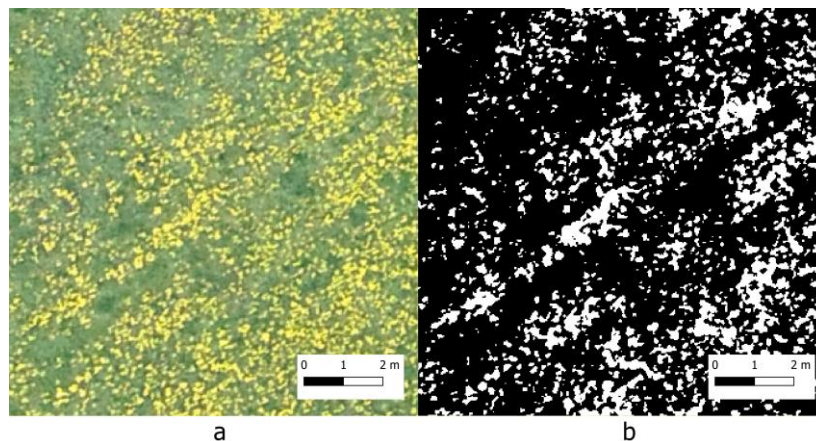


Figure 19 : Résultat de mise en évidence des fleurs de pissenlits en prairie

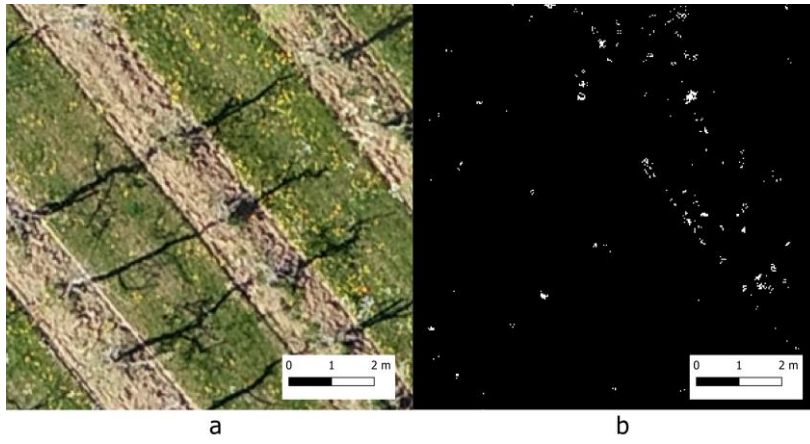


Figure 20 : Résultat de mise en évidence des pissenlits en verger

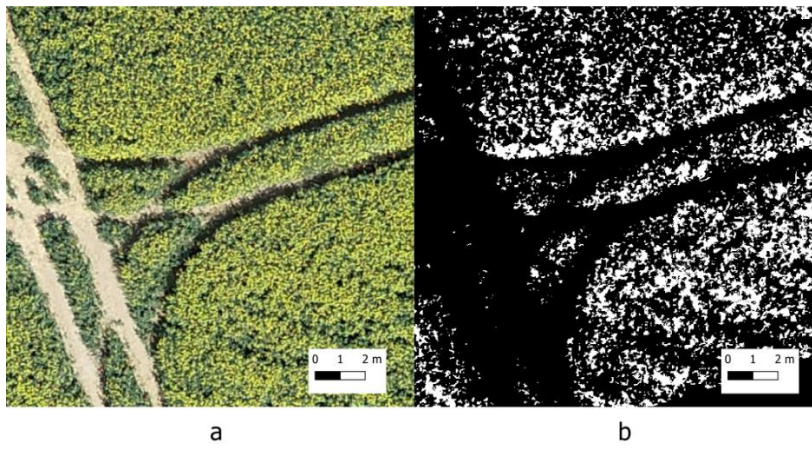


Figure 21 : Résultat de mise en évidence du colza.

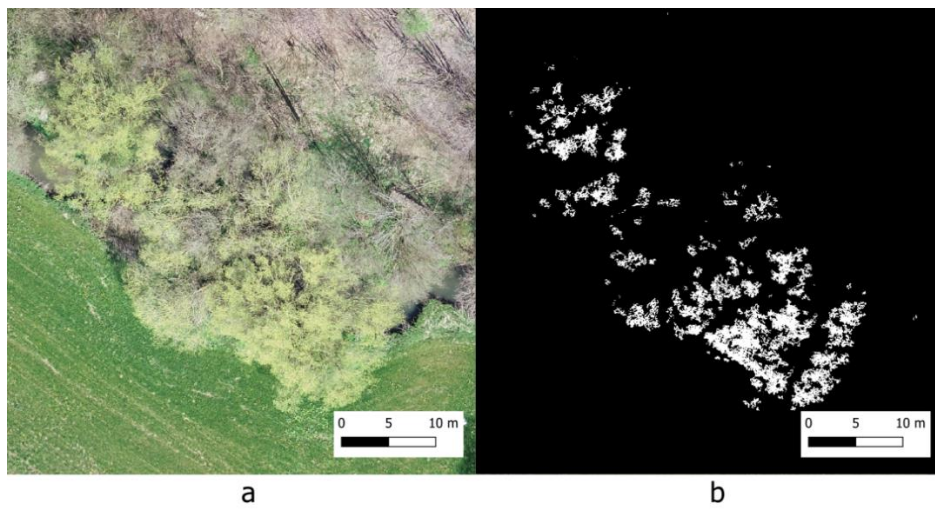


Figure 22 : Résultat de mise en évidence des saules

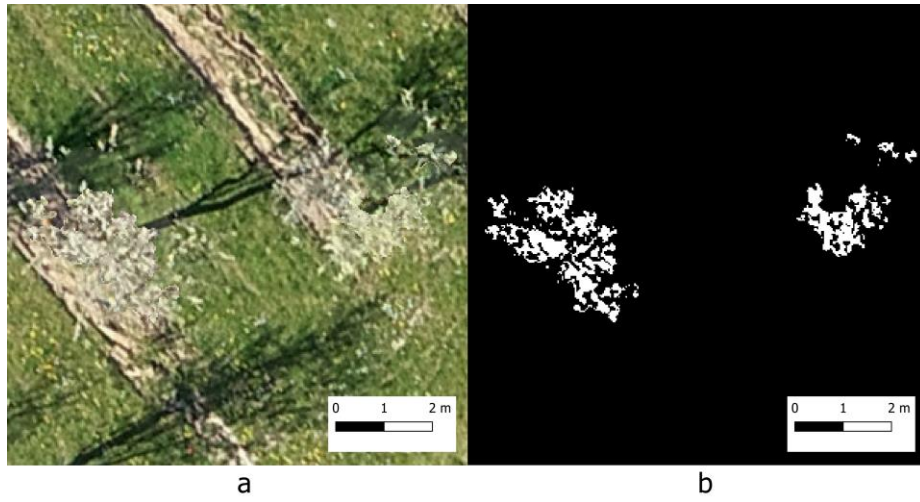


Figure 23 : Résultat de mise en évidence des fruitiers

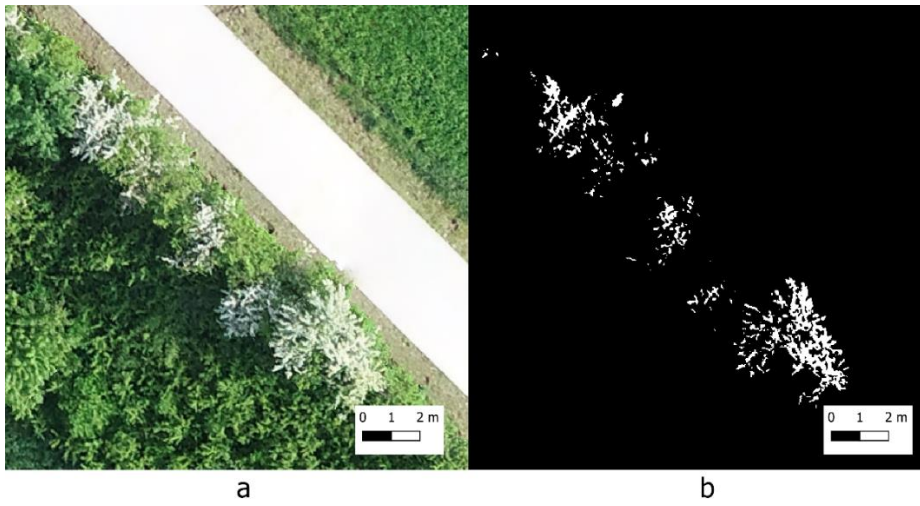


Figure 24 : Résultat de mise en évidence de l'aubépine

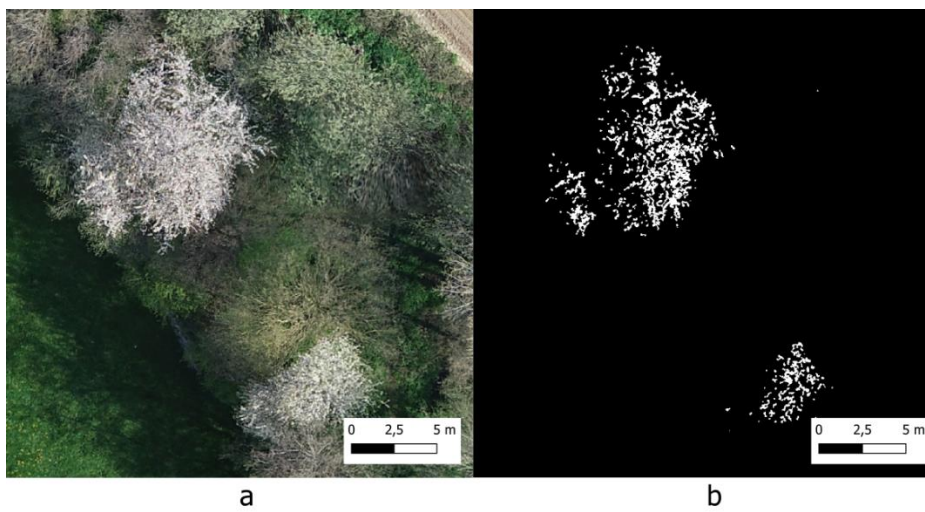


Figure 25 : Résultat de mise en évidence des merisiers blancs

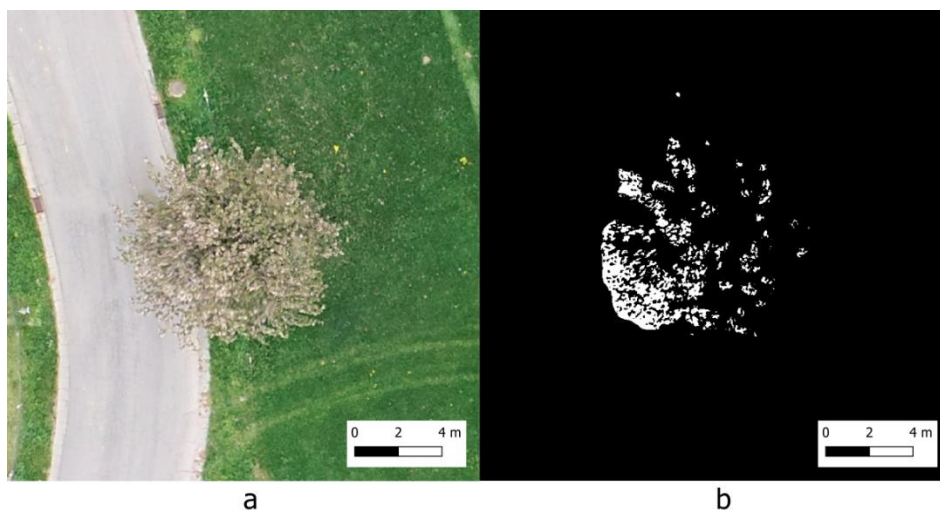


Figure 26 : Résultat de mise en évidence des merisiers roses

4.2.1.2) Mise en évidence de plusieurs essences mellifères d'intérêts sur les zones

Les illustrations suivantes présentent les résultats de discrimination à l'échelle de la carte, respectivement pour les zones 3, 11, 5 et 12. Les couleurs utilisées sont des fausses couleurs pour accentuer la mise en évidence.

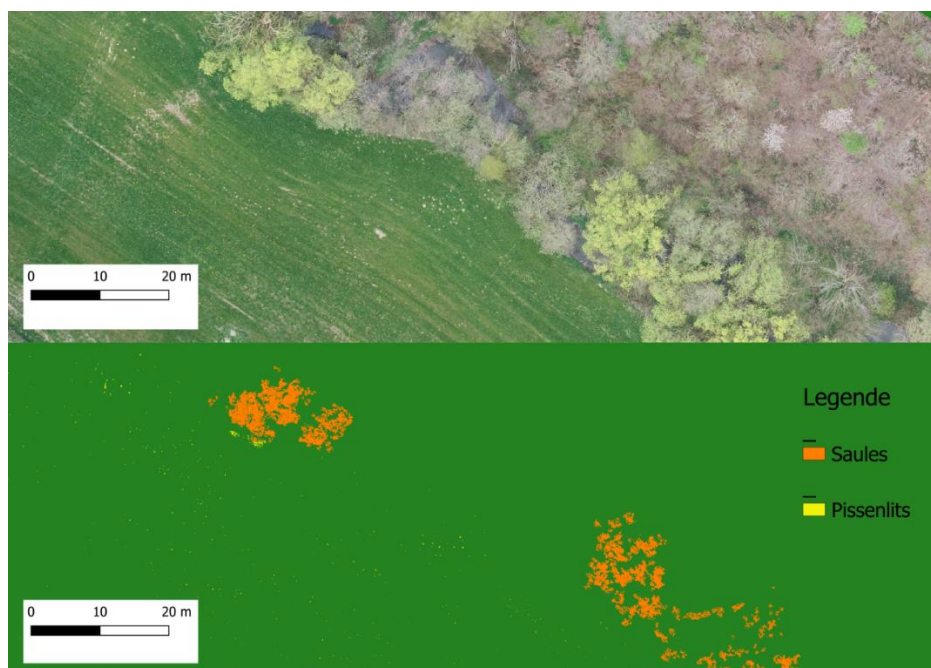


Figure 27 : Résultat de la mise en évidence des floraisons mellifère (Saules et Pissenlits) sur la zone 3 lors de la deuxième semaine d'expérimentation.

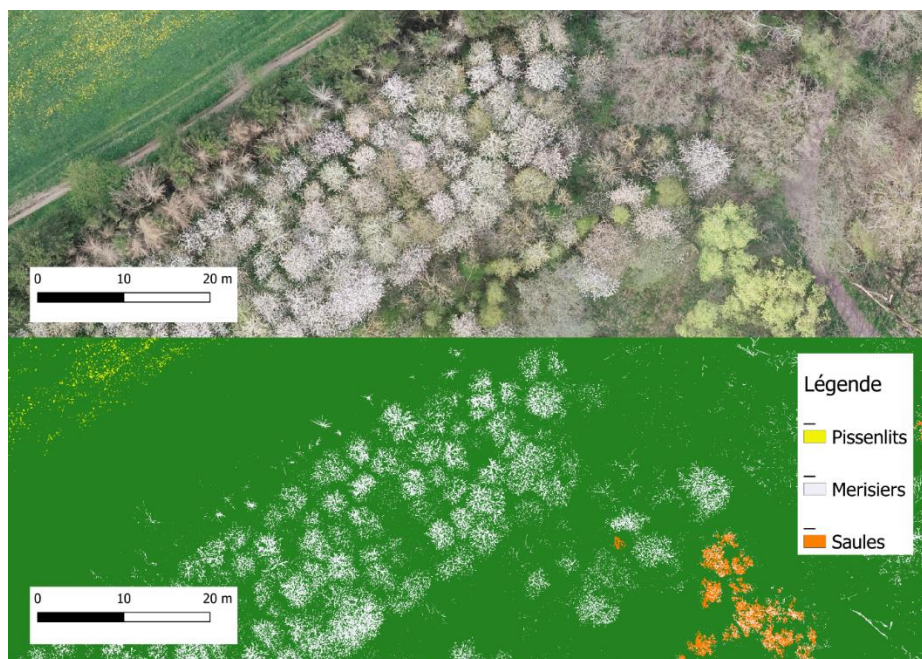


Figure 28 : Résultat de la mise en évidence des floraisons mellifère (pissenlits, merisiers et saules) sur la zone 11 lors de la deuxième semaine d'expérimentation



Figure 29 : Résultat de la mise en évidence des floraisons mellifère (fruitiers) sur la zone 5 lors de la première semaine d'expérimentation

4.2.1.3) Mise en évidence de l'évolution de la floraison de colza durant la période d'expérimentation

Les figures suivantes illustrent l'évolution hebdomadaire de la floraison du colza au cours de la durée d'expérimentation. La floraison augmente en intensité jusqu'à la semaine quatre ou

elle atteint une intensité maximale. Ensuite elle diminue jusqu'à la fin de la durée de l'expérimentation.

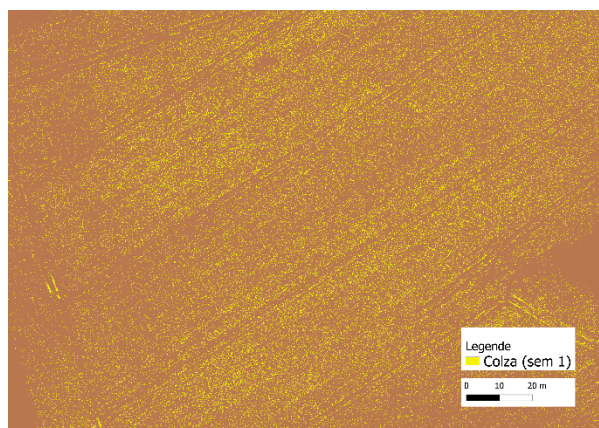


Figure 30 : Résultat de la mise en évidence de la floraison du colza la première semaine (zone 12)

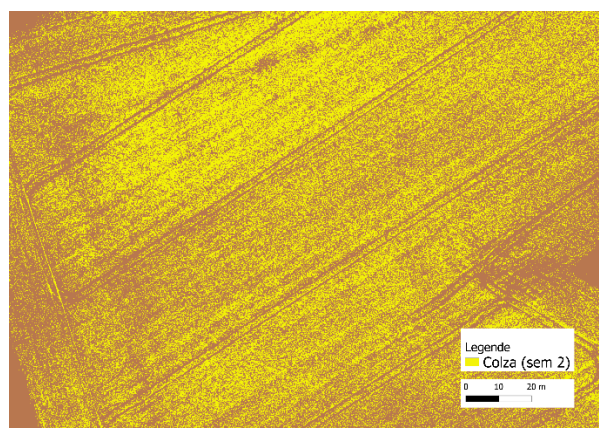


Figure 31 : Résultat de la mise en évidence de la floraison du colza la deuxième semaine (zone 12)

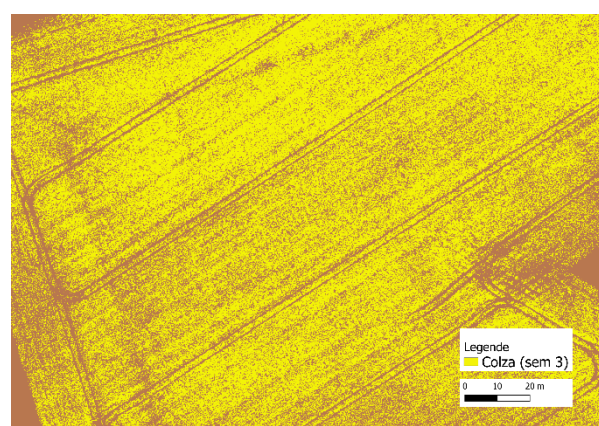


Figure 32 : Résultat de la mise en évidence de la floraison du colza la troisième semaine (zone 12)

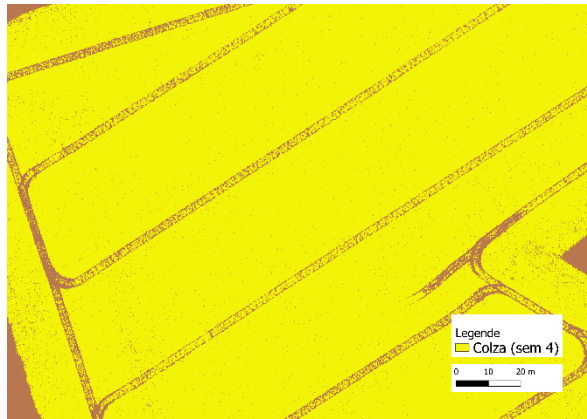


Figure 33 : Résultat de la mise en évidence de la floraison du colza la quatrième semaine (zone 12)

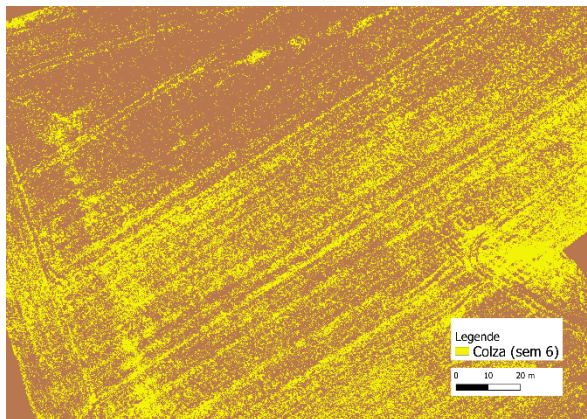


Figure 34 : Résultat de la mise en évidence de la floraison du colza la cinquième semaine (zone 12)

4.2.2) Dynamique hebdomadaire des densités de productions de nectar (kg/ha) par classe de paysage

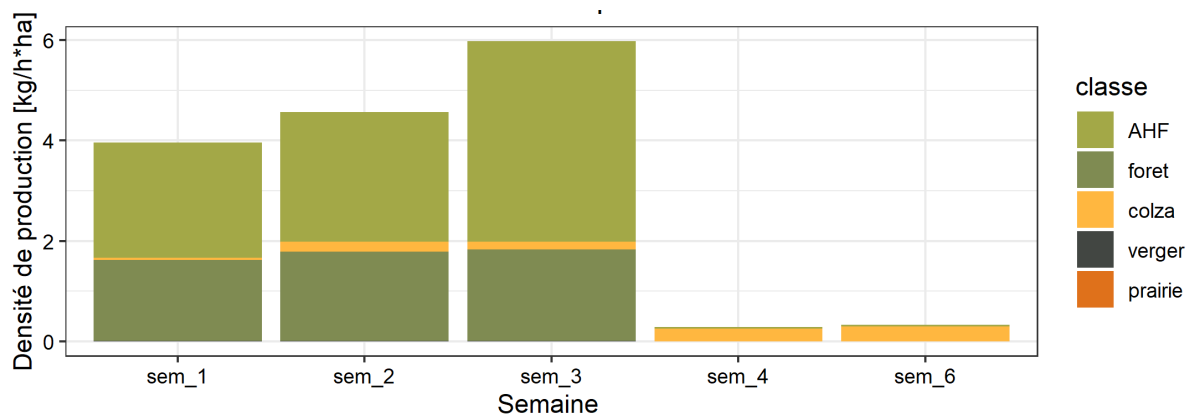


Figure 35 : Evolution hebdomadaire des quantités de nectar produites par heure pour une surface d'un ha pour la zone de butinage de Grand Manil.

L'illustration de l'évolution hebdomadaire de la densité de production nectarifère renseigne différentes informations. Premièrement, les classes de paysages les plus productrices de nectar par ordre décroissant sont les « arbres hors forêt », les forêts et les champs de colza. Ensuite, la densité production par classe de paysage est croissante jusqu'à la troisième semaine et chute brusquement à partir de la quatrième semaine pour devenir quasi négligeable.

Afin d'illustrer les productions nectarifères mêmes pour les dernières semaines, un tableau présentant l'entièreté des productions est présent ci-dessous (Tableau 12).

Tableau 12 : Production nectarifère (kg/ha*h) hebdomadaire par classe de paysage

Classe	Sem 1	Sem 2	Sem 3	Sem 4	Sem 6
AHF	2.291304	2.585684	3.9977	0.031633	0.028085
Colza	0.053008	0.200625	0.149895	0.245947	0.294826
Forêt	1.606449	1.773587	1.822158	0	0
Prairie	3.89E-05	9.02E-05	9.63E-05	0	0
Verger	0.007452	0.008146	0.008595	0	0

4.2.3) Dynamique hebdomadaire des productions de nectar par classe de paysage

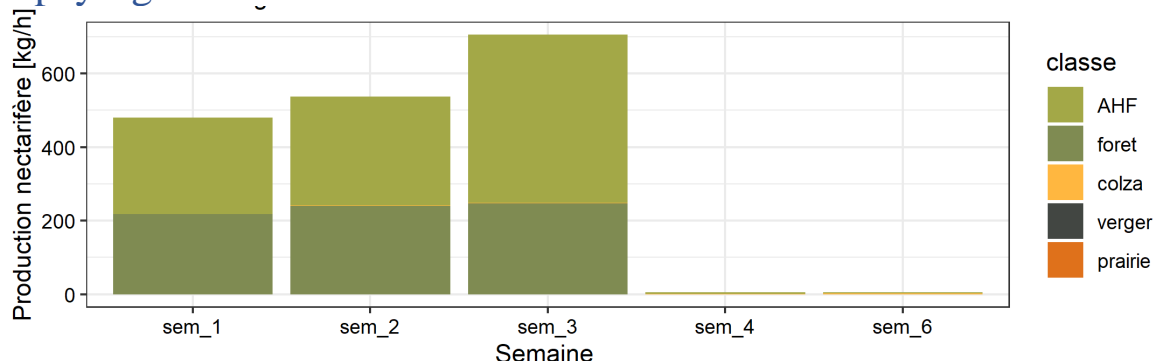


Figure 36 : Evolution hebdomadaire de la production nectarifère (kg/h) de l'environnement pour la zone de butinage de Grand-Manil.

La production de nectar à l'échelle du paysage de Grand-Manil suit la même dynamique que la densité de production. Des observations similaires peuvent être faites pour les autres zones de butinages (Annexe 7 et Annexe 8). Afin d'illustrer les productions nectarifères même pour les dernières semaines, un tableau présentant l'entièreté des productions est présent ci-dessous (Tableau 13).

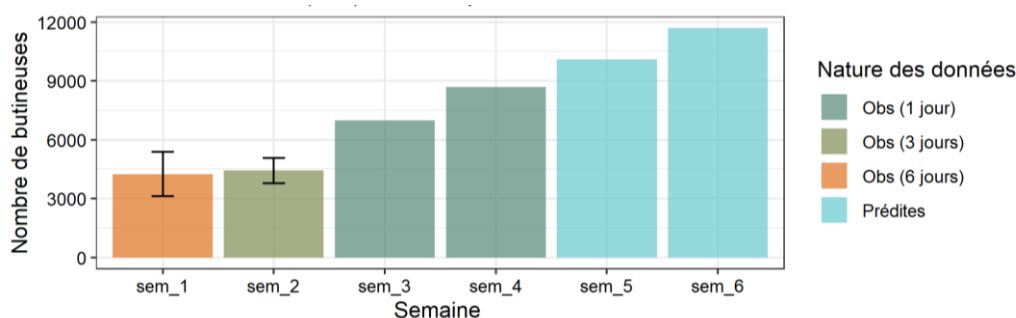
Tableau 13 : Production nectarifère (kg/h) par classe de paysage pour la zone de butinage de Grand-Manil

Classe	Sem 1	Sem 2	Sem 3	Sem 4	Sem 6
AHF	262.2589	295.9533	457.5704	3.620677	3.21451
Colza	0.316863	1.199256	0.896012	1.470173	1.762352
Forêt	217.571	240.2075	246.7858	0	0
Prairie	0.003478	0.008078	0.008618	0	0
Verger	0.098079	0.107213	0.113127	0	0

4.3) Résultat des relevés de données apicoles

4.3.1) Dynamique du nombre de butineuses

Tableau 14 : Evolution hebdomadaire du nombre de butineuses pour le rucher de Grand-Manil.



Ce graphique met en évidence l'évolution du nombre de butineuses sortant chaque matin de la ruche. En légende sont mentionnés le nombre de jours sur la semaine pour lesquels les enregistrements de poids se rapprochent de l'allure théorique et permettent ainsi le calcul du nombre de butineuses. Les valeurs prédites sont issues d'une extrapolation linéaire (voir section matériel et méthode). Il est à noter que l'écart type n'est pas calculable lorsque le nombre de jours utilisés pour calculer la moyenne est égal à 1. Cette illustration permet de mettre en évidence une tendance à l'augmentation du nombre de butineuses. Des observations similaires peuvent être faites pour les autres zones de butinages (Annexe 7 et Annexe 8)

4.3.2) Dynamique des différents indicateurs de gains de nectar

Dans ce travail, plusieurs indices de gains sont créés (3.6.1.2):

- Le gain journalier brut divisé par le nombre d'heure à plus de 12°C et pour une quantité de 15 000 butineuses.
- Le gain journalier net divisé par le nombre d'heure à plus de 12°C pour une quantité de 15 000 butineuses.

- Le gain journalier net divisé par le nombre d'heure de vol pour une quantité de 15 000 butineuses.

Pour rappel, le gain brut se calcule comme la différence de poids entre le poids de la ruche au lever et au coucher du soleil. Le gain net est la différence de poids de la ruche entre le poids de la ruche au moment du retour des butineuses et le moment de départ des butineuses.

Les variables étudiées sur le rucher sont toutes moyennées à l'échelle de la semaine et standardisées pour 15 000 butineuses. Cette standardisation permet de tenir compte de la dynamique du développement de la colonie, variable d'une ruche à l'autre.

L'évolution de ces indices de gain à l'échelle de la semaine est illustrée ci-dessous pour le rucher de Grand-Manil. Le nombre de jours utilisé pour le calcul du gain moyen hebdomadaire est référencé à l'aide d'un code couleur. Il est à noter qu'aucune donnée de gain net n'est calculable pour les semaines 5 et 6 du rucher de Grand-Manil étant donné l'allure non théorique des courbes de poids journalières de la ruche expérimentale. Les graphiques des données des 2 autres ruchers sont disponibles en annexe (Annexe 11 et Annexe 12).

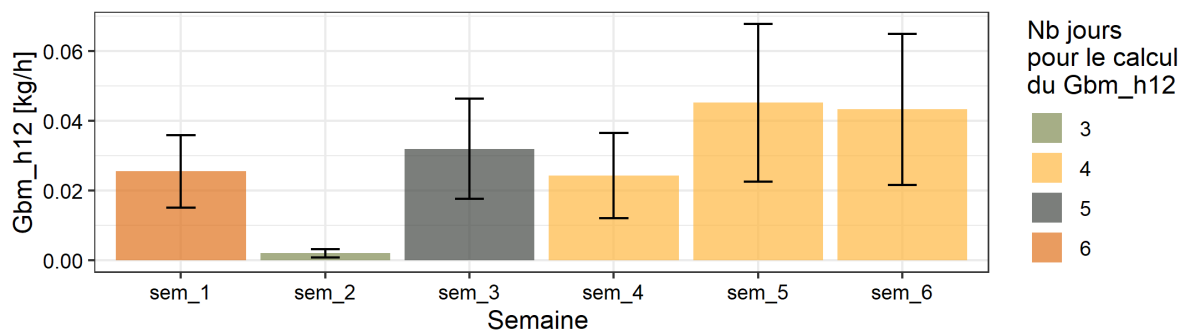


Figure 37 : Evolution hebdomadaire du gain journalier brut moyen par heure (dont la température maximale est supérieure à 12°C) pour 15 000 butineuses pour le rucher de Grand Manil.

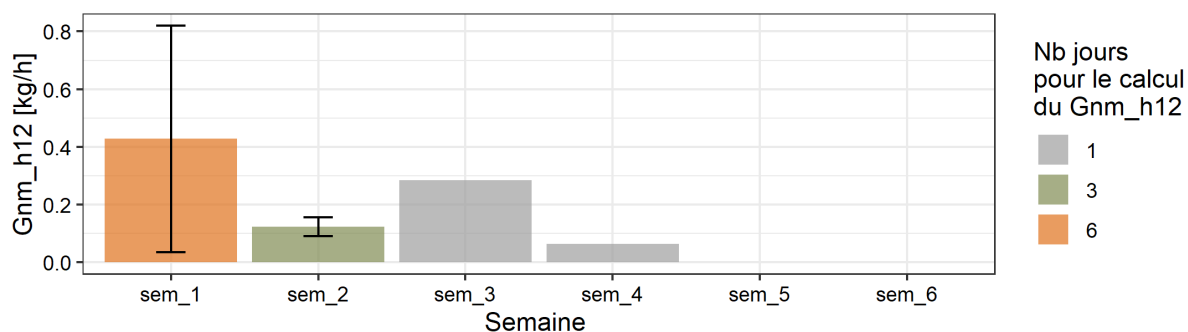


Figure 38 : Evolution hebdomadaire du gain journalier net par heures (dont la température maximale est supérieure à 12°C) pour le rucher de Grand Manil.

