

Impacts de la fertilisation des prairies maigres de fauche sur les populations de Rhopalocères et sur les ressources florales au Grand Duché de Luxembourg



Mémoire présenté par Emeline Aupy

En vue de l'obtention du grade de master en Biologie des Organismes et Écologie à finalité spécialisée Biologie de la Conservation : Biodiversité et Gestion

Promoteur : Nicolas Magain

Co-promoteur : Claude Dopagne

Année académique 2021-2022

Résumé

Impacts de la fertilisation des prairies maigres de fauches sur les populations de Rhopalocères et sur les ressources florales au Grand Duché de Luxembourg. Mémoire réalisé par Emeline Aupy. Promoteurs : Claude Dopagne et Nicolas Magain. Année 2021-2022.

L'agriculture est le second facteur impactant le plus la biodiversité mondiale. L'utilisation de produits chimiques pour augmenter la rentabilité des cultures accroît les effets indésirables. Les insectes font partie des espèces les plus menacées par ces pratiques. Les papillons, étant des bio-indicateurs et des espèces parapluies, sont un outil idéal pour évaluer la qualité d'une prairie. Ce travail a pour but d'étudier l'effet d'une fertilisation à l'azote minéral des prairies maigres de fauches sur les populations de rhopalocères et les ressources florales au Grand Duché de Luxembourg.

Pour ce faire, 10 prairies gérées par Fourrages Mieux en collaboration avec Natagriwal ont été visitées entre mai et juin 2022 au Grand Duché. Ces prairies sont séparées en deux parcelles, avec une zone fertilisée à 50 unités d'azote et une autre zone non-fertilisée. Un recensement des rhopalocères, un dénombrement des unités florales et l'observation des interactions de butinages ont été réalisés.

Le nombre d'individus de Rhopalocères a été plus élevé dans la partie non-fertilisée. Pourtant, la diversité spécifique n'est pas significativement différente entre les deux parcelles. Le nombre d'unités florales a été plus faible dans la zone fertilisée. Sept espèces de rhopalocères ont été sélectionnées parmi les vingt-cinq observées afin d'analyser s'il existe une préférence entre la zone fertilisée et la zone non-fertilisée. Parmi les sept espèces, quatre espèces de rhopalocères ont préféré la zone non-fertilisée. Il y a aussi eu majoritairement plus d'interactions dans la zone non-fertilisée. Par conséquent, la fertilisation du milieu a un effet négatif de manière générale sur l'ensemble des prairies.

Remerciements

Tout d'abord, je souhaite remercier Claude Dopagne, mon promoteur, sans qui je n'aurais pas eu de sujet de recherche. Je le remercie pour sa disponibilité, ses conseils et son soutien durant cette longue période de mémoire.

Je remercie également Nicolas Magain, mon co-promoteur, qui m'a été d'une grande aide sur la rédaction et les statistiques. Je lui suis très reconnaissante pour ses réponses rapides, ses lectures et sa patience qui m'ont beaucoup rassurée.

Je souhaite aussi remercier Julien Piqueray sans qui le mémoire n'aurait pas eu lieu. Un grand merci pour toute l'aide et le temps fourni à me guider et m'expliquer les statistiques.

Je tiens à remercier Arnaud Farinelle et Fourrages Mieux qui m'ont donné la possibilité de faire ce sujet. Je le remercie pour le temps qu'il a passé à me montrer les prairies, pour sa disponibilité et sa rapidité de réponses quand j'avais un problème.

Je remercie également le Ministère de l'Agriculture, de la Viticulture et du Développement rural pour m'avoir autorisé à travailler sur les prairies du projet.

Je remercie Chloé et Alyssa pour leur conseil et leur expérience. Je remercie également Emeline qui m'a soutenu et rassuré nombre de fois. Je remercie Aurélie avec qui j'ai vécu une expérience similaire et sur qui j'ai pu compter dans mes moments de stress. On a pu se soutenir mutuellement et je me suis sentie moins perdue.

Je tiens à remercier ma maman et mes sœurs qui sont un pilier fondamental dans ma vie, qui m'ont toujours soutenue et encouragée. Vous m'avez donné beaucoup de force sans le savoir et vous avez toujours été présentes alors que je me ferme très vite dans des grands moments de stress. Je tiens aussi à remercier le reste de ma famille et tous mes amis qui ont toujours été là et sur qui je pourrai toujours compter. Une grosse pensée à mon papa qui n'est plus présent parmi nous, mais qui j'espère est fier de moi.

Table des matières

Résumé	2
Remerciements	3
Introduction	6
I. Une biodiversité en danger	6
<i>Une crise générale</i>	6
<i>Un déclin des insectes pollinisateurs</i>	7
II. Les causes d'une perte de la biodiversité	7
<i>La transformation des habitats</i>	7
<i>L'agriculture et la fertilisation</i>	9
<i>Le changement climatique</i>	10
<i>La pollution</i>	10
<i>Les facteurs biologiques</i>	11
III. Un bio-indicateur d'intérêt : le papillon	12
<i>Importance dans la biodiversité</i>	12
<i>Un déclin visible</i>	13
IV. Des actions face au déclin de la biodiversité	14
<i>Le Réseau Natura 2000</i>	14
<i>Les Mesures Agro Environnementales et Climatiques (MAEC)</i>	15
<i>Le projet LIFE Papillon</i>	16
<i>Les plans nationaux d'actions (PNA)</i>	16
V. Objectifs du TFE	17
Matériel et méthode	18
I. Zone d'étude	18
II. Méthodes d'échantillonnages	20
<i>Conditions météorologiques essentielles</i>	20
<i>Suivi des populations de papillons</i>	20
<i>Recensement floristique et comptage des unités florales</i>	22
<i>Observation des interactions de butinages entre papillons et fleurs</i>	23
III. Méthodes d'analyses	24
1. <i>Suivi de la population de papillon et floristique au cours de la saison</i>	24

2.	<i>Comparaison entre les indices de diversité entre les deux zones</i>	24
3.	<i>Analyse de la préférence des papillons.....</i>	25
4.	<i>Analyse des interactions de butinage entre les rhopalocères et les plantes</i>	26
5.	<i>Étude de la différence entre les compositions de chaque parcelle</i>	26
Résultats		27
1.	<i>Suivi de la population de papillon et floristique au cours de la saison</i>	27
2.	<i>Comparaison entre les indices de diversité entre les deux zones</i>	29
3.	<i>Analyse de la préférence des papillons.....</i>	30
4.	<i>Analyse des interactions de butinage entre les rhopalocères et les plantes</i>	31
5.	<i>Étude de la différence entre les compositions de chaque parcelle</i>	33
Discussion		36
	<i>Evolution de la population de papillon et des ressources florales.....</i>	36
	<i>Analyse de la biodiversité au sein des différentes parcelles.....</i>	38
	<i>Effet de la fertilisation sur les interactions entre les papillons et les plantes.....</i>	39
Conclusion		42
Bibliographie.....		44
Annexes		53
	<i>Annexe 1 : Abondance totale des Rhopalocères dans chaque parcelle.</i>	54
	<i>Annexe 2 : Tableau représentant le nombre d'espèce de rhopalocères par zone.....</i>	55
	<i>Annexe 3 : Tableau regroupant le statut de conservation européenne et wallonne, et la législation du Grand Duché relative aux espèces de papillons avec le nombre d'individus totaux et le nombre de stations où sont présentes les différentes espèces.</i>	56
	<i>Annexe 4 : Type d'habitat EUNIS des différentes parcelles en fonction de la phytosociologie et de la zoocénologie.</i>	57
	<i>Annexe 5 : Tableau reprenant les unités florales par zone et la production nectarifère pour chaque espèce végétale. En rouge : les espèces ayant été butinées.....</i>	58

Introduction

I. Une biodiversité en danger

Une crise générale

Depuis plusieurs années, la biodiversité s'effondre à un rythme alarmant. Chaque année, des chiffres sortent quant à l'étendue des disparitions et des espèces menacées (IUCN, 2022). Entre 1970 et 2016, l'Indice Planète Vivante (IPV) 2020 mondiale montre un déclin moyen de 68 % des populations suivies de mammifères, d'oiseaux, d'amphibiens, de reptiles et de poissons (Figure 1, WWF, 2020).

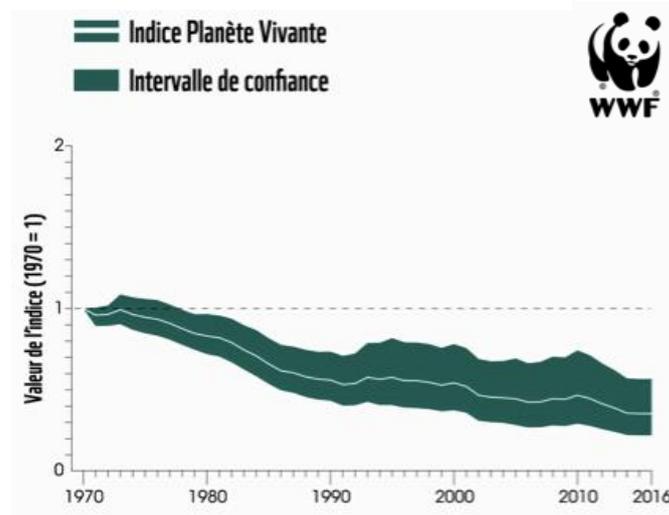


Figure 1 : Indice planète vivante (WWF, 2020).

De plus, selon l'IPBES (Plateforme Intergouvernementale scientifique et politique sur la Biodiversité et les Services Écosystémiques), en 2019, 75 % de l'écosystème terrestre est sévèrement altéré par les activités humaines et 66 % pour le milieu marin. Cette utilisation des terres n'étant pas durable (MEA, 2005), elle entraîne notamment une extinction des plantes présentes sur le territoire. Les plantes sont la base de la chaîne alimentaire et de nombreux services écosystémiques. Il est alors important de bien comprendre ces liens afin de faire une planification efficace de la conservation (Humphreys *et al.*, 2019). L'extinction de certaines plantes entraîne l'extinction des espèces qui leur sont associées, notamment de nombreux pollinisateurs.

Un déclin des insectes pollinisateurs

D'après Jacquemet (2021), le déclin des insectes est un phénomène complexe, car il est difficile à évaluer précisément. Les derniers chiffres révèlent que 41 % des espèces d'insectes seraient concernées par ce déclin et 31 % seraient menacées d'extinction dans le monde. Chaque année, on compte environ 1 % de perte des espèces d'insectes. De plus, au sein de la communauté scientifique, un consensus se dégage constatant que ce déclin concerne surtout les groupes d'insectes spécialistes, contrairement aux espèces généralistes qui résistent mieux. En effet, les insectes sont souvent liés à un moment de leur stade de vie ou par leur régime alimentaire à certaines plantes (exemple du cuivré de la bistorte [Jacquot, 2012] et de l'azuré de la sanguisorbe [Popović *et al.*, 2014]). Ainsi, les espèces dépendantes de plantes hôtes rares sont d'autant plus sujettes à une extinction imminente.

En 1987, Edward Wilson a appelé les insectes les « petites choses qui font tourner le monde (Wilson, 1987) ». En effet, ils jouent un rôle important dans le bon fonctionnement des écosystèmes à différents niveaux. L'un de ces niveaux concerne la pollinisation. Environ 90 % des angiospermes ont besoin d'être pollinisés avec l'aide de différents animaux (Aizen *et al.*, 2009) et notamment des insectes (Kearns *et al.*, 1998). Ainsi, les pollinisateurs sont indispensables pour le maintien de la flore, pour la production agricole et donc pour tout ce qui concerne l'alimentation. Il est donc primordial de déterminer les causes de ce déclin afin de savoir où intervenir pour limiter et, si possible, contrecarrer ce déclin.

II. Les causes d'une perte de la biodiversité

Selon l'IPBES (2019), il existe cinq facteurs directs impactant le plus la biodiversité au niveau mondial. Le facteur majeur responsable concerne une modification de l'habitat, notamment l'expansion anthropique et l'agriculture intensive. L'exploitation directe des espèces vient en deuxième position. Ensuite, le changement climatique est considéré comme étant le troisième facteur explicatif. Pour finir, la pollution et l'augmentation des espèces exotiques envahissantes sont respectivement en quatrième et cinquième position.

La transformation des habitats

La population mondiale ne cessant de croître, l'urbanisation des milieux naturels est de plus en plus présente (Boucher et Fontaine, 2010). Cela implique une transformation des habitats pour les espèces : perte d'habitats et fragmentation du milieu (Fahrig, 2013). La

disparition et la dégradation de l'habitat représentent une réduction de 30 % de l'intégrité de l'habitat terrestre mondial (IPBES, 2019). Il est important de faire la différence entre une perte d'habitat (par exemple : due à un changement dans l'utilisation) et une fragmentation de l'habitat. En effet, la fragmentation de l'habitat peut, selon Fahrig (2013), avoir des effets positifs et négatifs moindres tandis que la perte d'habitats a des effets importants et systématiquement négatifs. La fragmentation de l'habitat entraîne une diminution du territoire disponible pour une espèce (Figure 2). Ainsi, il y a notamment une perte de la diversité génétique, mais aussi une difficulté à trouver de la nourriture pour les espèces plus spécialisées comme certains pollinisateurs (Kwak *et al.*, 1998, Fahrig, 2013). La perte des habitats naturels ou semi-naturels est particulièrement due à l'intensification de l'exploitation des terres agricoles (Krauss *et al.*, 2010). Elle peut entraîner une perte immédiate des espèces présentes dans le milieu, mais aussi une extinction retardée dite « dette d'extinction ».

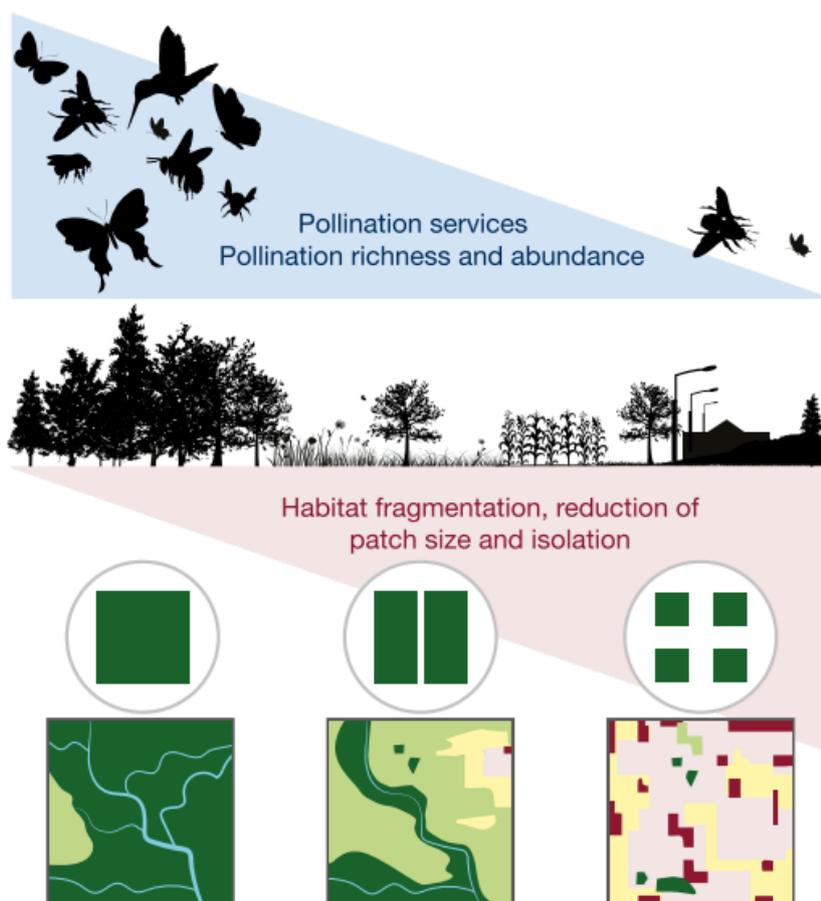


Figure 2 : Visualisation conceptuelle des effets des gradients de fragmentation de l'habitat et de la perte de couverture terrestre naturelle et semi-naturelle sur les pollinisateurs et la pollinisation. (Kovács-Hostyánszki *et al.*, 2016).

L'agriculture et la fertilisation

D'après IPBES (2019), depuis 1970, la production des cultures vivrières¹ a augmenté de 300 %, et 75 % de ces cultures mondiales dépendent des animaux pour la pollinisation. La dégradation des sols due à une mauvaise exploitation engendre une perte de 23 % de leur productivité. La fertilisation du milieu tente de contrebalancer cette perte de productivité, mais en dégradant et détruisant les espèces présentes. Plusieurs auteurs s'accordent sur le fait qu'une forte fertilisation du sol diminue de façon significative la richesse spécifique du milieu en changeant les communautés de plantes (Socher *et al.*, 2013, Jing *et al.*, 2017 et Klaus *et al.*, 2018). D'après, Rease et Decker (1966), le résultat de la fertilisation est analogue à une prairie abandonnée : il y a davantage de nutriments disponibles, la richesse spécifique diminue et une seule espèce de graminée devient dominante. En effet, la fertilisation favorise certaines espèces peu nombreuses à la croissance rapide et plus compétitives par rapport à la lumière et à l'eau. Les espèces moins compétitives vont donc en pâtir (Burel *et al.*, 2008). Le moteur principal de la perte de richesse spécifique dans les prairies est la compétition favorisée par l'augmentation de la fertilisation. Les effets de la fertilisation à l'azote restent les plus étudiés, mais il existe aussi des effets dus au phosphore et au potassium. De manière générale, ils ont aussi un impact négatif sur la richesse spécifique (Burel *et al.*, 2008). Cependant, l'impact du phosphore n'est visible qu'à très long terme contrairement à l'azote dont les effets sont visibles à court terme. Néanmoins, une étude sur 117 prairies (Klimek *et al.*, 2007) montre que la suppression totale de la fertilisation azotée dans des prairies gérées intensivement est le meilleur moyen pour retrouver une meilleure biodiversité. La fertilisation des prairies impacte aussi la nidification des oiseaux. Celle-ci va modifier le couvert végétal et donc la disponibilité des sites de reproduction, mais aussi le nourrissage des juvéniles. Par exemple, les Vanneaux préfèrent des prairies avec de l'herbe courte afin de faciliter leurs déplacements. Ils peuvent donc abandonner leur site de nidification si l'évolution de la hauteur des herbes devient trop importante (Burel *et al.*, 2008). Le changement du couvert végétal va aussi limiter l'accessibilité des proies pour les oiseaux comme les Passereaux. De plus, le défrichement, la production agricole et la fertilisation représentent 25 % des émissions de gaz à effet de serre favorisant le changement climatique. La production de nourriture animale participe à 75 % de ce chiffre (IPBES, 2019).

¹ Culture pratiquée principalement en vue de la consommation alimentaire dans le pays même.

