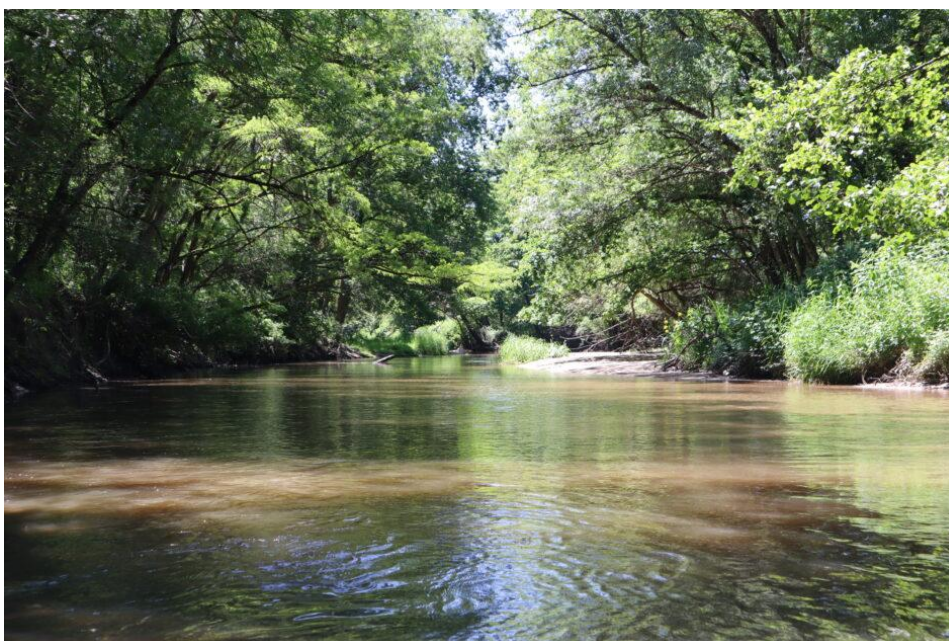


Projet Recherche Innovation 2024-2025

Les insectes aquatiques issus des milieux aquatiques et la pollinisation



Judith LOOTEN (sous la direction de Direction : Cassandre MURAIL-ZIMMERMANN)

Les insectes aquatiques issus des milieux aquatiques et la pollinisation

Directrice de recherche : Cassandre Murail -Zimmermann

Auteure : Judith Looten

Année : 2025/2026

Avertissements

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur (de cette recherche a signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

Formation par la recherche, Projet recherche innovation en génie de l'Aménagement et de l'Environnement

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet recherche innovation (PRI) situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.

Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord ma tutrice, Cassandra, pour son accompagnement, qui m'a guidé et conseillé avec bienveillance tout au long des deux semestres. Ses remarques et ses conseils m'ont été précieux pour l'avancement de mon travail.

Je tiens également à remercier Madame Lehec, qui nous a encadré à travers cette initiation à la recherche et qui nous a transmis des méthodes et une démarche de réflexion essentielle.

Enfin, je tiens à remercier mes camarades pour leur soutien, leur bonne humeur ainsi que pour la bonne ambiance qui nous accompagnait lors de nos soirées de travail à la bibliothèque.

Sommaire

Table des matières

Introduction.....	9
I-Etat de l'art.....	11
A-Référencement des visites rendues à des fleurs.....	11
B-Traits fonctionnels morphologiques	12
1.Pièces buccales.....	12
2 .Poids et taille	14
3.Distance de vol	14
C-Période d'émergence des insectes issus des milieux aquatiques	15
II-Matériel et méthodes.....	16
A-Création d'une base de données via l'état de l'art.....	16
B- Utilisation d'une base de données de terrain	17
B.1-Sites d'étude.....	17
B.2-Analyses des données	18
III-Résultats	19
A-Limites de l'état de l'art.....	19
1- Distance de vol	19
2-Taille et poids des insectes	20
B-Analyse comparative des insectes aquatiques et terrestres en milieu terrestre.....	23
1-Traits floraux quantitatifs	23
2-Impact des couleurs entre les insectes aquatiques et terrestres.....	24
C-Différences de fréquentation florale entre les familles d'insectes aquatiques.....	26
1-ACP	26
2- Analyse des familles de plantes visitées par les Syrphes	29
4 - Période d'émergence des insectes et période de floraison.....	31
Discussion	34
Conclusion	36
Annexes	37
Bibliographie.....	50