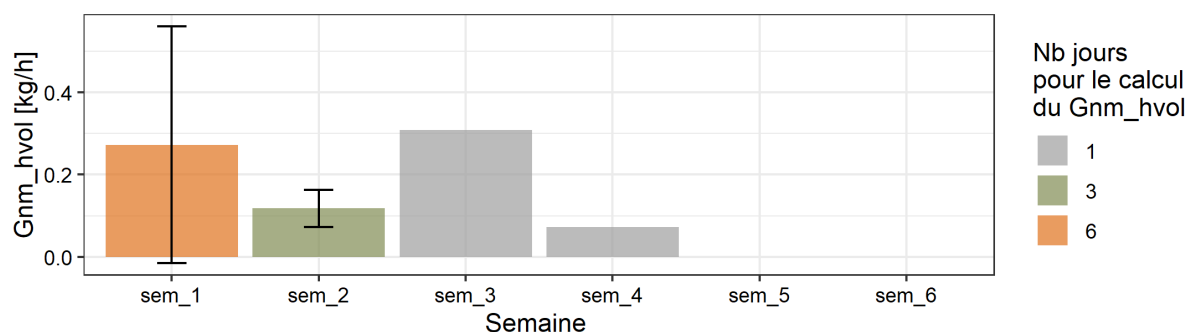


Figure 39 : Evolution hebdomadaire du gain journalier net moyen par heure de vol de butinage, standardisé pour 15 000 butineuses pour le rucher de Grand Manil.

Les gains bruts du rucher de Lonzée et de Grand-Manil mettent en évidence une tendance à l'augmentation jusqu'à l'atteinte d'un maximum en sixième semaine et en cinquième semaine respectivement pour le gain journalier brut moyen et pour le gain brut moyen divisé par le nombre d'heure à plus de 12°C. Le gain journalier brut moyen relatif au rucher de Corroy le Château atteint un maximum lors de la troisième semaine et aucune tendance ne peut être tirée pour le gain brut divisé par le nombre d'heure à plus de 12°C de ce rucher.

Aucune tendance particulière ne peut être réellement observée en ce qui concerne l'évolution temporelle des gains nectarifères nets pour les ruchers de Corroy le Château et de Grand-Manil étant donné que seuls 3 et 4 données sont disponibles respectivement pour ces ruchers. En ce qui concerne les gains nets du rucher de Lonzée, une diminution est observée après l'atteinte d'un maximum à la troisième semaine.

Sur ces trois dernières figures, il peut être observé que le gain brut est systématiquement inférieur au gain net lorsque le calcul de ce dernier est réalisable. En effet, le gain brut peut être diminué des pertes de poids effectués à deux moments clés de la journée :

- entre le lever du soleil et le départ des butineuses.
- entre le retour des butineuses à la ruche et le coucher de soleil.

Cette observation est également réalisée pour les autres ruchers.

4.3.3) Dynamique de la récolte de pollen

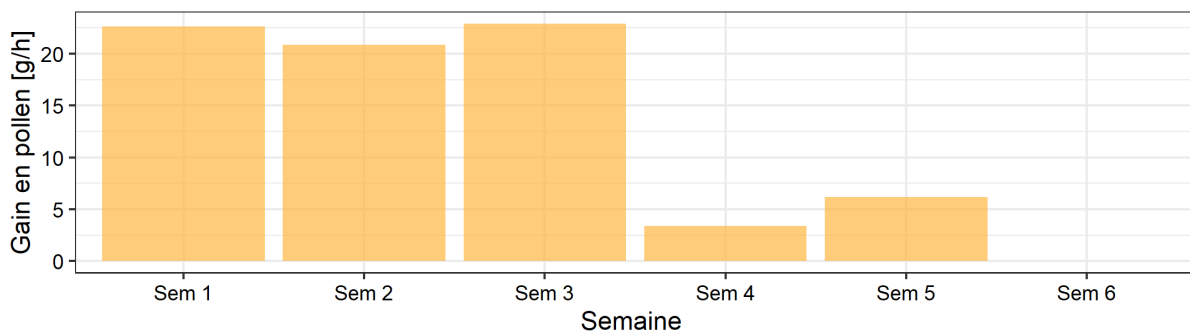


Figure 40 : Evolution hebdomadaire des rentrées en pollen par heure dont la température maximale est supérieure à 12°C et pour 15 000 butineuses pour le rucher de Grand-Manil

L'illustration de l'évolution hebdomadaire des rentrées de pollen pour le rucher de Grand-Manil met en évidence une diminution brusque des quantités de pollen récoltées à partir de la quatrième semaine. Aucune donnée n'est disponible pour la sixième semaine étant donné que le pollen récolté n'a pas été pesé. Il en est de même pour les autres ruchers. Pour le rucher de Corroy-le-Château, un maximum est atteint en deuxième semaine pour ensuite diminuer jusqu'à la quatrième semaine pour la diversité et jusqu'à la cinquième semaine pour les gains. Les quantités de pollen récoltées pour le rucher de Lonzée atteignent un maximum lors de la troisième semaine. La diversité des pollens récoltée pour ce même rucher est quasi constante durant la totalité de l'expérimentation.

4.3.4) Dynamique de la diversité des pollens récoltés

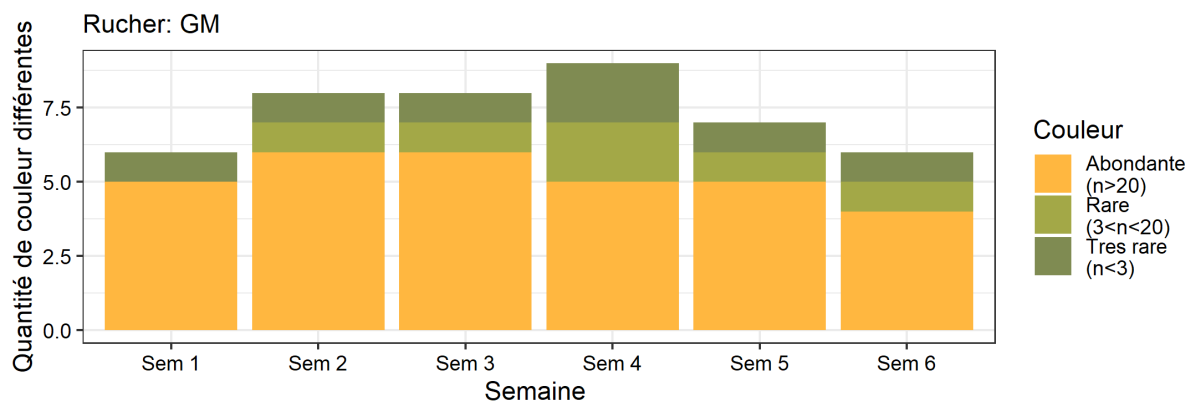


Figure 41 : Evolution hebdomadaire de la diversité chromatique des rentrées en pollen pour le rucher de Grand-Manil

L'évolution hebdomadaire de la diversité des pelotes de pollen récoltées suit une augmentation croissante jusqu'à la quatrième semaine où elle rencontre un maximum. A partir de ce point, elle diminue jusqu'à la fin de l'expérimentation. Il est intéressant de consulter les observations homologues pour les autres ruchers car elles ne suivent pas les mêmes tendances.

4.3.5) Dynamique de la mortalité

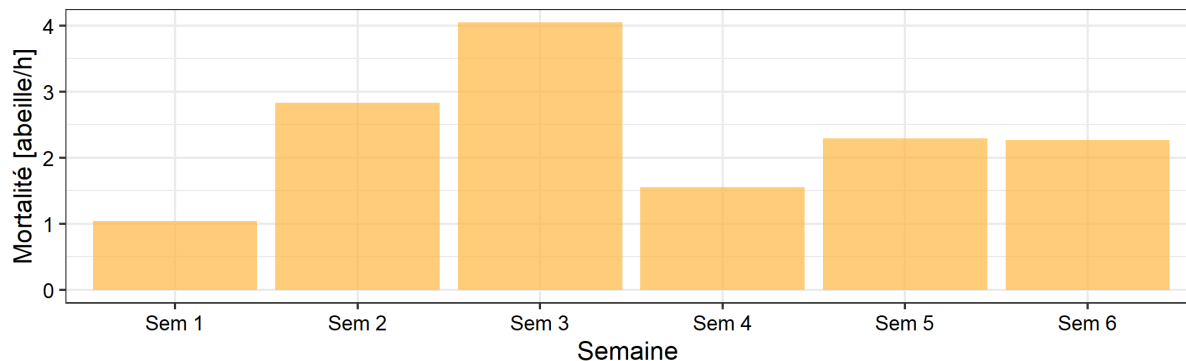


Figure 42: Evolution hebdomadaire de la mortalité adulte par heure pour 15 000 butineuses pour la ruche expérimentale du rucher de Grand-Manil

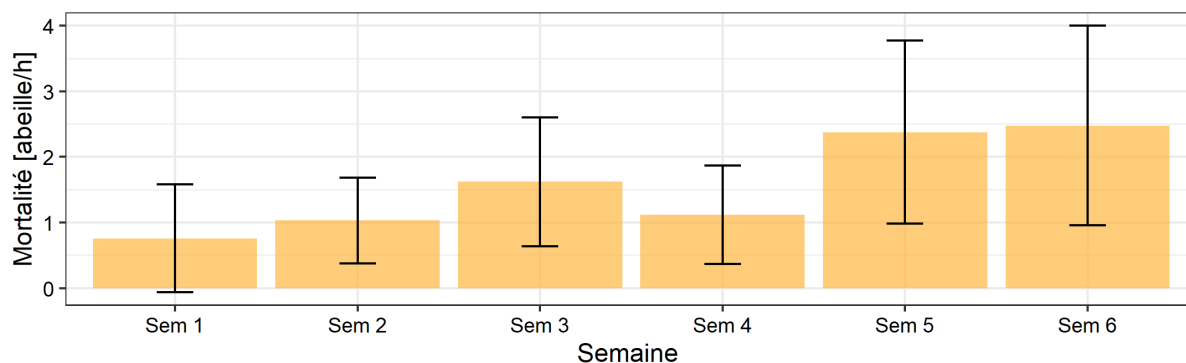


Figure 43 : Evolution hebdomadaire de la mortalité adulte moyenne par heure et écart type pour le rucher de Grand-Manil

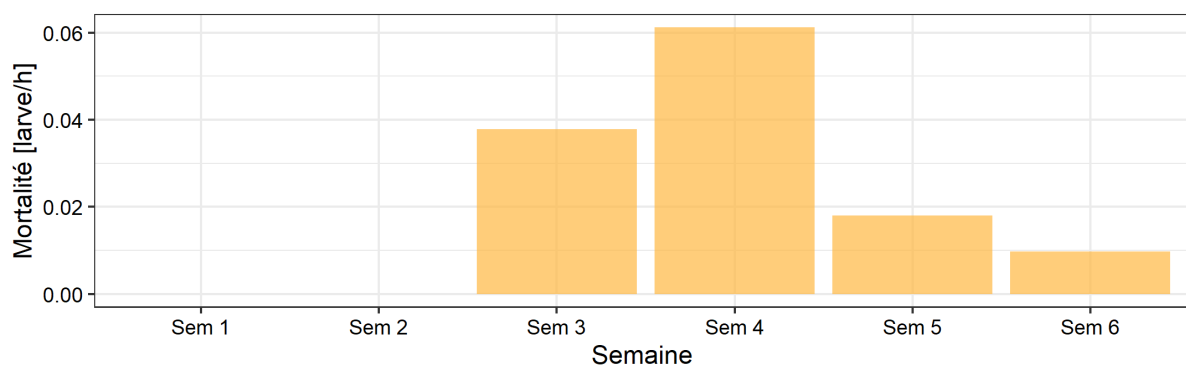


Figure 44 : Evolution hebdomadaire de la mortalité larvaire par heure et pour 15 000 butineuses pour la ruche expérimentale du rucher de Grand-Manil

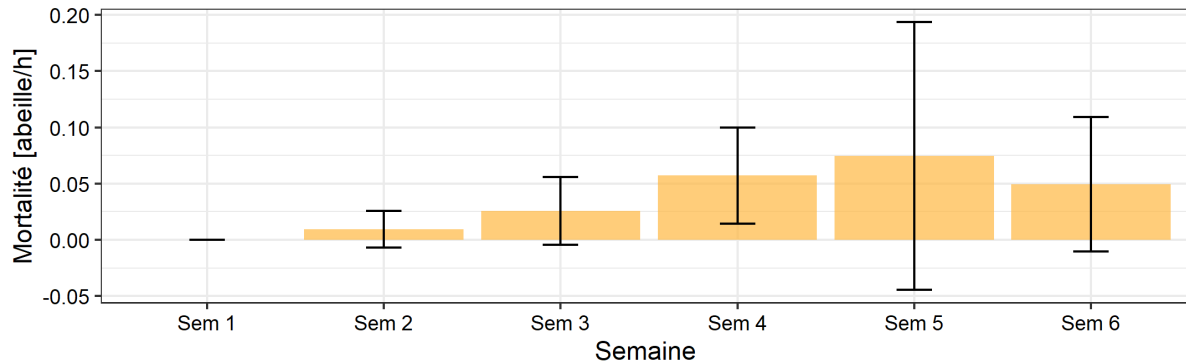


Figure 45 : Evolution hebdomadaire de la mortalité larvaire moyenne par heure et écart type pour le rucher de Grand-Manil

Les taux de mortalités larvaires et adultes calculés sur l'ensemble des ruchers de Corroy le château, de Grand-Manil et de Loncée, suivent une tendance similaire à ce qui est renseigné dans la littérature, à savoir une augmentation constante du mois d'Avril au mois de juin (Guerriat, 2017), à l'exception du taux de mortalité larvaire pour les ruchers de Loncée et de Grand Manil où une diminution est observée après l'atteinte d'un maximum respectivement à la troisième et à la cinquième semaine. Une dynamique similaire s'observe pour le taux de mortalité adulte sur les ruches expérimentales des ruchers de Grand-Manil (maximum en

troisième semaine) et de Lonzée (maximum en quatrième semaine) ainsi que pour le taux de mortalité larvaire de la ruche expérimentale de Grand-Manil (maximum en quatrième semaine). En ce qui concerne la mortalité larvaire pour la ruche expérimentale de Lonzée, une diminution constante durant toute la période d'expérimentation est constatée.

4.3.6) Dynamique de l'infestation au varroa

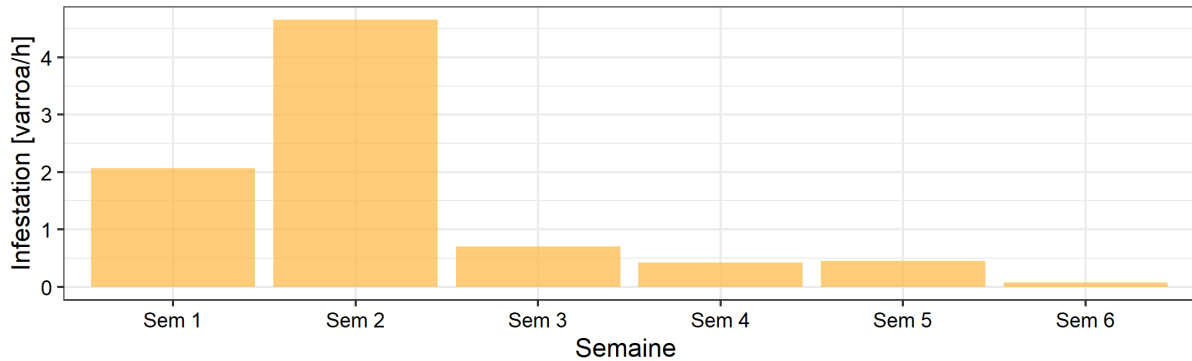


Figure 46 : Evolution hebdomadaire de l'infestation au Varroa pour la ruche expérimentale du rucher de Grand-Manil

L'infestation au varroa recensée sur la ruche expérimentale connaît un pic durant la deuxième semaine. Elle diminue ensuite jusqu'à la sixième semaine où elle devient quasi négligeable.

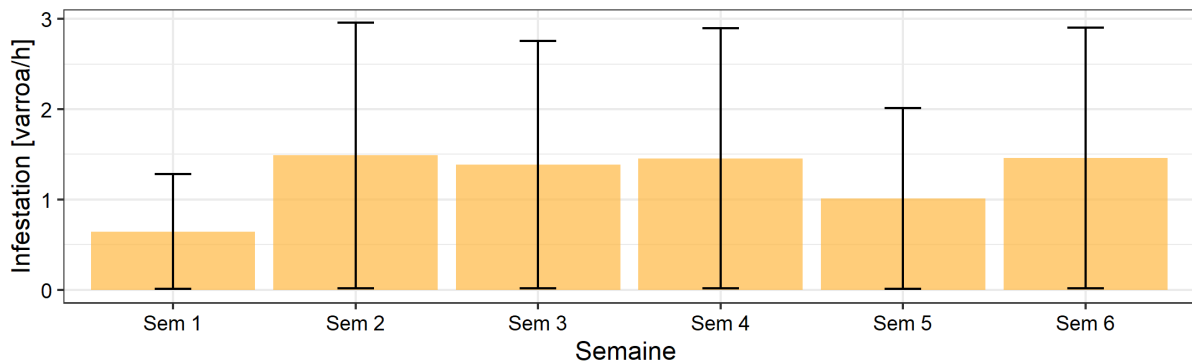


Figure 47 : Evolution hebdomadaire de l'infestation au Varroa moyenne par heure et écart type pour le rucher de Grand-Manil

L'infestation au varroa pour les ruches expérimentales de Corroy-le-Château et de Grand Manil atteignent un maximum lors de la deuxième semaine pour ensuite diminuer jusqu'à la fin de l'expérimentation. L'infestation moyenne de l'ensemble de ces 2 ruchers est quasi constante durant toute la durée de l'expérimentation avec un pic d'infestation lors de la cinquième semaine uniquement observée pour le rucher de Corroy le Château. Une diminution de l'infestation au varroa est la tendance observée pour la ruche expérimentale de Lonzée. Un pic

lors de la troisième semaine est néanmoins observé. Pour l'ensemble ce même rucher, l'infestation au varroa moyenne augmente constamment jusqu'à la cinquième semaine où elle atteint un maximum pour ensuite diminuer.

4.3.7) Récoltes de miel réalisées sur chacun des ruchers

Les ruchers de Grand-Manil et de Lonzée ont permis une récolte de miel respectivement de 11.9 (sur une ruche) et de 70 kg (sur 5 ruches). En ce qui concerne les ruches expérimentales, une quantité de 11.9 kg et de 18.6 kg ont été extraites respectivement pour la ruche expérimentale de Grand-Manil et la ruche expérimentale de Lonzée. La ruche expérimentale de Corroy-le-Château n'a pas pu être récoltée suite à un essaimage de la colonie.

4.3.8) Analyse des miels des trois zones d'études

Le choix des essences d'intérêt de notre étude est basé sur la littérature. Cependant, les analyses de miel réalisées par le CARI ont confirmé la pertinence de ce choix pour les 3 ruchers. Mis à part les merisiers, l'ensemble des essences d'intérêt sont identifiées dans les miels récoltés. Les origines botaniques des miels analysés sont reprises ci-dessous (Tableau 15).

Tableau 15 : Identification des essences mellifères par l'analyse des miels des différents ruchers

	Origines botaniques	Pollen dominant	Pollen d'accompagnement
Rucher de Corroy le Château	Saule, colza, pissenlits, fruitiers, aubépines	Brassicaceae (49%)	Salix sp. (Saule) (11%), Fruitiers (32%)
Rucher de Grand Manil	Miellat, fruitiers, saule	Fruitiers (52%)	Salix sp. (Saule) (35%)
Rucher de Lonzée	Fruitiers, miellat, saule, pissenlits	Brassicaceae (60%)	Salix sp. (Saule) (11%), Fruitiers (23%)

4.4) Présentation des résultats de l'étude de la relation entre la production de nectar du paysage et les variables quantifiées sur les ruches.

4.4.1) Présentation des coefficients de détermination linéaires de Pearson (R^2) entre l'ensemble des variables apicoles observées et les productions nectarifères environnementales (par classe de paysage).

Ces tableaux reprennent l'ensemble des coefficients linéaires de Pearson (R^2) calculés pour chaque combinaison de variables apicoles et de production nectarifère par classe de paysage. Seul les relations présentant un R^2 supérieurs à 0,75 sont prises en compte pour la suite de ce travail.

4.4.1.1) Coefficient de détermination linéaires de Pearson (R^2) : Rucher de Corroy-le-Château

Tableau 16 : Coefficients de détermination linéaires de Pearson pour le rucher de Corroy-le-Château. Relation modérée ($R^2 > 0,75$) en rouge / Relation forte ($R^2 > 0,9$) en jaune / Relation très forte ($R^2 > 0,95$) en vert.

$C_p \backslash V_r$	Gbn	But	Gp	Div_p	AM_x	LM_x	AM_r	LM_r	Va_x	Va_r
N_all	0.33	0.53	0.37	0.52	0.25	0.21	0.03	0.50	0.44	0.01
N_AHF	0.37	0.37	0.17	0.45	0.41	0.25	0.11	0.43	0.29	0.00
N_Colza	0.65	0.55	0.27	0.43	0.02	0.00	0.02	0.24	0.33	0.50
N_Forêt	0.29	0.64	0.54	0.55	0.15	0.17	0.00	0.52	0.54	0.01
N_Prairie	0.10	0.39	0.23	0.46	0.27	0.44	0.05	0.55	0.39	0.07
N_Verger	0.30	0.63	0.51	0.54	0.16	0.17	0.00	0.52	0.53	0.01

Légende : C_p = Classe de paysage / V_r = Variables du rucher / N_{all} = Production nectarifère toutes classes de paysage confondues [kg/h] / N_{AHF} = Production nectarifère pour la classe « Arbre Hors Forêt » [kg/h] / N_{Colza} = Production nectarifère pour la classe « Colza » [kg/h] / N_{Foret} = Production nectarifère pour la classe « Forêt » [kg/h] / $N_{Prairie}$ = Production nectarifère pour la classe « Prairie » [kg/h] / N_{Verger} = Production nectarifère pour la classe « Verger » [kg/h] / Gbn = Gain nectarifère brut [kg/h] / But = Nombre de butineuses [butineuse] / Gp = Gain pollinifère [g/h] / Div_p = Diversité des pelotes de pollen [Nombre de couleurs différentes] / AM_x = Nombre d'imagos morts pour la ruche expérimentale [Imago/h] / LM_x = Nombre de larves mortes pour la ruche expérimentale [Larve/h] / AM_r = Nombre d'imagos morts pour l'ensemble du rucher [Imago/h] / LM_r = Nombre de larves mortes pour l'ensemble du rucher [Larve/h] / Va_x = Infestation au varroa pour la ruche expérimentale [varroa/h] / Va_r = Infestation au varroa pour l'ensemble du rucher [varroa/h]

Aucune relation entre les variables apicoles du rucher de Corroy-le-Château et la production nectarifère de la zone de butinage (totale ou par classe) de ce rucher ne présente un coefficient de Pearson supérieur à 0,75. Le R^2 le plus élevé est de 0,65 et quantifie la relation entre le gain brut nectarifère et la production de nectar de la classe « forêt ».

4.4.1.2) Coefficient de détermination linéaires de Pearson (R^2) : Rucher de Grand-Manil

Tableau 17: Coefficients de détermination linéaires de Pearson pour le rucher de Grand-Manil. Relation modérée ($R^2 > 0,75$) en rouge / Relation forte ($R^2 > 0,9$) en jaune / Relation très forte ($R^2 > 0,95$) en vert.

$C_p \backslash V_r$	Gbn	But	Gp	Div_p	AM_x	LM_x	AM_r	LM_r	Va_x	Va_r
N_all	0.16	0.57	0.91	0.01	0.30	0.09	0.16	0.64	0.27	0.08
N_AHF	0.10	0.46	0.82	0.01	0.39	0.05	0.11	0.52	0.18	0.05
N_Colza	0.05	0.65	0.52	0.01	0.02	0.09	0.47	0.69	0.10	0.72
N_Forêt	0.26	0.72	0.98	0.02	0.17	0.19	0.25	0.80	0.42	0.13
N_Prairie	0.27	0.44	0.65	0.08	0.51	0.06	0.09	0.44	0.36	0.00
N_Verger	0.25	0.71	0.98	0.02	0.18	0.18	0.24	0.79	0.40	0.13

Abbreviations : IDEM Rucher Corroy le Château

Plusieurs relations entre les variables apicoles du rucher de Grand-Manil et la production nectarifère de la zone de butinage de ce rucher présentent un R^2 supérieur à 0.75. Deux groupes de variables apicoles sont mis en évidence :

- Les gains en pollen [g/h]
- La mortalité larvaire moyenne du rucher [larve/h]

En ce qui concerne les gains de pollen, une forte relation ($R^2 > 0,9$) est observée avec la production nectarifère totale (toutes classes confondues) du rucher. Lors de l'étude des relations par classe de paysage, 2 relations très fortes ($R^2 > 0,95$) sont observées pour la production de nectar par les prairies et par les vergers. Une autre relation modérée est observée avec la production de nectar par les « Arbres hors forêt ».

En ce qui concerne la mortalité larvaire moyenne du rucher, deux relations modérées peuvent être observées avec la production nectarifère de la classe « forêt » d'une part et de la classe « verger » d'autre part.

4.4.1.3) Coefficient de détermination linéaires de Pearson (R^2) : Rucher de Loncée

Tableau 18: Coefficients de détermination linéaires de Pearson pour le rucher de Loncée Relation modérée ($R^2 > 0,75$) en rouge / Relation forte ($R^2 > 0,9$) en jaune / Relation très forte ($R^2 > 0,95$) en vert

C_p \ V_r	Gbn	But	Gp	Div_p	AM_x	LM_x	AM_r	LM_r	Va_x	Va_r
N_all	0.74	0.87	0.64	0.06	0.35	0.37	0.04	0.92	0.60	0.00
N_AHF	0.66	0.87	0.80	0.03	0.49	0.38	0.01	0.98	0.74	0.00
N_Colza	0.24	0.75	0.08	0.67	0.11	0.80	0.13	0.35	0.23	0.00
N_Forêt	0.79	0.83	0.43	0.11	0.21	0.35	0.11	0.81	0.44	0.00
N_Prairie	0.85	0.62	0.59	0.01	0.28	0.10	0.05	0.87	0.53	0.00
N_Verger	0.78	0.84	0.45	0.11	0.22	0.36	0.10	0.82	0.45	0.00

Abbreviations : IDEM Rucher Corroy le Château

Deux variables apicoles du rucher de Loncée sont reliées à la production nectarifère totale (toute classe confondues) de la zone de butinage de ce rucher :

- Le nombre de butineuses avec une relation modérée
- La mortalité larvaire du rucher avec une relation forte

Lors de l'étude des relations par classe de paysage, 13 relations sont observées et réparties comme suit :

- Quatre relations modérées ($R^2 > 0,75$) avec le nombre de butineuses pour les classes « AHF », « Colza », « Forêt » et « Verger ».
- Quatre relations avec la mortalité larvaire du rucher dont 3 sont modérées ($R^2 > 0,75$) pour les classes « Forêt », « Prairie » et « Verger » et une relation très forte ($R^2 > 0,95$) pour la classe « AHF ».
- Trois relations modérées ($R^2 > 0,75$) avec les gains bruts en nectar pour les classes « Forêt », « Prairie » et « Verger ».
- Une relation modérée ($R^2 > 0,75$) avec le gain en pollen pour la classe « AHF »
- Une relation modérée ($R^2 > 0,75$) avec la mortalité larvaire de la ruche expérimentale pour la classe « Colza »

4.4.1.4) Coefficient de détermination linéaires de Pearson (R^2) : Rucher moyen

Les variables apicoles du rucher moyen et les variables de production nectarifères (par classe de paysage) sont obtenues respectivement par la moyenne de l'ensemble des variables apicoles des 3 ruchers et par la moyenne des productions de nectar des 3 zones de butinage.

Tableau 19: Coefficients de détermination linéaires de Pearson pour le rucher « moyen ». Relation modérée ($R^2 > 0,75$) en rouge / Relation forte ($R^2 > 0,9$) en jaune / Relation très forte ($R^2 > 0,95$) en vert

C_p \ V_r	Gbn	But	Gp	Div_p	AM_x	LM_x	AM_r	LM_r	Va_x	Va_r
N_all	0.28	0.83	0.95	0.26	0.32	0.15	0.01	0.27	0.75	0.02
N_AHF	0.21	0.76	1.00	0.23	0.46	0.17	0.00	0.41	0.65	0.01
N_Colza	0.02	0.79	0.25	0.12	0.04	0.63	0.14	0.00	0.43	0.32
N_Forêt	0.34	0.88	0.82	0.28	0.18	0.14	0.05	0.14	0.84	0.04
N_Prairie	0.48	0.61	0.80	0.35	0.31	0.01	0.00	0.34	0.74	0.02
N_Verger	0.33	0.88	0.84	0.28	0.19	0.14	0.04	0.15	0.83	0.04

Abbreviations : IDEM Rucher Corroy le Château

Trois variables apicoles du rucher moyen sont reliées à la production nectarifère totale moyenne (toute classe confondues) de la zone de butinage :

- Le nombre de butineuses avec une relation modérée
- Le gain en pollen avec une relation forte
- L'infestation au varroa de la ruche expérimentale avec une relation modérée

Lors de l'étude des relations par classe de paysage, 10 relations sont observées et réparties comme suit :

- Quatre relations modérées ($R^2 > 0,75$) avec le nombre de butineuses pour les classes « AHF », « Colza », « Forêt » et « Verger ».
- Quatre relations avec le gain en pollen dont 3 sont modérées ($R^2 > 0,75$) pour les classes « Forêt », « Prairie » et « Verger » et une relation très forte ($R^2 > 0,95$) pour la classe « AHF ».
- Deux relations modérées ($R^2 > 0,75$) avec l'infestation au varroa de la ruche expérimentale pour les classes « Forêt » et « Verger ».

4.4.2) Illustration des relations retenues parmi les 3 ruchers et le rucher moyen.

4.4.2.1) Relations mises en évidence pour le rucher de GM

L'ensemble des droites de régressions discutées dans cette section sont présentées en annexe (Annexe 33)

4.4.2.1.1) Relations sélectionnées entre le gain en pollen (g/h) et la production nectarifère (kg/h) de la zone de butinage du rucher de Grand-Manil.

Pour l'ensemble des relations sélectionnées entre le gain pollinifère du rucher de Grand-Manil et la production nectarifère de la zone de butinage de ce rucher, la pente de la droite de régression est positive.

4.4.2.1.2) Relations sélectionnées entre la mortalité larvaire du rucher et la production nectarifère (kg/h) de la zone de butinage du rucher de Grand-Manil.

Pour l'ensemble des relations sélectionnées entre la mortalité larvaire du rucher de Grand-Manil et la production nectarifère de la zone de butinage de ce rucher, la pente de la droite de régression est négative.

4.4.2.2) Relations mises en évidence pour le rucher de Lonzée

4.4.2.2.1) Relations sélectionnées entre le gain nectarifère et la production nectarifère (kg/h) de la zone de butinage du rucher de Lonzée.

Pour l'ensemble des relations sélectionnées entre la mortalité larvaire du rucher de Lonzée et la production nectarifère de la zone de butinage de ce rucher, la pente de la droite de régression est négative.

4.4.2.2.2) Relations sélectionnées entre le nombre de butineuses et la production nectarifère (kg/h) de la zone de butinage du rucher de Lonzée.

De manière générale, la pente de la droite de régression de la relation entre le nombre de butineuses du rucher de Lonzée et la production nectarifère de la zone de butinage de ce rucher est négative. Cette observation n'est pas vérifiée pour la relation entre le nombre de butineuses et la production nectarifère de la classe « Colza ».

4.4.2.2.3) Relations sélectionnées entre le gain pollinifère et la production nectarifère (kg/h) de la zone de butinage du rucher de Lonzée.

La pente de la droite de la relation entre le gain pollinifère du rucher de Lonzée et la production nectarifère de la classe « AHF » de la zone de butinage de ce dernier est positive.

4.4.2.2.4) Relations sélectionnées entre la mortalité larvaire de la ruche expérimentale et la production nectarifère (kg/h) de la zone de butinage du rucher de Loncée.