Le changement climatique

Le changement climatique impacte la composition et la dynamique des écosystèmes. Il vient s'ajouter aux pressions exercées par les activités humaines sur la biodiversité (Boucher et Fontaine, 2010). De plus, le changement climatique dû aux activités anthropiques est reconnu comme étant une menace majeure pour les espèces vivantes pouvant entraîner l'extinction de milliers d'espèces d'ici le siècle à venir (Cahill *et al.*, 2013). Ce changement est dû notamment à une augmentation des émissions de gaz à effet de serre. Depuis 1980, une augmentation de 100 % des émissions provoque une augmentation de la température moyenne mondiale d'au moins 0,7 degrés (IPBES, 2019). Ces changements de températures, mais aussi de précipitations impactent les seuils de tolérance physiologiques des espèces et dérèglent leurs phénologies. La synchronisation entre différentes espèces est indispensable à leur succès reproducteur (fitness) (Schenk *et al.*, 2018). En effet, par exemple il se produit une désynchronisation entre les insectes et les plantes (Hegland *et al.*, 2009). En 2018, Hutchings *et al.* ont montré que l'augmentation des températures pose un problème pour la pollinisation des ophrys-araignées (*Ophrys sphegodes*) par les abeilles mâles *Andrena nigroaenea*. Ainsi, le changement climatique impacte les dates clés des différents cycles de vie des espèces végétales (ex. : germination, floraison) et animales (ex. : reproduction, migration) (Boucher et Fontaine, 2010). Il engendre un risque d'amplification de prolifération de cyanobactéries, de maladies, mais surtout une opportunité pour les espèces exotiques envahissantes de se propager.

La pollution

La pollution est la quatrième cause du déclin de la biodiversité. Elle regroupe deux catégories : la pollution chimique qui est majoritairement la plus étudiée et la pollution lumineuse qui est une préoccupation récente (Jacquemet, 2021, Mougin *et al.*, 2021).

La pollution est présente dans l'air, dans l'eau et dans le sol. Les pesticides regroupant les insecticides, les herbicides et les fongicides ont la part de responsabilité la plus importante (Jacquemet, 2021). La pollution industrielle entraîne une contamination de tous les milieux avec des substances chimiques et des métaux lourds. Les substances nocives chimiques se retrouvent dans toutes les chaînes trophiques. La majorité des études analyse les effets d'une seule substance, mais très peu sur un cocktail de plusieurs substances. Les insecticides sont caractérisés par trois facteurs les rendant fortement nocifs (Mougin *et al.*, 2021). Le premier

concerne leur large spectre d'action et leur toxicité à très faible dose, ils peuvent se retrouver dans tous les organes d'une plante comprenant aussi le pollen et le nectar impactant donc un grand nombre d'espèces. Le second concerne leur utilisation en guise de prévention des maladies au début des cultures, même si le risque n'est pas forcément attesté. Le dernier est leur longévité dans l'environnement, ils peuvent intoxiquer la faune même plusieurs années après leur utilisation. Il existe aussi des polluants avec une toxicité chronique qui vont avoir des effets très importants à faible dose, mais dus à une exposition sur le long terme (Mougin *et al*, 2021).

La pollution lumineuse correspond à toutes les sources de lumière artificielle. Celle-ci augmente en moyenne de 6% chaque année (Mougin *et al*, 2021). Certaines régions du monde ne connaissent même plus l'obscurité. Cette pollution a un effet négatif sur tout le vivant. Elle impacte le comportement, les rythmes biologiques et la physiologie de l'ensemble des organismes, animaux et végétaux (Mougin *et al*, 2021). Il faut savoir qu'environ 30% des vertébrés et environ 65 % des invertébrés vivent principalement ou partiellement la nuit. Par exemple, les oiseaux migrateurs se déplacent grâce à la position des étoiles. En entrant dans des zones fortement lumineuses, ils sont éblouis et subissent une désorientation qui augmente leur mortalité due aux collisions. Concernant les insectes, la majorité sont attirés ou répulsés par les sources lumineuses ce qui les désorientent également causant une mortalité importante (Mougin *et al*, 2021).

Les facteurs biologiques

Les espèces exotiques envahissantes colonisent les niches écologiques perturbées par l'urbanisation et la mauvaise gestion des territoires (Boucher et Fontaine, 2010). D'après l'EPA (2008), 70 % des extinctions mondiales des espèces indigènes aquatiques sont liées aux espèces envahissantes. Aux États-Unis, 42 % des espèces indigènes sont actuellement en danger due à la compétition avec les espèces exotiques (Pimentel *et al.*, 2005). Depuis les années 70, le nombre d'espèces exotiques envahissantes par pays a augmenté d'environ 70 %² (IPBES, 2019). D'après Goulson (2003), il existe plusieurs effets négatifs que peuvent apporter des pollinisateurs exotiques, notamment une compétition pour les ressources florales et pour les sites de nidification, une pollinisation des plantes exotiques et surtout une

² Dans les 21 pays qui ont présenté des données détaillées.

transmission de parasites et de pathogènes. En effet, les espèces exotiques envahissantes peuvent être accompagnées de parasites qui leur sont propres et de pathogènes auxquels elles peuvent être résistantes, mais auxquels les espèces natives sont vulnérables (Goulson et Hugues, 2015).

III. Un bio-indicateur d'intérêt : le papillon

Importance dans la biodiversité

La dénomination « pollinisateur » regroupe différents taxons tels que les hyménoptères (abeilles, guêpes, fourmis) et les lépidoptères (papillons). Les abeilles sont reconnues comme étant le pollinisateur « le plus efficace » et les papillons comme étant le groupe « le plus fascinant » (ministère de la transition écologique, 2020). En effet, en raison de leur multitude de patterns différents, ils permettent de favoriser le côté esthétique des écosystèmes et ainsi, de sensibiliser un public plus large. D'après Stokes (2007), la plus grande partie de la biodiversité peut survivre seulement si l'espèce humaine choisit de la protéger, et elle a tendance à favoriser la conservation d'espèces qui ont une certaine esthétique. D'après New (1997), une espèce dite « parapluie » est une espèce qui permet de par sa conservation d'assurer ou de favoriser le bien-être d'autres espèces au sein du même écosystème. Ainsi, les taxons « parapluies » peuvent être utilisés pour détecter et surveiller les changements dans leurs environnements. Les papillons faisant partie des espèces « parapluies », ils peuvent être évalués plus facilement que de nombreux autres groupes de pollinisateurs. D'autre part, les papillons sont également des bio-indicateurs en raison de leurs liens spécifiques avec leur environnement (Van Swaay *et al.*, 2019). En effet, ils permettent de visualiser facilement l'état de santé du milieu (UICN *et al.*, 2012). Cependant, les lépidoptères subissent un déclin moins sévère que d'autres insectes. Par conséquent, lorsque l'évaluation des insectes se fonde en grande partie sur des études concernant les lépidoptères (ordre avec le plus de données précises [Thomas, 2016]), il y a une tendance à sous-estimer ce déclin (Jacquemet, 2021).

Un déclin visible

D'après Van Swaay et Warren (1999), la principale raison du déclin des rhopalocères³ en Europe est l'agriculture, mettant en danger 90 % des 71 espèces de papillons menacées d'extinctions d'Europe. Le Luxembourg est reconnu comme étant un des pays européens avec le plus grand nombre d'espèces de rhopalocères en déclin (L'essentiel, 2018). En 2018, 89 espèces de papillons ont été recensées au Grand Duché de Luxembourg dont un tiers est considéré comme étant menacé de disparition (L'essentiel, 2018). La ministre de l'Environnement a évoqué l'importance de lutter contre le déclin des espèces à l'occasion de la Journée mondiale de l'environnement de 2018. En effet, les papillons occupent majoritairement les habitats de prairies (plus de la moitié des espèces), suivies des bois (22 % des espèces), des landes et des tourbières (environ 12 %). La plupart de ces habitats ne sont pas des écosystèmes climaciques (état théorique dans lequel un sol ou une communauté végétale a atteint un état d'équilibre stable et durable avec les facteurs édaphiques⁴ et climatiques du milieu), ils doivent donc être entretenus par des systèmes agricoles comme le pâturage extensif ou la coupe du foin (Van Swaay et Warren, 1999). Cependant, l'utilisation de pesticides et autres polluants impacte ces écosystèmes. Une étude aux Pays-Bas souligne l'importance du moment de l'utilisation des pesticides. Ceux-ci impactent le bon développement des chenilles vivant sur ces plantes (New, 2005). Aux Pays-Bas, 65 % de l'agriculture utilise des pesticides entre mai et août, période où les chenilles et les papillons sont les plus abondants.

L'agriculture entraîne donc des changements dans la richesse spécifique du milieu. En effet, les plantes dont s'alimentent essentiellement les larves sont substituées par des cultures et des plantations exotiques par exemple. Elles peuvent aussi être détruites par l'urbanisation, ce qui augmente la fragmentation du milieu (Thomas, 2016). Il existe donc deux problèmes majeurs liés au mode de vie des papillons. Le premier est la spécialisation du régime alimentaire des chenilles : elles ne s'alimentent que d'une voire quelques espèces végétales qui lui sont propres. Le second problème est la faible dispersion des adultes. Si une population de papillons plutôt sédentaires s'éteint sur un site isolé, la probabilité qu'une autre espèce

³ Ancien sous ordre de l'ordre des lépidoptères. Ce terme regroupe les papillons de jour. Il s'oppose à l'ancien sous ordre des hétérocères qui regroupe les papillons de nuit. Aujourd'hui, c'est le terme Papilionoidea (super-famille de l'ordre des lépidoptères) qui est utilisé. Il correspond à l'ancien terme rhopalocère. Cependant, il ne sera pas utilisé ici car il ressemble à la famille Papilionidae et afin de faciliter la lecture.

⁴ Définition édaphique : ce qui a trait à un facteur écologique lié au sol (pH, humidité, etc.).

sédentaire colonise le milieu est faible. À terme, une disparition des espèces sédentaires sera dû à l'incapacité de se disperser sur des longues distances. La fragmentation de l'habitat entraîne donc des difficultés quant à la migration pour la période de reproduction (Thomas, 2016, Jacquemet, 2021). Le seul avantage est la facilité pour les chercheurs d'étudier les papillons qui sont donc peu dispersifs.

IV. Des actions face au déclin de la biodiversité

Afin de comprendre et de protéger les différents milieux hébergeant notamment les populations de lépidoptères, il existe des actions de conservation mises en place comme le réseau Natura 2000, les mesures agroenvironnementales et climatiques (MAEC) ou encore les projets LIFE.

Le Réseau Natura 2000

En 2022, le réseau Natura 2000 fête ses trente ans. Il a été créé pendant le sommet de Rio en 1992 dans le but de maîtriser la perte de la biodiversité dans l'Union européenne (ministère de la transition écologique, 2022). Ce réseau se fonde sur les espèces et les habitats identifiés comme menacés selon deux directives européennes : la directive Oiseaux (CEE 79/409) née en 1979 et la directive Habitats faune flore (CEE 92/43) de 1992 (Dufrêne, 2005). Ce réseau compte environ 27 000 sites qui sont répartis dans 27 pays européens et il recouvre 18,5% de la surface terrestre et 8,9% de la surface marine appartenant à l'Union européenne (ministère de la transition écologique, 2022). Natura 2000 constitue un moyen pour garantir la survie à long terme des espèces et des habitats classés comme étant menacés. Deux objectifs sont importants : le premier est la préservation de la biodiversité et des habitats, et le second est de ne pas perdre de vue les exigences économiques, sociales et culturelles liées aux territoires (ministère de la transition écologique, 2022). Ce dernier consiste à ne pas exclure des aménagements et des activités humaines sur des sites Natura 2000 si cela n'affecte pas les objectifs de conservation établis sur les sites en question.

Parmi les espèces listées dans l'annexe II (espèces animales et végétales d'intérêt communautaire dont la conservation nécessite la désignation) et l'annexe IV (espèces animales et végétales présentant un intérêt communautaire et nécessitant une protection stricte) de la directive Habitats, il y a une cinquantaine d'espèces de Lépidoptères (Conseil des communautés européennes, 2007), dont quatre rhopalocères présents sur le territoire belge

(La biodiversité en Wallonie, n.d.) et luxembourgeois (Le gouvernement du Grand Duché de Luxembourg, 2020). Les espèces protégées de papillons de jour que l'on peut rencontrer au Grand Duché de Luxembourg (Figure 3) sont le Damier de la succise (*Euphydryas aurinia*), le Cuivré des marais ou Grand cuivré (*Lycaena dispar*), le Cuivré de la bistorte (*Lycaena helle*) et l'Azuré du serpolet (*Phengaris arion*). Depuis la création des deux directives, il y a eu quelques modifications rajoutant des espèces parmi les listes associées. Il n'est donc pas impossible de rajouter (ou supprimer) des espèces au fur et à mesure en fonction des besoins de conservations.



Figure 3 : Dans l'ordre de gauche à droite : le Damier de la succise (*Euphydryas aurinia*), le Cuivré des marais ou Grand cuivré (*Lycaena dispar*), le Cuivré de la bistorte (*Lycaena helle*) et l'Azuré du serpolet (*Phengaris arion*), (<https://inpn.mnhn.fr/accueil/index>).

Les Mesures Agro Environnementales et Climatiques (MAEC)

En 1962, la Politique Agricole Commune (PAC) voit le jour (Commission européenne, n.d). A la suite de cela, des méthodes agro-environnementales ont commencé à apparaître pour pallier la production non respectueuse de l'environnement. Ainsi, en 1992, une réforme de la PAC inclut des mesures de développement rural, 2nd pilier de la PAC, le premier étant axé sur les finances (Direction générale de l'Agriculture, 2006). De là en découle l'outil appelé « Mesure Agro Environnementale Territorialisée » qui devient « Mesure Agro Environnementale et Climatique » plus récemment. Tous les 5 ans environ, les MAEC sont reprogrammées en fonction de l'état d'avancement et des besoins. Ces MAEC sont à destination des agriculteurs et sont souscrites volontairement (Préfet des Bouches-du-Rhône, 2016). Elles ont pour objectif d'accompagner les agriculteurs qui s'engagent dans le développement des pratiques combinant performance économique et performance environnementale, mais aussi dans le maintien de ces pratiques quand elles sont sur le point de disparaître (ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2021).

Le projet LIFE Papillon

Depuis 1992, il existe L'Instrument Financier pour l'Environnement connu sous le nom de projets LIFE. Ils ont pour but de protéger l'environnement et la nature. Ces projets sont cofinancés par l'Union européenne (Life Papillons, n.d.). Il existe donc différents types de projets LIFE répartis dans quatre thèmes choisis pour la période 2021-2027. Les thèmes sont Nature et biodiversité, Économie circulaire et qualité de vie, Atténuation du changement climatique et adaptation, Transition vers l'énergie propre (ministère de la transition écologique, 2020). C'est dans la thématique Nature et biodiversité, que se trouvent les projets visant à la restauration et à la conservation des habitats naturels menacés et des espèces protégées (Life Papillons, n.d.).

Le projet LIFE Papillon fait partie de cette thématique. Ce projet a quatre objectifs : mettre des habitats fragiles sous un statut de protection afin d'assurer la conservation de ces habitats, restaurer des milieux favorables à la biodiversité, mettre en place une gestion à long terme et durable de ces habitats, et sensibiliser la population et les responsables locaux à l'importance des papillons de jour dans l'écosystème. Étant donné la complexité de protéger une centaine de papillons, trois espèces ont été choisies sur base de leur statut de conservation : le Damier de la succise (*Euphydryas aurinia*), le Cuivré des marais ou Grand cuivré (*Lycaena dispar*) et le Cuivré de la bistorte (*Lycaena helle*). Durant 6 ans, ce projet a été exécuté et ce fut un succès pour les différentes espèces et plus encore. En effet, sur les habitats d'intérêts, on observe le retour de certaines espèces spécifiques des milieux ouverts tels que des orchidées, des vipères et d'autres espèces d'insectes.

Les plans nationaux d'actions (PNA)

En Europe, il existe des plans nationaux d'actions qui sont des outils stratégiques opérationnels visant à assurer la conservation de la faune et la flore jugées menacées ou faisant l'objet d'un intérêt particulier (Houard et Jaulins, 2018). Ces PNA sont déployés lorsque les autres politiques publiques environnementales sont estimées insuffisantes pour établir une conservation efficace. Il existe des PNA soit pour une espèce soit pour des groupes d'espèces et pour tout type de classe animales (amphibiens, mammifères, poissons, reptiles, oiseaux, etc.). L'objectif est de sauvegarder ces espèces en adoptant des mesures spécifiques visant à contrecarrer les causes directes de leurs menaces (fertilisation, destructions de l'habitat, fragmentation, etc.). Ce genre de PNA permet une mobilisation commune, que ce

soit par exemple l'État, les collectivités territoriales, les éleveurs, les forestiers, les gestionnaires d'espaces naturels, les propriétaires ou encore toutes personnes naturalistes, afin de favoriser une gestion appropriée dans le but de conserver les espèces d'intérêts.

Entre 2010 et 2016, en France, un plan national d'action appelé PNA *Maculinea* concernant le genre *Maculinea* regroupant majoritairement les azurés fut un succès (Houard et Jaulins, 2018). Par la suite un nouveau PNA est déployé de 2018 à 2028 : le PNA papillons de jour. Il s'accroît sur 38 espèces de papillons diurnes se basant sur la liste rouge de l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN). La protection de la nature du Grand Duché de Luxembourg a fait l'objet d'un plan d'action entre 2017 et 2021 prévoyant des programmes de protection et de conservation, dont un concernant la surveillance des insectes pollinisateurs (L'essentiel, 2018). À la suite de ce plan d'action, un autre plan de conservation a vu le jour s'axant uniquement sur la préservation des insectes pollinisateurs entre 2021 et 2026 (Le gouvernement du Grand Duché de Luxembourg, 2021).

V. Objectifs du TFE

Dans la mise en place de ces actions, il existe des associations qui aident à la mise en œuvre des MAEC, telles que les asbl (associations sans but lucratif) Natagriwal et Fourrages Mieux. Natagriwal a pour but d'encadrer, d'informer et de conseiller les agriculteurs, les forestiers et les propriétaires de parcelles dans la mise en place des MAEC en Wallonie. Fourrages Mieux est une asbl qui teste des techniques de gestion agricoles dans le domaine du fourrage en Wallonie, et récemment ils ont développé une collaboration avec le Grand Duché. Depuis quelque temps, ils allient rendement et conservation des prairies.

Ce mémoire a pour but d'étudier l'effet d'une fertilisation à l'azote minéral sur les populations de rhopalocères et les ressources florales des prairies maigres de fauches au Grand Duché de Luxembourg. Pour ce faire, plusieurs objectifs spécifiques en découlent.

Dans un premier temps, l'évolution des populations de rhopalocères et des ressources florales disponibles sera observée. Dans un second temps, la diversité spécifique des populations de papillons et leur équitabilité seront quantifiées et comparées en fonction de chaque zone de traitement. Ensuite, l'attraction de différentes espèces de papillons sera analysée par rapport à la zone fertilisée ou non-fertilisée. Puis, les interactions de butinage entre les espèces de papillons et les espèces florales seront étudiées au sein des deux types de zones afin de déterminer les préférences des papillons. Pour finir, la mise en évidence des

ressemblances entre chaque relevé en fonction des espèces de papillons retrouvées sur les différents sites sera analysée.

Matériel et méthode

I. Zone d'étude

Les prairies étudiées se situent au Grand Duché du Luxembourg. Elles sont prises en charge par Fourrages Mieux qui teste des méthodes afin d'optimiser la gestion des prairies par les agriculteurs. Cette gestion a débuté en 2020 et s'étend sur 5 ans. Les prairies sont aussi suivies pour la flore dans le cadre d'un projet de recherche financé par le ministère de l'agriculture du Luxembourg. Une dizaine de prairies ont été sélectionnées (Figure 4 et Tableau 1), exclusivement au sud du pays pour éviter les différences de propriétés du sol avec le nord. Chaque prairie contient au moins deux zones d'études (Figure 5 et Tableau 1) avec une parcelle fertilisée (ZF) et une parcelle témoin (Z0). Les prairies sont fertilisées depuis 2020 : 50 unités d'azote par parcelle fertilisée et 0 pour les parcelles témoins. Avant cela, toutes les prairies faisaient partie des MAEC. Toutes ne pouvaient être fauchées qu'à partir du 15 juin. Avant 2020, seules les prairies 13A et 16 recevaient l'équivalent de 50 unités d'azote minéral au printemps, les autres ne recevaient aucun engrais. En 2021, la prairie 07 n'avait pas été fauchée.

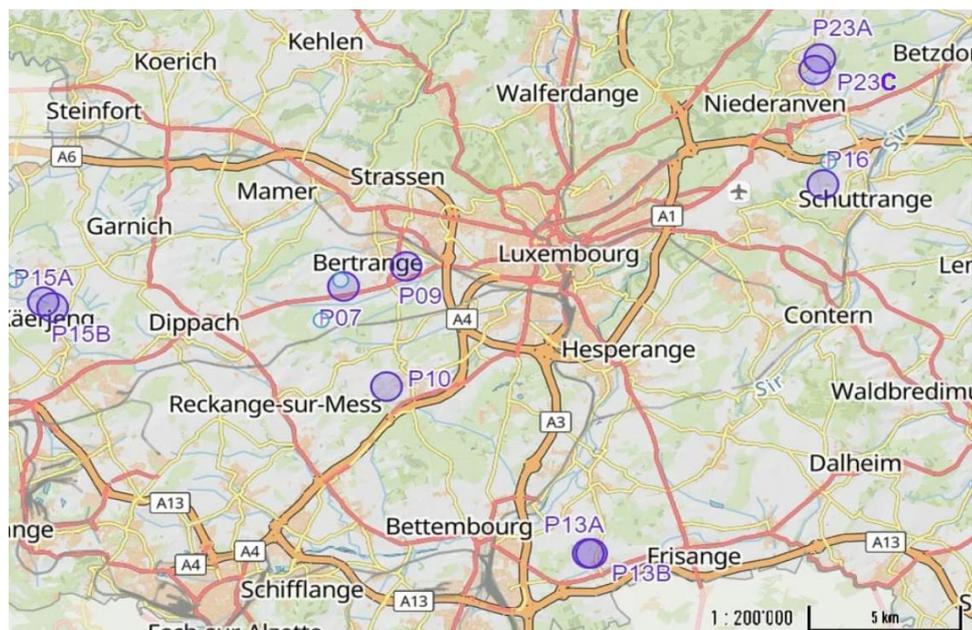


Figure 4 : Localisation des 10 prairies étudiées.

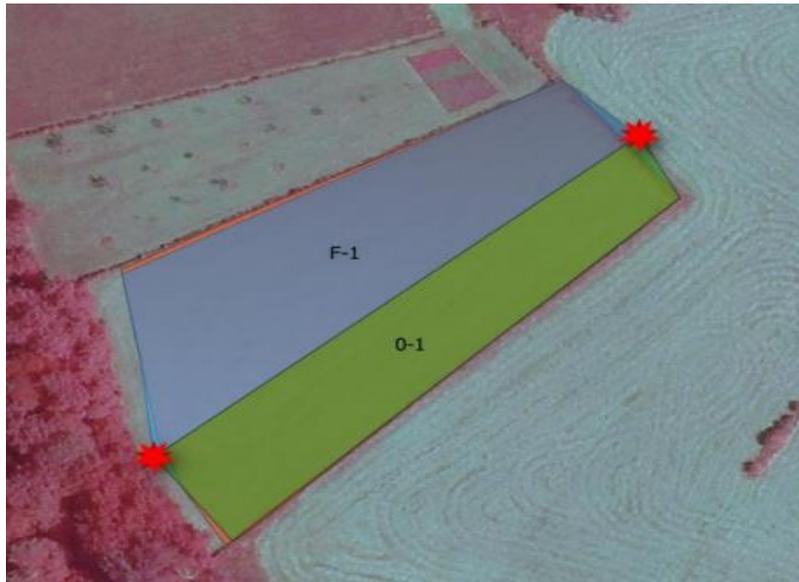


Figure 5 : Parcelle 15B avec les deux zones d'études, F-1 correspondant à la partie fertilisée et O-1 correspondant à la partie non-fertilisée. Les étoiles rouges correspondent à des poteaux mis sur le terrain comme point de repère.

Tableau 1: Description des 10 prairies divisées en deux parcelles. L'altitude est exprimée en mètres et la surface en m².

Localité	Station	Surface	Altitude	Localité	Station	Surface	Altitude
Bertrange	07/ZO	4500	300	Fingig	15A/ZO	2800	345
	07/ZF	4100			15A/ZF	2500	
Bertrange	09/ZO	8100	285	Fingig	15B/ZO	1900	345
	09/ZF	5900			15B/ZF	2600	
Leudelage	10/ZO	2000	335	Schuttrange	16/ZO	4000	300
	10/ZF	1400			16/ZF	4100	
Hellange	13A/ZO	7200	260	Rameldange	23A/ZO	9900	295
	13A/ZF	19300			23A/ZF	7300	
Hellange	13B/ZO	?	260	Rameldange	23C/ZO	4500	295
	13B/ZF	4300			23C/ZF	3100	

II. Méthodes d'échantillonnages

Conditions météorologiques essentielles

Les conditions météorologiques influençant beaucoup le comportement des papillons, il fallait une température minimum et un vent adéquat afin de pouvoir les observer. En effet, ils ont besoin de réchauffer leurs muscles alaires à l'aide du soleil et ils ne peuvent pas voler correctement lorsque le vent souffle fort (Langlois et Gilg, 2007).

Ainsi, les conditions pouvaient être optimales si les températures étaient supérieures à 14 °C lorsque le temps était dégagé ou avec de légers nuages, supérieures à 17 °C lorsque le temps était nuageux. Il était inutile d'effectuer les relevés si le temps était pluvieux ou si la couverture nuageuse était supérieure à 50 %, de même si le vent était supérieur à 30 km/h. Si les conditions météorologiques se dégradent lors des observations, il était recommandé de faire une pause. Si le mauvais temps persistait, la zone devait alors refaire l'objet d'une observation lorsque le temps serait redevenu favorable. Lors de la période de prospection si plusieurs jours consécutifs avaient des conditions très défavorables, il était très recommandé de faire les relevés directement le jour suivant. En effet, les papillons sont plus actifs lors du retour du beau temps (Langlois et Gilg, 2007).

Suivi des populations de papillons

Les prairies étudiées n'avaient pas d'antécédent de recensement des populations de papillons, c'est donc une première pour ces prairies. D'après Langlois et Gilg (2007), il était conseillé d'avoir un écart entre deux relevés inférieur à 10 jours, car c'était un délai optimal afin d'observer une évolution de population ou un maintien. Généralement, la période de prospection s'étendait d'avril à septembre pour des milieux types réserves naturelles (Langlois et Gilg, 2007). Cependant, les prairies étudiées avaient une fauche aux alentours du 15 juin, la période de relevé s'étendait de début mai à mi juin (Tableau 2). Il était conseillé de faire les relevés en matinée voire en début d'après-midi (Langlois et Gilg, 2007 et Dopagne, 2016).

Tableau 2 : Planning des relevés avec en colonne les dates où les relevés ont été effectués, et en lignes le numéro des prairies qui ont été étudiées.

Prairie	04/05/22	06/05/22	14/05/22	15/05/22	21/05/22	22/05/22	23/05/22
07	X		X		X		
09	X		X		X		
10	X		X		X		
13A		X		X			X
13B		X		X			X
15A	X		X		X		
15B	X		X		X		
16		X		X		X	
23A		X		X		X	
23C		X		X		X	

Prairie	31/05/22	01/06/22	02/06/22	12/06/22	13/06/22	14/06/22
07	X			X		
09	X			X		
10	X			X		
13A			X			X
13B			X			X
15A		X				X
15B		X				X
16			X		X	
23A			X		X	
23C			X		X	

Les prises de données étaient organisées par transects sur les différentes parties des prairies et s'effectuaient uniquement sur les imagos⁵ de papillons. La vitesse de marche devait être de 2km/h tout le long du transect. La zone d'échantillonnage s'étendait de 2,5m de chaque côté de l'observateur et 5m sur le devant (Figure 6; Langlois et Gilg, 2007). L'observation se faisait à vue ou avec l'aide d'une paire de jumelles spécialisées. Cependant, il était nécessaire pour certains individus de les capturer à l'aide d'un filet pour une meilleure

⁵ Dernière phase du développement de l'insecte ; stade adulte.

identification (Dopagne, 2016). L'identification se faisait grâce aux connaissances personnelles ou avec l'aide d'un guide naturaliste (guide photo des papillons d'Europe, édition Delachaux et Niestlé). Toutes les informations des relevés ont été ajoutées sur le site BIOGEOnet⁶, dans le groupe de travail : Fourrages Mieux - MAEC - Lux. Le comptage par parcelle est repris en Annexe 1.

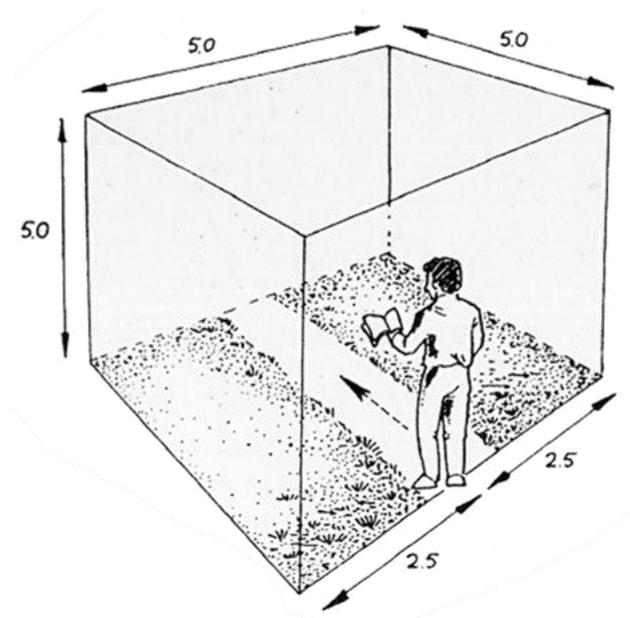


Figure 6 : Zone d'échantillonnage. (Langlois et Gilg, 2007)

Recensement floristique et comptage des unités florales

Un recensement floristique a été réalisé durant le mois de juin 2022. Il existe un recensement de la flore des différentes prairies datant de 2019 et un suivi depuis 2020 avec la différenciation zone fertilisée et zone non-fertilisée. Ceux-ci ont été encodés sur BIOGEOnet dans le groupe de travail : Fourrages Mieux - MAEC - Lux. Les recensements se sont faits par quadrats, il y en avait 6 par parcelles. Chaque espèce était qualifiée avec le coefficient d'abondance de Braun-Blanquet qui indiquait un pourcentage de recouvrement et une abondance relative.

Chaque espèce en fleur a fait l'objet d'un comptage de ses unités florales. D'après Saville (1993), une unité florale correspond à une ou plusieurs fleurs qu'une petite abeille peut butiner à la suite sans devoir voler. Les espèces se retrouvant sur un rayon d'un mètre carré ont été comptées. Cependant, les prairies n'étaient pas homogènes dans la répartition de la flore. En effet, par exemple : un endroit de la prairie avait un regroupement de 3 espèces

⁶ <https://www.biogeonet.ulg.ac.be/index.php?pg=0>

uniquement, à deux pas de là 2 autres espèces regroupées, mais pas d'endroit avec ces 5 espèces dans le même mètre carré. Pourtant, ces 5 espèces sont présentes de façon significative dans la prairie. Ainsi, pour avoir un plus large spectre d'espèces en fleurs, le cercle d'observation a été utilisé deux voire trois fois par parcelle, les espèces déjà comptabilisées n'ont pas été recomptées (pas d'accumulation entre les cercles).

Observation des interactions de butinage entre papillons et fleurs

Les interactions entre les papillons et les fleurs étaient aussi prises en compte dans les relevés. Le temps de butinage a été seulement pris en compte lors des analyses, mais il était possible d'observer des moments de repos. Le butinage était reconnaissable par le comportement du papillon qui va dérouler sa trompe (Figure 7), ouvrir ses ailes et se mouvoir sur la fleur. Un point d'observation était alors choisi aléatoirement et la prise de données s'était faite sur un cercle d'une dizaine de mètres de diamètre. La durée d'observation était d'une quinzaine de minutes en identifiant l'espèce de papillon et de la plante. Lorsqu'un individu interagissait avec la même espèce végétale, l'interaction n'était pas dupliquée et était comptée comme étant une unique interaction.



Figure 7 : Interaction de butinage d'Aporia crataegi (Gazé) sur Centaurea jacea (Centaurée jacée), (photo d'E. Aupy)

III. Méthodes d'analyses

Les analyses statistiques ont été effectuées avec le logiciel Microsoft Excel version 2203 (Microsoft Corporation, 2016) et le logiciel RStudio version 1.3.1073 (RStudio Team, 2019). Les packages utilisés pour les différentes analyses étaient *vegan* (Oksanen *et al.*, 2022), *emmeans* (Russell *et al.*, 2022), *network3D* (Allaire *et al.*, 2017), *stats* (R Core Team, 2022) et *lme4* (Models *et al.*, 2022)

1. Suivi de la population de papillon et floristique au cours de la saison

Un suivi de la population de papillon en fonction de la saison a été illustré avec Excel. Pour cela, une courbe de tendance du nombre total d'individus et du nombre total d'espèces de rhopalocères a été réalisée afin d'observer l'évolution sur la saison 2022. Le nombre de papillons par espèce et par zone a été représenté dans un tableau (Annexe 2). Le statut de conservation européenne et wallonne, et la législation du Grand Duché relative aux espèces de papillons ont été repris dans un tableau (Annexe 3) avec le nombre d'individus totaux et le nombre de stations où sont présentes les différentes espèces.

Le comptage des unités florales a permis de réaliser un classement des cinq espèces de fleurs avec le plus d'unités florales disponibles sur les prairies tout au long de la saison.

Les deux suivis ont permis de définir le type d'habitat pour chaque parcelle. BIOGEOnet calcule le type d'habitat représentant la prairie automatiquement en fonction de la phytosociologie et de la zoocénologie. La typologie EUNIS (European Nature Information System) a été choisie comme classification des habitats (Annexe 4).

2. Comparaison entre les indices de diversité entre les deux zones

L'indice de Shannon & Weaver et l'indice d'équitabilité de Piélu ont été calculés avec la fonction *diversity* du package *vegan* sur RStudio. L'indice de Shannon (H') exprime la diversité spécifique de la population étudiée (Marcon, 2015). Ainsi, si la population était constituée d'une seule espèce, l'indice serait égal à 0. En revanche, plus il y avait d'espèces différentes, plus la valeur de l'indice augmenterait. Généralement, l'indice (H') est compris entre 1 et $H_{max} = \log_2(\text{taille de l'échantillon})$. H_{max} représente la richesse spécifique théorique c'est-à-dire un peuplement où tous les individus de toutes les espèces sont répartis d'une façon égale (Calu, 2020).

Cet indice est souvent accompagné de l'indice d'équitabilité de Pielou qui mesure la répartition des individus au sein des espèces (Marcon, 2015). Il consiste au rapport de l'indice de diversité de Shannon & Weaver (la diversité réelle) sur la valeur de la diversité théorique maximale (Hmax). Le résultat est de 0 lorsqu'une seule espèce représente la quasi-totalité des effectifs, cela traduit un déséquilibre du milieu. En revanche, si le résultat est proche de 1, alors il y a un équilibre dans l'effectif de chaque espèce présente sur le milieu (Calu, 2020).

3. Analyse de la préférence des papillons

Pour vérifier l'existence de la préférence d'une ou plusieurs espèces de papillons pour la zone fertilisée ou non-fertilisée, des modèles linéaires généralisés à effets mixtes (Glm) suivant la loi de Poisson ont été employés avec la fonction *glmer* du package *lme4* du logiciel Rstudio. Deux variables explicatives étaient prises en compte : la variable traitement qui est la variable testée principale et qui se divise en deux catégories (zone non-fertilisée (Z0) et zone fertilisée (ZF)) et la variable Site considérée comme étant un effet aléatoire qui prend en considération chaque prairie. Les hypothèses des tests sont : H_0 = Il n'y a pas de différence significative entre les deux types de zones (ainsi, les espèces de papillons n'ont pas de préférences) et H_1 = il y a une différence significative entre les deux zones (les espèces de papillons préfèrent l'une ou l'autre zone). Pour valider H_0 , la p-value doit être supérieur à 0.05 dans le cas contraire H_0 est rejeté donc H_1 est accepté. Si ce cas se produit, alors il faut faire une comparaison multiple avec le test de Tukey à l'aide de la fonction *emmeans* du package du même nom. L'égalité des variances (homoscédasticité) a été vérifiée avec le test de Levene afin de valider les conditions d'applications de chaque Glm. Parmi le nombre total d'espèces retrouvées, seules les espèces avec au minimum 20 individus ont été sélectionnées. Ainsi, 7 espèces ont été retenues : *Polyommatus icarus* (Azuré commun), *Coenonympha pamphilus* (Pamphile), *Cyaniris semiargus* (Demi-argus ou Azuré des anthyllides), *Pieris rapae* (piéride de la rave), *Pieris napi* (piéride du navet), *Maniola jurtina* (myrtil) et *Aglais urticae* (petite tortue). Chaque espèce a été analysée séparément. Sept GLM ont donc été effectués.