La pente de la droite de la relation entre la mortalité larvaire du rucher de Loncée et la production nectarifère de la classe « Colza » de la zone de butinage de ce dernier est positive.

4.4.2.2.5) Relations sélectionnées entre la mortalité larvaire du rucher et la production nectarifère (kg/h) de la zone de butinage du rucher de Loncée.

Pour l'ensemble des relations sélectionnées entre la mortalité larvaire du rucher « moyen » et la production nectarifère de la zone de butinage de ce rucher, la pente de la droite de régression est positive.

4.4.2.3) Relations mises en évidence pour le rucher moyen

4.4.2.3.1) Relations sélectionnées entre le nombre de butineuses et la production nectarifère (kg/h) de la zone de butinage du rucher moyen.

De manière générale, la pente de la droite de régression de la relation entre le nombre de butineuses du rucher « moyen » et la production nectarifère de la zone de butinage de ce rucher est négative. Cette observation n'est pas vérifiée pour la relation entre le nombre de butineuses et la production nectarifère de la classe « Colza ».

4.4.2.3.2) Relations sélectionnées entre le gain pollinifère et la production nectarifère (kg/h) de la zone de butinage du rucher moyen.

Pour l'ensemble des relations sélectionnées entre le gain pollinifère du rucher « moyen » et la production nectarifère de la zone de butinage de ce rucher, la pente de la droite de régression est positive.

4.4.2.3.3) Relations sélectionnées entre le gain pollinifère et la production nectarifère (kg/h) de la zone de butinage du rucher moyen.

Pour l'ensemble des relations sélectionnées entre l'infestation au varroa du rucher « moyen » et la production nectarifère de la zone de butinage de ce rucher, la pente de la droite de régression est positive.

5) Discussion et perspectives

5.1) Avantages et limites de l'échantillonnage par télédétection

5.1.1) Avantage de l'échantillonnage par télédétection

Dans un premier temps, l'échantillonnage par drone permet une grande couverture spatiale. Pour des zones d'études relativement restreintes (<15 ha), il est possible de parcourir l'entièreté de la zone en un seul vol (15 minutes). Dans ce travail, 9,24 % de la zone d'intérêt apicole (926,473, ha) sont échantillonnés ; ce qui constitue un taux d'échantillonnage bien supérieur à ce qui est observé dans la littérature pour les quantifications nectarifères. En effet, le taux médian d'échantillonnage est de 0,69 % (Szigeti et al., 2016).

Dans un second temps, l'acquisition d'images par drone (quasi instantanée) permet de réaliser plusieurs relevés en peu de temps (grande résolution temporelle) et d'envisager les répliques expérimentales, ce qui n'est pas toujours possible lors de relevés de terrains classiques, souvent chronophages (Timberlake et al., 2019). Ce gain de temps n'est pas négligeable étant donné que les contraintes temporelles sont fortement présentes lors des relevés de terrain classiques, notamment pour couvrir l'ensemble des zones d'études tout en maintenant une certaine précision (Langlois, 2019). De plus, cette grande résolution temporelle permet de capter de fines variations de production, informations essentielles dans de multiples études. La télédétection permet une estimation précise des paramètres de l'environnement en un temps record (Galbraith et al., 2015). En ce qui concerne la résolution spatiale, l'échantillonnage par drone permet de travailler à l'échelle de l'unité florale (3cm de résolution) des principales ressources mellifères en région wallonne. De cette manière, les valeurs de production de nectar spécifiques à chaque essence à l'échelle de l'unité florale, obtenues par Baude et al (2016), peuvent être utilisées.

Ensuite, l'échantillonnage par drone permet d'obtenir des données de hauteur des arbres, données essentielles pour le calcul du volume du houppier et par extrapolation, l'estimation du nombre de fleurs que comprend le houppier. Lors d'un échantillonnage de terrain, il n'est pas possible de compter les fleurs se situant à une hauteur supérieure à 2m, pour des raisons de visibilité (Tew et al., 2020). Dès lors, plusieurs auteurs ne tiennent pas compte de cette 3^{ème}

dimension de la ressource lors de leurs échantillonnages (Baldock et al., 2015) ce qui peut amener à une sous-estimation de l'offre en nectar de l'environnement (Somme et al., 2016).

Enfin, la télédétection est assez efficace et de plus en plus accessible grâce au développement permanent de sa technologie (Galbraith et al., 2015) ; en outre, elle ne nécessite pas la destruction du matériel observé (Pellecuer, 2017).

5.1.2) Limites de l'échantillonnage par télédétection

D'un point de vue législatif, certaines zones du territoire sont interdites au vol de drone. D'autres sont accessibles au vol sous conditions. De plus, l'utilisation d'un drone nécessite un permis.

D'un point de vue technique, les vols de drone nécessitent des conditions météorologiques particulières : un temps sec, une bonne luminosité et des rafales de vents inférieures à 40 km/h. De plus, la surface échantillonnée par drone est limitée par l'autonomie des batteries mais également par l'importance des quantités de données à traiter par la suite. Le traitement des images est énergivore et peut s'avérer chronophage lors de l'élaboration de l'algorithme. Cependant, une fois que ce dernier est mis au point, le traitement d'images est relativement rapide. Enfin, s'ajoute également le coût non négligeable de l'acquisition de tout le matériel nécessaire à une telle opération.

5.1.3) Limites des variables utilisées pour quantifier la dynamique des ruchers

Dans un premier temps, l'allure des courbes de poids obtenues s'éloigne fréquemment du modèle théorique ; ce qui rend plus complexe, voire impossible, l'exploitation de ces données pour le calcul du gain net et du nombre de butineuses au cours des six semaines d'expérimentation. Dès lors, le nombre de butineuses est estimé par extrapolation pour les semaines manquantes et seul le gain brut est utilisé comme indicateur tout au long de la période d'expérimentation. Cependant, ce dernier est d'une qualité moindre que le gain net étant donné que son calcul dépend également des pertes de poids liées à la consommation de la colonie d'abeilles à deux moments bien spécifiques :

- entre le lever du soleil et le départ des butineuses ;

- entre le retour des butineuses et le coucher du soleil.

Le calcul du gain (net ou brut) ne tient pas compte de la consommation d'énergie des abeilles pendant la journée. Or, cette consommation peut être très importante. A titre d'exemple, une larve d'abeille consomme jusqu'à 140 mg de miel lors de son développement et une butineuse jusqu'à 0,5 mg par kilomètre parcouru. Sachant d'une part qu'une colonie contient plus de 30 000 ouvrières et 9 000 larves et d'autre part, qu'une butineuse peut parcourir jusqu'à 800 km au cours de sa vie, cette consommation n'est pas négligeable (DECOURTYE et al., 2007). De plus, la consommation de la colonie peut varier en fonction des conditions d'humidité et de température intrinsèques de la ruche. Au total, les besoins annuels d'une colonie approchent les 80 kg de miel et oscillent entre 15 à 40 kg de pollen (Louveaux et al., 1954 ; Winston et al. 1987 ; Crailsheim et al., 1992).

5.3) Discussion des résultats de relevés

En ce qui concerne les dynamiques de l'ensemble des variables relevées sur les ruchers, plusieurs éléments sont à prendre en compte.

Dans un premier temps, il est intéressant de constater que certaines tendances de mortalité confirment la littérature (Guerriat, 2017) alors que d'autres indiquent le contraire. De plus, les dynamiques de mortalités larvaires et adultes d'un même rucher ne suivent pas spécialement la même tendance (Rucher de Loncée). Le même constat peut être tiré entre les mortalités adultes (ou larvaires) d'un même rucher en fonction de la modalité considérée, sur l'ensemble du rucher ou sur la ruche expérimentale. Toutefois, l'indicateur de mortalité par ruche expérimentale dépend du nombre de butineuses. Plus précisément, pour le rucher de Corroy-le-Château, il est possible que le pic de mortalité adulte de la troisième semaine s'explique par un problème dû à la trappe à pollen. En effet, une grappe d'abeilles formée devant la trappe à pollen, à l'extérieur de la ruche, a pu être observée un soir de cette troisième semaine. Le lendemain matin, la grappe était tombée dans le bac à abeilles mortes, de nombreuses abeilles n'ayant probablement pas survécu aux conditions plus fraîches de la nuit.

Dans un second temps, le nombre de varroas observés sur l'ensemble des ruches est bien supérieur aux limites acceptables renseignées par la littérature (Giovenazzo & Dubreuil, 2011; Guerriat, 2017; van Engelsdorp et al., 2008). Pour les chutes naturelles de varroas phorétiques

en phénosaison vernale, un comptage supérieur à 8 varroas par jour est considéré comme une infestation forte. De plus, la présence de fourmis a pu être observée sur les plateaux de comptage de varroas. Dès lors, l'hypothèse que les fourmis prélèvent un certain nombre de varroas n'est pas à négliger. Il est intéressant d'observer des dynamiques similaires pour l'infestation au varroa des ruchers de Grand Manil et de Corroy le Château même si elles ne suivent pas une augmentation constante comme référencé dans la littérature en phénosaison vernale (Guerriat, 2017).

Ensuite, il est intéressant d'observer que la tendance des gains en pollen est fortement similaire à celle de la diversité en pelottes de pollen pour le rucher de Corroy-le-Château. Pour les autres ruchers, une diminution légère voire nulle de la diversité en pollen est observée respectivement pour les ruchers de Grand-Manil et de Loncée lorsque les rentrées en pollen chutent lors de la quatrième semaine. Pour l'ensemble des ruchers, les quantités de pollen récoltées sur une journée sont du même ordre de grandeur que celles rencontrées dans la littérature (Steffan-dewenter et al., 2017).

Enfin, l'évolution du nombre de butineuses adopte une tendance très proche de ce qui est renseigné dans la littérature en phénosaison vernale (Guerriat, 2017), à savoir une augmentation constante.

Un dernier constat fait apparaître que les ruchers de Loncée et de Grand Manil sont assez similaires en ce qui concerne l'évolution des gains bruts. Les gains nets et bruts mesurés sur l'ensemble des ruches expérimentales sont du même ordre de grandeur que les gains référencés dans la littérature (Lecocq et al., 2015; Meikle et al., 2018).

5.4) Discussion des résultats de production de nectar

L'approche visuelle des résultats cartographiques consiste en une première évaluation de la méthode de mise en évidence des fleurs d'intérêt. Cette dernière est satisfaisante, tenant compte des résultats d'analyses d'images présentés dans la section résultats (voir section résultats), pour l'ensemble des classes à l'exception toutefois des classes « forêt » et « AHF » qui présentent une grande quantité de faux positifs, notamment par la mise en évidence de peupliers à la place de saules (Annexe 34) ou de pixels « merisier » alors qu'il s'agit d'arbres nus (Annexe 35). La production nectarifère de ces classes est donc surestimée pour certaines zones échantillonnées.

Une évaluation plus approfondie de la qualité de la méthode de mise en évidence consisterait en l'élaboration de matrices de confusion.

Une deuxième approche pour évaluer la qualité des prédictions des productions de nectar consiste à comparer les productions nectarifères (g/ha*jour) par classe de paysage avec ce qui est repris dans la littérature. Selon Langlois et al. (2020), le classement décroissant des essences principales contribuant à la production de nectar en avril est le suivant : pissenlits (55%), saules (19%), merisiers (12%) (Langlois et al., 2020). Or, dans ce travail, la plus grande densité de production de nectar est attribuée aux classes « forêt » et « arbre hors forêt », uniquement représentées par les saules et les merisiers ; elles dépassent largement la production de nectar de la classe « prairie » uniquement quantifiée sur base des pissenlits. De plus, les productions nectarifères calculées dans ce travail pour les classes « forêt » et « arbres hors forêt » au mois d'avril ne sont pas du même ordre de grandeur que ce qui est renseigné dans la littérature pour le même mois (Tableau 20).

Tableau 20 : Production de nectar en avril (g/h*jour)

Essence / Classe	Production littérature (g/ha*jour)	Production VH (g/ha*jour)	Source
Haie	1005 ± 1207	62056	(Langlois2020)
Forêt	1254 ± 767	42566	(Langlois2020)
Prairie extensive	2.7 ± 4	2.16	(Langlois2020)
Colza	2367	4815	(Langlois2020)
Verger	300	195	(Langlois2020, Jachula2021).

Cette deuxième approche permet aussi de conclure à une surestimation des productions nectarifères des classes « forêt » et « arbre hors forêt ».

Enfin, les surestimations s'expliquent probablement par la présence de faux positifs mais il se pourrait également qu'il existe une erreur dans le calcul des facteurs de conversion ou dans les estimations des volumes de houppiers des ressources mellifères ligneuses. Il est également à noter que les classes de paysage définies par Bolyn et al. (2019) ne correspondent pas toujours parfaitement à la réalité de terrain. Dès lors, un certain biais dans ces estimations est à prendre en compte lors de l'extrapolation de la quantification des ressources à l'ensemble du paysage.

5.5) Discussion de l'étude des relations entre les variables apicoles et la production nectarifère de l'environnement

Etant donné la surestimation des productions nectarifères des classes « Forêt » et « Arbres Hors Forêt », aucune relation n'est considérée pour ces 2 classes ni pour les relations avec la production totale, même lorsque les coefficients linéaires de Pearson sont supérieurs à 0,75. Désormais, les relations retenues par rucher sont reprises et discutées ci-dessous.

Tableau 21 : Relations retenues pour le rucher de Grand-Manil

Variable apicole	Classe de production	R ²	Pente
Gain en pollen	Verger	0,98	+
Mortalité larvaire (rucher)	Verger	0.79	-

Tableau 22 : Relations retenues pour le rucher de Loncée

Classe de production	Variable apicole	R ²	Pente
Gain brut en nectar	Prairie	0.85	-
Gain brut en nectar	Verger	0.78	-
Nombre de butineuses	Colza	0.75	+
Nombre de butineuses	Verger	0.84	-
Mortalité larvaire (ruche exp.)	Colza	0.8	-
Mortalité larvaire (rucher)	Prairie	0.87	+
Mortalité larvaire (rucher)	Verger	0.82	+

Tableau 23: Relations retenues pour le rucher "moyen"

Classe de production	Variable apicole	R ²	Pente
Nombre de butineuses	Colza	0.79	+
Nombre de butineuses	Verger	0.88	-
Gain en pollen	Prairie	0.80	+
Gain en pollen	Verger	0.84	+
Infestation au varroa (ruche exp.)	Verger	0.83	+

A l'issue de ce travail, il est possible d'émettre quelques hypothèses expliquant les relations observées, moyennant quelques réserves et attentions préalables. En effet, ces relations ne sont pas causales mais juste des corrélations observées dans les conditions expérimentales de ce travail. Sans informations supplémentaires, aucune conclusion ne peut être tirée sur base uniquement de l'observation de ces relations. De plus, étant donné le faible nombre d'observations, la droite de régression est fortement influencée par les valeurs extrêmes. Pour y remédier, une solution consisterait à échantillonner le paysage à une fréquence moindre et sur

une plus longue durée afin de capter une plus grande variabilité de la floraison au cours de la phénosaison vernale.

Premièrement, une augmentation des gains en pollen est observée quand la production nectarifère de la classe « verger » augmente pour le rucher de Grand Manil. Cette observation est vérifiée également sur le rucher « moyen » pour lequel une relation similaire avec la classe « Prairie » est également mise en évidence. Cela permet de supposer qu'il existe un lien entre la quantification des ressources florales estimées par télédétection (selon la méthodologie présentée dans ce travail) et la ressource florale réellement présente sur le terrain (et rapportée à la ruche), pour les classes « Verger » et « Prairie ». Selon Danner et.al (2017), la quantité et la diversité de la récolte de pollen ne dépendent pas des caractéristiques du paysage mais bien de la saison. Ce travail met en évidence des tendances indiquant le contraire.

Deuxièmement, la mortalité larvaire quantifiée sur les ruches expérimentales est reliée négativement à la ressource en nectar de la classe « Verger » et « Colza » respectivement pour les ruchers de Grand-Manil et de Lonzée. Cette tendance permet d'écartier toute éventuelle intoxication des abeilles aux produits phytosanitaires éventuellement répandus sur les champs de Colza ou les Vergers. Par ailleurs, il existe une similarité de la dynamique temporelle de la mortalité larvaire moyenne et de la mortalité larvaire quantifiée sur la ruche expérimentale de Grand-Manil en lien avec la floraison des champs de colza, avec toutefois un déphasage d'une semaine pour la mortalité larvaire moyenne.

Ensuite, le nombre de butineuses du rucher de Lonzée augmente avec l'accroissement de la production nectarifère de la classe « colza ». Cela permet de supposer que la colonie d'abeilles se focalise sur cette ressource et laisse partir butiner une plus grande proportion de ses ouvrières pour récolter le nectar de colza. Par contre, le nombre de butineuses de ce même rucher diminue avec l'accroissement de la production nectarifère de la classe « verger ». Ces observations se rencontrent également en moyenne sur les 3 ruchers. Cela peut laisser penser que, dans le cas d'une ressource abondante mais pas d'une qualité exceptionnelle, la colonie s'économise et n'envoie qu'un nombre restreint de butineuses. Au contraire, lorsque la ressource est faible, un grand nombre de butineuses est nécessaire pour rapporter à la colonie une faible quantité de nectar ou de pollen présente dans l'environnement.

Pour continuer, il est intéressant de constater, contre toute attente, qu'une relation négative est observée entre le gain brut en nectar du rucher de Loncée et la production nectarifère de l'environnement de ce dernier.

Enfin, il est à noter que l'ensemble de ces tendances peuvent directement être rapportées à une essence particulière étant donné que les classes considérées à ce stade de la discussion ne sont uniquement représentées que par une essence florale. Il s'agit des pissenlits, des fruitiers et du colza respectivement pour les classes « prairie », « verger » et « colza ».

Pour terminer, il serait intéressant d'introduire la notion de distance séparant le rucher de la ressource lors de l'étude de ces relations. Par exemple, plusieurs coefficients de R^2 pourraient être calculés pour la relation entre deux mêmes variables mais à chaque fois pour des distances différentes. Une analyse de sensibilité du paramètre R^2 pourrait être réalisée en fonction de la distance séparant la ressource du rucher.

5.6) Limitations de ce travail

Plusieurs paramètres ou éléments n'ont pu être abordés dans le plan expérimental de ce travail et méritent cependant d'être considérés dans un processus d'amélioration continue.

Dans un premier temps, aucun rucher externe aux ruchers expérimentaux n'a été considéré. Or, il aurait été préférable de les localiser pour prendre en compte l'éventuelle compétition entre les colonies. En effet, il est raisonnable de penser que la présence de plusieurs ruchers sur une même zone peut impacter et diminuer leurs récoltes respectives. A titre d'exemple, la plus grosse récolte de miel réalisée dans ce travail est attribuée au rucher de Loncée alors que ce n'est pas la zone de butinage qui présente la plus grosse ressource nectarifère parmi les trois zones étudiées. Cependant, aucun autre rucher n'est recensé dans cette zone, ce qui n'est pas le cas pour les zones de butinages de Grand-Manil et de Corroy-le-Château. Cela pourrait prouver une compétition entre les ruchers d'une même zone de butinage.

Dans un second temps, les productions de miellat et de pollen ne sont pas évaluées dans ce travail. Cependant, la quantification nectarifère à elle seule permet d'évaluer la qualité mellifère d'un environnement sans passer par la quantification du pollen ou du miellat (Baude et al., 2016). De plus, les gains en pollen dépendent fortement des besoins de la colonie

(DECOURTYE et al., 2007). Il n'est pas certain que les rentrées en pollen soient directement liées à la production pollinifère de l'environnement. Par contre, le nectar est récolté de manière générale en abondance pour être stocké pour l'hiver et indépendamment des besoins physiologiques de la colonie.

Ensuite, les pruneliers ne sont pas pris en compte car, vu le caractère précoce de leur floraison dans la saison, le comptage par quadra sur le terrain prévu dans le protocole expérimental n'a pu être mis en place qu'une fois la floraison des pruneliers terminée.

Enfin, les colonies utilisées dans ce travail n'ont pas spécialement été prévues pour une telle expérimentation. Les reines ne présentent pas la même génétique et l'infestation au varroa est particulièrement élevée, bien au-dessus de ce qui est recensé dans la littérature. C'est probablement dû à l'absence de traitement hivernal.

5.7) Perspectives

Ce travail présente plusieurs perspectives intéressantes.

Dans un premier temps, la démarche de quantification de la ressource nectarifère par télédétection nécessite quelques améliorations comme mentionné ci-dessus. Afin de réaliser un plus grand nombre de quadras et d'éventuellement établir des tables de facteurs de conversion, une force de travail d'au moins 2 personnes supplémentaires est nécessaire. L'idéal serait de composer l'équipe d'une personne chargée de la télédétection, d'une autre chargée de la gestion des ruchers et d'une 3^{ème} polyvalente. Une fois la méthode évaluée comme plus robuste et confirmée pour la phénosaison vernale, elle pourra être testée en phénosaison estivale. Cela permettrait de juger de sa performance étant donné que plusieurs essences principales mellifères de cette phénosaison sont présentes dans les sous-bois et donc non identifiables via des méthodes de télédétection. Enfin, il serait intéressant d'étudier plus précisément la contribution en nectar des différentes essences étudiées et non plus uniquement des classes de paysages. Etant donné, qu'il a pu être observé sur le terrain qu'une classe de paysage est bien souvent représentée par une seule essence en floraison à la fois, cette perspective est tout à fait envisageable.

Dans un second temps, si une relation peut être établie entre les gains nectarifères standardisés pour un certain nombre de butineuses et la ressource nectarifère de l'environnement, il serait alors possible d'estimer cette dernière uniquement sur base des observations de poids des ruches sous balances. En effet, grâce à leurs caractéristiques biologiques et physiologiques (Lambert et al., 2011), les colonies d'abeilles mellifères permettent d'échantillonner et d'évaluer l'environnement y compris dans leur zone de butinage (Guerriat, 2017; Jones, 1986; Kalbande et al., 2007; Kevan, 1999; Lambert et al., 2012; Yarsan et al., 2007). Cependant, le suivi du poids des colonies d'abeilles mellifères pour évaluer la ressource florale à l'échelle du paysage est un domaine qui n'en est qu'à ses débuts (Sponsler et al., 2020). Même s'il est pertinent de penser que les gains en nectar sont directement liés à la quantité de nectar disponible dans l'environnement, il n'y a pas de proportionnalité établie entre la disponibilité des ressources et les gains de poids d'une colonie d'abeilles mellifères (Sponsler et al., 2020). De plus, l'échantillonnage d'un paysage par le suivi de colonies d'abeilles mellifères est biaisé par les caractéristiques intrinsèques des colonies d'abeilles (Sponsler et al., 2020). A titre d'exemple, les abeilles délaissent les sources de nectar les moins rentables (Janssens, 2005) et elles ne sont donc pas échantillonnées.

6) Conclusion

Dans un contexte de diminution de la ressource mellifère environnementale à l'échelle mondiale et européenne, ce mémoire apporte des nouvelles connaissances dans le domaine de quantification de cette dernière par télédétection.

Premièrement, ce travail présente une approche méthodologique de quantification via des méthodes de discrimination essentiellement chromatiques. Les résultats de discriminations permettent de conclure à la possibilité de mise en évidence de la floraison des essences mellifères principales du paysage gembloutois en phénosaison vernale (le colza, les saules, les pissenlits, les fruitiers, les merisiers, et les aubépines) à partir d'images aériennes RGB (RED GREEN BLUE) d'une résolution de 3 cm. Les résultats obtenus pour la production nectarifère des prairies, des champs de colza et des vergers à l'échelle du paysage sont du même ordre de grandeur que ce qui est renseigné dans la littérature (par des méthodes de quantifications de terrain) et confirment la cohérence de la méthodologie développée par télédétection dans ce travail pour ces trois classes de paysage.

Ensuite, ce travail s'est intéressé parallèlement à l'étude d'une série de variables apicoles sur 3 ruchers situés à Grand-Manil, Corroy-le-Château et Loncée. L'évolution du poids des ruches (à 'échelle de la demi-heure), les rentrées en pollen (quantité et diversité), la mortalité et l'infestation au varroa ont été quantifiées. Du traitement des données chronologiques de poids, il ressort une méthode de quantification du nombre de butineuses journalier ainsi que le calcul de plusieurs indicateurs permettant de quantifier le gain nectarifère journalier.

Enfin, l'étude à l'échelle de la semaine pour une durée de 6 semaines, de la relation entre la dynamique de production nectarifère de l'environnement et la dynamique des multiples variables étudiées sur les ruches met en évidence un certain nombre de relations qualifiées de modérées ($R^2 > 0,75$) à très fortes ($R^2 > 0,95$), notamment entre les gains en pollen et la production nectarifère des classes « verger » et « prairie » du rucher « moyen ». Cela permettrait de supposer qu'il existe un lien entre la quantification des ressources florales réalisée par télédétection et la ressource florale réellement présente sur le terrain. De plus, certaines relations peuvent être supposées entre la production de nectar du colza et des

vergers avec les traits biologiques des colonies d'abeilles *Apis mellifera* L., notamment en ce qui concerne le nombre de butineuses et la mortalité larvaire des colonies.

A l'analyse fine de ces premiers résultats, il apparaît que certains éléments méthodologiques devraient être améliorés. Afin de capter une plus grande variabilité en termes de ressource nectarifère disponible, il serait judicieux de diminuer la fréquence d'acquisition des données de télédétection et d'augmenter la période d'acquisition. De plus, il serait intéressant d'améliorer certains paramètres permettant la quantification nectarifère depuis des images multispectrales tels que les facteurs de conversion et les indices de discrimination afin d'améliorer les prédictions de production pour les classes « forêt » et « arbres hors forêt ».

Pour finir, ce travail présente plusieurs perspectives pour l'évaluation de la ressource mellifère à l'échelle du paysage. Une fois la méthode développée confirmée dans son intégralité, il sera possible de quantifier la ressource en un temps record et avec une grande précision, contrairement à ce qui est possible actuellement via des méthodes de quantification de terrain. Ces quantifications par télédétection peuvent également apporter de précieuses informations dans le domaine des abeilles sentinelles pour la quantification des ressources nectarifères environnementales.

7) Bibliographie

- Abdel-Rahman, E. M., Makori, D. M., Landmann, T., Piironen, R., Gasim, S., Pellikka, P., & Raina, S. K. (2015). The utility of AISA eagle hyperspectral data and random forest classifier for flower mapping. *Remote Sensing*, 7(10), 13298–13318. <https://doi.org/10.3390/rs71013298>
- Adam, E., & Mutanga, O. (2009). Spectral discrimination of papyrus vegetation (*Cyperus papyrus* L.) in swamp wetlands using field spectrometry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(6), 612–620. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.04.004>
- Aggelopoulou, A. D., Bochtis, D., Fountas, S., Swain, K. C., Gemtos, T. A., & Nanos, G. D. (2011). Yield prediction in apple orchards based on image processing. *Precision Agriculture*, 12(3), 448–456. <https://doi.org/10.1007/s11119-010-9187-0>
- Alaux, C., Ducloz, F., Crauser, D., & Le Conte, Y. (2010). Diet effects on honeybee immunocompetence. *Biology Letters*, 6(4), 562–565. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2009.0986>
- Api, A. (n.d.). *Actu Api n° 17 I*. 1–8.
- Arundel, J., Winter, S., Gui, G., & Keatley, M. (2016). A web-based application for beekeepers to visualise patterns of growth in floral resources using MODIS data. *Environmental Modelling and Software*, 83, 116–125. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.05.010>
- Balayer, M. (1990). Evaluation des potentialités mellifères en Roussillon. *Bulletin de La Societe Botanique de France. Lettres Botaniques*, 137(2–3), 157–171. <https://doi.org/10.1080/01811797.1990.10824876>
- Baldock, K. C. R., Goddard, M. A., Hicks, D. M., Kunin, W. E., Mitschunas, N., Osgathorpe, L. M., Potts, S. G., Robertson, K. M., Scott, A. V., Stone, G. N., Vaughan, I. P., & Memmott, J. (2015). Where is the UK's pollinator biodiversity? The importance of urban areas for flower-visiting insects. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 282(1803). <https://doi.org/10.1098/rspb.2014.2849>
- Baude, M., Kunin, W. E., Boatman, N. D., Conyers, S., Davies, N., Gillespie, M. A. K., Morton, R. D., Smart, S. M., & Memmott, J. (2016). Historical nectar assessment reveals the fall and rise of floral resources in Britain. *Nature*, 530(7588), 85–88. <https://doi.org/10.1038/nature16532>
- Beekman, M., & Ratnieks, F. L. W. (2000). Long-range foraging by the honey-bee, *Apis mellifera* L. *Functional Ecology*, 14(4), 490–496. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.2000.00443.x>
- Béguin, C. (1994). Contribution à la cartographie des potentialités mellifères du haut-jura; exemple de variations spatio-temporelles autour d'un rucher à chaumont/ne. *Geographica Helvetica*, 49(3), 115–124. <https://doi.org/10.5194/gh-49-115-1994>
- Blomstedt, W. (2013). *Mapping The Phenology of European Honey Bee Nectar Flows*. August.
- Bradley, B. A. (2014). Remote detection of invasive plants: A review of spectral, textural and phenological approaches. *Biological Invasions*, 16(7), 1411–1425. <https://doi.org/10.1007/s10530-013-0578-9>
- Briane, G., & Cabrol, J.-L. (1986). L'abeille dans le géosystème : essai de cartographie des ressources mellifères. *Revue Géographique Des Pyrénées et Du Sud-Ouest*, 57(3), 363–373. <https://doi.org/10.3406/rgpso.1986.4954>
- Bruneau, E. (2020). *No Title* (SPW Agricu).
- Campbell, T., & Fearn, P. (2018). Honey crop estimation from space: Detection of large flowering events in Western Australian forests. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(1), 79–86.

<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-1-79-2018>

- Campbell, Tristan. (2020). *Predicting And Mapping Of Honey Flow From Corymbia Calophylla Trees With Remote Sensing*. September, 119 pp.
<https://espace.curtin.edu.au/bitstream/handle/20.500.11937/81507/Campbell%2520T%25202020.pdf%3Fsequence%3D1%26isAllowed%3Dy&hl=en&sa=X&d=8038168183829971897&ei=Pj-cX8bqA5HeyQTX3IyoDg&scisig=AAGBfm1hErJret20PlzaffdpqInnm02K7Q&nossl=1&oi=scholaralrt&hist=8C>
- Carl, C., Landgraf, D., van der Maaten-Theunissen, M., Biber, P., & Pretzsch, H. (2017). Robinia pseudoacacia L. Flower analyzed by using Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *Remote Sensing*, 9(11), 1–19. <https://doi.org/10.3390/rs9111091>
- Carvalho, L. G., Barbosa, E. R. M., & Memmott, J. (2008). *Pollinator networks, alien species and the conservation of rare plants: Trinia glauca as a case study*. 1419–1427.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2008.01518.x>
- Cerrutti, N., & Pontet, C. (2016). Differential attractiveness of sunflower cultivars to the honeybee Apis mellifera L. *OCL - Oilseeds and Fats, Crops and Lipids*, 23(2).
<https://doi.org/10.1051/ocl/2016005>
- Chen, B., Jin, Y., & Brown, P. (2019). An enhanced bloom index for quantifying floral phenology using multi-scale remote sensing observations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 156(April), 108–120. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.08.006>
- Chen, J., Shen, M., Zhu, X., & Tang, Y. (2009). Indicator of flower status derived from in situ hyperspectral measurement in an alpine meadow on the Tibetan Plateau. *Ecological Indicators*, 9(4), 818–823. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2008.09.009>
- COLIN, M.-E., GAUTHIER, L., & TOURNAIRE, M. (2008). *L'opportunisme chez Nosema ceranae*.
- Crane, E. (1975). Bee Products. *Bee World*, 56(1), 32–34.
<https://doi.org/10.1080/0005772x.1975.11097535>
- DAVAINE, J.-B. (2012). Évolution Récente De La Ressource Mellifère Dans Le Paysage Agricole Français: Le Cas Des Grandes Cultures Et Des Productions Fourragères. *Bulletin de l'Académie Vétérinaire de France*, 1, 293. <https://doi.org/10.4267/2042/48810>
- de Roissart, E. (2019). *Evaluation de la biodiversité des haies de la ferme de Lauzelle et proposition d'un plan d'aménagement*. 131.
- de Sá, N. C., Castro, P., Carvalho, S., Marchante, E., López-Núñez, F. A., & Marchante, H. (2018). Mapping the flowering of an invasive plant using unmanned aerial vehicles: Is there potential for biocontrol monitoring? *Frontiers in Plant Science*, 9(March), 1–13.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00293>
- DECOURTYE, A., LECOMPTE, P., PIERRE, J., CHAUZAT, M.-P., & THIEBEAU, P. (2007). Introduction de jachères florales en zones de grandes cultures : comment mieux concilier agriculture, biodiversité et apiculture ? *Courrier de l'environnement de l'INRA*, 54, 33–56.
- Di Pasquale, G., Salignon, M., Le Conte, Y., Belzunces, L. P., Decourtye, A., Kretschmar, A., Suchail, S., Brunet, J. L., & Alaux, C. (2013). Influence of Pollen Nutrition on Honey Bee Health: Do Pollen Quality and Diversity Matter? *PLoS ONE*, 8(8), 1–13.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0072016>
- Fang, S., Tang, W., Peng, Y., Gong, Y., Dai, C., Chai, R., & Liu, K. (2016). Remote estimation of vegetation fraction and flower fraction in oilseed rape with unmanned aerial vehicle data. *Remote Sensing*, 8(5). <https://doi.org/10.3390/rs8050416>
- Fauvel, M., Lopes, M., Dubo, T., Rivers-Moore, J., Frison, P. L., Gross, N., & Ouin, A. (2020).