4. *Analyse des interactions de butinage entre les rhopalocères et les plantes*

Les interactions de butinage ont été représentées à l'aide d'un diagramme de Sankey avec le package « network3D ». Deux diagrammes ont été réalisés afin de comparer la différence entre la zone fertilisée et la zone non-fertilisée en reliant rhopalocères et plante(s) butinée(s).

5. *Étude de la différence entre les compositions de chaque parcelle*

Afin de comprendre les différences et ressemblances entre chaque relevé, une analyse des coordonnées principales a été réalisée à l'aide de la fonction *cmdscale* du package *stats*. Il permettait de représenter graphiquement une matrice de ressemblance entre x éléments à partir d'une matrice de distances. Celle-ci a été créée avec la fonction *vegdist* du package *vegan*. L'annexe 1 permettra de soutenir le résultat de l'analyse.

Résultats

1. Suivi de la population de papillon et floristique au cours de la saison

La population de rhopalocères a tendance à augmenter durant la saison (Figure 8). Il y a une forte augmentation au mois de juin notamment à la moitié du mois. En effet, le nombre d'individus triple passant de 200 début juin à plus de 600 individus mi-juin.

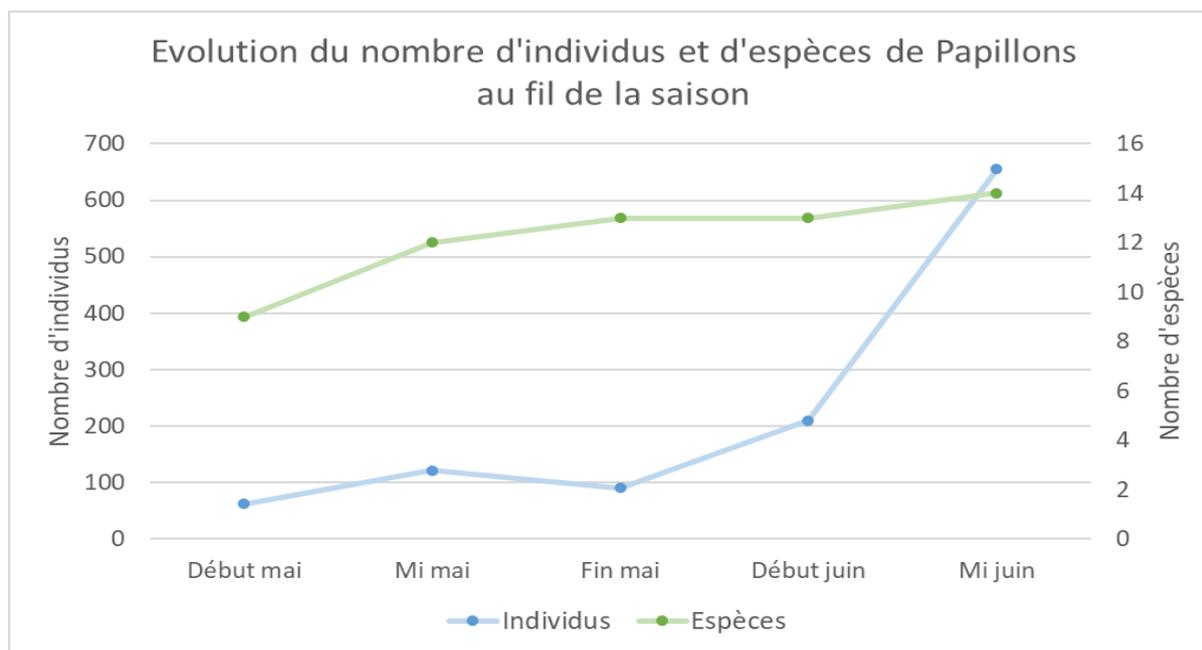


Figure 8 : Évolution du nombre d'individus et d'espèces de Papillons au fil de la saison. La courbe en bleu correspond au suivi de nombre d'individus. La courbe en vert correspond au suivi du nombre d'espèces.

Concernant le nombre d'espèces, il n'y a pas de différence importante au fil de la saison. Pourtant, début mai, il y avait une dizaine d'espèces sur la totalité des prairies et, mi-juin, 14 espèces ont été recensées. Sur la totalité de la saison et toutes prairies confondues, il y avait 1140 individus de papillons pour 25 espèces différentes (Annexe 2). Au niveau Européen, toutes les espèces sont considérées comme étant des Espèces non menacées de préoccupation mineure (LC) (Annexe 3). La législation au Luxembourg protège toutes les espèces sauf le genre *Pieris*. Au niveau de la Wallonie, la plupart des espèces sont considérées LC sauf 6 espèces et 2 espèces qui sont non évaluées (*Vanessa atalanta* (Vulcain) et *Vanessa cardui* (Belle-dame)). *Melitaea athalia* (Mélitée du mélampyre) et *Pyrgus malvae* (Hespérie de la mauve) sont des espèces vulnérables. *Cyaniris semiargus* (Demi-argus) et *Thymelicus lineola* (Hespérie du dactyle) sont considérées comme étant des espèces quasi menacées et, *Boloria dia* (Petite violette) et *Speyeria aglaja* (Grand nacré) sont estimées comme étant des espèces

en danger. *Boloria dia* (Petite violette) et *Melitaea athalia* (Mélitée du mélampyre) sont aussi des espèces Natura 2000.

Sur la saison 2022, 45 espèces de plantes à fleurs disponibles pour les pollinisateurs ont été recensées. À première vue, une même majorité d'espèces de plantes à fleurs est disponible pour les pollinisateurs tout au long de la saison au sein des deux types de zones (Figure 9). Cependant, une différence sur la quantité de fleurs disponibles a été notifiée. La zone non-fertilisée répertorie un total de 13 221 unités florales par m², le classement (Figure 9) contient un total de 9 425 unités florales par m². Tandis que la zone fertilisée a un total de 7 396 unités florales par m² et le classement (Figure 9) a un total de 5 378 unités florales par m².

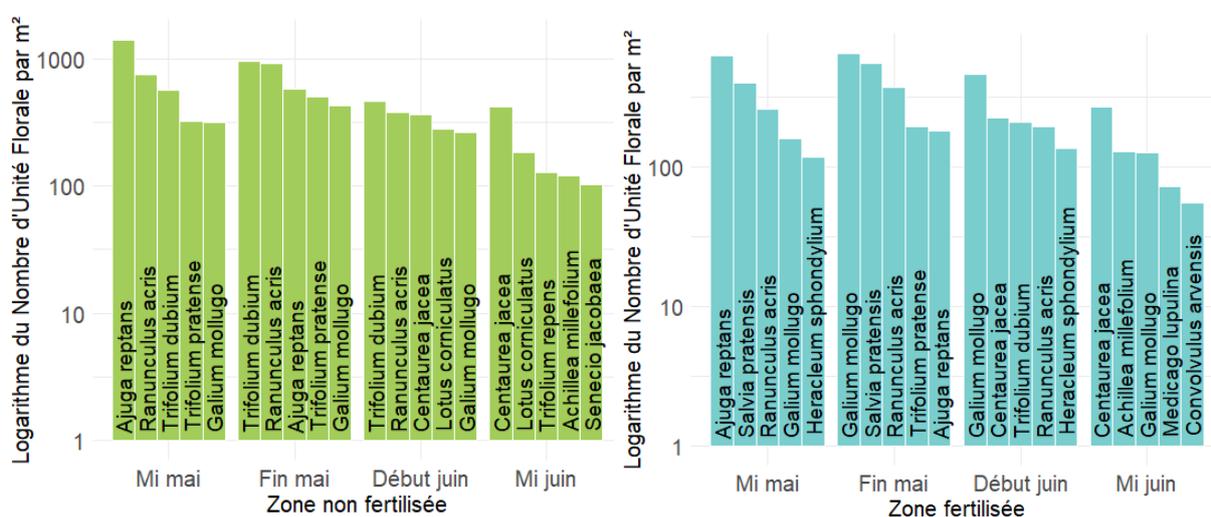


Figure 9 : Classement des espèces végétales avec le plus d'unités florales au fil de la saison. Les valeurs des unités florales sont représentées en logarithme base de 10. Le graphique de gauche en vert concerne les parcelles non-fertilisées. Le graphique de droite en bleu concerne les parcelles fertilisées.

Au sein d'une même zone, il y a un changement des plantes disponibles durant la saison. En effet, à la mi-mai, *Ajuga reptans* (Bugle rampante) est la plante avec le plus d'unités florales (1404 unités florales par m²) dans la zone non-fertilisée. *Trifolium dubium* (Trèfle douteux) se positionne en première place à la fin mai et début juin. Mi-juin, c'est *Centaurea jacea* (Centaurée jacée) qui est le plus disponible avec 416 unités florales par m². Dans la zone fertilisée, à la mi-mai, c'est aussi *Ajuga reptans* (Bugle rampante) avec 624 unités florales par m². *Galium mollugo* (Caille-lait blanc) se positionne en première place fin mai et début juin. À la mi-juin, c'est aussi *Centaurea jacea* (Centaurée jacée) que l'on retrouve le plus dans les parcelles fertilisées avec 266 unités florales par m².

Ensuite, il y a des plantes que l'on ne trouve que dans une zone. Les plantes à fleurs retrouvées uniquement en grande quantité dans la zone non-fertilisée sont *Lotus corniculatus* (Lotier corniculé) et *Senecio jacobaea* (Séneçon jacobée). Alors que dans la zone fertilisée, il y a *Salvia pratensis* (Sauge commune), *Heracleum sphondylium* (Berce commune), *Medicago lupulina* (Luzerne lupuline) et *Convolvulus arvensis* (Liseron des champs).

D'après la phytosociologie avec EUNIS de BIOGEOnet, la plupart des prairies sont considérées comme des « prairies pâturées permanentes pas ou peu fertilisées (E2.11b) » (Annexe 4). La prairie 10 fait exception, elle est caractérisée comme étant une « prairie de fauche humide moyennement fertilisée (E3.41) ». D'après la zoocénologie avec EUNIS de BIOGEOnet, les prairies sont considérées comme étant des « Prairies de fauche planitiaires et collinéennes (E2.2) ». Il y a quelques exceptions où les prairies sont déterminées comme étant des « Pâtures permanentes et prairies mixtes (E2.1) (Annexe 4)».

2. Comparaison entre les indices de diversité entre les deux zones

L'indice de Shannon exprimant la diversité spécifique de la population de rhopalocères, est plus élevé pour la zone fertilisée avec 1,38 comparé à la zone non-fertilisée avec 1,23 (Tableau 3). En revanche, l'Anova indique que la différence n'est pas significative, car la p-value est supérieure à 0,05 ($p = 0,5155$). Pourtant, la zone non-fertilisée a le plus d'individus par rapport à la zone fertilisée. La valeur de Hmax correspond au maximum théorique de la diversité spécifique dans chaque zone, les indices de Shannon sont environ deux fois moins importants que celle-ci.

L'équitabilité de Piélou exprime la répartition des espèces au sein des zones et tend vers 1 lorsque la répartition est équilibrée. Pour les deux types de zones, l'équitabilité est supérieure à 0,5. Il n'y a donc pas de déséquilibre significatif au sein de celles-ci. L'Anova indique que la différence entre les deux zones n'est pas significative, car la p-value est égale à 0,5, il n'y a donc pas de déséquilibre important entre les zones.

Tableau 3 : Indice de l'équitabilité de Piélou et Indice de Shannon en fonction du type de traitement. Hmax correspond à la moyenne maximale de diversité. Les p-values correspondent aux résultats d'une Anova.

Zone	Nombre d'individus	Equitabilité de Piélou (J)	Indice de Shannon (H)	Hmax
Non fertilisée	680	0.62	1.23	2.79
Fertilisée	460	0.67	1.38	2.88
P value	X	0.50	0.52	0.67

3. Analyse de la préférence des papillons

Plusieurs modèles linéaires généralisés à effets mixtes (Glmm) ont été réalisés afin d'observer l'impact de la fertilisation sur quelques espèces de rhopalocères (Tableau 4). La p-value pour la variable fertilisation des espèces *Polyommatus icarus* (Azuré commun), *Coenonympha pamphilus* (Fadet commun ou Pamphile) et *Pieris rapae* (Piéride de la rave) est supérieure à 0.05, H0 est donc acceptée. Elle indique qu'il n'y a pas de différence significative entre les deux zones, mais il existe plus de 5% de chances d'observer une différence due au hasard. En revanche, *Cyaniris semiargus* (Azuré des anthyllides ou Demi-argus) avec 58 individus a une p-value pour la variable fertilisation de 0,0004, H0 est donc rejetée, il y a une différence significative entre les deux zones. De même pour *Pieris napi* (Piéride du navet) avec 66 individus, il y a une différence significative, car la p-value est inférieure à 0,05. *Maniola jurtina* (Myrtil) et *Aglais urticae* (Petite tortue) ont une p-value inférieure à 0,05 avec respectivement 6,01e-07 et 0,004. H0 est donc rejetée pour ces deux espèces. Il existe donc une différence significative entre les deux zones. Après une comparaison multiple avec le test de Tukey pour déterminer dans quel sens vont les préférences de chaque espèce ayant une différence significative pour l'une des zones, les quatre espèces de papillons ont une tendance à être plus présentes dans la zone non-fertilisée.

Tableau 4 : analyse statistique des modèles linéaires généralisés à effets mixtes (Glmm).
p-valeur <0,01, *p-valeur<0,001.

Espèces	Nombre d'individus	P value de la Variable Traitement
<i>Polyommatus icarus</i>	33	0.053
<i>Coenonympha pamphilus</i>	136	0.73
<i>Cyaniris semiargus</i>	58	0.0004 ***
<i>Pieris rapae</i>	28	0.26
<i>Pieris napi</i>	66	<2e-16 ***
<i>Maniola jurtina</i>	623	6.01e-07 ***
<i>Aglais urticae</i>	103	0.004 **

4. Analyse des interactions de butinage entre les rhopalocères et les plantes

Aucune interaction de butinage n'a été enregistrée au mois de mai. Les papillons se reposaient sur les fleurs ou se reproduisaient, mais au moment des passages zéro interaction de butinage. Au mois de juin ont été recensées un total de 100 interactions lors des passages dans les prairies (Figure 10 et 11). 13 espèces de rhopalocères sur 25 ont été enregistrées ayant une interaction avec une ou plusieurs des 11 plantes à fleurs sur un total de 45 plantes sur l'ensemble des prairies.

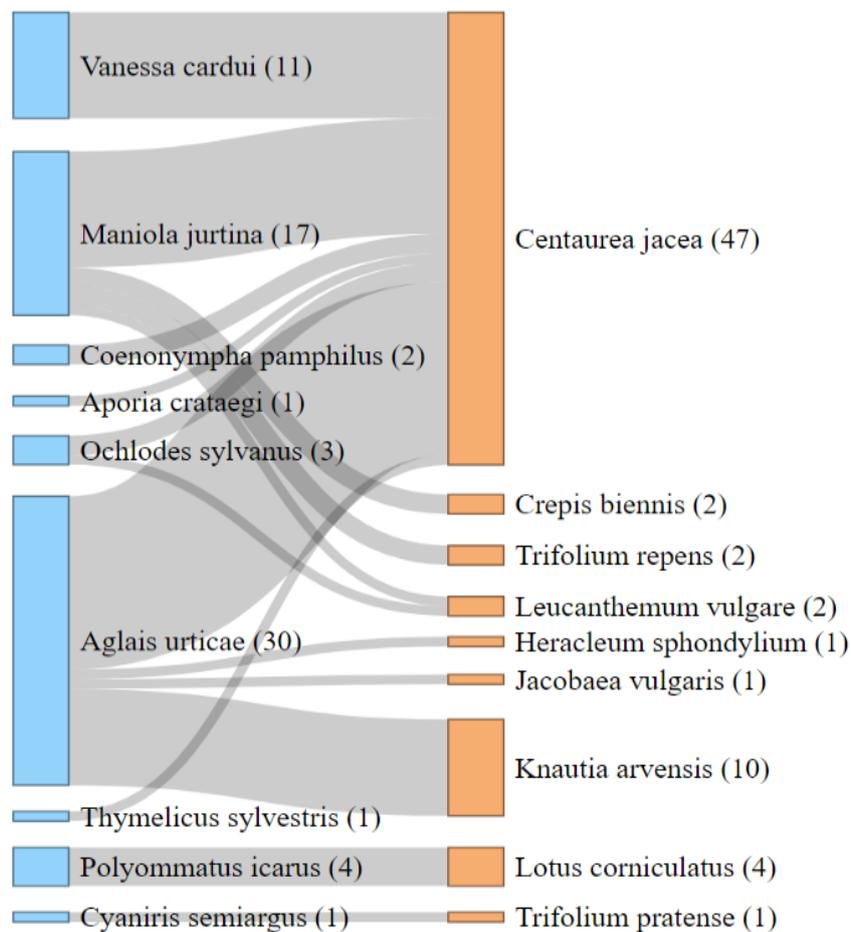


Figure 10 : Diagrammes de Sankey montrant les interactions de butinages dans la zone non-fertilisée. Les espèces en bleu correspondent aux espèces de papillons., les espèces en orange correspondent aux espèces florales. Les chiffres entre parenthèses à côté des espèces correspondent aux nombres d'interactions associées à celles-ci.

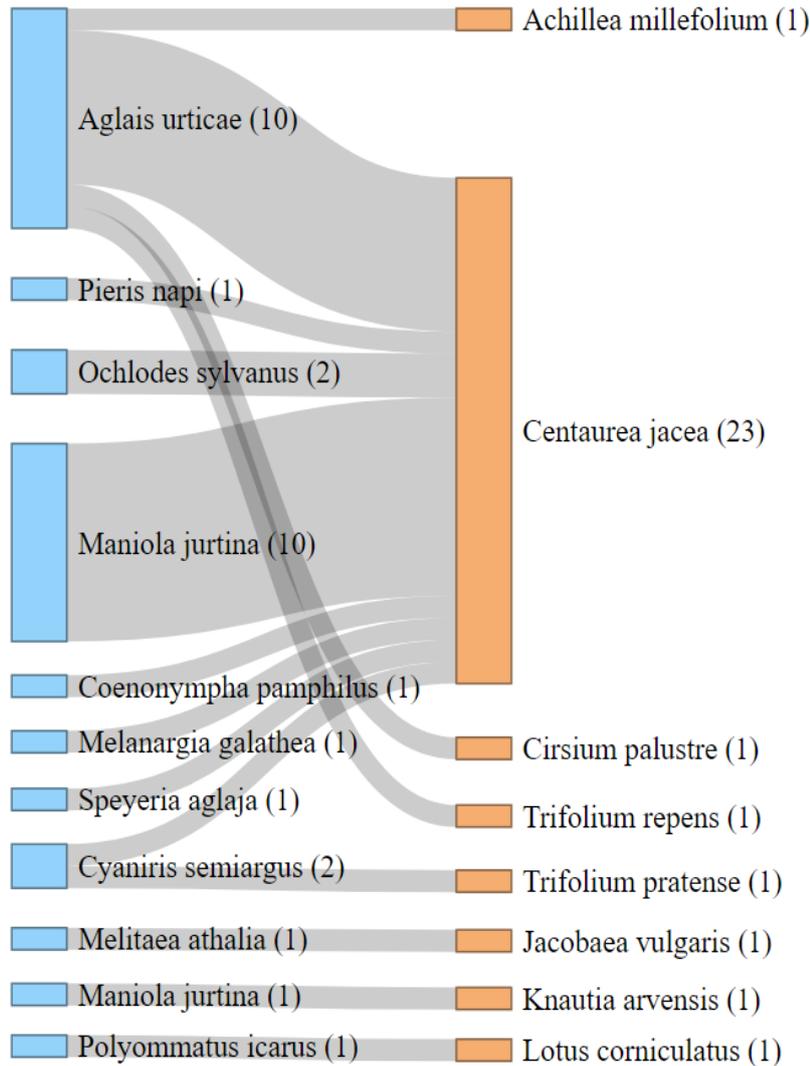


Figure 11 : Diagrammes de Sankey montrant les interactions de butinages dans la zone fertilisée. Les espèces en bleu correspondent aux espèces de papillons., les espèces en orange correspondent aux espèces florales. Les chiffres entre parenthèses à côté des espèces correspondent aux nombres d'interactions associées à celles-ci.