- Prediction of plant diversity in grasslands using Sentinel-1 and -2 satellite image time series. *Remote Sensing of Environment*, 237(October 2019), 111536. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111536>
- Feltin, A. M., & Hummel, R. (2016). *Reconnaître le pollen des plantes , arbres ou arbustes*.
- Frankl, R., Wanning, S., & Braun, R. (2005). Quantitative floral phenology at the landscape scale: Is a comparative spatio-temporal description of “flowering landscapes” possible? *Journal for Nature Conservation*, 13(4), 219–229. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2004.10.002>
- Gaia, É. D., Mouquet, C. N., Romain, R., Mnhn, J., Muriel, E., Inra, T., & Cebc-cnrs, E. V. B. (2015). *Présentée par : Effet de l ’ hétérogénéité des paysages agricoles (composition et configuration) et de l ’ intensification des pratiques culturales sur la structure des communautés écologiques (oiseaux et adventices) en systèmes intensifs tempérés*.
- Galbraith, S. M., Vierling, L. A., & Bosque-Pérez, N. A. (2015). Remote sensing and ecosystem services: Current status and future opportunities for the study of bees and pollination-related services. *Current Forestry Reports*, 1(4), 261–274. <https://doi.org/10.1007/s40725-015-0024-6>
- Geldmann, J., & González-Varo, J. P. (2018). Conserving honey bees does not help wildlife. *Science*, 359(6374), 392–393. <https://doi.org/10.1126/science.aar2269>
- Giovenazzo, P., & Dubreuil, P. (2011). Evaluation of spring organic treatments against Varroa destructor (Acari: Varroidae) in honey bee Apis mellifera (Hymenoptera: Apidae) colonies in eastern Canada. *Experimental and Applied Acarology*, 55(1), 65–76. <https://doi.org/10.1007/s10493-011-9447-3>
- Glenn, N. F., Mundt, J. T., Weber, K. T., Prather, T. S., Lass, L. W., & Pettingill, J. (2005). Hyperspectral data processing for repeat detection of small infestations of leafy spurge. *Remote Sensing of Environment*, 95(3), 399–412. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.01.003>
- Goulson, D., Nicholls, E., Botías, C., & Rotheray, E. L. (2015). Bee declines driven by combined Stress from parasites, pesticides, and lack of flowers. *Science*, 347(6229). <https://doi.org/10.1126/science.1255957>
- Guerriat. (2017). *No Title* (Horzo).
- Hardman, C. J. (2016). Delivering biodiversity and pollination services on farmland : a comparison of three wildlife-friendly farming schemes. *Doctoral Dissertation, University of Reading, June*.
- He, K. S., Rocchini, D., Neteler, M., & Nagendra, H. (2011). Benefits of hyperspectral remote sensing for tracking plant invasions. *Diversity and Distributions*, 17(3), 381–392. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2011.00761.x>
- Herold, M., Roberts, D. A., Gardner, M. E., & Dennison, P. E. (2004). Spectrometry for urban area remote sensing - Development and analysis of a spectral library from 350 to 2400 nm. *Remote Sensing of Environment*, 91(3–4), 304–319. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.013>
- Herrera, C. M. (1990). Daily Patterns of Pollinator Activity , Differential Pollinating Effectiveness , and Floral Resource Availability , in a Summer-Flowering Mediterranean Shrub Author (s): Carlos M . Herrera Published by : Wiley on behalf of Nordic Society Oikos Stable UR. *Oikos*, 58(3), 277–288.
- Hicks, D. M., Ouvrard, P., Baldock, K. C. R., Baude, M., Goddard, M. A., Kunin, W. E., Mitschunas, N., Memmott, J., Morse, H., Nikolitsi, M., Osgathorpe, L. M., Potts, S. G., Robertson, K. M., Scott, A. V., Sinclair, F., Westbury, D. B., & Stone, G. N. (2016). Food for pollinators: Quantifying the nectar and pollen resources of urban flower meadows. *PLoS ONE*, 11(6), 1–37. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158117>
- Holzschuh, A., Steffan-Dewenter, I., Kleijn, D., & Tschardtke, T. (2007). Diversity of flower-visiting

- bees in cereal fields: Effects of farming system, landscape composition and regional context. *Journal of Applied Ecology*, 44(1), 41–49. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2006.01259.x>
- Horton, R., Cano, E., Bulanon, D., & Fallahi, E. (2017). Peach flower monitoring using aerial multispectral imaging. *Journal of Imaging*, 3(1). <https://doi.org/10.3390/jimaging3010002>
- Huang, C. ying, & Asner, G. P. (2009). Applications of remote sensing to alien invasive plant studies. *Sensors (Switzerland)*, 9(6), 4869–4889. <https://doi.org/10.3390/s90604869>
- Jachuła, J., Denisow, B., & Wrzesień, M. (2021). Habitat heterogeneity helps to mitigate pollinator nectar sugar deficit and discontinuity in an agricultural landscape. *Science of the Total Environment*, 782. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146909>
- Janssens, X. (2005). Préviation des potentialités de production de miel à l'échelle d'un rucher au moyen d'un système d'information géographique. *Apidologie*, 38, 67–76. <https://doi.org/10.1051/apido>
- Jones, K. C. (1986). Honey as an indicator of heavy metal contamination. *Water, Air, and Soil Pollution*, 33(1–2), 179–189. <https://doi.org/10.1007/BF00191386>
- Kalbande, D. M., Dhadse, S. N., Chaudhari, P. R., & Wate, S. R. (2007). Biomonitoring of heavy metals by pollen in urban environment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 138(1–3), 233–238. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9793-0>
- Keller, I., Fluri, P., & Imdorf, A. (2005). Pollen nutrition and colony development in honey bees: Part I. *Bee World*, 86(1), 3–10. <https://doi.org/10.1080/0005772X.2005.11099641>
- Kevan, P. G. (1999). Pollinators as bioindicators of the state of the environment: species, activity and diversity. In *Invertebrate Biodiversity as Bioindicators of Sustainable Landscapes* (Vol. 74). Woodhead Publishing Limited. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-50019-9.50021-2>
- Krebs, J. R., Wilson, J. D., Bradbury, R. B., & Siriwardena, G. M. (1999). The second silent spring? *Nature*, 400(6745), 611–612. <https://doi.org/10.1038/23127>
- Lambert, O., Piroux, M., Puyo, S., Thorin, C., Larhantec, M., Delbac, F., & Pouliquen, H. (2012). Bees, honey and pollen as sentinels for lead environmental contamination. *Environmental Pollution*, 170, 254–259. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.07.012>
- Lambert, O., Veyrand, B., Durand, S., Marchand, P., Bizec, B. Le, Piroux, M., Puyo, S., Thorin, C., Delbac, F., & Pouliquen, H. (2011). Polycyclic aromatic hydrocarbons: Bees, honey and pollen as sentinels for environmental chemical contaminants. *Chemosphere*, 86(1), 98–104. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.09.025>
- Landmann, T., Piironen, R., Makori, D. M., Abdel-Rahman, E. M., Makau, S., Pellikka, P., & Raina, S. K. (2015). Application of hyperspectral remote sensing for flower mapping in African savannas. *Remote Sensing of Environment*, 166, 50–60. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.06.006>
- Langlois, A. (2019). *Evaluation de la variation spatio-temporelle des ressources florales dans les paysages agricoles et de leur utilisation par les insectes pollinisateurs*.
- Langlois, A., Jacquemart, A. L., & Piqueray, J. (2020). Contribution of extensive farming practices to the supply of floral resources for pollinators. *Insects*, 11(11), 1–19. <https://doi.org/10.3390/insects11110818>
- Lass, L. W., Prather, T. S., Glenn, N. F., Weber, K. T., Mundt, J. T., & Pettingill, J. (2005). A review of remote sensing of invasive weeds and example of the early detection of spotted knapweed (*Centaurea maculosa*) and babysbreath (*Gypsophila paniculata*) with a hyperspectral sensor. *Haefner 2004*, 242–251.
- Lecocq, A., Kryger, P., Vejsnæs, F., & Jensen, A. B. (2015). Weight watching and the effect of landscape on honeybee colony productivity: Investigating the value of colony weight monitoring

- for the beekeeping industry. *PLoS ONE*, *10*(7), 1–14.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132473>
- Librán-Embú, F., Klaus, F., Tschardt, T., & Grass, I. (2020). Unmanned aerial vehicles for biodiversity-friendly agricultural landscapes - A systematic review. *Science of the Total Environment*, *732*, 139204. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139204>
- Lowenstein, D. M., Matteson, K. C., & Minor, E. S. (2019). Evaluating the dependence of urban pollinators on ornamental, non-native, and ‘weedy’ floral resources. *Urban Ecosystems*, *22*(2), 293–302. <https://doi.org/10.1007/s11252-018-0817-z>
- Magneraud, L. (2015). *Mesurons tous ensemble la biodiversité des pollens*.
- Makori, D. M., Abdel-Rahman, E. M., Landmann, T., Mutanga, O., Odindi, J., Nguku, E., Tonnang, H. E., & Raina, S. (2020). Suitability of resampled multispectral datasets for mapping flowering plants in the Kenyan savannah. *PLoS ONE*, *15*(9 September), 1–22.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232313>
- Mallinger, R. E., Gaines-Day, H. R., & Gratton, C. (2017). Do managed bees have negative effects on wild bees?: A systematic review of the literature. In *PLoS ONE* (Vol. 12, Issue 12).
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0189268>
- MARDEN, J. H., & WADDINGTON, K. D. (1981). Floral choices by honeybees in relation to the relative distances to flowers. *Physiological Entomology*, *6*(4), 431–435.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-3032.1981.tb00658.x>
- Matteson, K. C., Grace, J. B., & Minor, E. S. (2013). Direct and indirect effects of land use on floral resources and flower-visiting insects across an urban landscape. *Oikos*, *122*(5), 682–694.
<https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2012.20229.x>
- Maurizio, A., & Hodges, F. E. D. (2015). The Influence of Pollen Feeding and Brood Rearing on the Length of Life and Physiological Condition of the Honeybee Preliminary Report. *Bee World*, *31*(2), 9–12. <https://doi.org/10.1080/0005772x.1950.11094617>
- Meikle, W. G., Holst, N., Colin, T., Weiss, M., Carroll, M. J., McFrederick, Q. S., & Barron, A. B. (2018). Using within-day hive weight changes to measure environmental effects on honey bee colonies. *PLoS ONE*, *13*(5), 1–21. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0197589>
- Melin, E. (2015). *Botanique apicole et notions d ’ écologie à destination des apiculteurs*.
- Menz, M. H. M., Phillips, R. D., Winfree, R., Kremen, C., Aizen, M. A., Johnson, S. D., & Dixon, K. W. (2011). Reconnecting plants and pollinators: Challenges in the restoration of pollination mutualisms. *Trends in Plant Science*, *16*(1), 4–12. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2010.09.006>
- Miyoshi, G. T., Arruda, M. dos S., Osco, L. P., Junior, J. M., Gonçalves, D. N., Imai, N. N., Tommaselli, A. M. G., Honkavaara, E., & Gonçalves, W. N. (2020). A novel deep learning method to identify single tree species in UAV-based hyperspectral images. *Remote Sensing*, *12*(8), 1–18. <https://doi.org/10.3390/RS12081294>
- Moquet, L., Bacchetta, R., Laurent, E., & Jacquemart, A. L. (2017). Spatial and temporal variations in floral resource availability affect bumblebee communities in heathlands. *Biodiversity and Conservation*, *26*(3), 687–702. <https://doi.org/10.1007/s10531-016-1266-8>
- Nelson, K., & Papuga, S. K. (2009). *Continuous Monitoring of Dynamic Pulse-Driven Phenological Phases in a Semiarid Shrubland*. *152*(2), 2007.
- Nightingale, J. M., Esaias, W. E., Wolfe, R. E., Nickeson, J. E., & Ma, P. L. A. (2008). Assessing honey bee equilibrium range and forage supply using satellite-derived phenology. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, *3*(1), 763–766.
<https://doi.org/10.1109/IGARSS.2008.4779460>

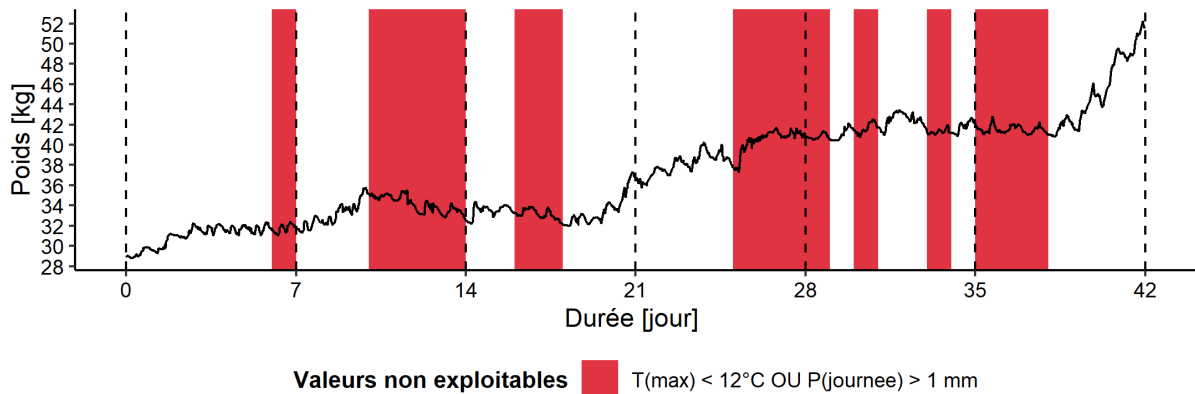
- Pellecuer. (2017). *No Title* (F. Agricole (ed.)).
- Pérez, J. L., Higes, M., Suárez, M., & Llorente, J. (2015). *dead-bee traps Easy ways to determine honey bee mortality using dead-bee*. 8839, 24–28. <https://doi.org/10.1080/00218839.2001.11101045>
- Pettorelli, N., Laurance, W. F., O'Brien, T. G., Wegmann, M., Nagendra, H., & Turner, W. (2014). Satellite remote sensing for applied ecologists: Opportunities and challenges. *Journal of Applied Ecology*, 51(4), 839–848. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12261>
- Pierpont, D. (n.d.). *Dynamique spatio-temporelle de la disponibilité des ressources florales de milieux agricoles contrastés*.
- Porrini, C., Sabatini, A. G., Girotti, S., Ghini, S., Medrzycki, P., Grillenzoni, F., Bortolotti, L., Gattavecchia, E., & Celli, G. (2003). Honey Bees and Bee Products As Monitors of the Environmental Contamination. *Apiacta*, 38(May 2014), 63–70.
- Potts, S. G., Roberts, S. P. M., Dean, R., Marris, G., Brown, M. A., Jones, R., Neumann, P., & Settele, J. (2010). Declines of managed honey bees and beekeepers in Europe. *Journal of Apicultural Research*, 49(1), 15–22. <https://doi.org/10.3896/IBRA.1.49.1.02>
- Pu, R. (2009). Broadleaf species recognition with in situ hyperspectral data. *International Journal of Remote Sensing*, 30(11), 2759–2779. <https://doi.org/10.1080/01431160802555820>
- Requier, F., Odoux, J. F., Henry, M., & Bretagnolle, V. (2017). The carry-over effects of pollen shortage decrease the survival of honeybee colonies in farmlands. *Journal of Applied Ecology*, 54(4), 1161–1170. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12836>
- Resasco, J., Bruna, E. M., Haddad, N. M., Banks-Leite, C., & Margules, C. R. (2017). The contribution of theory and experiments to conservation in fragmented landscapes. *Ecography*, 40(1), 109–118. <https://doi.org/10.1111/ecog.02546>
- Robinson, R. A., & Sutherland, W. J. (2002). Post-war changes in arable farming and biodiversity in Great Britain. *Journal of Applied Ecology*, 39(1), 157–176. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2664.2002.00695.x>
- Schubnel, A. F., Hummel, R., & Feltn, M. (2019). *Des abeilles et des chiffres*.
- Seeley, T. D., Camazine, S., & Sneyd, J. (1991). Collective decision-making in honey bees: how colonies choose among nectar sources. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 28(4), 277–290. <https://doi.org/10.1007/BF00175101>
- Somme, L., Moquet, L., Quinet, M., Vanderplanck, M., Michez, D., Lognay, G., & Jacquemart, A. L. (2016). Food in a row: urban trees offer valuable floral resources to pollinating insects. *Urban Ecosystems*, 19(3), 1149–1161. <https://doi.org/10.1007/s11252-016-0555-z>
- Sponsler, D. B., Shump, D., Richardson, R. T., & Grozinger, C. M. (2020). Characterizing the floral resources of a North American metropolis using a honey bee foraging assay. *Ecosphere*, 11(4). <https://doi.org/10.1002/ecs2.3102>
- Steffan-dewenter, I., Danner, N., Keller, A., & Ha, S. (2017). Honey bee foraging ecology : Season but not landscape diversity shapes the amount and diversity of collected pollen. *Plos One*, 12(8), 9–12.
- Steffan-Dewenter, I., & Kuhn, A. (2003). Honeybee foraging in differentially structured landscapes. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 270(1515), 569–575. <https://doi.org/10.1098/rspb.2002.2292>
- Stoate, C., Baldi, A., Beja, P., Boatman, N. D., Herzon, I., van Doorn, A., de Snoo, G. R., Rakosy, L., & Ramwell, C. (2009). Ecological impacts of early 21st century agricultural change in Europe - A review. *Journal of Environmental Management*, 91(1), 22–46.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.07.005>

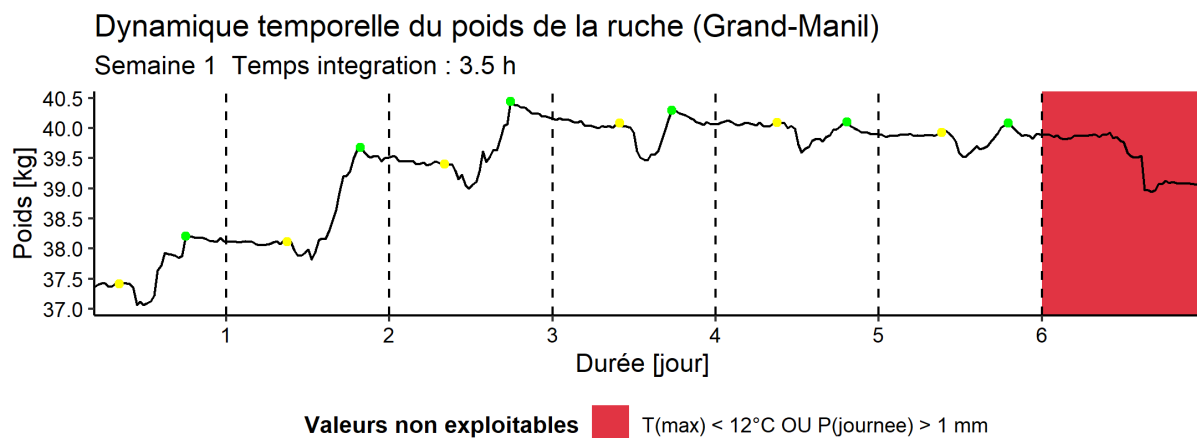
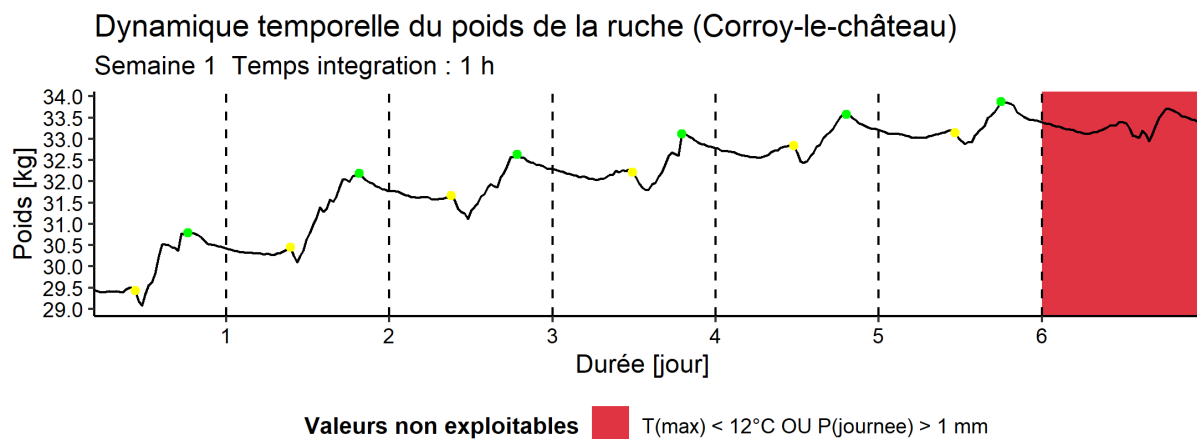
- Sulik, J. J., & Long, D. S. (2015). Spectral indices for yellow canola flowers. *International Journal of Remote Sensing*, 36(10), 2751–2765. <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1047994>
- Szigeti, V., Korösi, Á., Harnos, A., Nagy, J., & Kis, J. (2016). Measuring floral resource availability for insect pollinators in temperate grasslands - A review. *Ecological Entomology*, 41(3), 231–240. <https://doi.org/10.1111/een.12298>
- Tew, N. E., Memmott, J., Vaughan, I. P., Bird, S., Stone, G. N., Potts, S. G., & Baldock, K. C. R. (2020). Quantifying nectar production by flowering plants in urban and rural landscapes. *Journal of Ecology*, September 2020, 1–11. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13598>
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). 2 Tilman. *Nature*, 418(August), 671–677.
- Timberlake, T. P., Vaughan, I. P., & Memmott, J. (2019). Phenology of farmland floral resources reveals seasonal gaps in nectar availability for bumblebees. *Journal of Applied Ecology*, 56(7), 1585–1596. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13403>
- Tricault, Y. (2010). Lutte biologique contre les pucerons : auxiliaires, strategies et perspectives en cultures maraichères et en fraise. *Coulombel, A. Ed. Journées Techniques : Fruits et Légumes Biologiques, 14 at 15 Décembre 2010, Angers, France.*, 33–37.
- Van Daele, C. (2011). *Plantes d'intérêt apicole*. 1–5. <http://www.cthgx.be/plantes-melliferes-abeilles.pdf>
- van Engelsdorp, D., Hayes, J., Underwood, R. M., & Pettis, J. (2008). A survey of honey bee colony losses in the U.S., Fall 2007 to Spring 2008. *PLoS ONE*, 3(12), 8–13. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0004071>
- Xiao, C., Zheng, L., Sun, H., Zhang, Y., & Li, M. (2014). Estimation of the apple flowers based on aerial multispectral image. *American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting 2014, ASABE 2014*, 6, 4426–4433. <https://doi.org/10.13031/aim.20141912593>
- Yarsan, E., Karacal, F., Ibrahim, I. G., Dikmen, B., Koksall, A., & Das, Y. K. (2007). Contents of some metals in honeys from different regions in Turkey. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 79(3), 255–258. <https://doi.org/10.1007/s00128-007-9034-9>

Annexes (Figures)

Annexe 1 : Sélection des jours dont la Température maximale est supérieure à 12°C et dont les précipitations cumulées sur la journée sont inférieures à 1mm. La courbe relate la dynamique temporelle de poids de la ruche expérimentale de Lonzée.

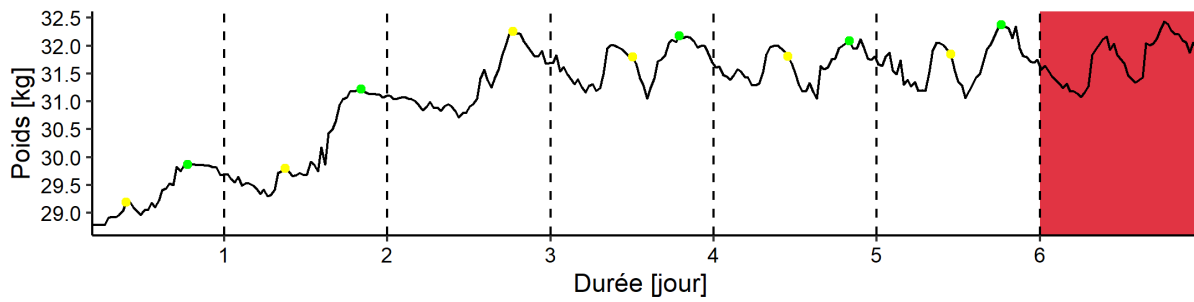


Annexe 2 : Dynamique temporelle du poids de la ruche expérimentale du rucher considéré (semaine 1). Les points jaunes indiquent le départ des butineuses (dérivée négative maximale) et les points vers le retour des butineuses à la ruche (poids journalie)



Dynamique temporelle du poids de la ruche (Lonzée)

Semaine 1 Temps integration : 2 h

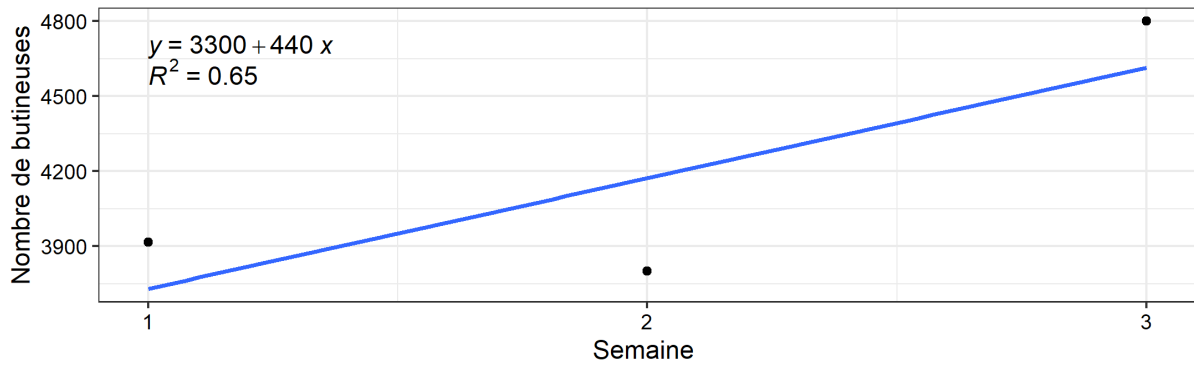


Valeurs non exploitables ■ T(max) < 12°C OU P(journee) > 1 mm

Annexe 3 : Courbes de régression permettant d'estimer le nombre de butineuses pour chacun des ruchers lorsqu'il n'est pas directement quantifiable par l'analyse des courbes

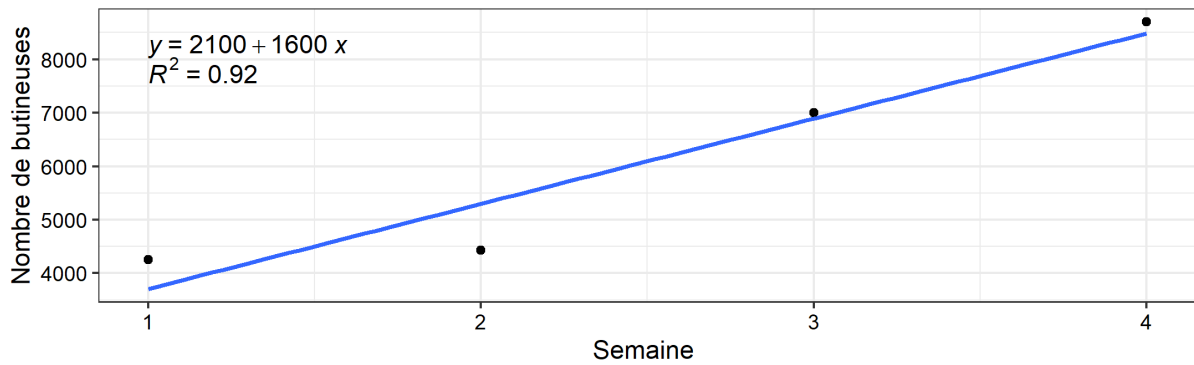
Evolution du nombre de butineuses

Rucher: CC Cond : T(max) > 12 °C & p < 1 mm



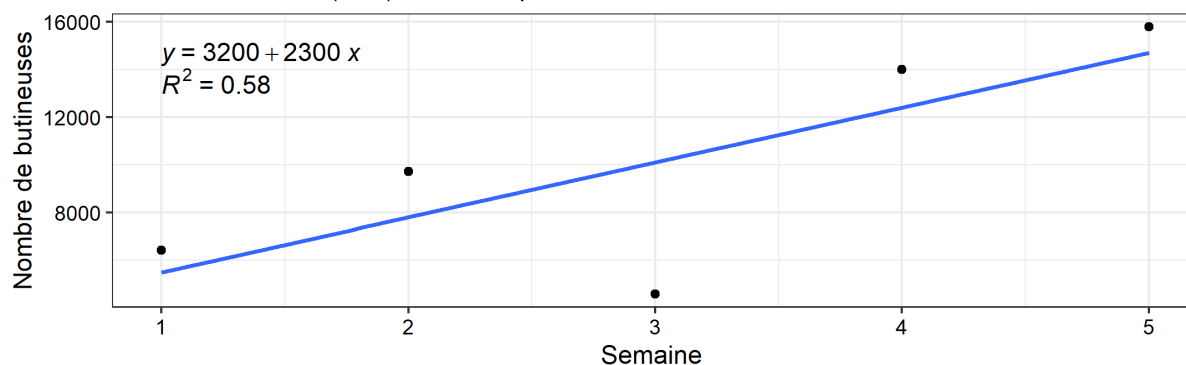
Evolution du nombre de butineuses

Rucher: GM Cond : T(max) > 12 °C & p < 1 mm



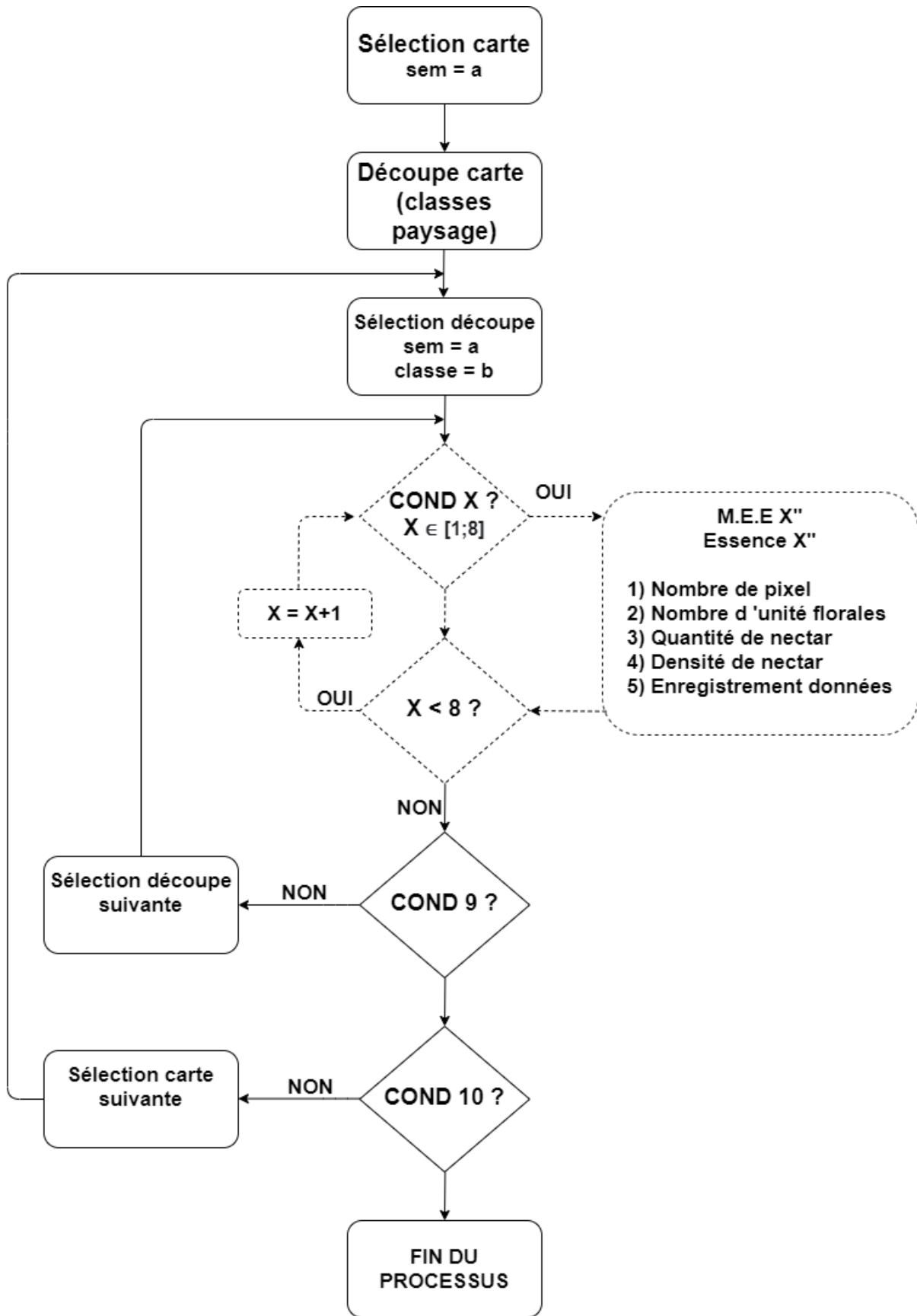
Evolution du nombre de butineuses

Rucher: L Cond : T(max) > 12 °C & p < 1 mm

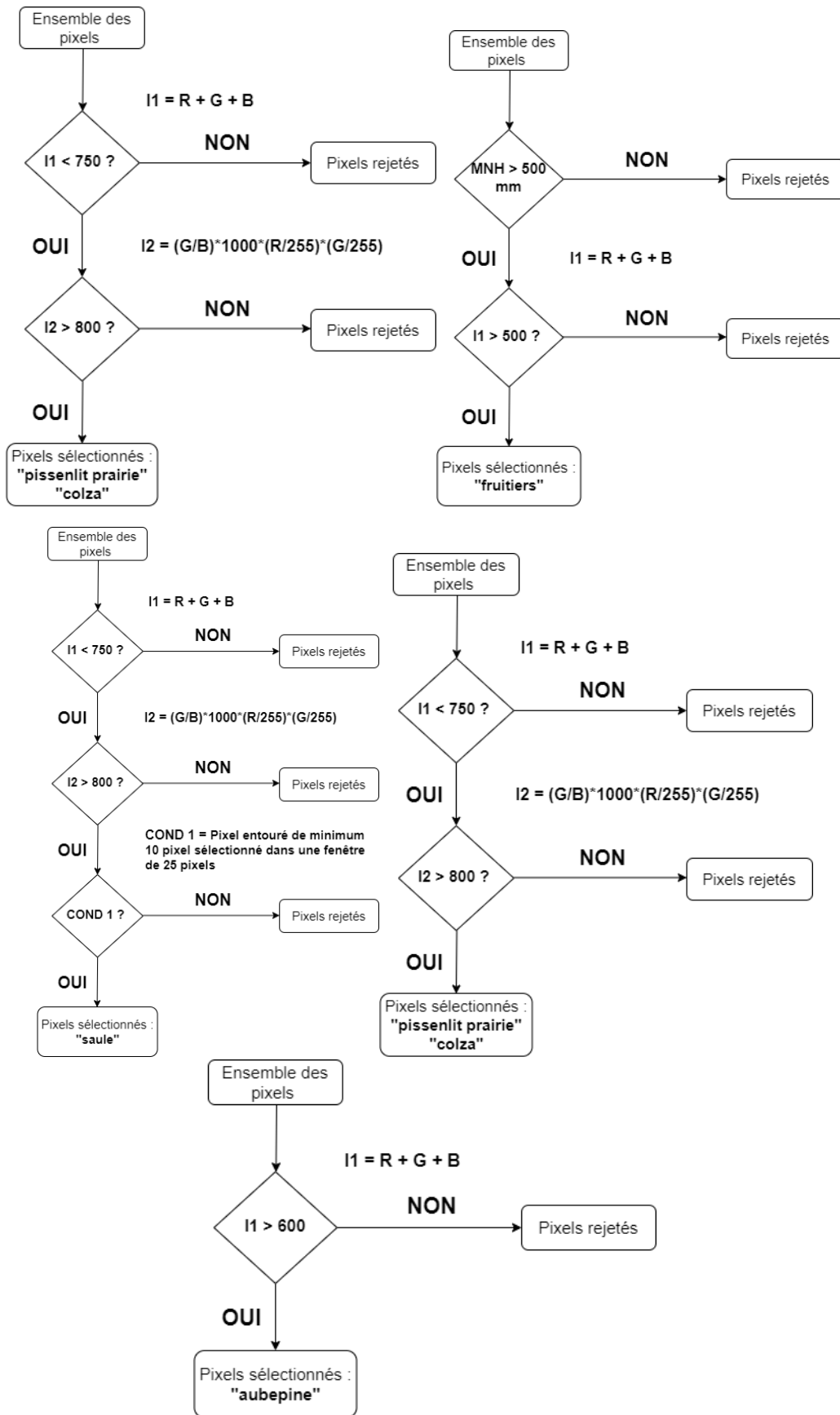


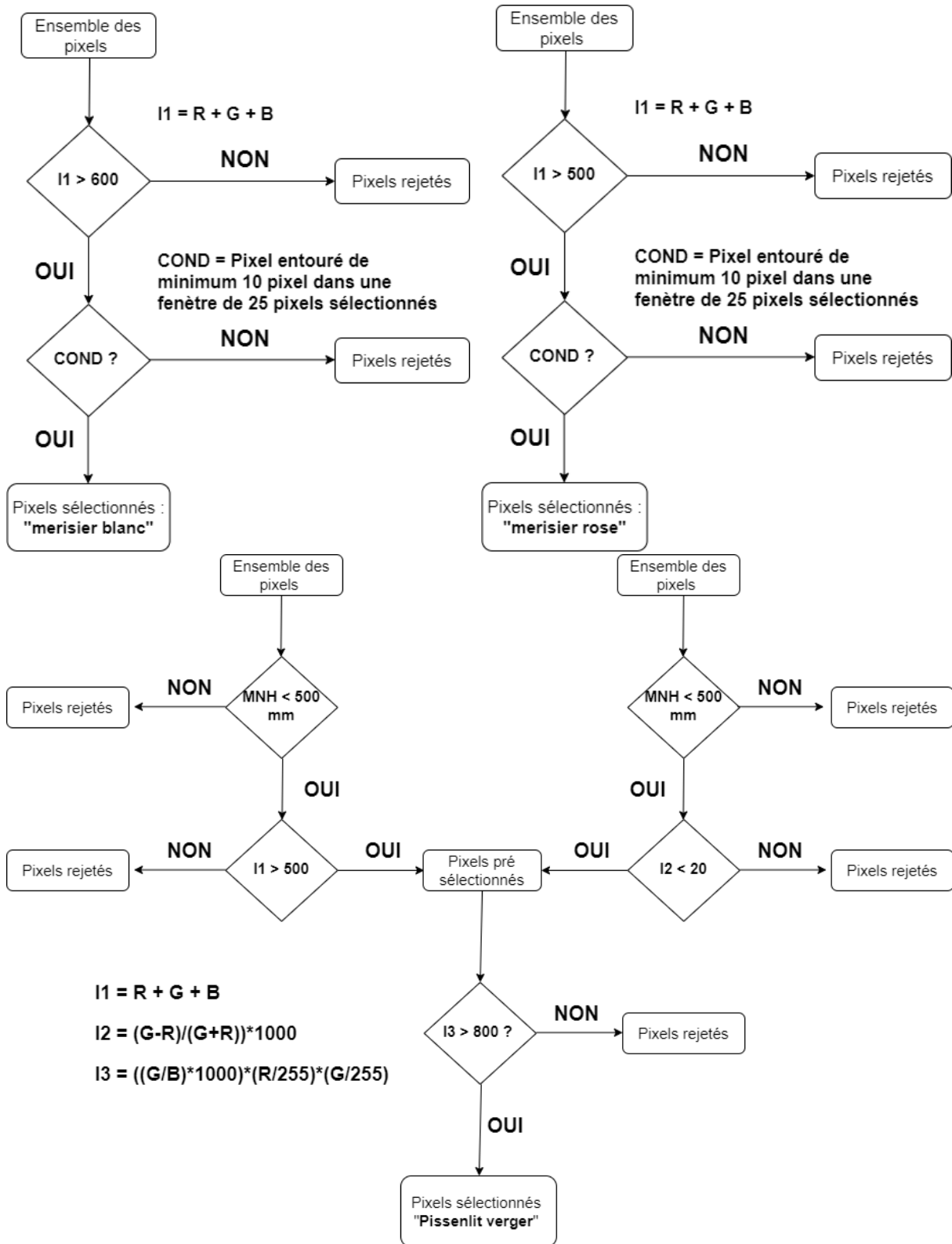
Annexe 4 : Conditions à respecter pour rentrer dans les boucles de discriminations (voir Diagramme de discrimination)

X	Essence	Condition
1	Pissenlit (Prairie)	<ul style="list-style-type: none"> • classe = prairie & sem = 1 • classe = prairie & sem = 2 • classe = prairie & sem = 3
2	Pissenlit (Verger)	<ul style="list-style-type: none"> • classe = verger & sem = 1 • classe = verger & sem = 2 • classe = verger & sem = 3
3	Colza	<ul style="list-style-type: none"> • classe = colza & sem = 1 • classe = colza & sem = 2 • classe = colza & sem = 3 • classe = colza & sem = 4 • classe = colza & sem = 5 • classe = colza & sem = 6
4	Saule	<ul style="list-style-type: none"> • classe = forêt & sem = 1 • classe = forêt & sem = 2 • classe = AHF & sem = 1 • classe = AHF & sem = 2
5	Fruitier	<ul style="list-style-type: none"> • classe = verger & sem = 1 • classe = verger & sem = 2 • classe = verger & sem = 3
6	Aubépine	<ul style="list-style-type: none"> • classe = AHF & sem = 4 • classe = AHF & sem = 6
7	Merisier blanc	<ul style="list-style-type: none"> • classe = forêt & sem = 1 • classe = forêt & sem = 2 • classe = forêt & sem = 3 • classe = AHF & sem = 1 • classe = AHF & sem = 2 • classe = AHF & sem = 3
8	Merisier rose	<ul style="list-style-type: none"> • classe = AHF & sem = 2 • classe = AHF & sem = 3 • classe = AHF & sem = 4
9	/	Toutes les découpes de la carte ont été analysées ?
10	/	Toutes les cartes ont été analysées ?

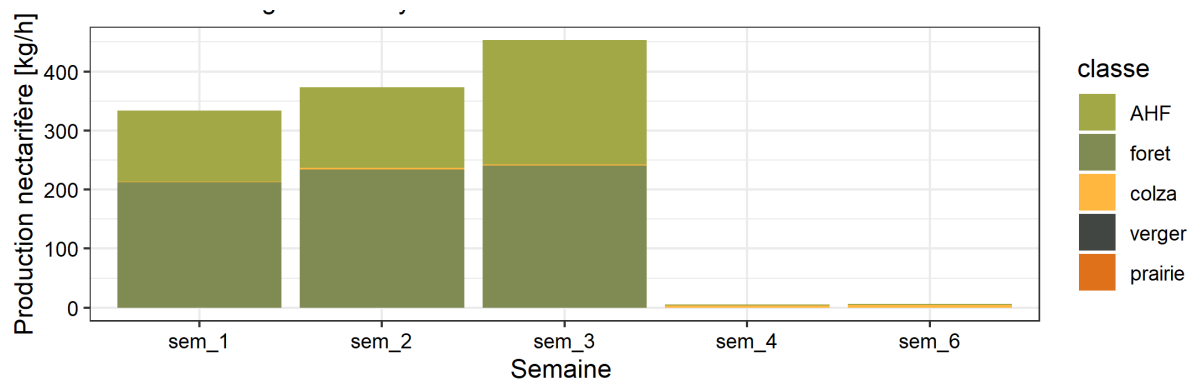


Annexe 6 : Processus de discrimination des essences d'intérêt

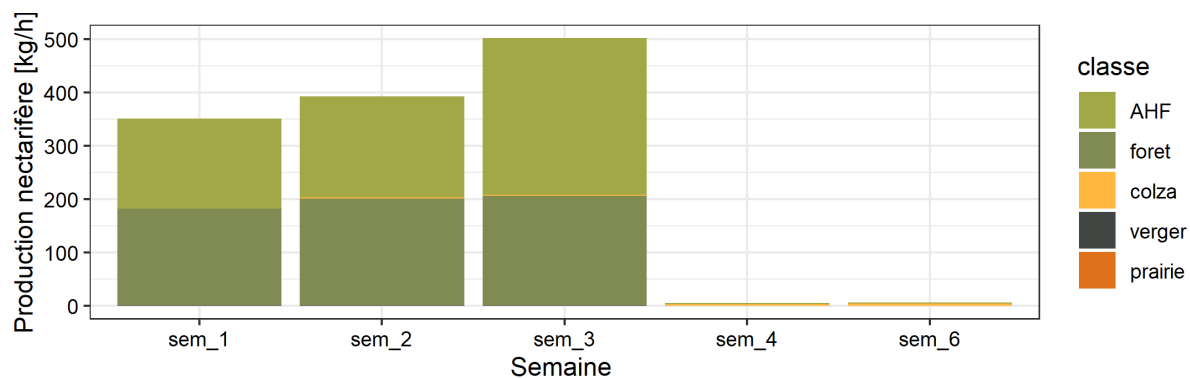




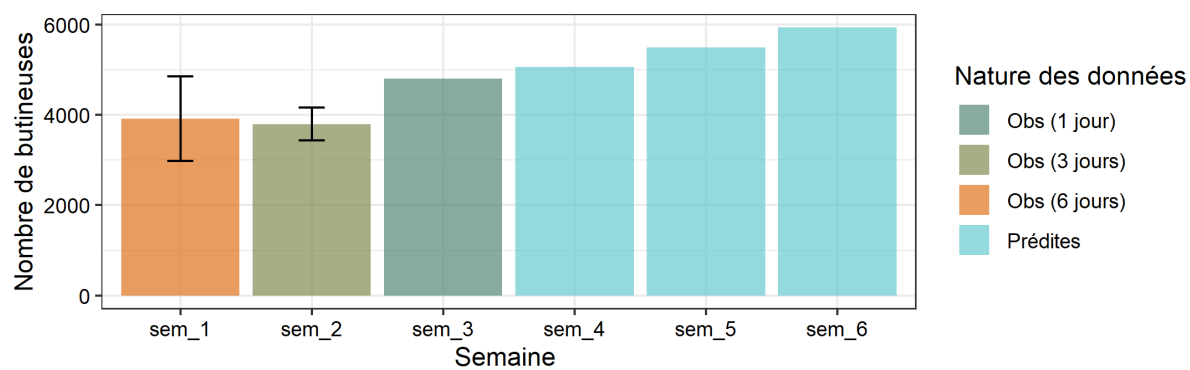
Annexe 7 : Evolution hebdomadaire de la production nectarifère de l'environnement pour la zone de butinage de Corroy-le-Château.



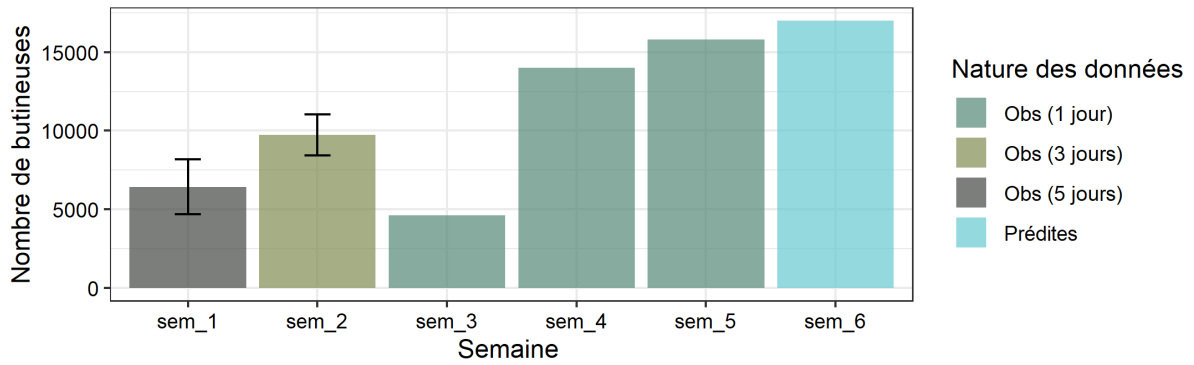
Annexe 8 : Evolution hebdomadaire de la production nectarifère de l'environnement pour la zone de butinage de Loncée.



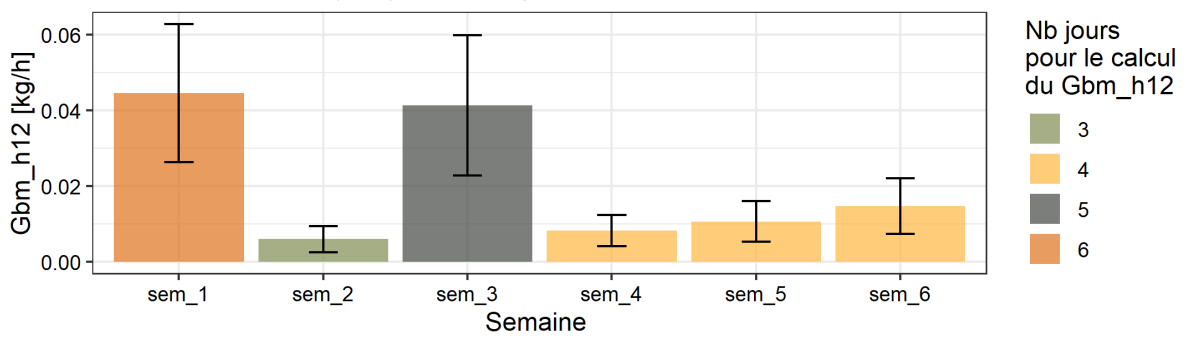
Annexe 9 : Evolution hebdomadaire du nombre de butineuses pour le rucher de Corroy le Château



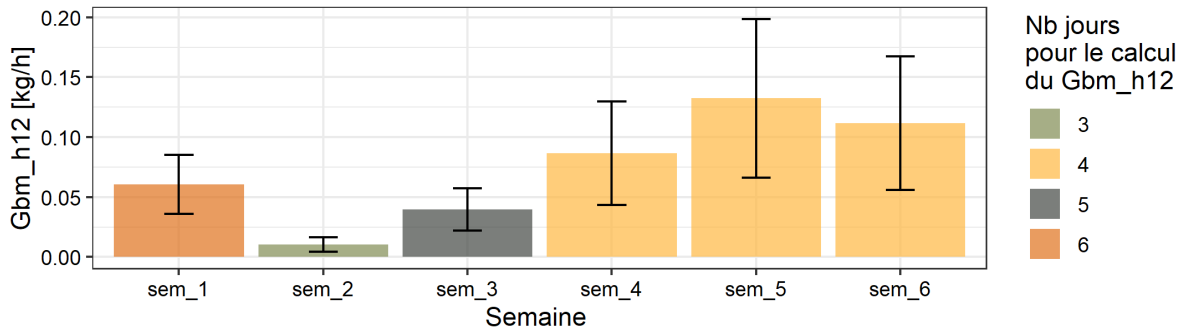
Annexe 10 : Evolution hebdomadaire du nombre de butineuses pour le rucher de Lonzée



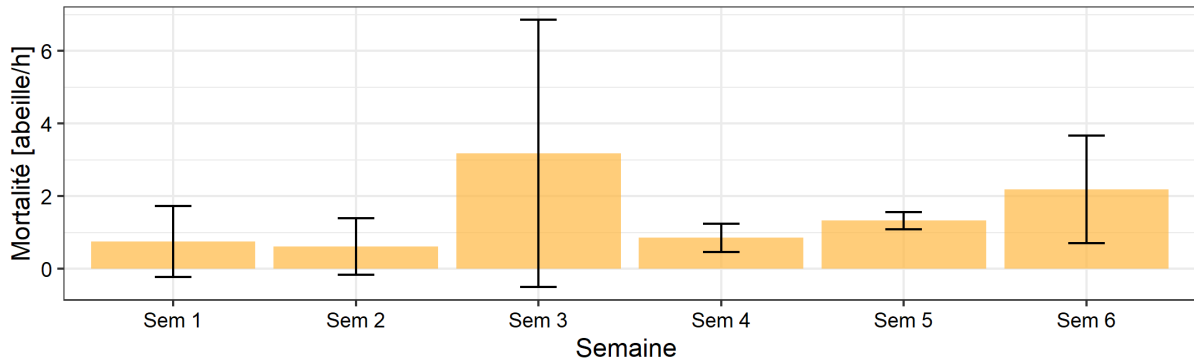
Annexe 11 : Evolution hebdomadaire du gain journalier brut moyen par heure (dont la température maximale est supérieure à 12°C) pour 15 000 butineuses pour le rucher de Corroy-le-Château.



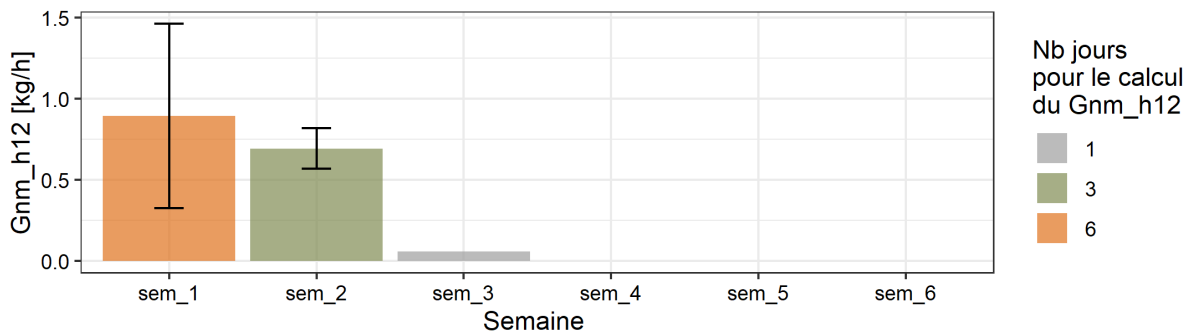
Annexe 12 : Evolution hebdomadaire du gain journalier brut moyen par heure (dont la température maximale est supérieure à 12°C) pour 15 000 butineuses pour le rucher de Lonzée



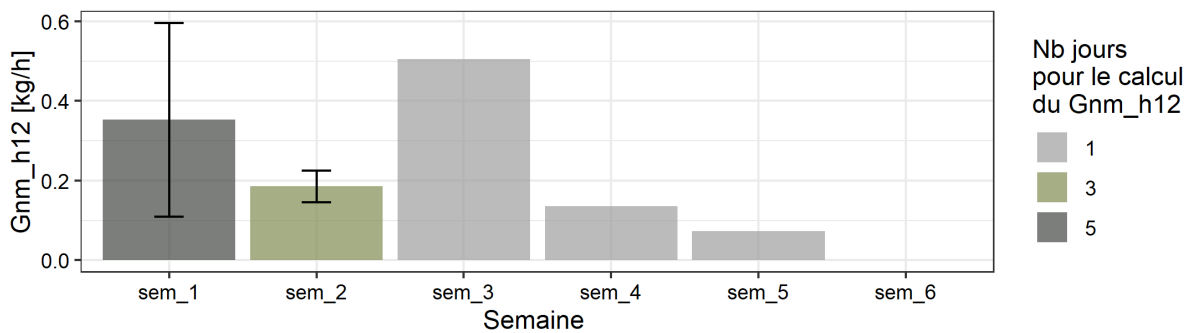
Evolution hebdomadaire de la mortalité adulte moyenne par heure et écart type
Rucher: CC (Ensemble du rucher)



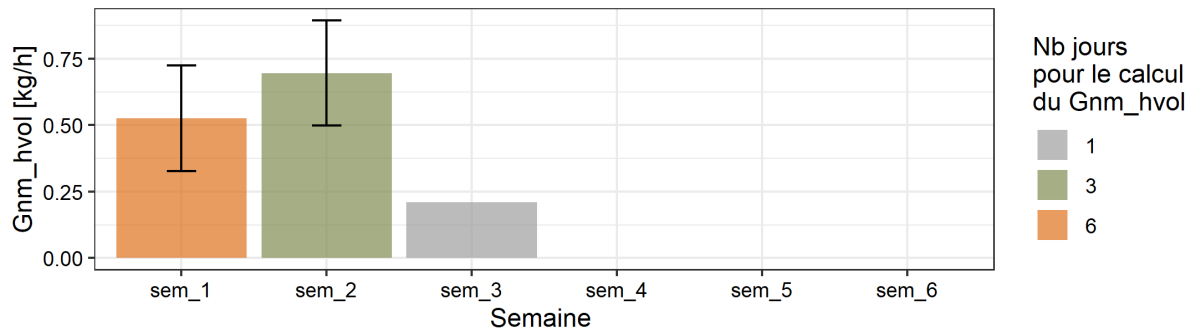
Annexe 13 : Evolution hebdomadaire du gain journalier net par heures (dont la température maximale est supérieure à 12°C) pour le rucher de Corroy-le-Château



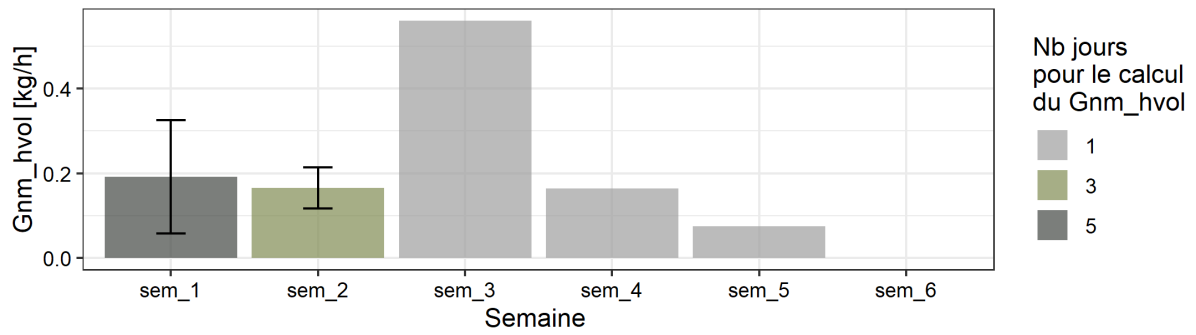
Annexe 14 : Evolution hebdomadaire du gain journalier net par heures (dont la température maximale est supérieure à 12°C) pour le rucher de Lonzée



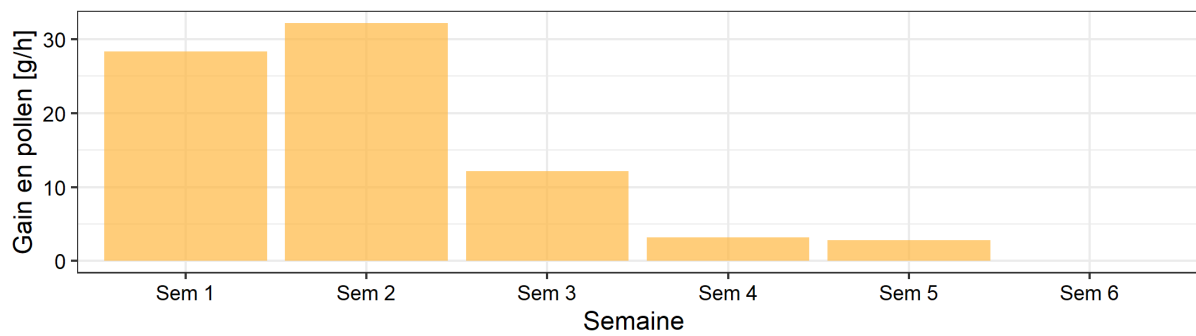
Annexe 15 : Evolution hebdomadaire du gain journalier net moyen par heure de vol de butinage, standardisé pour 15 000 butineuses pour le rucher de Corroy-le-Château



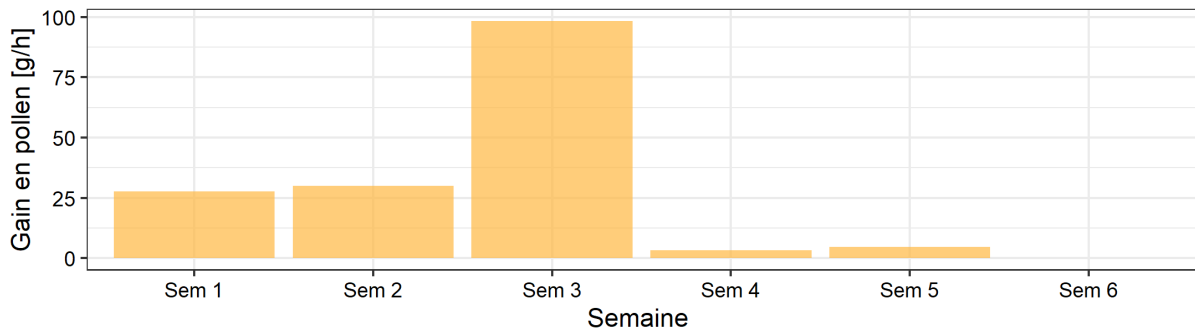
Annexe 16 : Evolution hebdomadaire du gain journalier net moyen par heure de vol de butinage, standardisé pour 15 000 butineuses pour le rucher de Lonzé



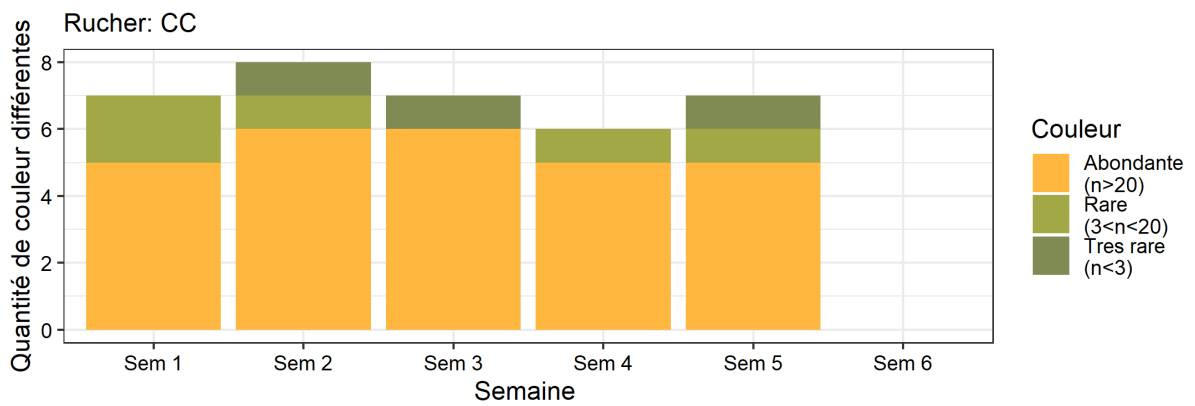
Annexe 17 : Evolution hebdomadaire des rentrées en pollen par heure dont la température maximale est supérieure à 12°C et pour 15 000 butineuses pour le rucher de Corroy-le-Château