Il existe une différence entre les observations dans la zone non-fertilisée (Figure 10) et la zone fertilisée (Figure 11). Il y a 70 interactions recensées dans la zone non-fertilisée et 30 interactions dans l'autre. *Centaurea jacea* (Centaurée jacée) est l'espèce de plante avec le plus d'interactions recensées dans les deux zones. Elle a été majoritairement butinée par *Aglais urticae* (Petite tortue) et *Maniola jurtina* (Myrtil) dans la zone fertilisée et avec *Vanessa cardui* (Belle dame) dans la zone non-fertilisée. Dans celle-ci, les rhopalocères les plus généralistes ont été *Aglais urticae* (Petite tortue) et *Maniola jurtina* (Myrtil) avec 4 espèces de plantes butinées chacune. Dans la zone fertilisée, c'est uniquement *Aglais urticae* (Petite tortue) qui a aussi butiné 4 espèces de fleurs différentes. La plupart des autres papillons n'ont butiné

qu'une espèce de plante par exemple *Polyommatus icarus* (Azuré commun ou Argus bleu) et *Coenonympha pamphilus* (Pamphile). Il y a quelques exceptions de papillons qui ont butiné deux espèces de plantes différentes. *Trifolium pratense* (Trèfle des près) et *Lotus corniculatus* (Lotus corniculé) sont butinées par les mêmes espèces de papillons dans les deux types de zones. *Trifolium repens* (Trèfle blanc) et *Knautia arvensis* (Knautie des champs) sont les deux espèces qui n'ont pas été butinées par la même espèce dans chaque zone. *Knautia arvensis* (Knautie des champs) a été butinée par *Aglais urticae* (Petite tortue) dans la zone non-fertilisée et par *Maniola jurtina* (Myrtil) dans la zone fertilisée. En revanche, *Trifolium repens* (Trèfle blanc) a été butinée par les mêmes espèces de papillons citées précédemment, mais dans les zones inverses.

5. Étude de la différence entre les compositions de chaque parcelle

Le pourcentage de variance pouvant expliquer correctement l'analyse doit être à minima de 70% (Kassambara, 2017). Pour atteindre les 70%, il faut considérer les trois premières composantes (PC1 = 46.8% , PC2 = 18.6% et PC3 = 11.9%) (Figure 12). Cependant, sur les Figures 13 et 14, seules les composantes 1 et 2 sont représentées. Elles représentent ensemble environ 60% de la variance, ce qui est un pourcentage acceptable pour effectuer l'analyse (Kassambara, 2017).

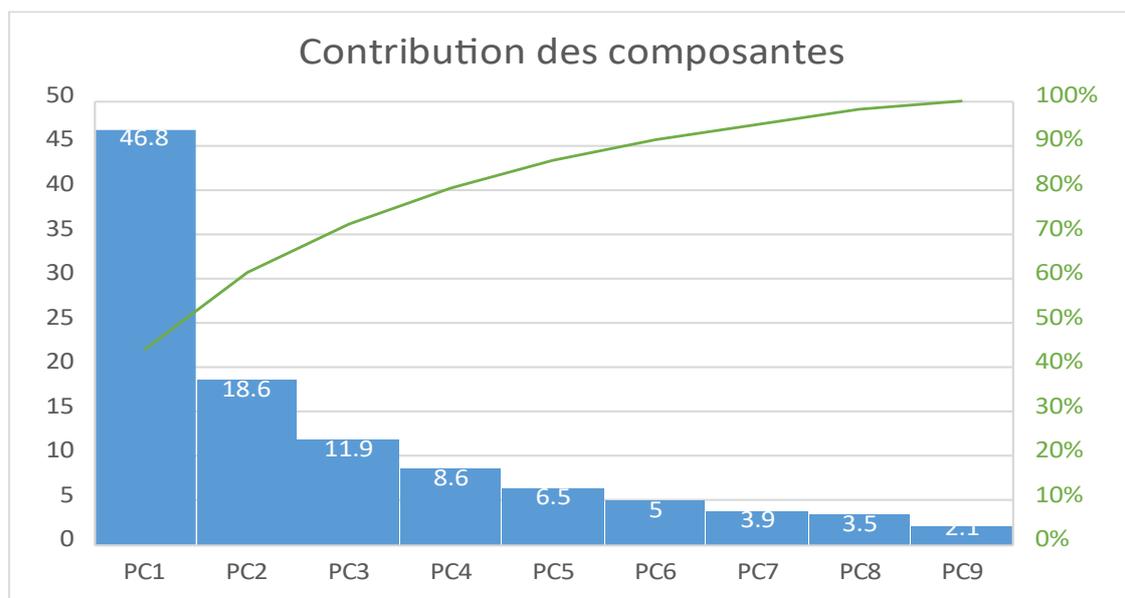


Figure 12 : Représentation en barres des différentes composantes (PC) de l'analyse. La courbe verte correspond à l'accumulation des pourcentages des barres bleues.

Les variables de l'analyse sont les espèces présentes dans les prairies (Figure 13). Ainsi, les variables Azuré des anthyllides (*Cyaniris semiargus*), Azuré commun (*Polyommatus icarus*) et Mélitée du mélampyre (*Melitaea athalia*) sont fortement corrélées positivement à PC1, car ce sont les variables les plus proches de 1 sur l'axe des abscisses. Elles sont aussi corrélées entre elles du fait de leur rapprochement. Au contraire, la variable Piéride de la rave (*Pieris rapae*) est plutôt aux alentours de 0.2 sur l'axe des abscisses qui explique donc moins PC1. La variable Myrtil (*Maniola jurtina*) est aussi fortement corrélée à PC1, mais négativement. Concernant PC2, sur l'axe des ordonnées, les variables Paon du jour (*Aglais io*) et Cuivré commun (*Lycaena phlaeas*) sont les deux variables corrélées le plus positivement. En revanche, la variable Fadet commun (*Coenonympha pamphilus*) est fortement corrélée négativement avec PC2.

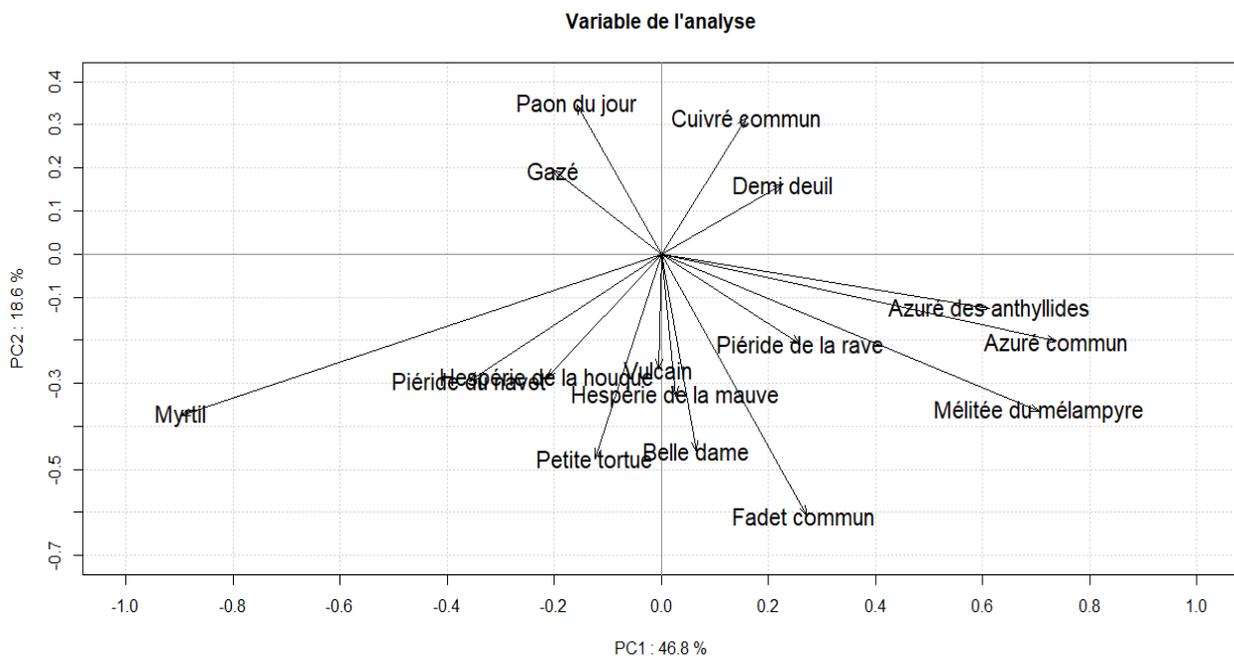


Figure 13 : Représentation des variables de l'analyse des coordonnées principales, les espèces de papillons sont présentées avec leur nom vernaculaire.

L'analyse des coordonnées principales (Figure 14) représente les distances entre les différentes parcelles expliquées par les variables vues précédemment. Par conséquent, les parcelles allant dans la même direction que les variables ont un nombre d'individus plus élevé dans la variable concernée. L'annexe 1 permet de confirmer la justification de l'analyse. Les zones fertilisées ont tendance à être corrélées positivement à PC2 (6 zones sur 10) et à PC1 (7 zones sur 10). Tandis que les zones non-fertilisées sont corrélées négativement à PC1 (6 zones sur 10) et négativement à PC2 (7 zones sur 10). Les parcelles proches du centre 0,0 telles que 09/ZF et la prairie 23C (avec ZF et Z0) a donc tendance à avoir en moyenne des

valeurs plus faibles pour les variables que les autres parcelles. En revanche, 07/Z0 se trouvant à l'écart des autres parcelles en bas à gauche, il est probable qu'elle contienne plus de Myrtils (*Maniola jurtina*), de Fadets communs (*Coenonympha pamphilus*), de Piérides du navet (*Pieris napi*) et de Petites tortues (*Aglais urticae*) que d'autres papillons (Figure 13 et 14, Annexe 1). Les deux parcelles de la prairie 16 sont proches entre elles et à l'écart du reste des parcelles (en bas à droite). Elles sont caractérisées par les variables Azuré des anthyllides (*Cyaniris semiargus*), Azuré commun (*Polyommatus icarus*) et Mélitée du mélampyre (*Melitaea athalia*). La parcelle 23A/Z0 est la troisième parcelle corrélée fortement avec PC1, elle est représentée par les variables Azuré des anthyllides (*Cyaniris semiargus*), Azuré commun (*Polyommatus icarus*) et Demi-deuil (*Melanargia galathea*). Ensuite, sur la gauche du graphique, il y a plusieurs parcelles regroupées (13A/Z0, 13A/ZF, 13B/Z0, 09/Z0, 15B/Z0, 15A/Z0). Elles sont donc similaires dans leurs variables, avec un grand nombre de Myrtils (*Maniola jurtina*), il est possible aussi que la variable Piéride du navet (*Pieris napi*) soit prise en compte. Au sein d'une même prairie, les deux zones des parcelles 10, 16 et 13A n'ont pas beaucoup de différences. Tandis que les parcelles des prairies 07, 09, 15A et 15B ont très peu de similitudes (Figure 14).

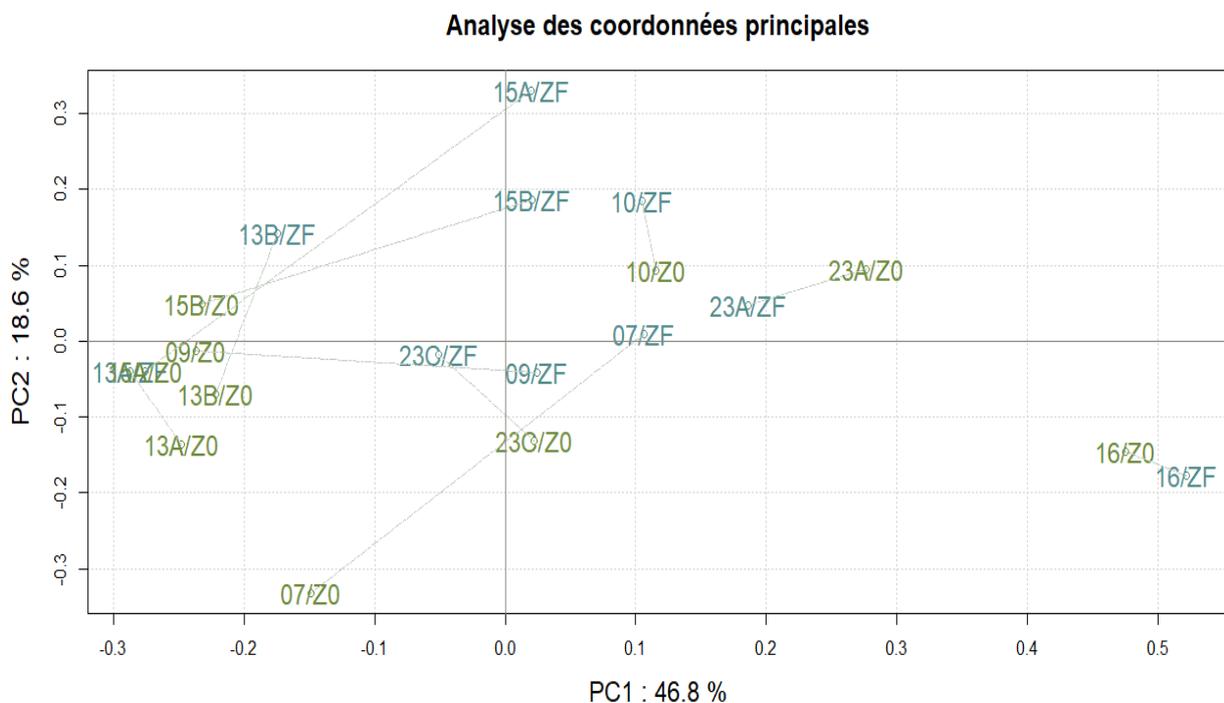


Figure 14 : Analyse des coordonnées principales. En bleu, les zones fertilisées. En vert, les zones non-fertilisées. Les pointillés relient les deux types de zones d'une même prairie. La différence entre les parcelles est corrélée positivement avec la longueur du trait en pointillé.

Discussion

Evolution de la population de papillon et des ressources florales

Le nombre d'individus de Rhopalocères a fortement augmenté à partir de juin, tandis que le nombre d'espèces n'a pas grandement augmenté (Figure 8). Cet accroissement est dû en bonne partie à un nombre d'individus de l'espèce *Maniola jurtina* (Myrtil) plus important mi-juin par rapport aux autres espèces. En effet, l'émergence des adultes de *Maniola jurtina* (Myrtil) est plus importante début juin (Lebeau, 2015). L'indice de Shannon indique qu'il y a légèrement plus d'espèces rares dans la zone fertilisée, tel que la présence de *Boloria dia* (Petite violette), *Speyeria aglaja* (Grand nacré) et *Thymelicus lineola* (Hespérie du dactyle) ; (Annexe 2) que dans la zone non-fertilisée. Cependant, la différence n'est pas significative et la répartition des espèces au sein de chaque zone est relativement équilibrée. De même, il n'y a pas de déséquilibre entre la zone fertilisée et la zone non-fertilisée, elles ont une dynamique similaire. Phoenix *et al.*, (2012) ont montré que même lorsque la diversité spécifique ne diminue pas, il peut avoir un changement dans la composition des communautés florales et faunistiques. Socher *et al.* (2013) ont aussi remarqué une faible augmentation de l'indice de Shannon due à la fertilisation. Ils ont émis comme hypothèse que c'était dû à une fertilisation des prairies ayant une diversité d'espèces initiales plus faibles. En effet, la diversité spécifique des deux zones étant loin de la diversité théorique (Tableau 3), la biodiversité qui est représentée actuellement dans chacune d'elle n'est pas à son optimum. Étant donné que la zone non-fertilisée n'a pas une diversité spécifique très importante, cette hypothèse pourrait concorder avec la présente étude. Cependant, il y a potentiellement une dégradation de l'habitat qui le rend moins favorable aux espèces de papillons. La présence d'*Heracleum sphondylium* (Berce commune) en plus forte quantité dans la zone fertilisée pourrait être un indicateur que la prairie commence à se détériorer (Couvreur *et al.* 2021). Étant donné qu'il n'y a pas de connaissance faunistique sur la période précédant la gestion avec la fertilisation, il n'est pas possible de confirmer cette dégradation. En revanche, cette étude peut servir de base une fois que cette gestion sera terminée et vérifier s'il y a un changement au sein des prairies.

Il a été prouvé que la fertilisation même à faible dose (environ 40kg N/ha.an) impacte la richesse spécifique (Kirkham *et al.* 1994, Tallowin *et al.* 1994). Elle favorise les graminées

par rapport aux dicotylédones (Schmitz *et al.*, 2014) (Figure 15). Ainsi, elle diminue le nombre d'espèces florales présentes dans le milieu, et cela se remarque par une réduction du nombre d'unités florales par unité de surface (Kirkham *et al.* 1994). En effet, les parcelles fertilisées avaient deux fois moins d'unités florales recensées cette année. La Figure 16 montre bien la différence entre les deux parcelles de la prairie 15B : la zone fertilisée présente moins de fleurs jaunes et plus de graminées. L'abondance des graminées provoque une concurrence pour la lumière due à une végétation plus haute (Mountford *et al.*, 1993) (Figure 15). Par conséquent, les espèces plus petites telles qu'*Ajuga reptans* (Bugle rampante) et *Lotus corniculatus* (Lotier corniculé) souffrent de cette compétition. *Lotus corniculatus* (Lotier corniculé), présent majoritairement dans la zone non-fertilisée (Annexe 5), est une espèce très prisée par la famille des Lycaenidae (Janz et Nylin, 1998), ce qui peut expliquer la préférence de *Cyaniris semiargus* (Azuré des anthyllides) pour la zone non-fertilisée (Tableau 4). Les prairies étudiées dans notre étude ont été fauchées à partir du 15 juin. Il serait intéressant de faire un suivi après cette date de fauche afin de comprendre les conséquences de celle-ci en lien avec la fertilisation sur la reproduction et l'évolution des populations de papillons. Une étude à ce propos a été réalisée par Weiner *et al.*, (2011).