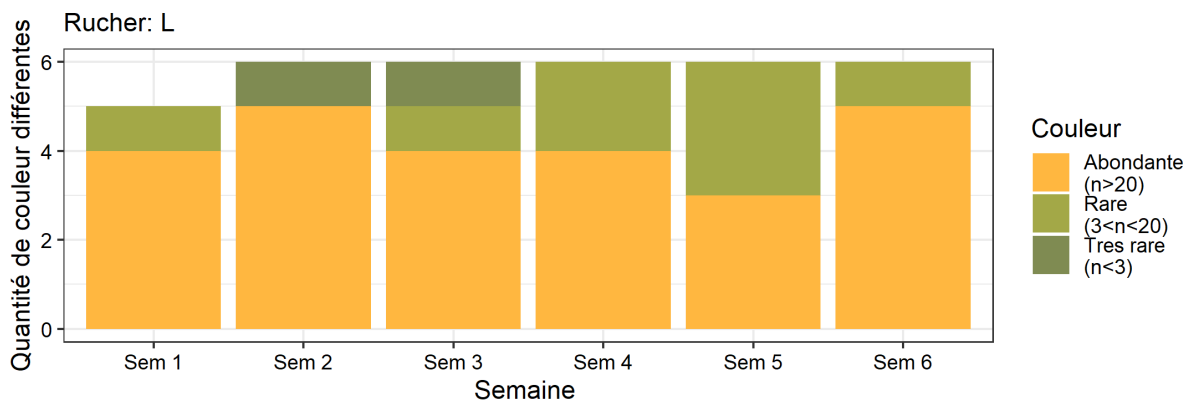
Annexe 18 : Evolution hebdomadaire des rentrées en pollen par heure dont la température maximale est supérieure à 12°C et pour 15 000 butineuses pour le rucher de Corroy-le-Château



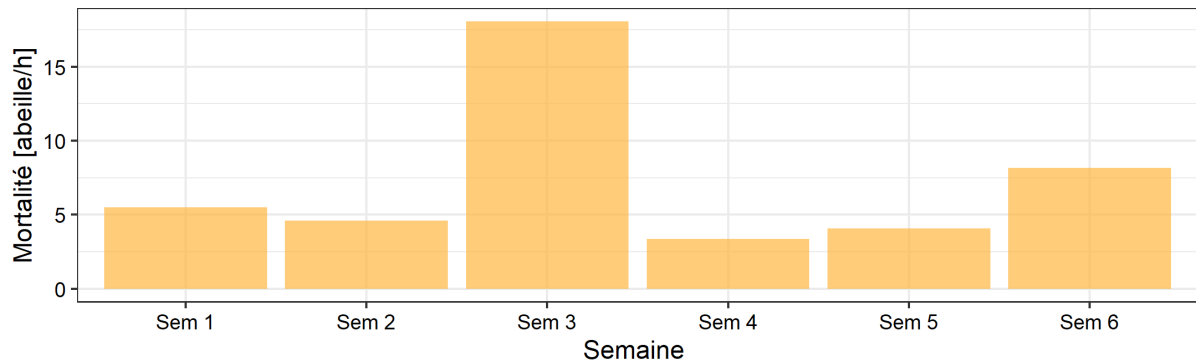
Annexe 19 : Evolution hebdomadaire de la diversité chromatique des rentrées en pollen pour le rucher de Corroy-le-Château



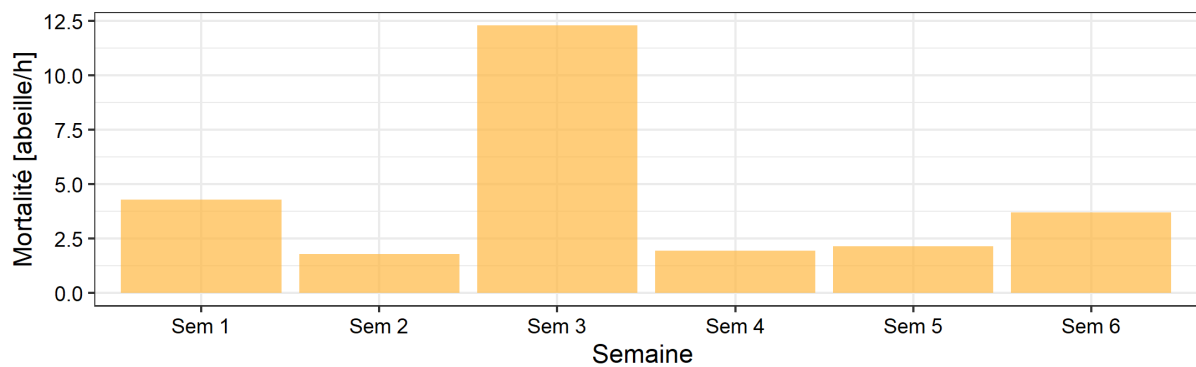
Annexe 20 : Evolution hebdomadaire de la diversité chromatique des rentrées en pollen pour le rucher de Lonzée



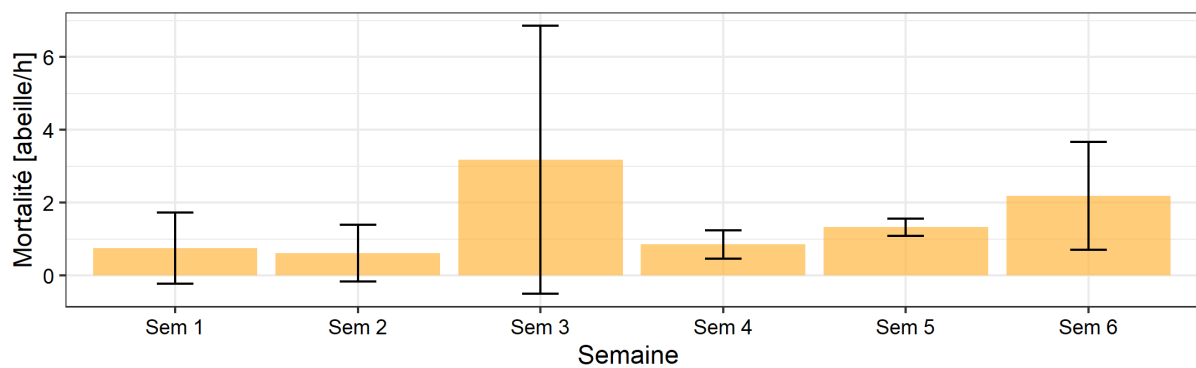
Annexe 21 : Evolution hebdomadaire de la mortalité adulte par heure pour 15 000 butineuses pour la ruche expérimentale du rucher de Corroy-le-Château.



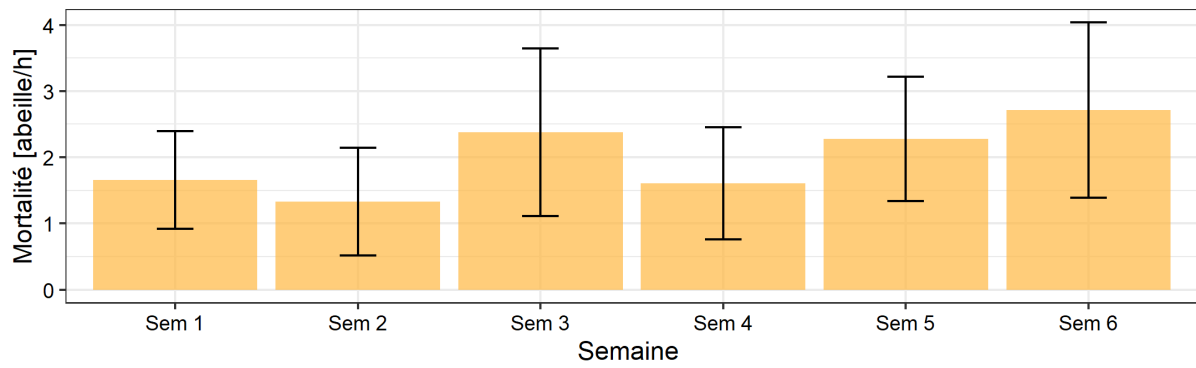
Annexe 22 : Evolution hebdomadaire de la mortalité adulte par heure pour 15 000 butineuses pour la ruche expérimentale du rucher de Loncée.



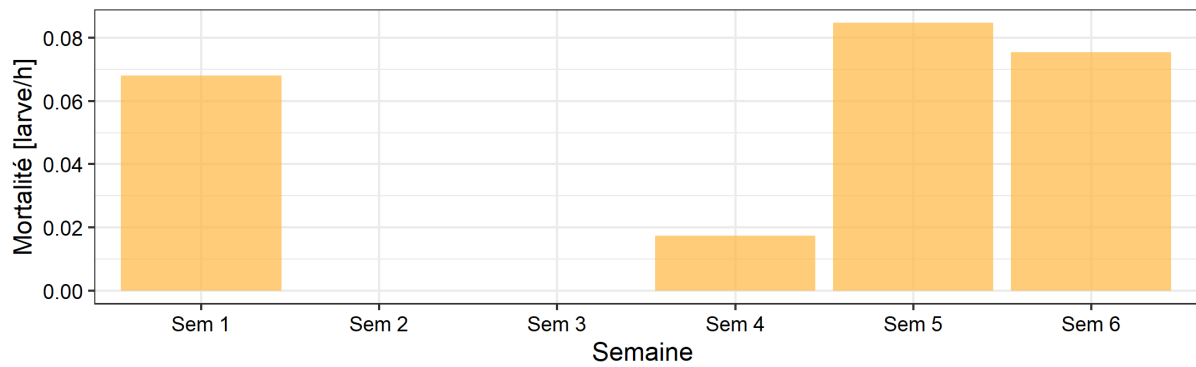
Annexe 23 : Evolution hebdomadaire de la mortalité adulte moyenne par heure et écart type pour le rucher de Corroy-le-Château



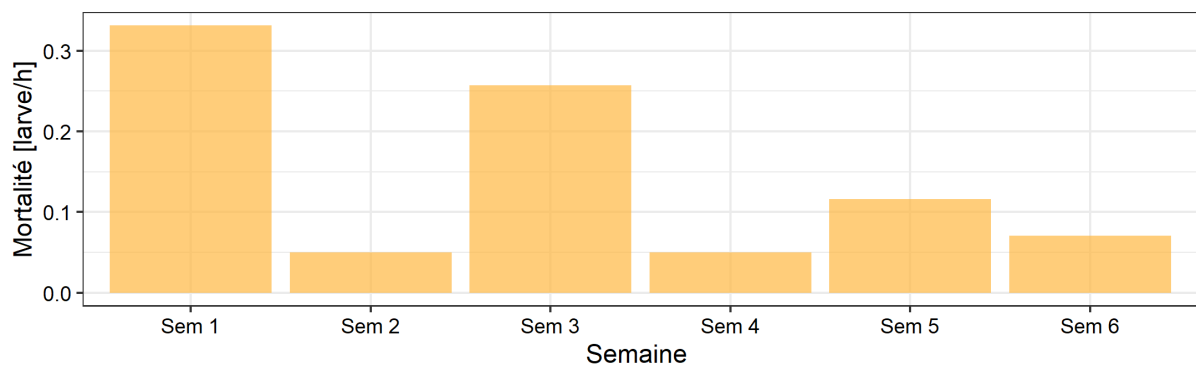
Annexe 24 : Evolution hebdomadaire de la mortalité adulte moyenne par heure et écart type pour le rucher de Lonzée



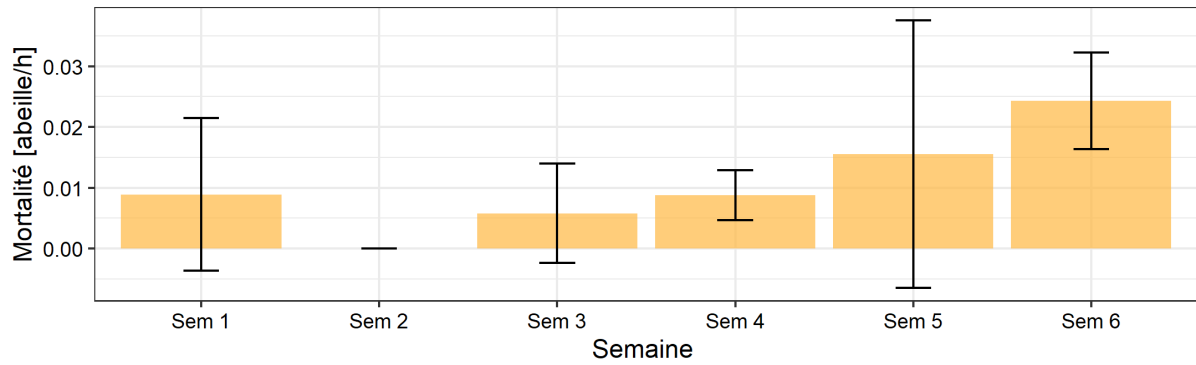
Annexe 25 : Evolution hebdomadaire de la mortalité larvaire par heure et pour 15 000 butineuses pour la ruche expérimentale du rucher de Corroy-le-Château



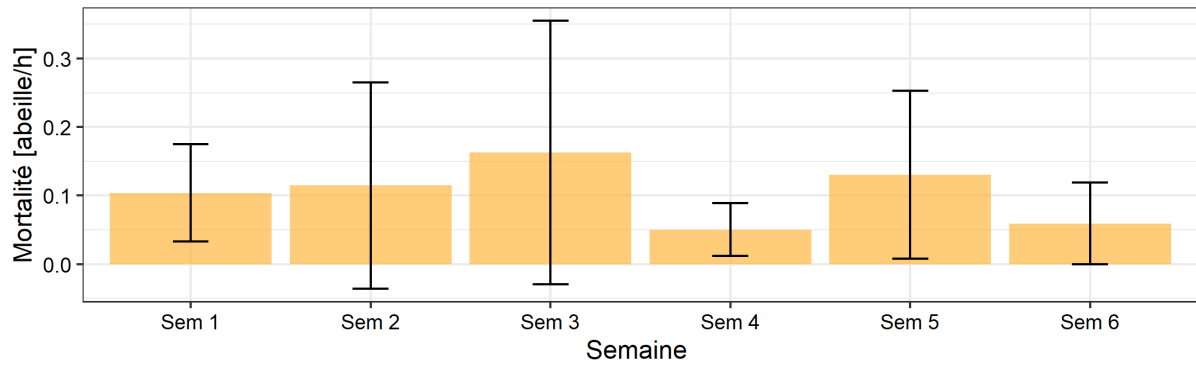
Annexe 26 : Evolution hebdomadaire de la mortalité larvaire par heure et pour 15 000 butineuses pour la ruche expérimentale du rucher de Lonzée



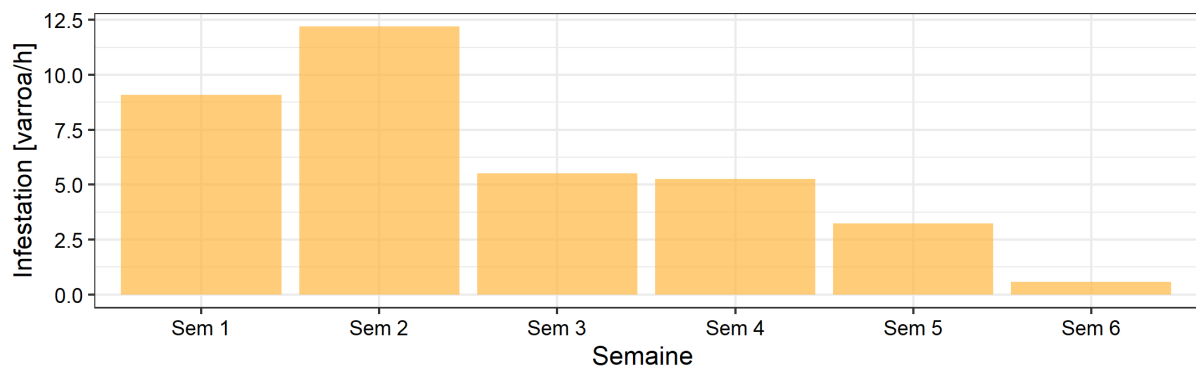
Annexe 27: Evolution hebdomadaire de la mortalité larvaire moyenne par heure et écart type pour le rucher de Corroy-le-Château



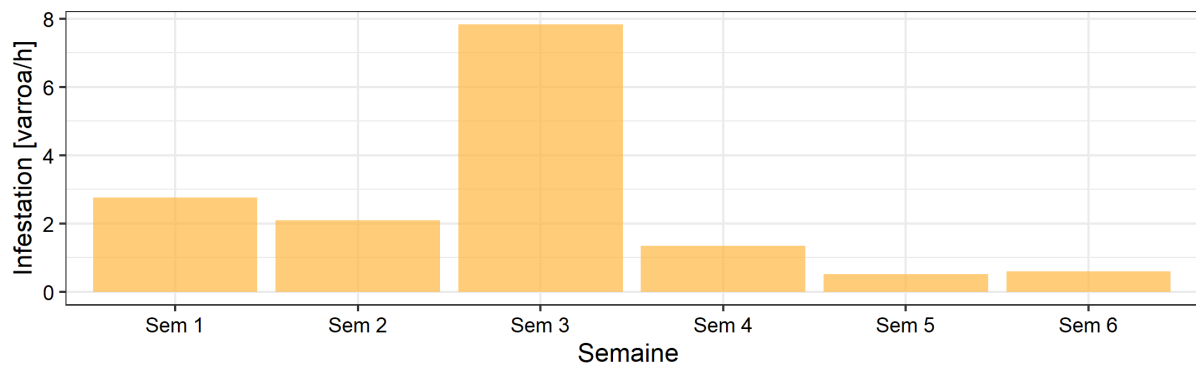
Annexe 28 : Evolution hebdomadaire de la mortalité larvaire moyenne par heure et écart type pour le rucher de Lonzée



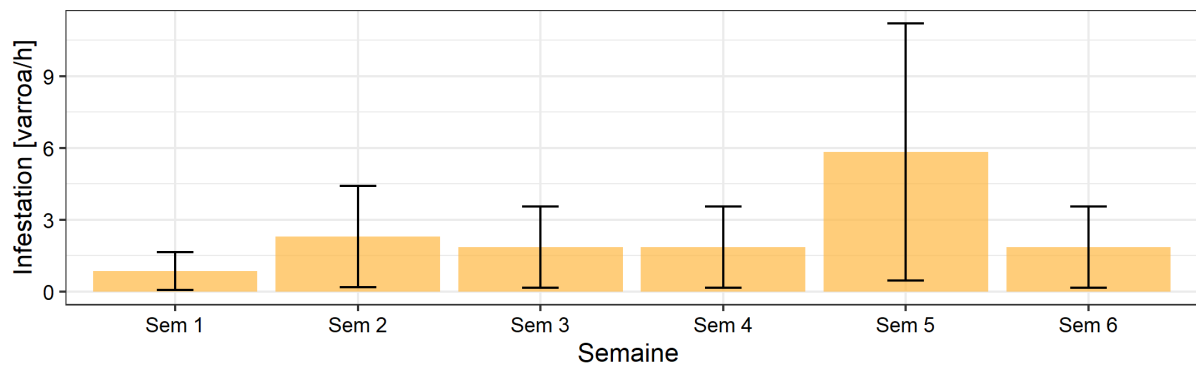
Annexe 29 : Evolution hebdomadaire de l'infestation au Varroa pour la ruche expérimentale du rucher de Corroy-le-Château



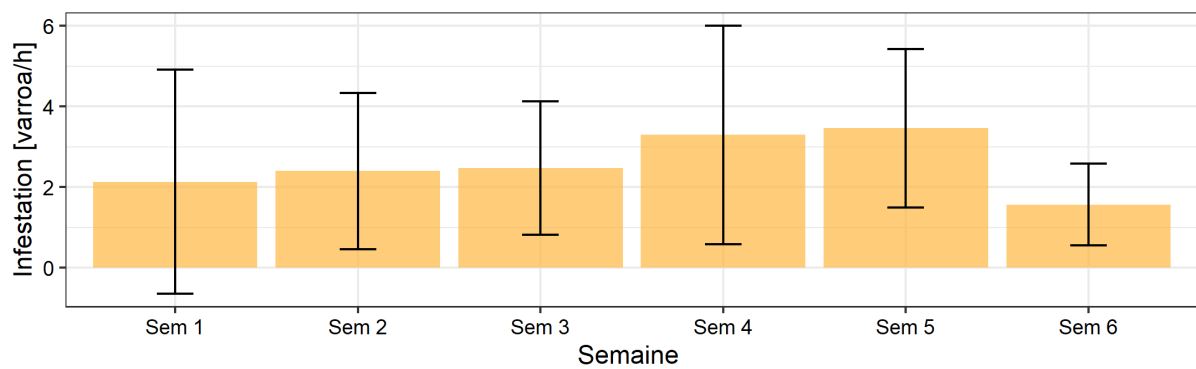
Annexe 30 : Evolution hebdomadaire de l'infestation au Varroa pour la ruche expérimentale du rucher de Lonzée



Annexe 31 : Evolution hebdomadaire de l'infestation au Varroa moyenne par heure et écart type pour le rucher de Corroy-le-Château



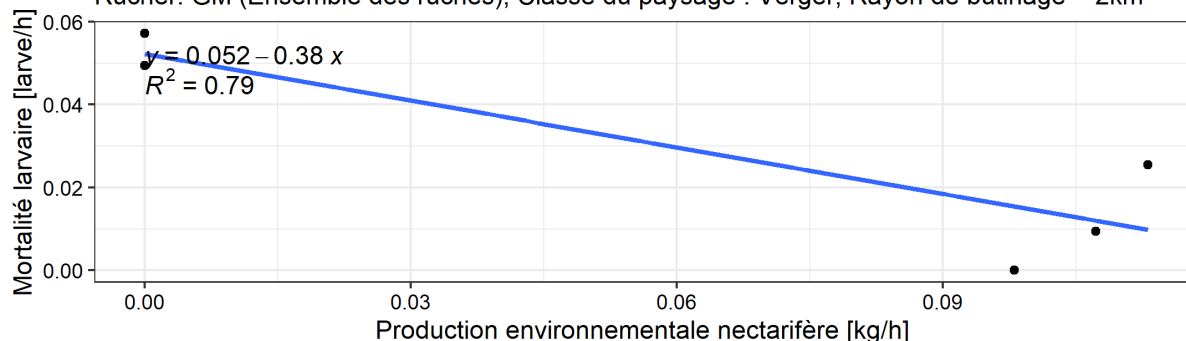
Annexe 32 : Evolution hebdomadaire de l'infestation au Varroa moyenne par heure et écart type pour le rucher de Lonzée



RUCHER GRAND MANIL :

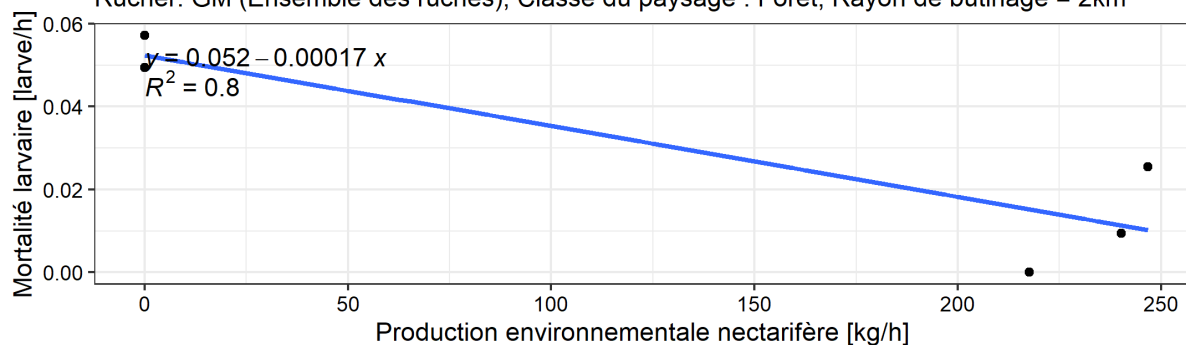
Evolution de la mortalité larvaire en fonction de la production nectarifère environnementale autour du rucher

Rucher: GM (Ensemble des ruches), Classe du paysage : Verger, Rayon de butinage = 2km



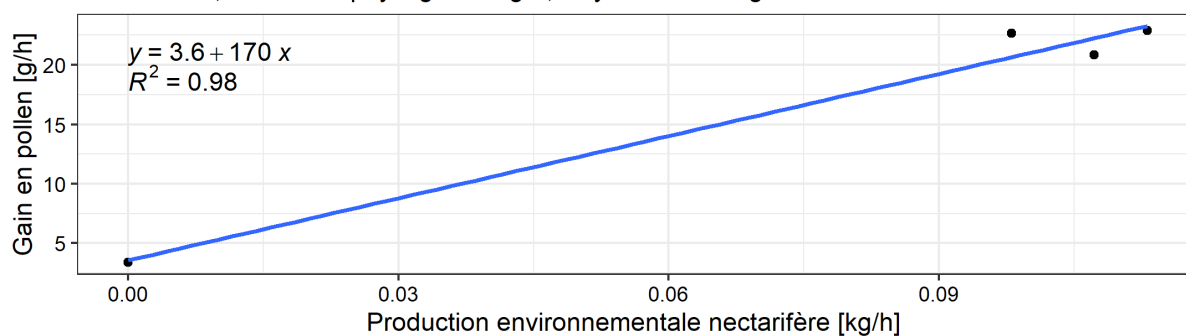
Evolution de la mortalité larvaire en fonction de la production nectarifère environnementale autour du rucher

Rucher: GM (Ensemble des ruches), Classe du paysage : Forêt, Rayon de butinage = 2km



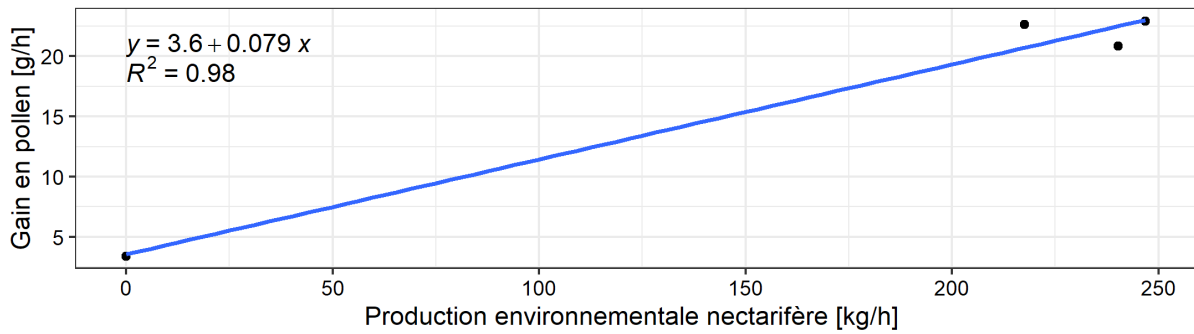
Evolution du gain pollinifère par heure pour 15.000 butineuses en fonction de la production nectarifère environnementale autour du rucher

Rucher: GM, Classe de paysage : Verger, Rayon de butinage = 2km



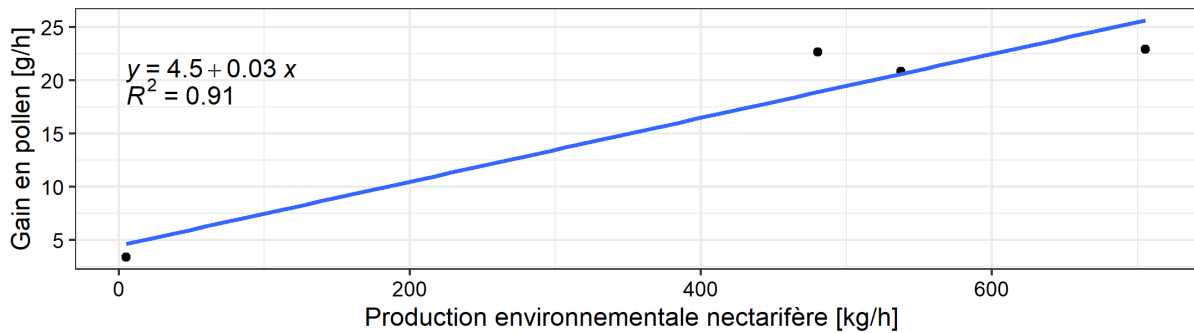
Evolution du gain pollinifère par heure pour 15.000 butineuses en fonction de la production nectarifère environnementale autour du rucher

Rucher: GM, Classe de paysage : Foret, Rayon de butinage = 2km



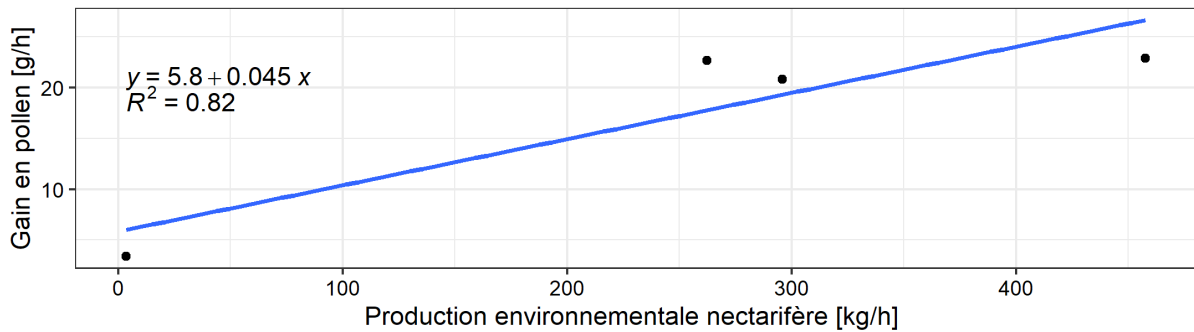
Evolution du gain pollinifère par heure pour 15.000 butineuses en fonction de la production nectarifère environnementale autour du rucher

Rucher: GM, Classe de paysage : Ensemble des classes, Rayon de butinage = 2km



Evolution du gain pollinifère par heure pour 15.000 butineuses en fonction de la production nectarifère environnementale autour du rucher

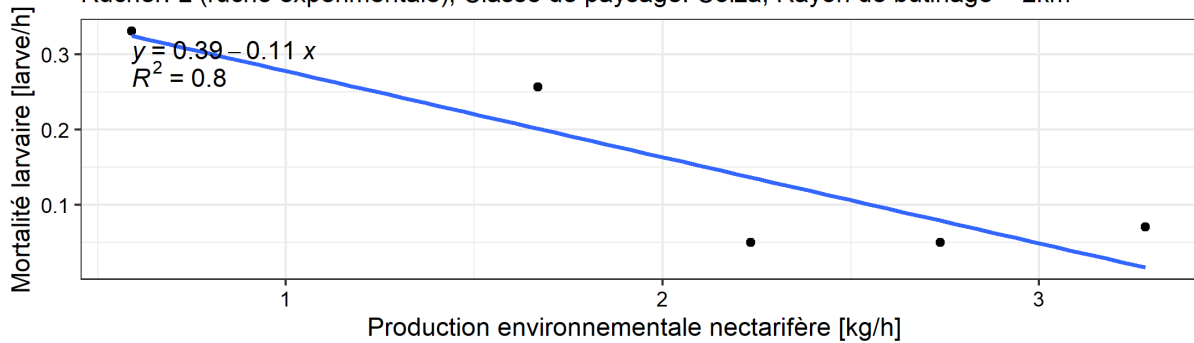
Rucher: GM, Classe de paysage : AHF, Rayon de butinage = 2km



RUCHER LONZEE

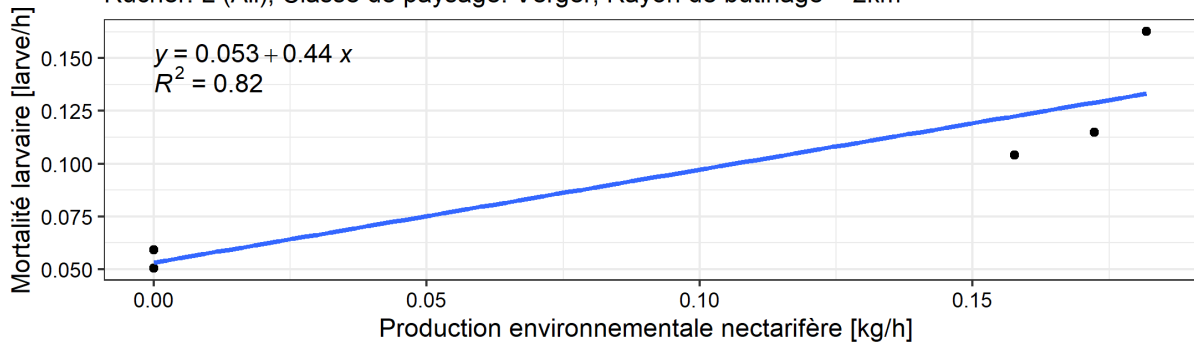
Evolution de la mortalité larvaire standardisée pour 15 000 butineuses en fonction de la production nectarifère environnementale autour du rucher

Rucher: L (ruche expérimentale), Classe de paysage: Colza, Rayon de butinage = 2km



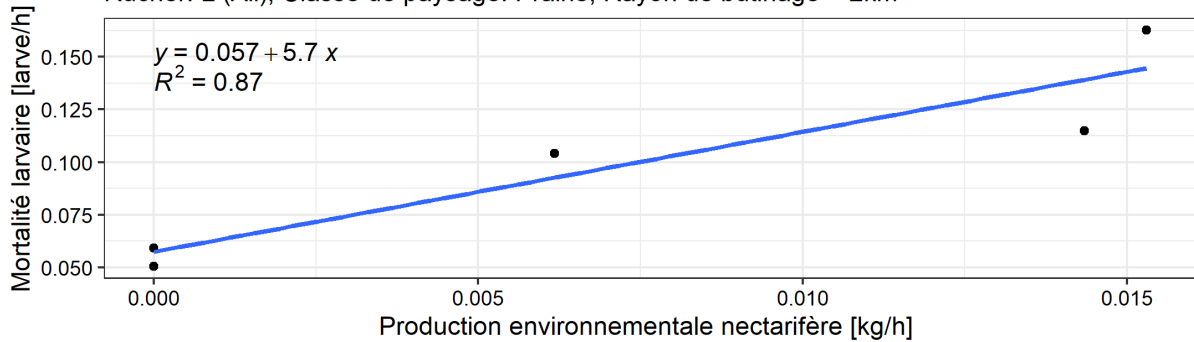
Evolution de la mortalité larvaire en fonction de la production nectarifère environnementale autour du rucher

Rucher: L (All), Classe de paysage: Verger, Rayon de butinage = 2km



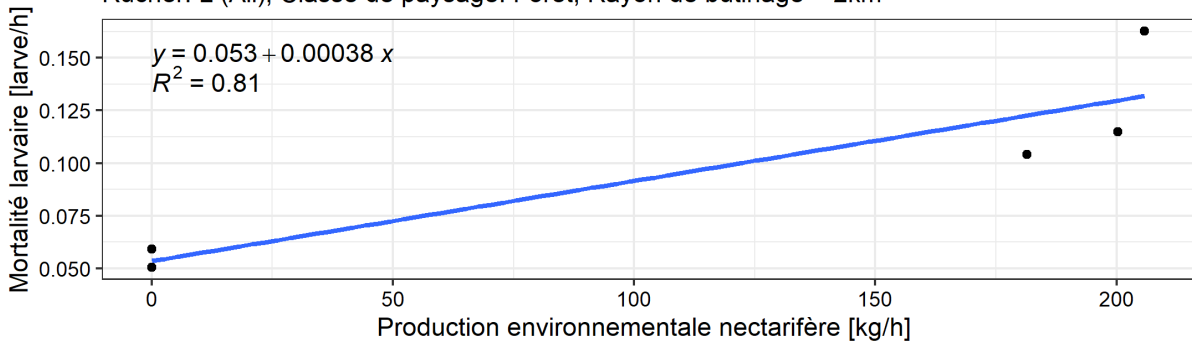
Evolution de la mortalité larvaire en fonction de la production nectarifère environnementale autour du rucher

Rucher: L (All), Classe de paysage: Prairie, Rayon de butinage = 2km



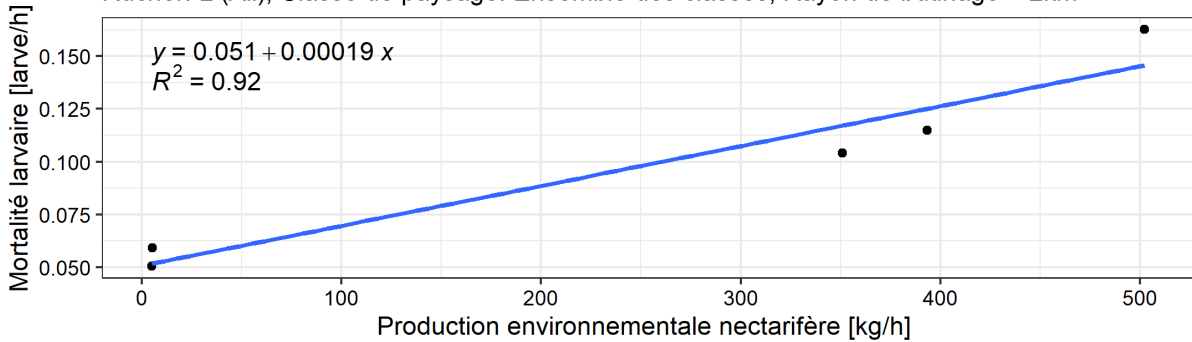
Evolution de la mortalité larvaire en fonction de la production nectarifère environnementale autour du rucher

Rucher: L (All), Classe de paysage: Forêt, Rayon de butinage = 2km



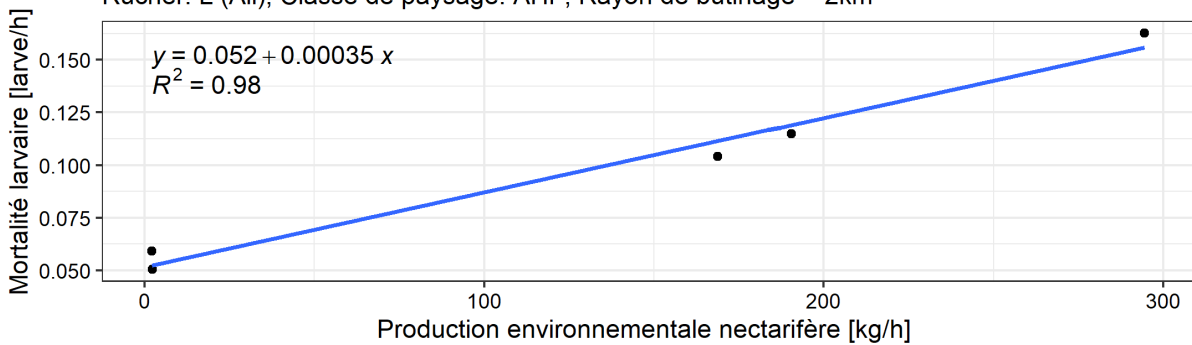
Evolution de la mortalité larvaire en fonction de la production nectarifère environnementale autour du rucher

Rucher: L (All), Classe de paysage: Ensemble des classes, Rayon de butinage = 2km



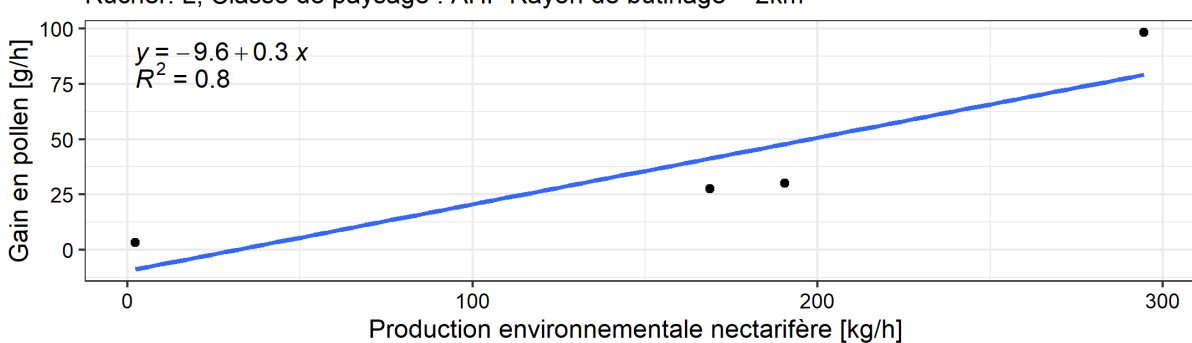
Evolution de la mortalité larvaire en fonction de la production nectarifère environnementale autour du rucher

Rucher: L (All), Classe de paysage: AHF, Rayon de butinage = 2km

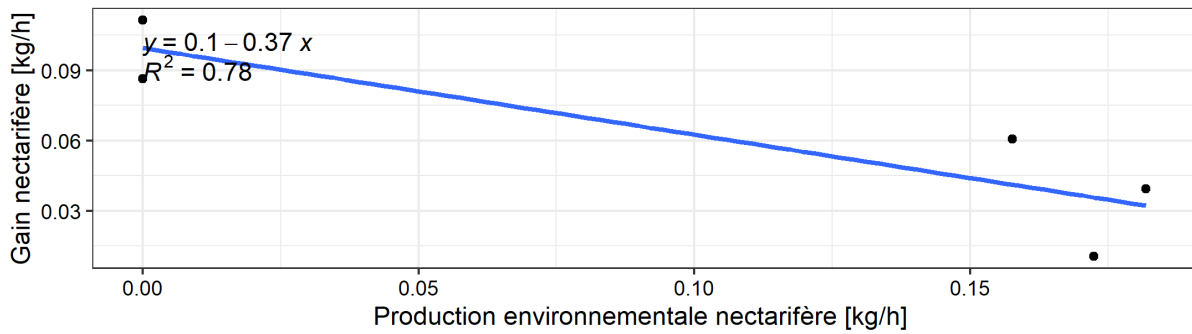


Evolution du gain pollinifère par heure pour 15.000 butineuses en fonction de la production nectarifère environnementale autour du rucher

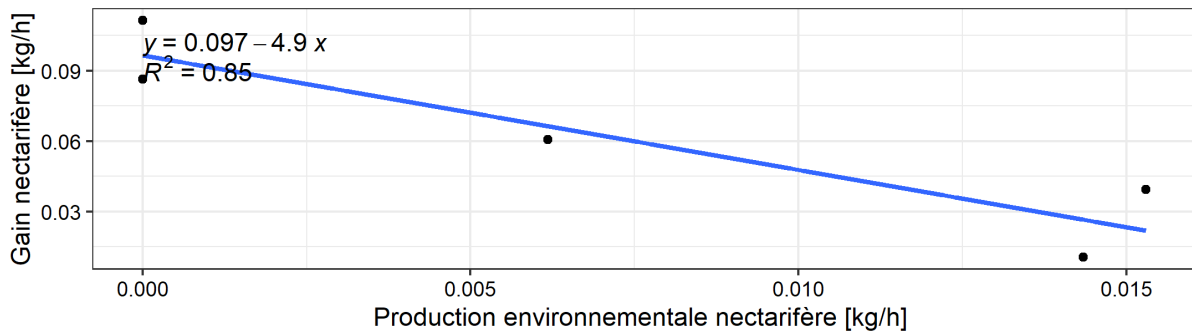
Rucher: L, Classe de paysage : AHF Rayon de butinage = 2km



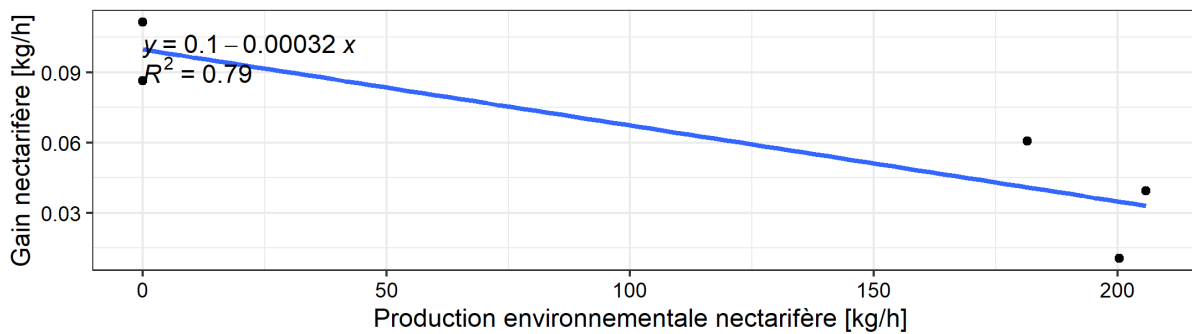
Evolution du gain nectarifère brut par heure ($T > 12^{\circ}\text{C}$) pour 15.000 butineuses en fonction de la production nectarifère environnementale autour du rucher
 Rucher: L, Classe de paysage : Verger, Rayon de butinage = 2km



Evolution du gain nectarifère brut par heure ($T > 12^{\circ}\text{C}$) pour 15.000 butineuses en fonction de la production nectarifère environnementale autour du rucher
 Rucher: L, Classe de paysage : Prairie, Rayon de butinage = 2km

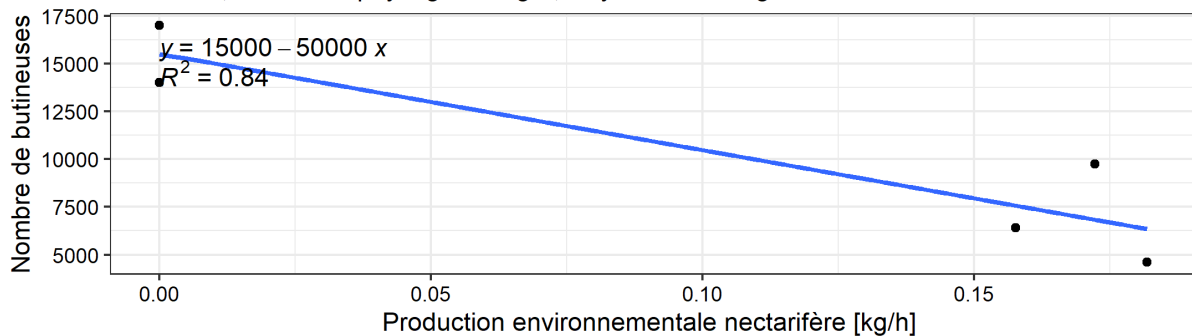


Evolution du gain nectarifère brut par heure ($T > 12^{\circ}\text{C}$) pour 15.000 butineuses en fonction de la production nectarifère environnementale autour du rucher
 Rucher: L, Classe de paysage : Forêt, Rayon de butinage = 2km



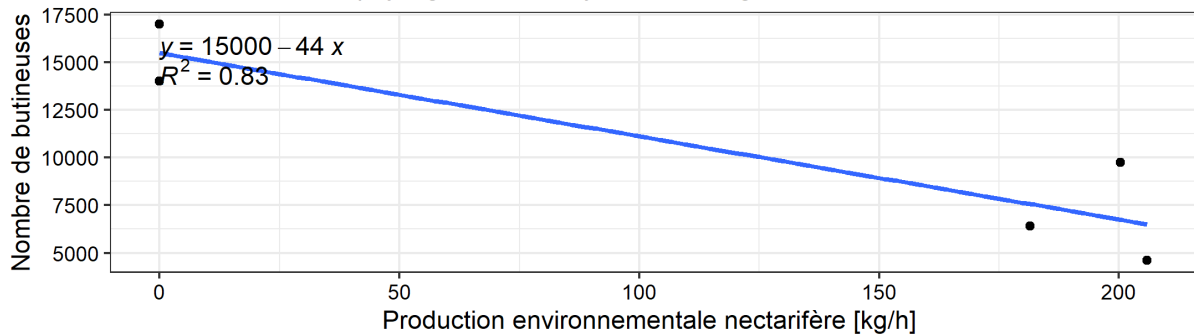
Evolution du nombre de butineuses en fonction de la production nectarifère environnementale autour du rucher

Rucher: L, Classe de paysage : Verger, Rayon de butinage = 2km



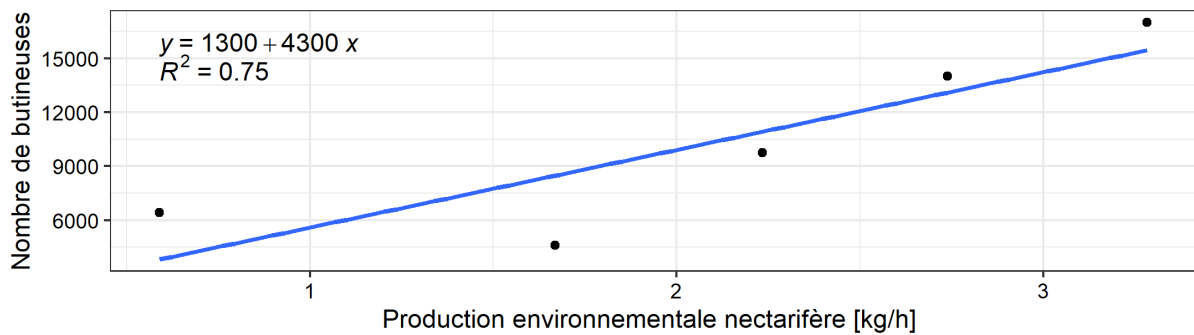
Evolution du nombre de butineuses en fonction de la production nectarifère environnementale autour du rucher

Rucher : L, Classe de paysage : Forêt, Rayon de butinage = 2km



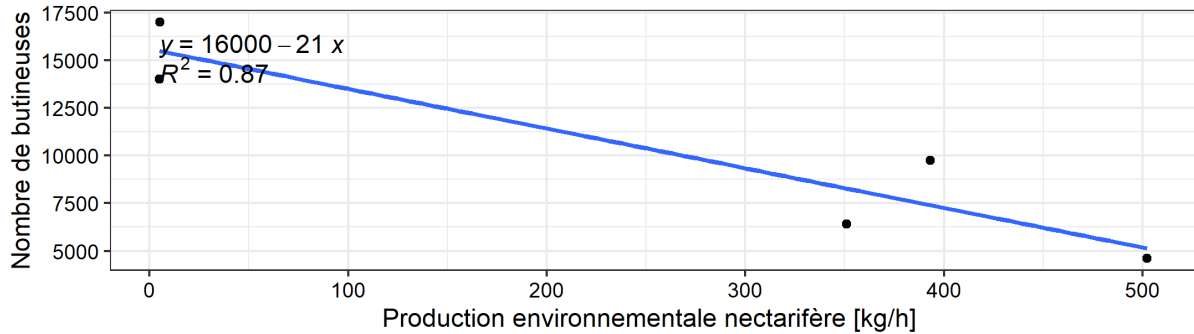
Evolution du nombre de butineuses en fonction de la production nectarifère environnementale autour du rucher

Rucher : L, Classe de paysage : Colza, Rayon de butinage = 2km



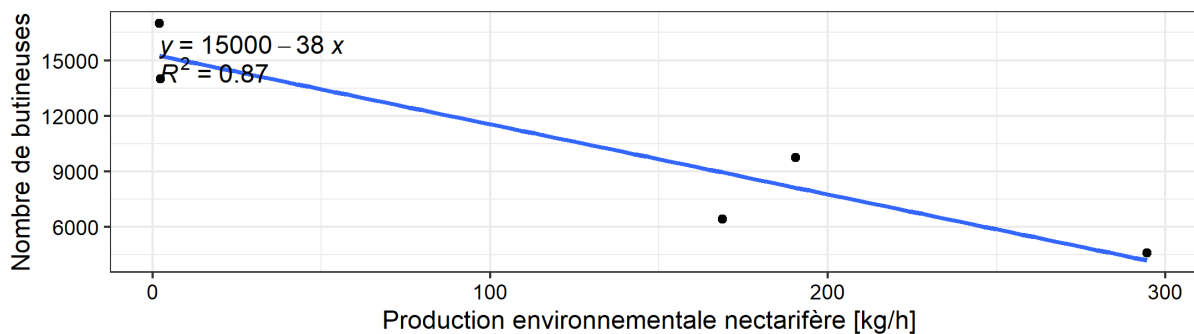
Evolution du nombre de butineuses en fonction de la production nectarifère environnementale autour du rucher

Rucher : L, Classe de paysage : Ensemble des classes, Rayon de butinage = 2km



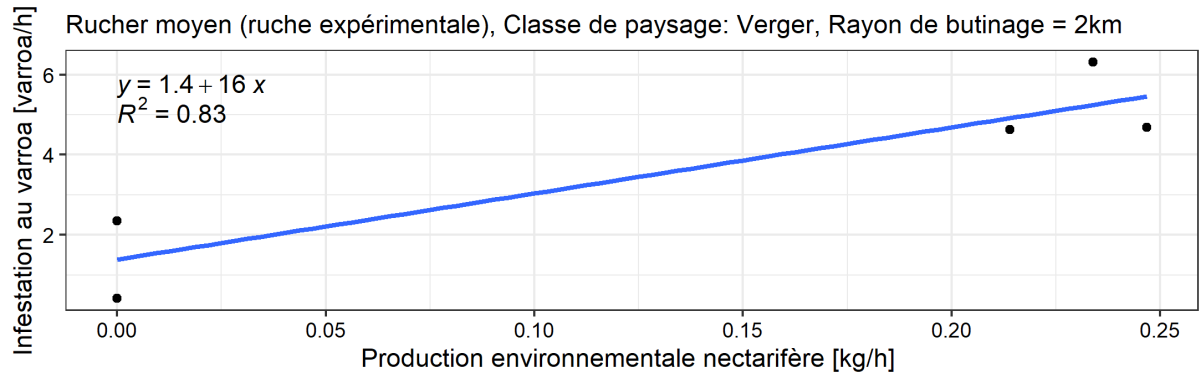
Evolution du nombre de butineuses en fonction de la production nectarifère environnementale autour du rucher

Rucher : L, Classe de paysage : AHF, Rayon de butinage = 2km

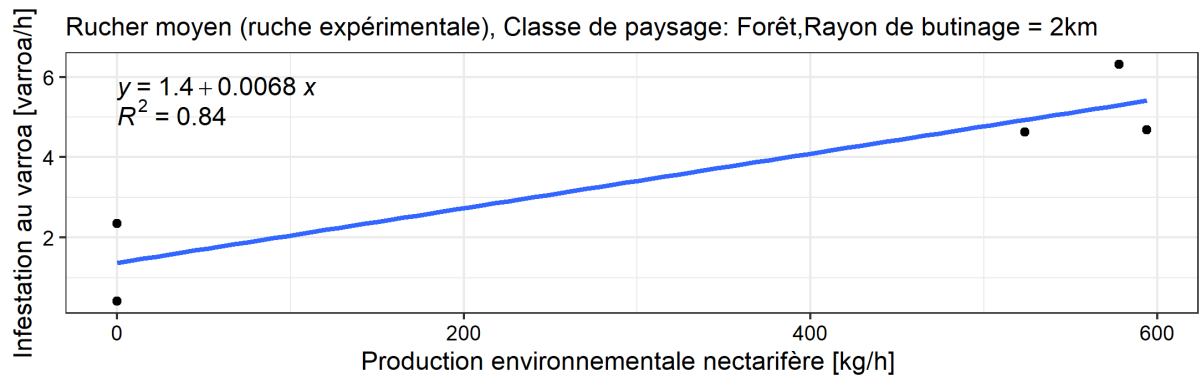


RUCHER MOYEN

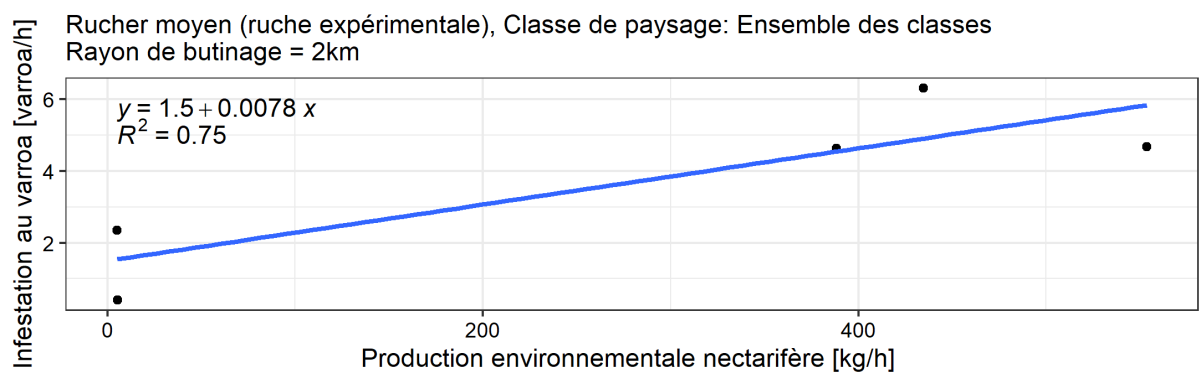
Evolution de l'infestation au varroa en fonction de la production nectarifère environnementale



Evolution de l'infestation au varroa en fonction de la production nectarifère environnementale

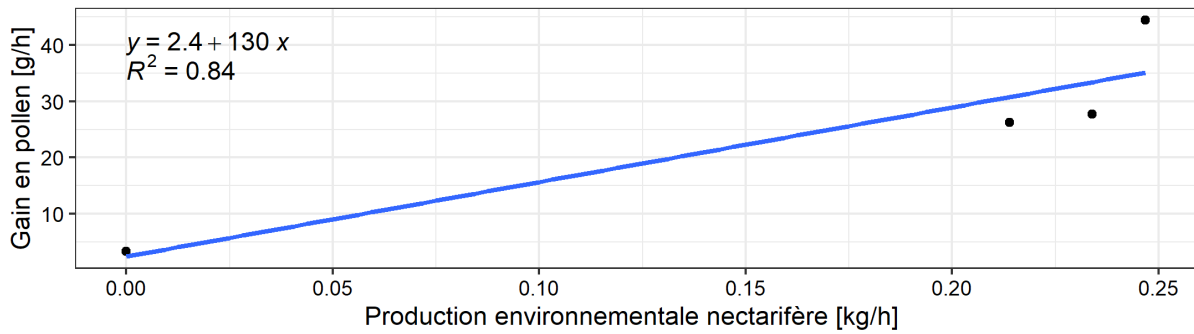


Evolution de l'infestation au varroa en fonction de la production nectarifère environnementale



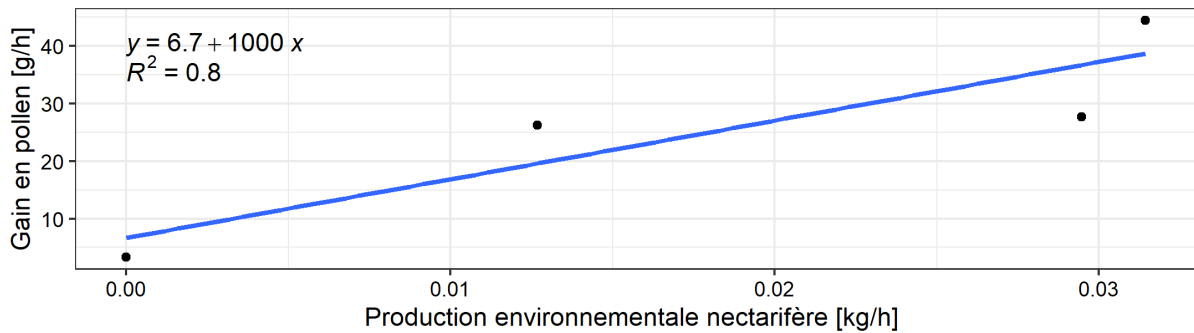
Evolution du gain pollinifère par heure pour 15.000 butineuses en fonction de la production nectarifère environnementale

Rucher moyen, Classe de paysage : Verger, Rayon de butinage = 2km



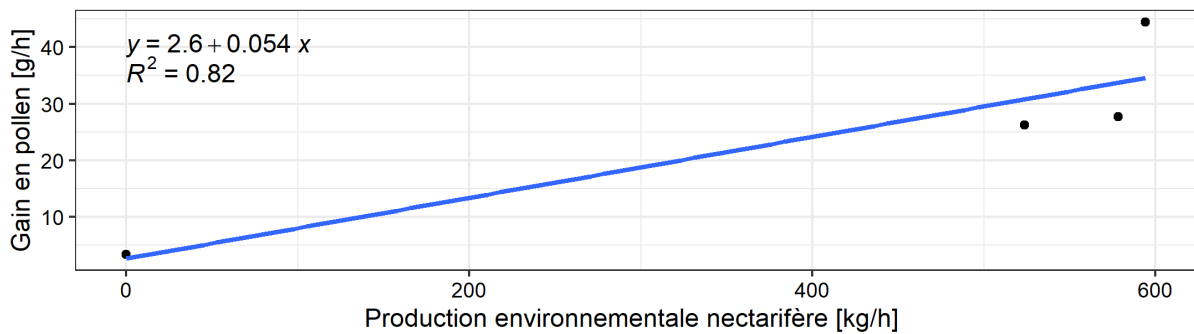
Evolution du gain pollinifère par heure pour 15.000 butineuses en fonction de la production nectarifère environnementale

Rucher moyen, Classe de paysage : Prairie, Rayon de butinage = 2km



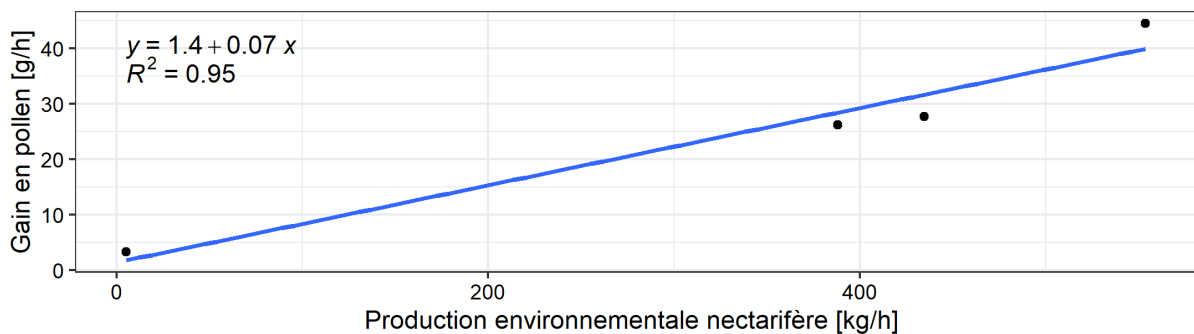
Evolution du gain pollinifère par heure pour 15.000 butineuses en fonction de la production nectarifère environnementale

Rucher moyen, Classe de paysage : Foret, Rayon de butinage = 2km



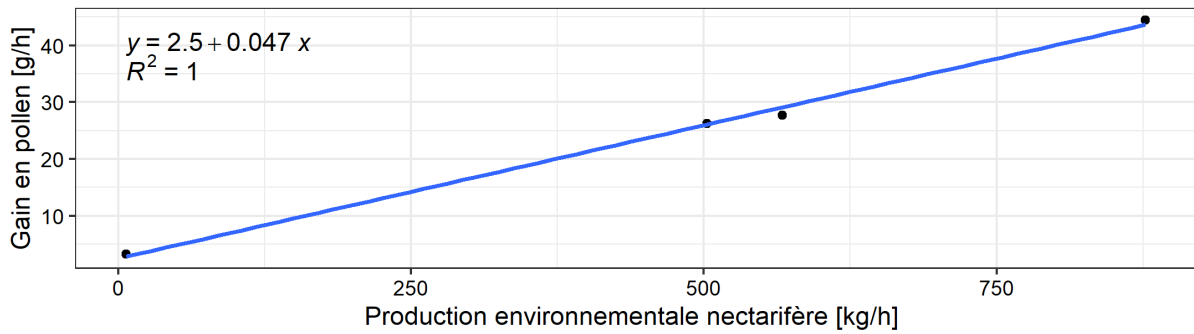
Evolution du gain pollinifère par heure pour 15.000 butineuses en fonction de la production nectarifère environnementale

Rucher moyen, Classe de paysage : Ensemble des classes, Rayon de butinage = 2km



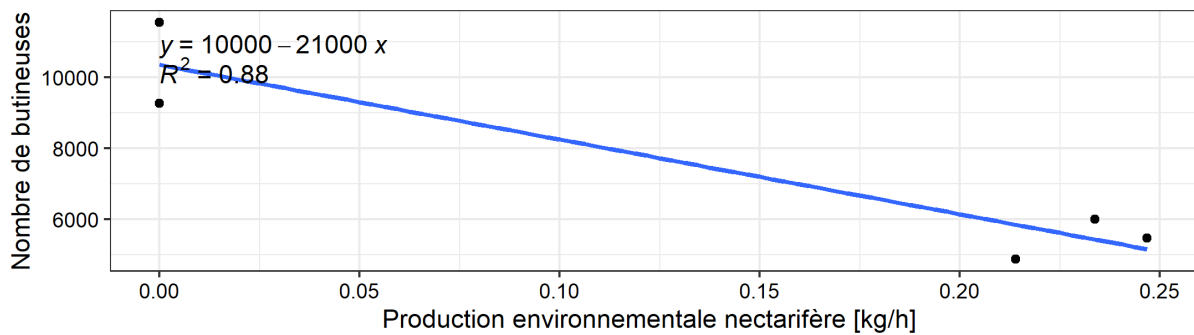
Evolution du gain pollinifère par heure pour 15.000 butineuses en fonction de la production nectarifère environnementale