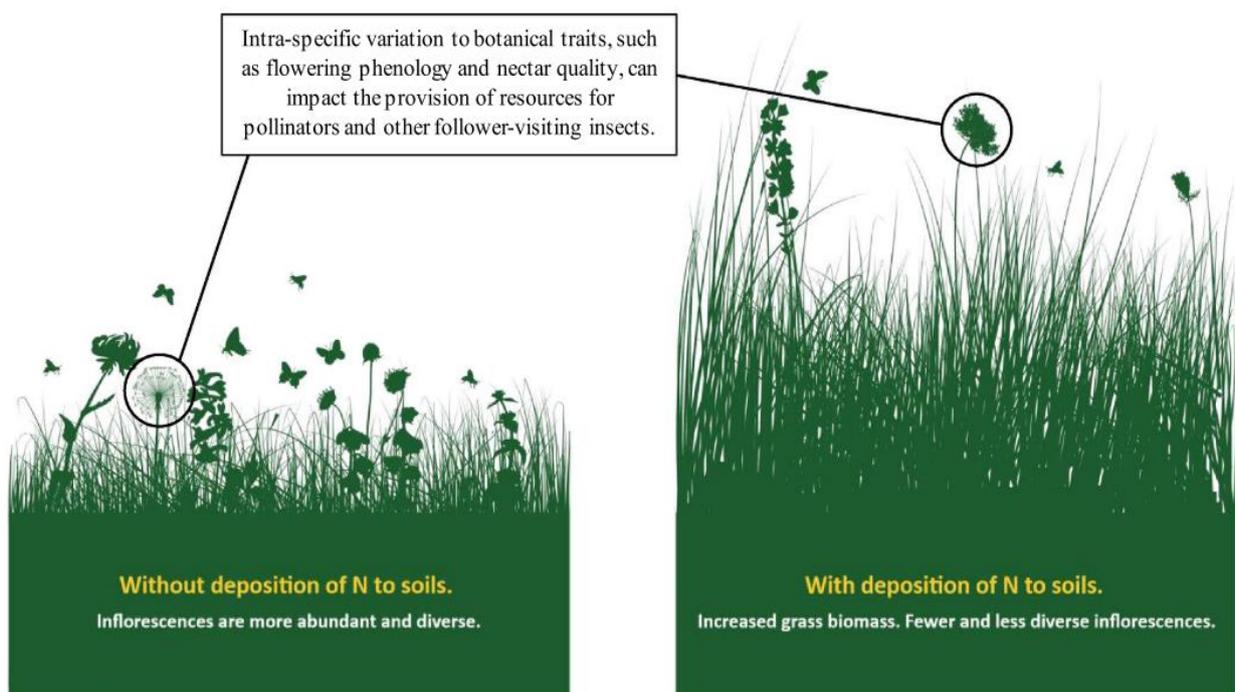


Figure 15 : L'image montre la perte d'espèces à fleurs et la dominance des graminées avec un dépôt d'azote élevé (David *et al.*, 2019).

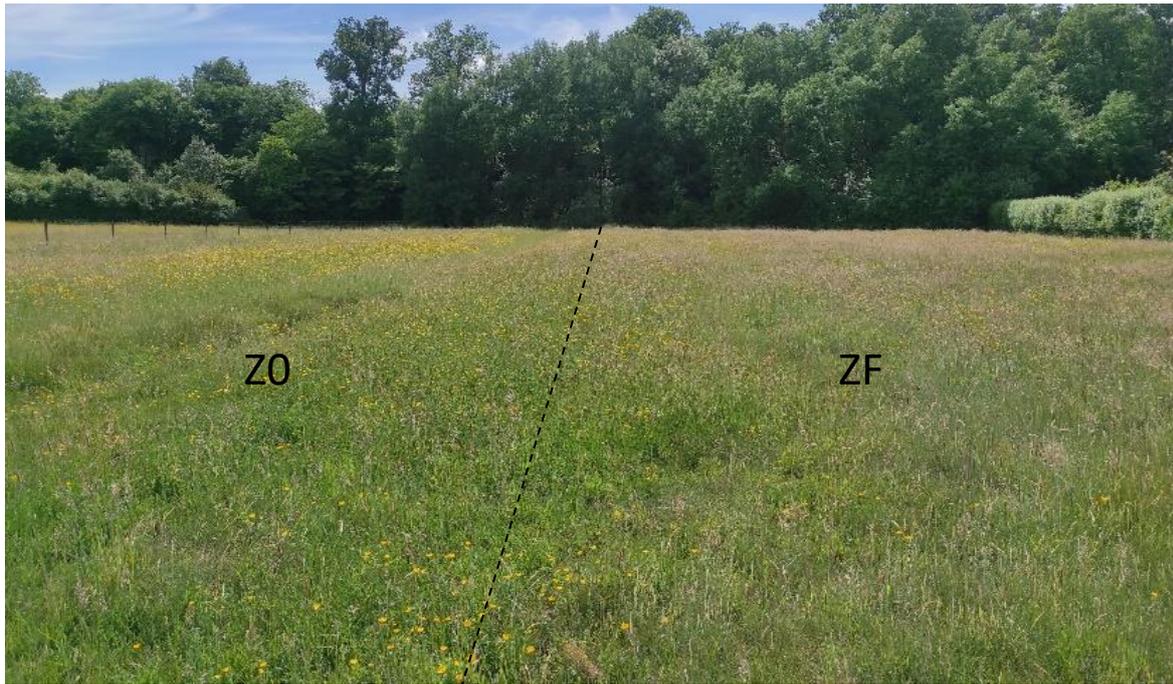


Figure 16 : Photo de la prairie 15B. Le trait en pointillé délimite les parcelles. A droite la zone fertilisée (ZF) et à gauche la zone non-fertilisée (Z0), (Photo d'E. Aupy).

Analyse de la biodiversité au sein des différentes parcelles

Les cortèges de papillons présents dans les parties non-fertilisées semblent en majorité être similaires de même que les cortèges au sein des parties fertilisées (Figure 14). Les parcelles 13A/Z0, 13B/Z0, 09/Z0, 15B/Z0, 15A/Z0 semblent avoir une composition de rhopalocères similaire avec une majorité de *Maniola jurtina* (Myrtil). En parallèle, la parcelle fertilisée de la prairie 13A a une dynamique similaire aux prairies non-fertilisées. Il est intéressant de remarquer qu'une grande partie des prairies ont une différence entre leurs deux parcelles (Figure 14). En effet, la prairie 7 a un écart entre ces deux parcelles. Cela est dû à une différence entre le nombre d'individus par espèce qui est plus important dans la zone non-fertilisée, mais aussi la présence d'une seule espèce supplémentaire dans la parcelle non-fertilisée (Annexe 1). La prairie 15A fonctionne de la même manière : il y a plus d'individus dans la zone non-fertilisée. A contrario, la prairie 9 a un nombre d'individus similaire entre les parcelles, mais la zone fertilisée présente plus d'espèces différentes. Pourtant, en regardant les espèces supplémentaires, ce ne sont pas des espèces rares : *Gonepteryx rhamni* (Citron), *Anthocharis cardamines* (Aurore) ou encore *Vanessa cardui* (Belle-Dame). Cette tendance à avoir plus d'individus au sein des parcelles non-fertilisées peut s'expliquer par la disponibilité des ressources florales et de leurs qualités. Cependant, il est possible d'émettre comme

hypothèse qu'étant donné qu'il y a majoritairement plus d'individus d'une même espèce présents dans la zone non-fertilisée, elles peuvent monopoliser les ressources. Cela obligerait les papillons plus rares et en nombre beaucoup plus réduit, de se tourner vers la zone fertilisée quitte à ne pas avoir une ressource de qualité. Pour vérifier cette hypothèse, il faudrait étudier le comportement des papillons au sein des différentes parcelles et ne pas se limiter aux interactions de butinages. Quelques études ont prouvé qu'il existe une compétition interspécifique entre certaines espèces de rhopalocères (Brower, 1962 et Jones *et al.*, 1998). Les espèces concernées ne sont pas celles de notre étude, mais c'est un facteur intéressant qu'il serait possible d'évaluer et qu'il faudrait prendre en compte. Sur le même principe, il existe des papillons plus territoriaux, comme *Coenonympha pamphilus* (Pamphile) (Wickman, 1985), qui se retrouvent en grand nombre dans les zones fertilisées (Annexe 2).

Effet de la fertilisation sur les interactions entre les papillons et les plantes

Parmi les sept espèces de rhopalocères les plus abondantes, quatre espèces ont montré une préférence significative pour la zone non-fertilisée (Tableau 4). De plus, il y avait 680 individus de papillons sur cette zone contrairement à 460 sur la zone fertilisée. Cette différence peut être corrélée à une composition chimique différente des plantes sur les sols fertilisés. En effet, David *et al.* (2019) ont prouvé que l'apport d'azote impactait la qualité de l'ensemble de la plante, y compris son nectar et son pollen (Figure 15). Le nectar des fleurs est vital pour les pollinisateurs après la longue période hivernale (O'Rourke *et al.*, 2014). Ainsi, une modification de la disponibilité en ressource florale peut engendrer des effets indésirables quant à la survie des espèces de rhopalocères. En effet, on ignore en grande partie comment les changements dans la phénologie de la floraison influenceront les communautés de pollinisateurs (Miller-Rushing *et al.*, 2010). Cependant, à de très faibles doses (de l'ordre de 10 kg N/ha.an), cela peut favoriser la sécrétion de nectar de certaines espèces (David *et al.*, 2019). Ceci pourrait expliquer la légère différence de diversité spécifique entre les deux types de parcelles. En effet, si la sécrétion de nectar est supérieure pour certaines espèces de fleurs, cela peut favoriser les interactions avec certaines espèces rares telles que *Speyeria aglaja* (Grand nacré) (Muñoz *et al.* 2005 ; Burkle et Irwin 2010). La vigilance est de mise quant à l'effet de l'azote sur les espèces végétales puisque toutes les études n'expérimentent pas sur l'ensemble des espèces ici présentes.

D'après David *et al.*, (2019), certaines espèces florales sont nettement plus impactées lorsque le sol est fertilisé. *Ranunculus acris* (Renoncule âcre), *Ajuga reptans* (Bugle rampante), *Ranunculus repens* (Renoncule rampante) et *Lotus corniculatus* (Lotier corniculé) ont un recensement d'unités florales plus important dans la zone non-fertilisée (Annexe 5). L'étude de David *et al.* (2019) concorde avec ces résultats, ces espèces semblent fortement affectées par la fertilisation du milieu. *Galium mollugo* (Caille-lait blanc), *Stellaria graminea* (Stellaire graminée), *Achillea millefolium* (Achillée millefeuille) et *Heracleum sphondylium* (Berce commune) font partie des espèces qui ne sont pas impactées par une fertilisation ni par un ajout d'herbicide ou d'insecticide (David *et al.*, 2019). Cela coïncide avec le nombre d'unités florales plus élevé dans la zone fertilisée au sein de cette présente étude (Annexe 5). *Leucanthemum vulgare* (Marguerite commune) est plus présent au sein de la zone non-fertilisée mais d'après David *et al.*, (2019), elle n'est pas reconnue comme étant perturbée par la fertilisation ni par un autre traitement. Cependant, les prairies de notre étude ne sont fertilisées que depuis 2020. Il faut prendre en considération le fait que les effets de cette fertilisation ne sont pas à leur maximum et qu'ils vont évoluer avec le temps. Il serait intéressant de faire une étude au terme de la gestion par fertilisation.

Achillea millefolium (Achillée millefeuille) a été butinée uniquement par *Aglais urticae* (Petite tortue) dans la zone fertilisée (Figure 11) bien qu'elle soit la deuxième plus importante ressource sur la parcelle fertilisée mi-juin (Figure 9). En effet, cette espèce de plante ne serait pas une priorité pour les papillons lorsque d'autres espèces plus intéressantes sont présentes sur la parcelle (Andersson, 2003). *Centaurea jacea* (Centaurée jacée) a été la plante la plus visitée avec 47 interactions dans la zone non fertilisée (Figure 10) et 23 dans la zone fertilisée (Figure 11). Elle a aussi attiré le plus d'espèces différentes avec 72% des espèces de la zone fertilisée et 66% des espèces de la zone non-fertilisée. Cette attractivité est causée par sa production mellifère importante. En effet, d'après Baude *et al* (2016), *Centaurea jacea* (Centaurée jacée) produit 1 177.75 µg par unité florale par jour (µg/UF/jour) (Annexe 5). Le pic de floraison de *Centaurea jacea* mi-juin peut être corrélé avec la forte abondance de l'espèce *Maniola jurtina* (Myrtil) (Lebeau *et al.*, 2017) puisque la centaurée fait partie des plantes les plus appréciées par *Maniola jurtina* (Myrtil) (Lebeau, 2015). *Centaurea jacea* (Centaurée jacée) a été la plante avec le plus d'interactions dans la zone fertilisée cela peut s'expliquer par le fait que cette espèce est plus haute que les autres plantes à fleurs et se retrouve condensée à différents endroits, ainsi elle est plus visible parmi les hautes graminées

(Ouvrard et al., 2018). Le mois de mai n'a pas connu beaucoup d'interactions entre les rhopalocères et les espèces florales, car les espèces les plus intéressantes telles que *Centaurea jacea* (Centaurée jacée) et *Lotus corniculatus* (Lotier corniculé) ont eu leurs pics de floraison au mois de juin.

WallisDeVries and Van Swaay (2017) ont établi un index (CNI : Community Nitrogen Index) permettant d'établir une relation entre certaines espèces de rhopalocères et un taux optimum d'azote. Au sein cette liste, vingt espèces sont présentes dans notre étude. Les espèces sont classées dans quatre catégories suivant leur limite face à une exposition à l'azote. *Speyeria aglaja* (Grand nacré) ayant une limite basse a pourtant été retrouvée dans la zone fertilisée. Au contraire, *Thymelicus sylvestris* (Hespérie de la houque) faisant partie de cette même catégorie n'a pas été recensée dans la partie fertilisée. *Maniola jurtina* (Myrtil) et *Aglais urticae* (Petite tortue) sont reconnus comme supportant respectivement un taux moyen et fort d'azote dans le milieu. Pourtant, ils ont tous deux préféré la zone non-fertilisée. Par conséquent, il est difficile d'émettre une hypothèse concernant l'effet d'une possible charge critique d'azote du sol des prairies sur les populations de papillons dans cette étude. Plusieurs études montrent également l'impact des dépôts de l'azote atmosphérique (David *et al.*, 2019 et Öckinger *et al.*, 2006), cela pourrait s'additionner à l'effet de la fertilisation minérale provenant de l'agriculture.

De manière générale, la fertilisation n'est pas préconisée pour une gestion durable et non-impactante pour la biodiversité. Cependant, certaines plantes sont plus productives en nectar, mais cela peut générer une compétition et un déséquilibre de la richesse spécifique. La dose d'azote actuellement disposée sur les prairies (50 unités d'azote) ne dégrade pas entièrement les prairies pour le moment, il faudrait avoir un retour à la fin de la gestion. Si on considère la rentabilité pour l'agriculteur et la conservation de la biodiversité au sein des prairies, la gestion actuelle est une méthode convenable à certaines conditions : si la dose d'azote est disposée sur l'ensemble de la prairie, il serait intéressant d'avoir des zones refuges et de faucher du centre vers l'extérieur afin d'avoir une fuite de la biodiversité vers les zones non fauchées.

Conclusion

Cette étude avait pour principal objectif d'étudier l'impact de la fertilisation sur les populations de rhopalocères et les ressources florales au sein des prairies maigres de fauches. Le but était d'évaluer l'existence d'une différence entre les populations de rhopalocères au sein des parcelles fertilisées et non-fertilisées.

La population de rhopalocère au sein des prairies a globalement augmenté durant la saison 2022 avec un pic à la moitié du mois de Juin. Cependant, il existe une différence entre la zone fertilisée et non-fertilisée. La diversité spécifique étant similaire pour les deux zones, la composition est néanmoins différente. Le nombre d'individus dans la zone non-fertilisée est supérieur à la partie fertilisée. Cela est dû à la dominance en nombre de l'espèce *Maniola jurtina* (Myrtil) par rapport aux autres espèces, et une disponibilité plus forte de *Centaurea jacea* (Centaurée jacée). Celle-ci est connue pour sa qualité et sa quantité de nectar. La différence avec la zone fertilisée peut s'expliquer par une dégradation du milieu dû à la fertilisation, indiquée par la présence en plus grand nombre d'*Heracleum sphondylium* (Berce commune). La fertilisation favorise la pousse de graminées, empêchant ainsi les petites fleurs de se développer. Une compétition est alors mise en place. *Centaurea jacea* (Centaurée jacée) étant une plante haute, elle arrive à se démarquer des autres et subit moins la pression. C'est la raison pour laquelle *Centaurea jacea* est la plante la plus butinée dans la partie fertilisée. Elle a aussi été majoritairement butinée dans la zone non-fertilisée en raison de sa qualité nutritive.

Une majorité d'espèces ont préféré la zone non-fertilisée de part la qualité du nectar disponible. En effet, il a été prouvé qu'une fertilisation du milieu impacte la physiologie de la plante et donc la composition chimique du nectar (David *et al.*, 2019). Les interactions de butinages ont été plus nombreuses dans la zone non-fertilisée. Cette différence peut s'expliquer par une compétition des espèces avec le plus d'individus par rapport aux espèces plus rares avec un effectif très faible.

Il existe donc une différence visible entre les parcelles fertilisées et non-fertilisées. Cependant, cette différence n'est peut-être pas significative sur le long terme. Pour admettre cet écart, il faudrait effectuer une étude similaire au terme du contrat de gestion. En effet, en l'absence de données passées, il n'est pas possible de valider cette hypothèse. En revanche, cette étude peut être une base pour une étude future. Il serait aussi intéressant pour

comprendre le fonctionnement de l'écosystème de la prairie maigre de fauche avec une fertilisation, et de prendre en considération le comportement général des papillons. Ainsi, il serait possible de confirmer l'existence d'une compétition pour la ressource nectarifère. En ces temps de changement climatique, la compétition à la ressource va être de plus en plus dure. La fertilisation du milieu additionnée avec le changement climatique, la pollution et la destruction des habitats vont impacter de plus en plus fortement les populations de papillons en modifiant la phénologie et la physiologie des plantes. Si la compréhension des interactions entre les papillons et les autres insectes était mieux connue, il serait aussi possible d'adapter la gestion des prairies en fournissant un apport de ressource florale compensant la compétition.