Rucher moyen, Classe de paysage : AHF, Rayon de butinage = 2km



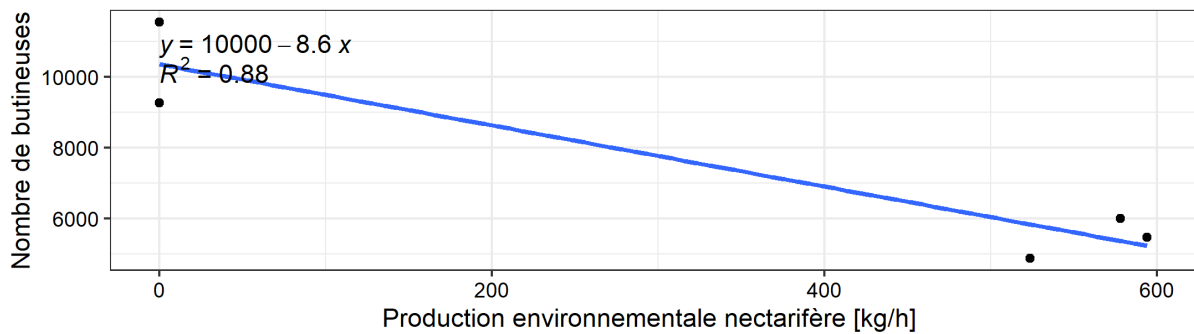
Evolution du nombre de butineuses en fonction de la production nectarifère environnementale

Rucher moyen, Classe de paysage : Verger, Rayon de butinage = 2km



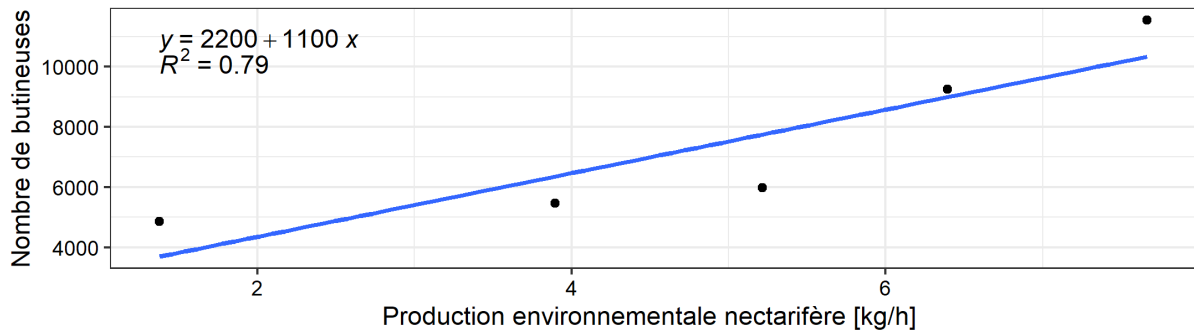
Evolution du nombre de butineuses en fonction de la production nectarifère environnementale

Rucher moyen, Classe de paysage : Foret, Rayon de butinage = 2km



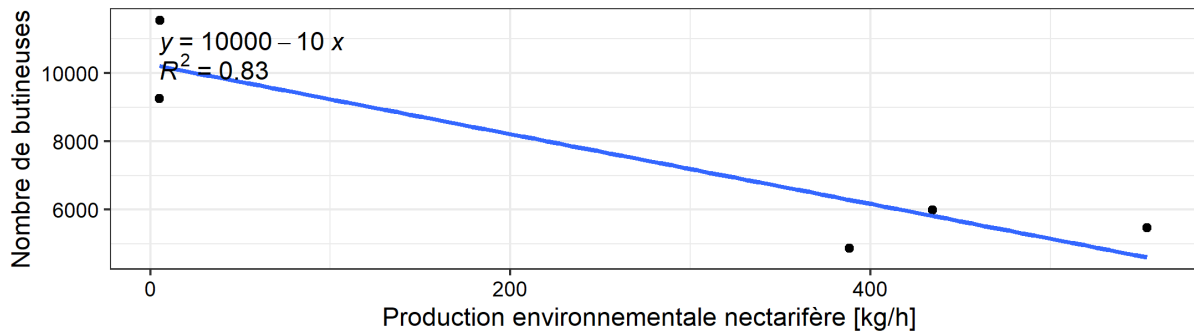
Evolution du nombre de butineuses en fonction de la production nectarifère environnementale

Rucher moyen, Classe de paysage : Colza, Rayon de butinage = 2km



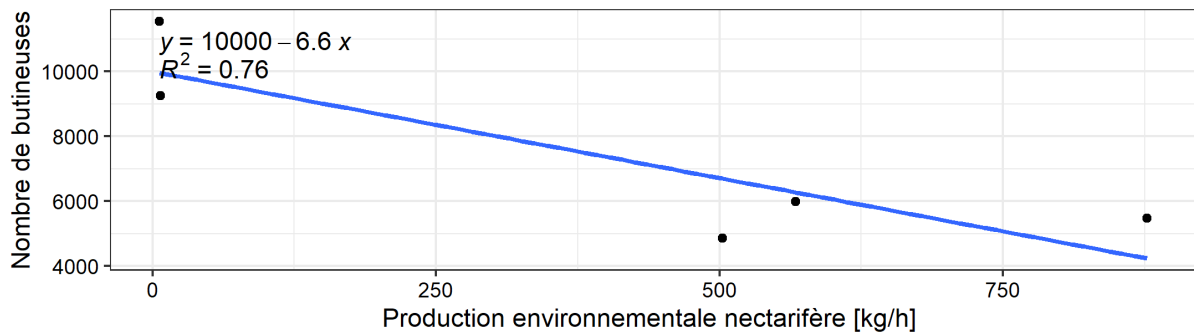
Evolution du nombre de butineuses en fonction de la production nectarifère environnementale

Rucher moyen, Classe de paysage : Ensemble des classes, Rayon de butinage = 2km

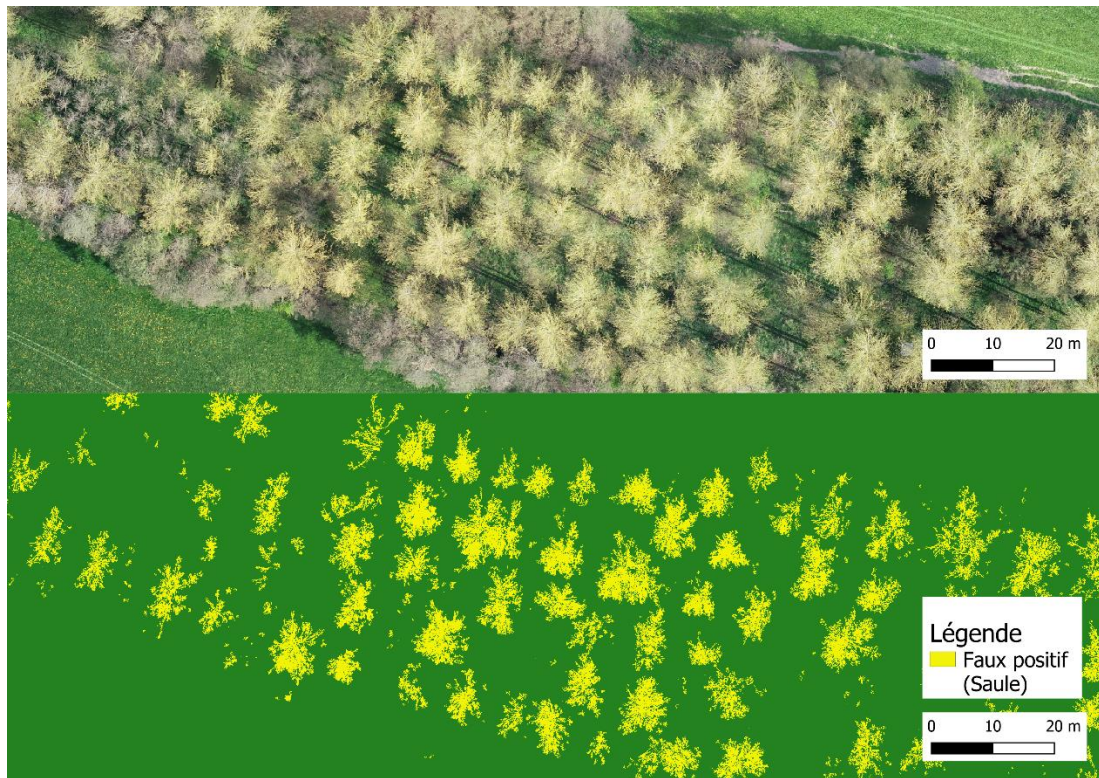


Evolution du nombre de butineuses en fonction de la production nectarifère environnementale

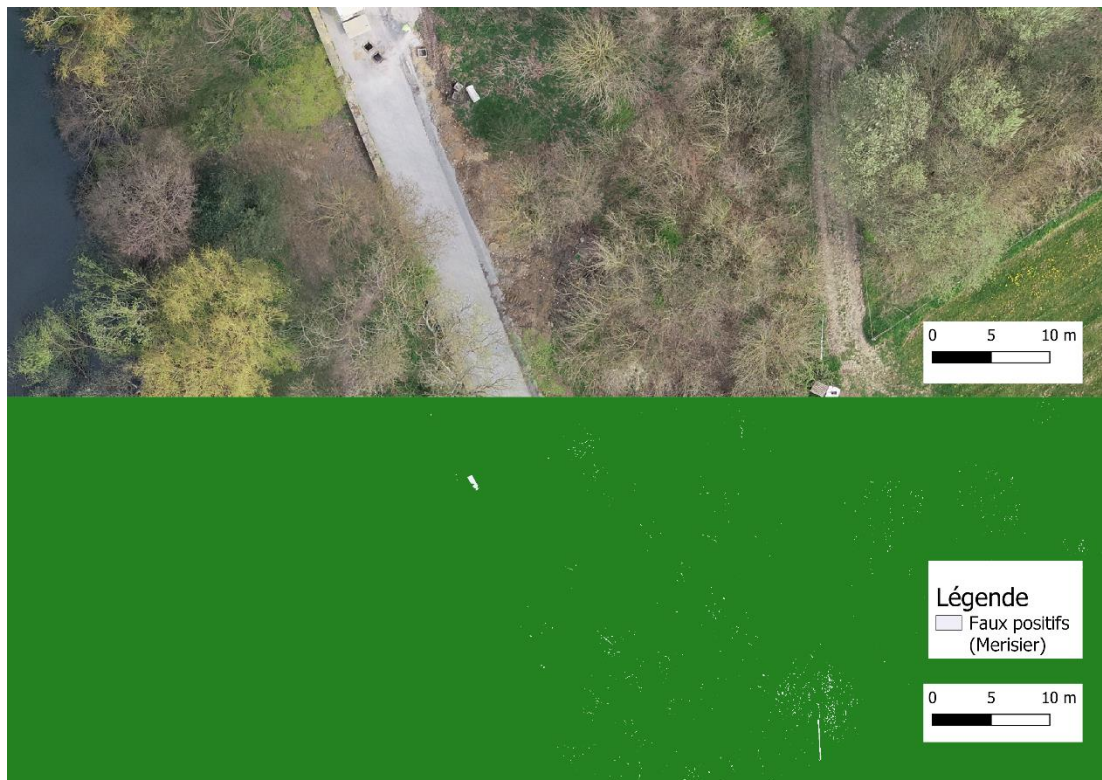
Rucher moyen, Classe de paysage : AHF, Rayon de butinage = 2km



Annexe 34 : Illustration de la présence de "faux-positifs"(peupliers) lors de la mise en évidence des saules



Annexe 35: Illustration de la présence de "faux-positifs" (arbres nus) lors de la mise en évidence des merisiers



Cette Annexe présente des suggestions d'amélioration dans le cas de l'élaboration d'une étude similaire reprenant la méthodologie développée dans ce travail.

Amélioration pour la gestion du rucher

Afin d'obtenir des courbes de poids d'allure théorique idéales (Meikle2018) pour le calcul du gain net et du nombre de butineuses, il est préférable de ne pas donner de cadres à bâtir aux colonies ; ce qui pourrait être à l'origine des courbes obtenues lors des dernières semaines de l'expérimentation dans ce travail. En effet, la construction de 100g de rayons de cire peut nécessiter jusqu'à plus d'un kilo de miel (Hepburn2014). D'un point de vue pratique, cela se traduit notamment par l'ajout de cadres déjà bâtis. Les éventuels essaimages dus au manque de cadres à bâtir ne posent pas de problèmes pour le traitement des données de poids ni pour l'évaluation du nombre de butineuses.

Amélioration pour la récolte des données des ruchers

Afin de rendre la récolte des données moins chronophage que celle réalisée dans ce travail, plusieurs améliorations peuvent être effectuées.

Dans un premier temps, la quantité d'abeilles mortes peut être quantifiée à l'aide de pesages et non plus de comptages. L'intégralité des abeilles mortes ainsi que plusieurs paquets d'un nombre connu d'abeilles sont pesés. Il est important d'étalonner pour chaque situation afin de tenir compte de la variabilité du poids moyen d'une abeille (abeilles mouillées, plus de mâles morts que d'ouvrières).

Dans un second temps, une photo des grains de pollen récoltés pourrait être prise après les avoir étalés sur une feuille blanche, pour ensuite quantifier la diversité des couleurs via un algorithme de traitement d'images. En fonction de la couleur, les grains de pollen pourraient être associés à une essence même si ces méthodes ne sont pas toujours exactes (Conti2016).

Enfin, d'après les observations réalisées lors de ce travail, il est recommandé de ne pas laisser les plateaux à varroa plus de 3-4 jours sinon des croissances fongiques peuvent se développer, ce qui peut porter préjudice à la colonie.

Amélioration pour le traitement des cartes

Etant donné le volume conséquent des données, il est conseillé de travailler avec « gdal » et « otb » plutôt qu'avec les packages « raster » et « terra » du logiciel R qui sont moins appropriés pour traiter de tels volumes de données. Il est à noter que le package « gdalUtils » permet de bénéficier des avantages de « gdal » tout en utilisant une syntaxe propre à l'environnement du logiciel R.

Amélioration du calcul des facteurs de conversion

Les facteurs de conversion sont les éléments charnières de ce travail car ils font le lien entre le nombre de pixels mis en évidence sur les cartes et le nombre d'unités florales présentes sur le terrain. Pour une essence, le facteur de conversion varie en fonction de :

- l'ouverture des unités florales qui dépend de la période de la journée ;
- l'algorithme de mise en évidence ;
- la résolution des images.

Dès lors, un facteur de conversion devrait être calculé pour chaque combinaison possible de ces 4 paramètres. La résolution des images peut être considérée comme constante si les vols sont systématiquement réalisés à 120 m d'altitude. Sachant que les fleurs s'ouvrent de manière générale entre 9 h et 17 h, 3 périodes peuvent être définies et pour chacune d'entre elles un facteur de conversion est calculé (avant 10 h, de 10 h à 16 h, après 16 h). Afin de rendre les facteurs de conversion plus robustes, un plus grand nombre de quadras que ce qui a été réalisé dans ce travail, pourrait être effectué pour le calcul d'un facteur de conversion. Un certain nombre de ces quadras devrait aussi être utilisé pour valider les facteurs de conversion et calculer l'erreur. Il est à noter qu'il est important de délimiter les zones de quadras avec des piquets bien visibles du ciel et ce, même pour les essences ligneuses.

Le calcul des facteurs de conversion s'inscrit dans une même logique que les travaux de Baude (2016 et pourrait être complémentaire si la quantification nectarifère via drone venait à se démocratiser. L'idéal serait de disposer de tables de facteurs de conversion pour chaque essence d'intérêt en fonction des différentes combinaisons évoquées ci-dessus.

En ce qui concerne les essences ligneuses dont le volume de fleurs n'est pas directement proportionnel à la surface du houppier vue du ciel (surface vue du ciel constante alors que la hauteur du houppier augmente), un facteur de conversion doit être calculé pour une hauteur de houppier unitaire. C'est par exemple le cas pour les arbres tels que les merisiers, dont le

houppier peut être approximé par un cylindre. A un certain stade de développement de l'arbre, la surface vue du ciel n'évolue plus proportionnellement avec la hauteur du houppier, elle reste quasiment constante alors que la hauteur du houppier continue d'augmenter. Pour le calcul du facteur de conversion, le nombre de fleurs recensées sur l'ensemble du houppier est divisé par le nombre de pixels mis en évidence et par la hauteur du houppier. Lors du calcul du nombre d'unités florales, le résultat issu du produit du nombre de pixels mis en évidence par le facteur de conversion (pour une hauteur de houppier unitaire) est ensuite multiplié par la hauteur du houppier évaluée par le DEM.

Bien que ce cas de figure ne se soit pas rencontré dans ce travail, il est possible que 2 essences appartenant à la même classe du paysage et présentant des caractéristiques chromatiques similaires ne puissent pas être séparées par la discrimination. Dans ce cas, le facteur de conversion est calculé pour ces 2 essences réunies. Le nombre d'unités florales des 2 essences est estimé en multipliant le nombre de pixels mis en évidence par le facteur de conversion. Ensuite, le nombre d'unités florales de chaque essence est estimé en fonction de la proportion des 2 essences observées sur le terrain et le nombre d'unités florales total est ainsi obtenu.

Amélioration de l'élaboration des indices de discrimination

Les indices de discrimination sont les éléments clés dans l'algorithme de mise en évidence des essences d'intérêt mellifère. Cependant, les indices développés dans ce travail peuvent faire l'objet d'un surapprentissage. Alors qu'ils donnent de très bons résultats pour les parcelles sur lesquelles ils sont créés (mise en évidence exclusive des éléments d'intérêt), des résultats beaucoup moins pertinents sont obtenus lorsqu'ils sont appliqués sur l'ensemble des zones échantillonnées. Afin de pallier ce problème, l'indice doit être construit sur plusieurs parcelles et sa qualité doit ensuite être évaluée via une matrice de confusion.

De plus, afin d'augmenter la robustesse des indices, il serait utile de s'intéresser au domaine HSV (Hue, Saturation, Value) qui a l'avantage de ne pas relier l'intensité des pixels. Ce domaine, présentant 3 bandes supplémentaires, permettrait de construire les indices sur base d'un ensemble de 6 bandes, ce qui les rendraient plus robustes. De plus, la qualité du DEM pourrait être améliorée pour représenter un critère fiable de discrimination et constituer une septième bande sur laquelle l'indice pourrait être construit.

Ensuite, lorsque 2 essences d'intérêt présentent des caractéristiques similaires pour leur mise en évidence, il est préférable de les regrouper et d'établir un seul indice de discrimination pour ce groupe. Dans ce travail, c'est par exemple le cas pour les merisiers roses et les merisiers blancs. Cependant, deux indices de discrimination ont été créés, un pour chaque variété. Dès lors, chaque essence a été mise en évidence 2 fois, une première fois en tant que « merisier blanc » et une seconde fois en tant que « merisier rose », ce qui fausse les calculs de quantification nectarifère. Dans ce travail, cette erreur est corrigée en post-traitement par la suppression des doublons.

Enfin, travailler avec des caméras hyper-spectrales permettrait également d'améliorer les indices de discrimination. En effet, de nombreux auteurs identifient des végétaux d'intérêt sur base de leur signature hyper-spectrale (Lass2005, Pu2009, Adam2009, He2011, Bradley2014, Huang2009, Williams2002, Miyoshi2020, Glenn2005).

Amélioration pour l'extrapolation à l'ensemble de la zone d'étude

En ce qui concerne les classes de paysages, il serait intéressant de considérer une classe supplémentaire de « lisière de forêt » par exemple, en réalisant un buffer interne des zones délimitées comme forêt. En effet, il n'est pas déraisonnable de penser que la ressource en phénosaison vernale des forêts se trouve principalement en lisières de celles-ci (ex : les merisiers sont davantage présents en lisières qu'au centre de la zone de forêt, en raison notamment du tempérament de cette essence).

Annexes (Dossiers)

Annexe (Dossier) 1 Suivi des opérations de terrain

SEM	DATE	OPERATION (expérimentation)	REMARQUE / Gestion rucher
	29-03-21	Installation des balances pour GM (11) et CC (15)	Les observations sur les ruches à la sortie de l'hiver sont consultables sur le document LATEX.
	30-03-21	Installation des balances pour Lonzée (R9)	
SEM 0	12-04-21	/	
	13-04-21	/	
	14-04-21	/	
	15-04-21	/	
	16-04-21	/	
	17-04-21	/	
	18-04-21	Mise en place du dispositif expérimental aux 3 ruchers : Installation des trappes à pollen, des bacs et des langes varroas.	
SEM 1	19-04-21	Ruches : <ul style="list-style-type: none"> GM : Remise à zéro des bacs à abeilles et des langes (15h30) L : Remise à zéro des bacs à abeilles et des langes (16h30) CC : Remise à zéro des bacs à abeilles et des langes (17h30) 	
	20-04-21	Acquisition images: <ul style="list-style-type: none"> Pose de tous les repères. 	
	21-04-21	Acquisition images (avec Cédric) : <ul style="list-style-type: none"> Zones : 1, 6, 5, 2, 9, 4, 7, 10 	CC : <ul style="list-style-type: none"> R15 : Ajout une hausse (sans grille à reine) (5.39 kg) R14 : Ajout d'un volume de ruche par-dessous (4 cb et 6 cnb). L : <ul style="list-style-type: none"> Ajout d'une hausse à chaque (5.59kg) ruche (sans grille à reine).
	22-04-21	Acquisition images (avec Cédric): <ul style="list-style-type: none"> Zones : 12, 11, 3, 8 Ruches : <ul style="list-style-type: none"> GM (18h) : Pose peigne à pollen L (19h) : Pose peigne à pollen CC (20h) : Pose peigne à pollen 	Acquisition drone avec Cédric CC : <ul style="list-style-type: none"> R15 : Ajout 2 cadres de corps à bâtir. GM : <ul style="list-style-type: none"> R11 : Ajout une hausse (sans grille à reine). Une cellule royale (avec un œuf) est observée au milieu du cadre ainsi que la vieille reine qui ne semble pas super en forme. De plus, le couvain n'est pas homogène. R6 : Passage de ruchette en grande ruche. R12 : Pas assez populeuse pour passer en grande ruche. Rem : De base c'était noté au 21/04 (pour GM) mais je l'ai déplacé au 22 car ça correspond mieux avec la balance.
	23-04-21	/	Une grappe sur la trappe à pollen de GM est observée.
	24-04-21	Acquisition images : <ul style="list-style-type: none"> Prise des coordonnées GPS Ruches : <ul style="list-style-type: none"> CC : Récolte du pollen (20h) L : Récolte du pollen (20h) 	Cibles enlevées <ul style="list-style-type: none"> Zone 6 (verger) : 1 Zone 2 (prairie) : 1 Cibles détruites par les vaches : <ul style="list-style-type: none"> Zone 7 (prairie): 1 (cible 7_b)
	25-04-21	Acquisition images : <ul style="list-style-type: none"> Prise des coordonnées GPS Construction des piquets pour quadras. Ruches : <ul style="list-style-type: none"> GM : Récolte de pollen (15h30). Ensuite, la balance et la trappe à pollen sont déplacées de la ruche 11 vers la ruche 6. 	Rem : La ruche 11 est en remérage et la nouvelle reine ne pourra pas sortir se faire féconder s'il y a la trappe à pollen. En voulant déplacer la ruche 11 pour enlever la balance, j'ai fait tomber la ruche mais les cadres de corps n'ont pas bougés et les abeilles ne semblent pas avoir été vraiment dérangées.
SEM 2	26-04-21	Ruches : <ul style="list-style-type: none"> GM (10h) : Comptage varroa (10h) + Pose langes varroas + Comptage abeilles mortes (10h) + Pose peigne à pollen (19h45). 	

		<ul style="list-style-type: none"> L (16h15 – 17h45) : Comptage varroa + Pose langes varroas + Comptage abeilles mortes + Pose peigne à pollen CC (18h15) : Comptage varroa + Pose langes varroas + Comptage abeilles mortes + Pose peigne à pollen Acquisition images : <ul style="list-style-type: none"> Prise des coordonnées GPS du CRA (11h). 	
	27-04-21	Acquisition images (12h-17h): <ul style="list-style-type: none"> Zones : 1, 6, 5, 2 Quadras : zone 2 (3 fruitiers + 3 pissenlits). 	
	28-04-21	Acquisition images (8h30 – 16h): <ul style="list-style-type: none"> Zones : 9, 4, 7, 10, 12, 11, 8, 3 Quadras : zone 12 (3 colza), zone 11 (3 pissenlits + 3 lamier pourpres). 	Acquisitions : 8h30 – 16h
	29-04-21	Ruches : <ul style="list-style-type: none"> GM (8h30) : Récolte de pollen + Comptage varroa + Comptage abeilles mortes. CC (9h10) : Comptage varroa + Comptage abeilles mortes. 	Les abeilles de la 15 (CC) faisaient la grappe en dessous de la trappe à pollen (le pollen n'a pas pu être récolté).
	30-04-21	Ruches : <ul style="list-style-type: none"> L (14h) : Récolte de pollen + Comptage varroa + Comptage abeilles mortes. CC (16h) : Récolte de pollen 	La grappe de la 15 (CC) était tombée dans le bac et les abeilles ont été remises sur les cadres du corps.
	01-05-21	/	/
	02-05-21	Pesée des échantillons de pollen.	/
SEM 3	03-05-21	Ruches : <ul style="list-style-type: none"> GM : Pose peigne à pollen (6h40) + Pose langes varroas (6h40) + Récolte de pollen (18h) + Redistribution pollen récolté précédemment. CC : Pose peigne à pollen (7h) + Pose langes varroas (7h) + Récolte de pollen (17h30) + Redistribution pollen récolté précédemment. L : Pose peigne à pollen (7h30) + Pose langes varroas (7h30) + Récolte de pollen (16h30) + Redistribution pollen récolté précédemment. Acquisition images : <ul style="list-style-type: none"> Zones : 1, 6, 5, 2, 9, 7, 4, 10, 12, 11 	Rem 1 : Il y avait beaucoup d'abeilles mortes dans sur le plancher de la 15 (CC) que j'ai fait tomber dans le bac à AM. Ce nombre d'abeilles mortes est sûrement du au « sauvetage » du 30/04. Certaines abeilles remises au-dessus étaient certainement déjà mortes. Rem 2 : Un maximum de zone a été survolée étant donné le mauvais temps prévu pour la suite de la semaine. La zone 8 et 3 n'ont pas pu être survolée étant donné le vent qui s'est levé.
	04-05-21	Ruches : <ul style="list-style-type: none"> Traitement des données dans excel. 	
	05-05-21	Traitement des données.	
	06-05-21	Ruches : <ul style="list-style-type: none"> GM (10h20) : Comptage varroa + Comptage abeilles mortes. L (11h40) : Comptage varroa + Comptage abeilles mortes. CC (13h30) : Comptage varroa + Comptage abeilles mortes. 	
	07-05-21	Acquisition images : <ul style="list-style-type: none"> Zones : 8, 3 	Rem : Dans certaines prairies apparaissent des boutons d'or (jaune) et la floraison des érables est terminée.
	08-05-21	/	
	09-05-21	/	Essaimage non récupéré à Lonzeé.
SEM 4	10-05-21	Ruches : <ul style="list-style-type: none"> L: Pose langes varroas (8h30) + Pose peigne à pollen (9h40). CC (10h20) : Pose peigne à pollen + Pose langes varroas GM (11h20) : Pose langes varroas (oubli de la pose du peigne à pollen). 	L : <ul style="list-style-type: none"> Pose d'une hausse de cadres bâtis sur chaque ruche (avec une grille à reine). Les hausses sont bien remplies (avec souvent du couvain sur 3-4 cadres de hausse). Environ 4-5 cadres de hausses remplis de miel sont remonté au-dessus de la grille à reine. CC : <ul style="list-style-type: none"> Pose d'une hausse de cadres bâtis sur la 15. La hausse n'est pas remplie complètement mais tout les cadres sont bâtis. Aucun cadre de miel n'est remonté au-dessus de la grille à reine. GM : <ul style="list-style-type: none"> Pose d'une hausse de cadres bâtis sur la 6 (ruche exp). Aucun cadre de miel n'est remonté au-dessus de la grille à reine. Ajout d'un grand volume de ruche en dessous de la 12 (avec 6 cadres à bâtir).

			- Aucune hausse supplémentaire n'est posée sur la ruche 11
	11-05-21	Ruches : <ul style="list-style-type: none"> GM (10h) : Pose peigne à pollen + redistribution du pollen récolté précédemment. L (10h50) : Récolte pollen + redistribution du pollen récolté précédemment. CC (11h30) : Récolte pollen + redistribution du pollen récolté précédemment. 	<ul style="list-style-type: none"> La ruche 15 (CC) a essaimée. Il y avait beaucoup moins d'abeilles dans la ruche et du miel de la hausse a été consommé. L'essaimage peut se voir sur les mesures des balances (-3kg). La hausse ajoutée le 10-05-21 a été mise au-dessus du couvre cadre pour que la ruche n'ait pas un volume trop grand. L'essaim a été récupéré et placé dans une ruchette verte (3 cadres gaufrés et 3 cadres à jambages en alternance).
	12-05-21	Acquisition images : <ul style="list-style-type: none"> Zones : 1, 6, 5, 2, 9, 4, 7, 10, 12, 11, 8, 3 Quadras : zone 9 (3 ombellifères), zone 7 (1 merisier rose), zone 10 (1 merisier blanc), zone 12 (3 colza), zone 3 (1 saule). 	
	13-05-21	Ruches : <ul style="list-style-type: none"> GM (11h20) : Comptage varroa + Comptage abeilles mortes + récolte pollen. L (14h30) : Comptage varroa + Comptage abeilles mortes CC (16h40) : Comptage varroa + Comptage abeilles mortes 	CC : 4 reines mortes ont été retrouvées dans la bac suite à l'essaimage.
	14-05-21	/	Le pollen récolté a été mis au réfrigérateur
	15-05-21	/	
	16-05-21	/	
SEM 5	17-05-21	/	
	18-05-21	/	
	19-05-21	/	
	20-05-21	Ruches : <ul style="list-style-type: none"> GM (8h30) : Comptage abeilles mortes + Pose peigne à pollen + Pose lange à varroas CC (9h30) : Comptage abeilles mortes + Pose peigne à pollen + Pose lange à varroas L (10h30) : Comptage abeilles mortes + Pose peigne à pollen + Pose lange à varroas Acquisition images : Essais de vol (Zone 10) mais trop de vent.	GM et CC : Le peigne à pollen a du tomber à cause du vent et du pollen a été récolté (durée de récolte non définie).
	21-05-21	Ruches : <ul style="list-style-type: none"> GM (9h40) : Récolte de pollen CC (10h20) : Récolte de pollen + Comptage varroas L (11h30) : Récolte pollen + Comptage varroa 	GM : Le nombre de varroa n'a pas été compté car il n'y en avait pas assez (que 8).
	22-05-21	/	
	23-05-21	Acquisition image : <ul style="list-style-type: none"> Zones : essais de vol sur la zone 6 mais trop de vent. Quadras : zone 6 (3 aubépines) 	La délimitation des quadras a été laissée sur place.
SEM 6	24-05-21	Ruches : <ul style="list-style-type: none"> GM (16h) : Comptage varroas. 	Ce comptage de varroa vaut pour la semaine 5 (et pas la 6).
	25-05-21	/	
	26-05-21	/	
	27-05-21	/	CC : <ul style="list-style-type: none"> Récupération d'un essaim (probablement venant de la ruche 15). Ruchette verte : certains cadres ont été bâtis mais il n'y a pas de couvain (pas d'œufs). Ruche 14 : couvain dans la partie inférieure de la ruche. Ruche 15 : Dépeuplement d'abeilles. Les abeilles ne sont plus que sur 5 cadres du corps et ne sont pas dans la hausse. Pas de couvain observé. Pas de réserve observée.
	28-05-21	Ruches : <ul style="list-style-type: none"> CC: Pose langes varroas (6h40) L (7h10) : Pose peigne à pollen (7h10) + Pose langes varroas (7h10) + récolte pollen (21h30) GM: Pose peigne à pollen (7h40) + Pose langes varroas (7h40) + récolte pollen (20h15) Acquisition image :	CC : <ul style="list-style-type: none"> Le peigne à pollen n'a pas été posé sur la ruche 15 étant donné l'affaiblissement. La ruchette contenant l'essaim a été ouverte en début de soirée.

		<ul style="list-style-type: none"> • Zones : 6, 5, 1, 2, 9, 7, 4, 10, 12, 11, 8, 3 • Quadras : zone 6 (3 aubépines), zone 12 (3 colza), zone 8 (3 trèfles des prés). 	
	29-05-21	/	Lonz : <ul style="list-style-type: none"> - Récupération d'un essaim (dans ruchette verte) - Après une courte visite, c'est la ruche 1 qui a du essaimer. - Les hausses sont presque pleines mais pas encore operculées.
	30-05-21	/	CC : <ul style="list-style-type: none"> - Vol nuptial d'une ruche à CC (petit essaim de 20 cm observé par Irène).