Bibliographie

Programmes et packages :

- Microsoft Corporation. (2016). Microsoft Excel. <https://office.microsoft.com/excel>
- RStudio Team (2019). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, Inc., Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>.
- Allaire, J. J., Gandrud, C., Russell, K., & Yetman, C. (2017). networkD3: D3 JavaScript Network Graphs from R. R Package, version 0.4. <https://cran.r-project.org/package=networkD3>
- Models, T. L. M., Fit, D., Rcpp, L., Imports, R., Vignettebuilder, D., Gpl, L., Utf-, E., Bates, A. D., Maechler, M., Bolker, B., Walker, S., Haubo, R., Christensen, B., Singmann, H., Dai, B., Scheipl, F., & Grothendieck, G. (2022). Package 'lme4.'
- Oksanen, J., Simpson, G. L., & Blanchet, F. G. (2022). Vegan: Community Ecology Package. R package version 2.5–7. Available at: <https://cran.r-project.org/web/packages/vegan/vegan.pdf> (Accessed April 17, 2022).
- R Core Team (2022). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org>.
- Russell, A., Lenth, V., Buerkner, P., Herve, M., Love, J., Singmann, H., & Lenth, M. R. V. (2022). Package 'emmeans' R topics documented : 34(1), 216–221. <https://doi.org/10.1080/00031305.1980.10483031>>.License

BIBLIOGRAPHIE :

- Aizen, M. A., Garibaldi, L. A., Cunningham, S. A., & Klein, A. M. (2009). How much does agriculture depend on pollinators? Lessons from long-term trends in crop production. *Annals of Botany*, 103 (9), 1579–1588.
- 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>
- BOUCHER Isabelle et FONTAINE Nicolas. (2010). La biodiversité et l'urbanisation, Guide de bonnes pratiques sur la planification territoriale et le développement durable, ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire, coll. « Planification territoriale et développement durable », 178 p

- Brower, L. P. (1962). Evidence for interspecific competition in natural populations of the monarch and queen butterflies, *Danaus plexippus* and *D. gilippus berenice* in south central Florida. *Ecology*, 43(3), 549-552.
- Burel, F., Garnier, E., Amiaud, B., Aulagnier, S., Butet, A., Chauvel, B., Carré, G., Cortet, J., Couvet, D., Joly, P., others. (2008). Chapitre 1. Les effets de l'agriculture sur la biodiversité. ESCo Agriculture Biodiversité.
- Burkle LA, Irwin RE (2010) Beyond biomass: measuring the effects of community-level nitrogen enrichment on floral traits, pollinator visitation and plant reproduction. *J Ecol* 98:705–717. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2010.01648.x>
- Cahill, A. E., Aiello-Lammens, M. E., Caitlin Fisher-Reid, M., Hua, X., Karanewsky, C. J., Ryu, H. Y., Sbeglia, G. C., Spagnolo, F., Waldron, J. B., Warsi, O., & Wiens, J. J. (2013). How does climate change cause extinction? *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 280 (1750).
- Calu G. (2020). Page consultée le 30 juillet 2022. Les indices de diversité en écologie des écosystèmes, [En ligne], URL : <https://louernos-nature.fr/indices-de-diversite-ecologie-ecosystemes/#:~:text=Indice%20d'%C3%A9quitabilit%C3%A9%20de%20Pi%C3%A9lo, donc%20entre%20%20et%201>
- Commission européenne (no date). Page consultée le 30 mars 2022. La politique agricole commune en bref, [En ligne], URL : https://ec.europa.eu/info/food-farming-fisheries/key-policies/common-agricultural-policy/cap-glance_fr#title
- Conseil des communautés européennes. (2006). Directive 92/43/CEE du 21 mai 1992 concernant la conservation des habitats naturels ainsi que de la faune et de la flore sauvages. *Journal Officiel Des Communautés Européennes*, 66.
- Couvreur J.-M., Peeters A. et Delescaille L.-M., Halford M. et Peeters A. (2021) Les habitats prairiaux et les mégaphorbiaies. In : Delescaille L.-M., Wibail L., Claessens H., Dufrêne M., Mahy G., Peeters A. et Sérusiaux E. (éditeurs) (2020). *Les Habitats d'Intérêt Communautaire de Wallonie*. Publication du Département de l'Étude du Milieu Naturel et Agricole (SPW- DGARNE). Série « Faune – Flore – Habitat », n° 10, Gembloux : 113 p.

- David, T. I., Storkey, J., & Stevens, C. J. (2019). Understanding how changing soil nitrogen affects plant–pollinator interactions. *Arthropod-Plant Interactions*, 13(5), 671–684. <https://doi.org/10.1007/s11829-019-09714-y>
- Direction générale de l’Agriculture. (2006). Dossier : MAE, où en sommes-nous ? *Les Nouvelles de l’automne*, p10–27.
- Dopagne, C. (2016). Suivi des populations papillons diurnes sur les bandes fleuries, MC8. 37.
- Dormann, C. F., & Strauss, R. (2014). A method for detecting modules in quantitative bipartite networks. *Methods in Ecology and Evolution*, 5(1), 90–98.
- Dufrêne, M. (2005). Le réseau Natura2000 en Région wallonne : stratégies , réseau écologique et mise en œuvre. *Chaire Tractebel*, 167–185.
- Environmental Protection Agency (EPA) U.S. (2008) EPA’s 2008 Report on the Environment. National Center for Environmental Assessment, Washington, DC; EPA/600/R-07/045F. Available from the National Technical Information Service, Springfield, VA, and online at <http://www.epa.gov/roe>.
- Fahrig, L. (2003). Effects of Habitat Fragmentation on Biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 34, 487–515.
- Goulson, D. (2003). Effects of Introduced Bees on Native Ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 34, 1–26.
- Goulson, D., & Hughes, W. O. H. (2015). Mitigating the anthropogenic spread of bee parasites to protect wild pollinators. *Biological Conservation*, 191, 10–19.
- Hegland, S. J., Nielsen, A., Lázaro, A., Bjerknes, A. L., & Totland, Ø. (2009). How does climate warming affect plant-pollinator interactions? *Ecology Letters*, 12 (2), 184–195.
- HOUARD X. & JAULIN S. (coord.), (2018) – Plan national d’actions en faveur des « Papillons de jour » - Agir pour la préservation de nos lépidoptères diurnes patrimoniaux 2018-2028. Office pour les insectes et leur environnement – DREAL Auvergne-Rhône-Alpes - Ministère de la Transition écologique et solidaire : 64 p.
- Humphreys, A. M., Govaerts, R., Ficinski, S. Z., Nic Lughadha, E., & Vorontsova, M. S. (2019). Global dataset shows geography and life form predict modern plant extinction and rediscovery. *Nature Ecology and Evolution*, 3 (7), 1043–1047.

- Hutchings, M. J., Robbirt, K. M., Roberts, D. L., & Davy, A. J. (2018). Vulnerability of a specialized pollination mechanism to climate change revealed by a 356-year analysis. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 186 (4), 498–509.
- IPBES. (2019). Le dangereux déclin de la nature : Un taux d’extinction des espèces « sans précédent » et qui s’accélère. Ipbes. <https://ipbes.net/news/Media-Release-Global-Assessment-Fr>
- IUCN (2022). The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2022-1. <https://www.iucnredlist.org>
- Jacquemet, A. (2021). Le déclin des insectes. Les Notes Scientifiques de l’Office.
- JACQUOT P., (2012). Les papillons menacés en Franche-Comté. Cuivré de la bistorte *Lycaena helle* (Denis & Schiffermüller, 1775). Union européenne, Direction régionale de l’Environnement, de l’Aménagement et du Logement de Franche-Comté, Conseil régional de Franche-Comté, 2 p.
- Janz, N., & Nylin, S. (1998). Butterflies and plants: a phylogenetic study. *Evolution*, 52(2), 486–502. <https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.1998.tb01648.x>
- Jing, G., Li, W., Yu, K., Ratajczak, Z., Kallenbach, R. L., & Cheng, J. (2017). Effects of fertilization, burning, and grazing on plant community in the long-term fenced grasslands. *Plant, Soil and Environment*, 63 (4), 171–176.
- Jones, M. J., Lace, L. A., Harrison, E. C., & Stevens-Wood, B. (1998). Territorial behavior in the speckled wood butterflies *Pararge xiphia* and *P. aegeria* of Madeira: a mechanism for interspecific competition. *Ecography*, 21(3), 297-305.
- Kassambara, A. (2017). Practical guide to principal component methods in R: PCA, M (CA), FAMD, MFA, HCPC, factoextra (Vol. 2). Sthda.
- Kearns, C. A., Inouye, D. W., & Waser, N. M. (1998). Endangered mutualisms: The conservation of plant-pollinator interactions. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 29 (November), 83–112.
- Kirkham F.W., Tallowin J.R.B., Wilkins R.J., Mountford J.O. and Lakhani K.H. (1994) The effect of nitrogen on species diversity and agricultural production on the Somerset Moors. IGER : 16.
- Klaus, V. H., Schäfer, D., Prati, D., Busch, V., Hamer, U., Hoever, C. J., Kleinebecker, T., Mertens, D., Fischer, M., & Hölzel, N. (2018). Effects of mowing, grazing and

fertilization on soil seed banks in temperate grasslands in Central Europe. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 256 (August 2017), 211–217.

- Klimek, S., Richter gen. Kemmermann, A., Hofmann, M., & Iselstein, J. (2007). Plant species richness and composition in managed grasslands: The relative importance of field management and environmental factors. *Biological Conservation*, 134(4), 559–570. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2006.09.007>
- Kovács-Hostyánszki, A., Li, J., Pettis, J., Settele, J., Aneni, T., Espíndola, A.,
- Kahono, S., Szentgyörgyi, H., Thompson, H., Vanbergen, A. J., and R. Vandame. 2016: Chapter 2: Drivers of change of pollinators, pollination networks and pollination. In IPBES (2016): The assessment report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services on pollinators, pollination and food production. S.G. Potts, V. L. Imperatriz-Fonseca, and H. T. Ngo (eds.). Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn, Germany, pp. 27-149.
- Krauss, J., Bommarco, R., Guardiola, M., Heikkinen, R. K., Helm, A., Kuussaari, M., Lindborg, R., Öckinger, E., Pärtel, M., Pino, J., Pöyry, J., Raatikainen, K. M., Sang, A., Stefanescu, C., Teder, T., Zobel, M., & Steffan-Dewenter, I. (2010). Habitat fragmentation causes immediate and time-delayed biodiversity loss at different trophic levels. *Ecology Letters*, 13 (5), 597–605
- Kwak, M. M., Velterop, O., & van Andel, J. (1998). Pollen and gene flow in fragmented habitats. *Applied Vegetation Science*, 1 (1), 37–54.
- L'essentiel (2018). Page consultée le 30 mars 2022. Le Luxembourg veut sauver ses papillons, juin 2018. [En ligne], URL : <https://www.lessentiel.lu/fr/story/le-luxembourg-veut-sauver-ses-papillons-341107273546>
- La biodiversité en Wallonie (no date). Page consultée le 27 mars 2022. Ce qu'il faut savoir sur les papillons... [En ligne]. URL : <http://biodiversite.wallonie.be/fr/generalites.html?IDC=2939>
- Langlois, D., & Gilg, O. (2007). Méthode de suivi des milieux ouverts par les Rhopalocères dans les Réserves Naturelles de France. 34.
- Lebeau, J. (2015). Nectar resource limitation in agricultural landscapes : effects on behaviour and life-history traits in the meadow brown butterfly (*Maniola jurtina*).

[https://dial.uclouvain.be/pr/boreal/object/boreal%3A162113/datastream/PDF_01/vi
ew](https://dial.uclouvain.be/pr/boreal/object/boreal%3A162113/datastream/PDF_01/vi
ew)

- Lebeau, J., Wesselingh, R. A., & Van Dyck, H. (2017). Flower use of the butterfly *Maniola jurtina* in nectar-rich and nectar-poor grasslands: a nectar generalist with a strong preference? *Insect Conservation and Diversity*, 10(3), 258–270. <https://doi.org/10.1111/icad.12222>
- Le gouvernement du Grand Duché de Luxembourg, (2021). Plan national d'actions pour la préservation des insectes pollinisateurs 2021-2026. 61p.
- Le gouvernement du Grand Duché de Luxembourg : emwelt.lu, (2020). Page consultée le 27 mars 2022. Papillons [En ligne] . URL : https://environnement.public.lu/fr/natur/biodiversite/mesure_3_zones_especes_protgees/espeches_protgees/tiere/schmetterlinge.html
- Life Papillons (no date). Page consultée le 15 avril 2022. Le projet Life Papillons, [En ligne], URL : <https://www.life-papillons.eu/index2c3c.html?id=577&L=548>
- Marcon Eric. (2015). Mesures de la Biodiversité. Master. Kourou, France. cel-01205813v5
- MEA (Millennium Ecosystem Assessment) (2005) Ecosystems and human well-being: synthesis. Island Press, Washington, D.C.
- Miller-Rushing AJ, Høye TT, Inouye DW, Post E (2010) The effects of phenological mismatches on demography. *Philos Trans R Soc B* 365:3177–3186. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0148>
- Ministère de la transition écologique (2020). Page consultée le 06 mars 2022. Les insectes pollinisateurs nous en mettent plein la vue, [En ligne], URL : <https://www.ecologie.gouv.fr/insectes-pollinisateurs/>
- Ministère de la transition écologique (2022). Page consultée le 30 mars 2022. Réseau européen Natura 2000, [En ligne], URL : <https://www.ecologie.gouv.fr/reseau-europeen-natura-2000-0>
- Ministère de la transition écologique (2022). Page consultée le 15 avril 2022. Programme européen de financement LIFE, [En ligne], URL : <https://www.ecologie.gouv.fr/programme-europeen-financement-life>
- Ministère de l'agriculture et de l'alimentation. (2021). La politique agricole commune 2015-2020 - Annexe 10 : Les mesures agro-environnementales et climatiques - MAEC

(in French). 9. <https://agriculture.gouv.fr/mesures-agro-environnementales-et-climatique-maec-et-aides-lagriculture-biologique>

- Mougin Christian, Levrel Harold, Baudry Emmanuelle, Leadley Paul, Bonnaud Elsa, et al.. (2021) Les menaces sur la biodiversité. Enjeux de la transition écologique, EDP Sciences, 38p, 2021, 978-2-7598- 2662-9. fhal-03479058
- Mountford J, Lakhani K, Kirkham F (1993) Soil seed bank composition in relation to the above-ground vegetation in fertilized and unfertilized hay meadows on a Somerset peat moor. *J Appl Ecol* 30:321–332
- Muñoz AA, Celedon-Neghme C, Cavieres LA, Arroyo MTK (2005) Bottom-up effects of nutrient availability on flower production, pollinator visitation, and seed output in a high-Andean shrub. *Oecologia* 143:126–135. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1780-3>
- New, T. R. (1997). Are Lepidoptera an effective “umbrella group” for biodiversity conservation? *Journal of Insect Conservation*, 1 (1), 5–12
- New, T.R. (2005) *Invertebrate conservation and agricultural ecosystems*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Öckinger, E., Hammarstedt, O., Nilsson, S. G., & Smith, H. G. (2006). The relationship between local extinctions of grassland butterflies and increased soil nitrogen levels. *Biological Conservation*, 128(4), 564–573. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2005.10.024>
- O’Rourke, A. T., Fitzpatrick, U., & Stout, J. C. (2014). Spring foraging resources and the behaviour of pollinating insects in fixed dune ecosystems. *Journal of Pollination Ecology*, 13(17), 161–173. [https://doi.org/10.26786/1920-7603\(2014\)14](https://doi.org/10.26786/1920-7603(2014)14)
- Ouvrard, P., Jacquemart, A.-L., & Transon, J. (2018). Flower-strip agri-environment schemes provide diverse and valuable summer flower resources for pollinating insects. *Biodiversity and Conservation*, 27(9), 2193–2216. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1007/s10531-018-1531-0>
- Phoenix GK, Emmett BA, Britton AJ et al (2012) Impacts of atmospheric nitrogen deposition: responses of multiple plant and soil parameters across contrasting ecosystems in long-term field experiments. *Glob Chang Biol* 18:1197–1215. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02590.x>

- Pimentel, David & Zuniga, Rodolfo & Morrison, Doug. (2005). Update on the Environmental and Economic Costs Associated with Alien-Invasive Species in the United States. *Ecological Economics*. 52. 273–288. 10.1016/j.ecolecon.2004.10.002.
- Popović, M., Radaković, M., Durdević, A., Franeta, F., & Verovnik, R. (2014). Distribution and threats of *Phengaris teleius* (Lepidoptera: Lycaenidae) in northern Serbia. *Acta Zoologica Academiae Scientiarum Hungaricae*, 60 (2), 173–183.
- Préfet des Bouches-du-Rhône (2016). Les mesures agro-environnementales et climatiques (MAEC). Cap sur la PAC 2015 → 2020. 7 p. <https://www.bouches-du-rhone.gouv.fr/content/download/18135/112428/file/MAEC.pdf>
- Rease, J.T. and Decker, A.M. (1966) Yields, stands persistence, and carbohydrate reserves of perennial grasses as influenced by spring harvest stage, stubble height, and nitrogen fertilization. *Agronomy J.* 58, 322–325.
- Saville, N.M. (1993) Bumblebee ecology in woodlands and arable farmland. PhD Thesis, University of Cambridge, Cambridge, UK
- Schenk, M., Krauss, J., & Holzschuh, A. (2018). Desynchronizations in beeplant interactions cause severe fitness losses in solitary bees. *Journal of Animal Ecology*, 87 (1), 139–149.
- Schmitz, J., Hahn, M., & Brühl, C. A. (2014). Agrochemicals in field margins - An experimental field study to assess the impacts of pesticides and fertilizers on a natural plant community. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 193, 60–69. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.04.025>
- Socher, S. A., Prati, D., Boch, S., Müller, J., Baumbach, H., Gockel, S., Hemp, A., Schöning, I., Wells, K., Buscot, F., Kalko, E. K. V., Linsenmair, K. E., Schulze, E. D., Weisser, W. W., & Fischer, M. (2013). Interacting effects of fertilization, mowing and grazing on plant species diversity of 1500 grasslands in Germany differ between regions. *Basic and Applied Ecology*, 14 (2), 126–136.
- Stokes DL (2007). Things we like: human preferences among similar organisms and implications for conservation. *Hum Ecol.* 35: 361–369
- Tallowin J.R.B., Mountford J.O., Kirkham F.W., Smith R. and Lakhani K.H. (1994) The effect of inorganic fertilizer on a species-rich grassland : implications for nature conservation. In : *Grassland and Society*, 't Mannelje and Frame J. (eds). Proceedings of the 15th General Meeting of the EGF : 332-337

- Thomas, J. A. (2016). Butterfly communities under threat. *Science*, 353 (6296), 216–218.
- UICN France, MNHN, Opie & SEF (2012). La Liste rouge des espèces menacées en France — Chapitre Papillons de jour de France métropolitaine. Dossier électronique.
- Van Swaay, C.A.M. & Warren, M.S. (1999) Red Data book of European butterflies (Rhopalocera). *Nature and Environment*, No. 99, Council of Europe Publishing, Strasbourg.
- Van Swaay, C. A. M., Dennis, E. B., Schmucki, R., Sevilleja, C. G., Balalaikins, M., Botham, M., Bourn, N. A. D., Brereton, T., Cancela, J. P., Carlisle, B., Chambers, P., Collins, S., Dopagne, C., Escobés, R., Feldmann, R., Fernández-García, J. M., Fontaine, B., Gracianteparaluceta, A., Harrower, C., ... Roy, D. B. (2019). The EU Butterfly Indicator for Grassland species: 1990–2017: Technical Report. Butterfly Conservation Europe, 23. [https://butterfly-monitoring.net/sites/default/files/Publications/Technical report EU Grassland indicator 1990–2017 June 2019 v4 \(3\). pdf](https://butterfly-monitoring.net/sites/default/files/Publications/Technical report EU Grassland indicator 1990–2017 June 2019 v4 (3). pdf)
- WallisDeVries MF, van Swaay CAM (2017) A nitrogen index to track changes in butterfly species assemblages under nitrogen deposition. *Biol Conserv* 212:448–453. <https://doi.org/10.1016/j.bioco n.2016.11.029>
- Weiner, C. N., Werner, M., Linsenmair, K. E., & Blüthgen, N. (2011). Land use intensity in grasslands: Changes in biodiversity, species composition and specialisation in flower visitor networks. *Basic and Applied Ecology*, 12(4), 292–299. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2010.08.006>
- Wickman, P. O. (1985). Territorial defence and mating success in males of the small heath butterfly, *Coenonympha pamphilus* L.(Lepidoptera: Satyridae). *Animal Behaviour*, 33(4), 1162-1168.
- Wilson, E. O. (1987). *The Little Things That Run the World (The Importance and Conservation of Invertebrates)* Author (s): Edward O. Wilson Published by: Blackwell Publishing for Society for Conservation Biology Stable URL: <http://www.jstor.org/stable/2386020>. Blackwell Publishing for Society for Conservation Biology, 1 (4), 344–346
- WWF. (2020). Living Planet Report – 2020: Bending the curve of biodiversity loss. Almond, R.E.A., Grooten M. and Petersen, T. (Eds). WWF, Gland, Suisse.

Annexes

<u>Annexes</u>	53
<i><u>Annexe 1 : Abondance totale des Rhopalocères dans chaque parcelle.</u></i>	54
<i><u>Annexe 2 : Tableau représentant le nombre d'espèce de rhopalocères par zone.</u></i>	55
<i><u>Annexe 3 : Tableau regroupant le statut de conservation européenne et wallonne, et la législation du Grand Duché relative aux espèces de papillons avec le nombre d'individus totaux et le nombre de stations où sont présentes les différentes espèces.</u></i>	56
<i><u>Annexe 4 : Type d'habitat EUNIS des différentes parcelles en fonction de la phytosociologie et de la zoocénologie.</u></i>	57
<i><u>Annexe 5 : Tableau reprenant les unités florales par zone et la production nectarifère pour chaque espèce végétale. En rouge : les espèces ayant été butinées.</u></i>	58

Annexe 1 : Abondance totale des Rhopalocères dans chaque parcelle.

Relevé	Azuré commun	Cuivré commun	Demi argus	Collier de Corail	Piéride de la rave	Piéride du navet	Piéride du chou	Citron	Souci	Gazé	Aurore	Belle dame	Grand nacré
07/ZO	0	0	0	0	0	16	0	0	0	0	2	4	0
07/ZF	0	0	0	0	1	7	0	0	0	0	2	0	0
09/ZO	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0
09/ZF	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0	2	1	0
10/ZO	7	1	9	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
10/ZF	0	1	4	0	3	7	0	0	0	0	3	0	0
13A/ZO	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
13A/ZF	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0
13B/ZO	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	1	0
13B/ZF	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
15A/ZO	0	0	0	0	0	7	0	0	0	1	0	0	0
15A/ZF	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0
15B/ZO	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
15B/ZF	0	0	1	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0
16/ZO	9	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0
16/ZF	6	0	3	0	5	0	0	0	0	0	1	0	0
23A/ZO	4	0	8	1	2	0	0	0	0	0	0	1	0
23A/ZF	1	0	4	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0
23C/ZO	2	0	11	0	15	3	0	0	3	0	0	9	0
23C/ZF	4	0	3	0	1	2	0	0	1	0	0	0	3

Relevé	Vulcain	Mélitée du mélampyre	Demi deuil	Myrtil	Fadet commun	Petite violette	Petite tortue	Sylvaine	Hespérie de la mauve	Hespérie du dactyle	Hespérie de la houque	Paon du jour	Total d'espèce	Total d'individus
07/ZO	1	0	0	50	33	0	24	3	1	0	0	0	9	143
07/ZF	0	0	0	21	16	0	6	2	2	0	0	0	8	65
09/ZO	0	0	0	45	3	0	7	0	0	0	0	0	5	64
09/ZF	1	0	0	29	13	0	3	0	1	0	0	0	9	62
10/ZO	1	0	0	24	0	0	0	4	0	0	0	0	8	56
10/ZF	0	0	0	17	2	0	2	3	0	0	0	0	9	51
13A/ZO	0	0	1	62	1	0	1	0	0	0	2	0	8	80
13A/ZF	0	0	0	52	2	0	2	0	0	0	0	0	4	64
13B/ZO	0	0	0	49	5	0	2	0	0	0	0	0	5	66
13B/ZF	0	0	1	32	1	0	4	0	0	0	0	0	5	45
15A/ZO	0	0	0	51	2	0	6	0	0	0	0	0	5	72
15A/ZF	0	0	0	15	1	0	3	0	0	0	0	1	5	28
15B/ZO	0	0	0	39	3	0	0	1	0	0	0	1	5	51
15B/ZF	0	0	0	21	5	0	6	1	0	0	0	0	7	45
16/ZO	0	2	0	8	14	0	3	0	0	0	0	0	7	57
16/ZF	0	3	0	5	12	0	1	0	0	0	0	0	8	44
23A/ZO	0	0	3	16	6	0	5	0	0	0	0	0	9	55
23A/ZF	0	0	3	21	10	0	5	0	0	1	0	0	11	60
23C/ZO	0	0	0	30	3	0	18	0	2	0	1	0	11	108
23C/ZF	0	0	0	36	4	1	5	0	1	0	0	1	12	74

Annexe 2 : Tableau représentant le nombre d'espèce de rhopalocères par zone.

	Famille	Zone non fertilisée	Zone fertilisée	Total par espèce
<i>Aglais io</i> - Paon du jour	Nymphalidae	1	2	3
<i>Aglais urticae</i> - Petite tortue	Nymphalidae	66	37	103
<i>Anthocharis cardamines</i> - Aurore	Pieridae	3	9	12
<i>Aporia crataegi</i> - Gazé	Pieridae	3	1	4
<i>Aricia agestis</i> - Collier de Corail	Lycaenidae	2	1	3
<i>Boloria dia</i> - Petite violette	Nymphalidae	0	1	1
<i>Coenonympha pamphilus</i> - Fadet commun / Pamphile	Nymphalidae	70	66	136
<i>Colias croceus</i> - Souci	Pieridae	3	1	4
<i>Cyaniris semiargus</i> - Azuré des anthyllides / Demi argus	Lycaenidae	43	15	58
<i>Gonepteryx rhamni</i> - Citron	Pieridae	0	1	1
<i>Lycaena phlaeas</i> - Cuivré commun	Lycaenidae	1	1	2
<i>Maniola jurtina</i> - Myrtil	Nymphalidae	374	249	623
<i>Melanargia galathea</i> - Demi deuil	Nymphalidae	4	4	8
<i>Melitaea athalia</i> - Mélitée du mélampyre	Nymphalidae	2	3	5
<i>Ochlodes sylvanus</i> - Sylvaine	Hesperiidae	8	6	14
<i>Pieris brassicae</i> - Piéride du chou	Pieridae	0	1	1
<i>Pieris napi</i> - Piéride du navet	Pieridae	36	30	66
<i>Pieris rapae</i> - Piéride de la rave	Pieridae	17	11	28
<i>Polyommatus icarus</i> - Argus bleu / Azuré commun	Lycaenidae	22	11	33
<i>Pyrgus malvae</i> - Hespérie de la mauve	Hesperiidae	3	4	7
<i>Speyeria aglaja</i> - Grand nacré	Nymphalidae	0	3	3
<i>Thymelicus lineola</i> - Hespérie du dactyle	Hesperiidae	0	1	1
<i>Thymelicus sylvestris</i> - Hespérie de la houque	Hesperiidae	3	0	3
<i>Vanessa atalanta</i> - Vulcain	Nymphalidae	2	1	3
<i>Vanessa cardui</i> - Belle dame	Nymphalidae	17	1	18
Total par zone		680	460	1140

Annexe 3 : Tableau regroupant le statut de conservation européenne et wallonne, et la législation du Grand Duché relative aux espèces de papillons avec le nombre d'individus totaux et le nombre de stations où sont présentes les différentes espèces.

La législation du Luxembourg : Règlement du 9 janvier 2009 concernant la protection intégrale et partielle de certaines espèces animales de la faune sauvage.

Abréviation des statuts : NE = Espèces non évaluées, LC = Espèces non menacées, préoccupation mineure, VU = Espèces vulnérables, NT = Espèces quasi menacées, EN = Espèces en danger.

	Nombre d'individus totaux	Nombre de Stations	Législation au Luxembourg	Statut en Wallonie	Statut En Europe	Natura 2000
<i>Aglais io</i> - Paon du jour	3	3	Règlement protection faune	LC	LC	X
<i>Aglais urticae</i> - Petite tortue	103	18	Règlement protection faune	LC	LC	X
<i>Anthocharis cardamines</i> - Aurore	12	7	Règlement protection faune	LC	LC	X
<i>Aporia crataegi</i> - Gazé	4	4	Règlement protection faune	LC	LC	X
<i>Aricia agestis</i> - Collier de Corail	3	3	Règlement protection faune	LC	LC	X
<i>Boloria dia</i> - Petite violette	1	1	Règlement protection faune	EN	LC	Oui
<i>Coenonympha pamphilus</i> - Fadet commun / Pamphile	136	19	Règlement protection faune	LC	LC	X
<i>Colias croceus</i> - Souci	4	2	Règlement protection faune	NE	LC	X
<i>Cyaniris semiargus</i> - Demi argus	58	10	Règlement protection faune	NT	LC	X
<i>Gonepteryx rhamni</i> - Citron	1	1	Règlement protection faune	LC	LC	X
<i>Lycaena phlaeas</i> - Cuivré commun	2	2	Règlement protection faune	LC	LC	X
<i>Maniola jurtina</i> - Myrtil	623	20	Règlement protection faune	LC	LC	X
<i>Melanargia galathea</i> - Demi deuil	8	4	Règlement protection faune	LC	LC	X
<i>Melitaea athalia</i> - Mélitée du mélampyre	5	2	Règlement protection faune	VU	LC	Oui
<i>Ochlodes sylvanus</i> - Sylvaine	14	6	Règlement protection faune	LC	LC	X
<i>Pieris brassicae</i> - Piéride du chou	1	1	X	LC	LC	X
<i>Pieris napi</i> - Piéride du navet	66	15	X	LC	LC	X
<i>Pieris rapae</i> - Piéride de la rave	28	7	X	LC	LC	X
<i>Polyommatus icarus</i> - Azuré commun	33	7	Règlement protection faune	LC	LC	X
<i>Pyrgus malvae</i> - Hespérie de la mauve	7	5	Règlement protection faune	VU	LC	X
<i>Speyeria aglaja</i> - Grand nacré	3	1	Règlement protection faune	EN	LC	X
<i>Thymelicus lineola</i> - Hespérie du dactyle	1	1	Règlement protection faune	NT	LC	X
<i>Thymelicus sylvestris</i> - Hespérie de la houque	3	2	Règlement protection faune	LC	LC	X
<i>Vanessa atalanta</i> - Vulcain	3	6	Règlement protection faune	NE	LC	X
<i>Vanessa cardui</i> - Belle dame	18	6	Règlement protection faune	NE	LC	X

Annexe 4 : Type d'habitat EUNIS des différentes parcelles en fonction de la phytosociologie et de la zoocénologie.

<i>Relevé</i>	<i>Phytosociologie</i>	<i>Zoocénologie</i>
07/ZO	Prairies pâturées permanentes pas ou peu fertilisées. - E2.11b	Pâtures permanentes et prairies mixtes. - E2.1
07/ZF	Prairies pâturées permanentes pas ou peu fertilisées. - E2.11b	Pâtures permanentes et prairies mixtes. - E2.1
09/ZO	Prairies pâturées permanentes pas ou peu fertilisées. - E2.11b	Prairies de fauche planitiaires et collinéennes. - E2.2
09/ZF	Prairies pâturées permanentes pas ou peu fertilisées. - E2.11b	Prairies de fauche planitiaires et collinéennes. - E2.2
10/ZO	Prairies de fauche humides moyennement fertilisées. - E3.41	Prairies de fauche planitiaires et collinéennes. - E2.2
10/ZF	Prairies de fauche humides moyennement fertilisées. - E3.41	Prairies de fauche planitiaires et collinéennes. - E2.2
13A/ZO	Prairies pâturées permanentes pas ou peu fertilisées. - E2.11b	Prairies de fauche planitiaires et collinéennes. - E2.2
13A/ZF	Prairies pâturées permanentes pas ou peu fertilisées. - E2.11b	Prairies de fauche planitiaires et collinéennes. - E2.2
13B/ZO	Prairies pâturées permanentes pas ou peu fertilisées. - E2.11b	Prairies de fauche planitiaires et collinéennes. - E2.2
13B/ZF	Prairies pâturées permanentes pas ou peu fertilisées. - E2.11b	Pâtures permanentes et prairies mixtes. - E2.1 Prairies de fauche planitiaires et collinéennes. - E2.2
15A/ZO	Prairies pâturées permanentes pas ou peu fertilisées. - E2.11b	Pâtures permanentes et prairies mixtes. - E2.1
15A/ZF	Prairies pâturées permanentes pas ou peu fertilisées. - E2.11b	Pâtures permanentes et prairies mixtes. - E2.1
15B/ZO	Prairies pâturées permanentes pas ou peu fertilisées. - E2.11b	Pâtures permanentes et prairies mixtes. - E2.1
15B/ZF	Prairies pâturées permanentes pas ou peu fertilisées. - E2.11b	Prairies de fauche planitiaires et collinéennes. - E2.2
16/ZO	Prairies pâturées permanentes pas ou peu fertilisées. - E2.11b	Prairies de fauche planitiaires et collinéennes. - E2.2
16/ZF	Prairies pâturées permanentes pas ou peu fertilisées. - E2.11b	Prairies de fauche planitiaires et collinéennes. - E2.2
23A/ZO	Prairies pâturées permanentes pas ou peu fertilisées. - E2.11b	Prairies de fauche planitiaires et collinéennes. - E2.2
23A/ZF	Prairies pâturées permanentes pas ou peu fertilisées. - E2.11b	Prairies de fauche planitiaires et collinéennes. - E2.2
23C/ZO	Prairies pâturées permanentes pas ou peu fertilisées. - E2.11b	Prairies de fauche planitiaires et collinéennes. - E2.2
23C/ZF	Prairies pâturées permanentes pas ou peu fertilisées. - E2.11b	Prairies de fauche planitiaires et collinéennes. - E2.2

Annexe 5 : Tableau reprenant les unités florales par zone et la production nectarifère pour chaque espèce végétale. En rouge : les espèces ayant été butinées.

Espèces	Zone non fertilisée	Zone fertilisée	Production de nectar ⁷ (µg/UF/jour)
<i>Achillea millefolium</i>	178	251	7.56
<i>Ajuga reptans</i>	2024	811	155.06
<i>Anacamptis pyramidalis</i>	21	x	NA
<i>Anthriscus sylvestris</i>	x	10	11.33
<i>Bellis perennis</i>	83	64	0.84
<i>Campanula glomerata</i>	5	x	NA
<i>Campanula rapunculus</i>	10	42	NA
<i>Cardamine pratensis</i>	4	x	58.68
<i>Centaurea jacea</i>	791	497	1177.75
<i>Cerastium fontanum</i>	63	11	26.93
<i>Cirsium palustre</i>	6	22	216.18
<i>Convolvulus arvensis</i>	56	67	351.82
<i>Crepis biennis</i>	183	39	9.02
<i>Daucus carota</i>	x	24	7.35
<i>Galium mollugo</i>	1051	1397	3.58
<i>Heracleum sphondylium</i>	135	416	98.17
<i>Knautia arvensis</i>	61	33	146.31
<i>Leucanthemum vulgare</i>	420	137	15.81
<i>Lotus corniculatus</i>	937	242	61.82
<i>Malva moschata</i>	x	50	823.75
<i>Medicago lupulina</i>	170	127	1.63
<i>Medicago sativa</i>	30	10	146.14
<i>Myosotis arvensis</i>	40	30	23.36
<i>Myosotis discolor</i>	x	20	NA
<i>Myosotis scorpioides</i>	59	131	NA
<i>Pimpinella major</i>	339	x	NA

⁷ D'après Baude et al. (2016) et Ouvrard et al. (2018)

<i>Potentilla reptans</i>	73	10	30.85
<i>Primula veris</i>	50	10	NA
<i>Ranunculus acris</i>	2129	854	78.83
<i>Ranunculus bulbosus</i>	170	44	49.33
<i>Ranunculus repens</i>	108	27	104.51
<i>Salvia pratensis</i>	229	1037	NA
<i>Sanguisorba minor</i>	55	98	0.11
<i>Saxifraga granulata</i>	115	14	NA
<i>Senecio jacobaea</i>	207	50	22.6
<i>Silene flos-cuculi</i>	110	49	NA
<i>Stellaria graminea</i>	6	28	17.05
<i>Tragopogon pratensis</i>	1	x	NA
<i>Trifolium dubium</i>	1973	208	0
<i>Trifolium pratense</i>	939	354	116.86
<i>Trifolium repens</i>	287	73	48.97
<i>Veronica agrestis</i>	x	3	NA
<i>Veronica chamaedrys</i>	49	48	8.85
<i>Vicia cracca</i>	17	x	484.4
<i>Vicia sativa nigra</i>	37	58	300.34