Table des figures

Figure 1 : Les quatre types d'appareils buccaux	12
Figure 2 : Cycle de vie d'une Phrygane	15
Figure 3 : Sites d'études	18
Figure 4 : Taille moyenne des insectes	20
Figure 5 : Graphiques des tailles d'espèces de Trichoptères, Éphéméroptères et Syrphes (1 individu par espèce)	21
Figure 6 : Corbeille à pollen remplie d'une abeille	21
Figure 7 : <i>Agapetus fuscipe</i>	22
Figure 8 : <i>Phryganea grandis</i>	22
Figure 9 : Poids de familles d'insectes	22
Figure 10 : Résultats du GLM	23
Figure 11 : Résultats du test ANOVA	23
Figure 12 : Répartition des couleurs de fleurs sur lesquelles les insectes se sont posés	24
Figure 13 : Proportion d'insectes observés selon la couleur des fleurs	25
Figure 14 : Moyenne des traits morphologiques, abondance et nombre d'espèces des fleurs selon leur couleur	25
Figure 15 : Dunn test sur le volume des anthères	26
Figure 16 : Répartition des couleurs en fonction de la distance au cours d'eau (m)	26
Figure 17 : ACP des familles d'insectes aquatiques en fonction des traits floraux	27
Figure 18 : Graphe des variables quantitatives des traits floraux	27
Figure 19 : Carte factorielle des individus syrphes suivant les traits floraux	27
Figure 20 : Graphe des variables quantitatives des traits floraux des syrphes	27
Figure 21 : <i>Eristalis transversa</i>	28
Figure 22 : <i>Rhingia campestris</i>	28
Figure 23 : Représentation des familles de plantes les plus retrouvées dans la littérature scientifique, sur lesquelles des syrphes ont été observés	30
Figure 24 : Nombre d'individus de chaque espèce étudiée pour la réalisation de la heatmap	30
Figure 25 : Heatmap de la probabilité d'émergence des familles selon les mois	32
Figure 26 : Période de floraison	33

Introduction

Dans un contexte de déclin de la biodiversité, les pollinisateurs occupent une place centrale dans nos préoccupations. Ils sont victimes de la perte de leurs habitats, de l'arrivée de nouveaux prédateurs, de la pollution et les conséquences de leur disparition sur nos terres agricoles et nos écosystèmes inquiètent. En effet, la majorité des plantes que nous cultivons sont des angiospermes, des plantes à fleurs qui nécessite une pollinisation.

En outre, l'importance des pollinisateurs fait partie intégrale de l'économie mondiale. Des recherches ont estimé que les services de pollinisation fournis par les insectes représentent environ 153 milliards d'euro par an, ce qui représente 10% de la valeur totale de la production alimentaire mondiale pour la consommation humaine. Cette contribution économique montre la dépendance de l'agriculture aux pollinisateurs et l'enjeu que représente leur déclin pour la sécurité alimentaire.

Avant de chercher à comprendre qui ils sont, définissons ce qu'ils font, le processus de pollinisation.

La pollinisation est un transfert de grains de pollens de la structure mâle vers la structure reproductrice femelle d'une plante, ce qui permet la fécondation puis le développement de graines et de fruits. La pollinisation peut se faire de différentes façons, par le vent, l'eau ou les animaux. Les fleurs pollinisées par les insectes sont qualifiées d'entomophiles et représentent entre 80 et 90% des plantes à fleurs. De plus environ 2/3 des plantes cultivées impliquent un vecteur animal afin de se reproduire et de favoriser un bon brassage génétique. Ici, nous nous intéressons aux animaux. En venant se nourrir du nectar des fleurs, ceux-ci récupèrent du pollen venant des étamines et le déposent sur le pistil d'une autre fleur en allant butiner la suivante. On considère donc comme pollinisateurs les insectes qui assurent la pollinisation des fleurs entomophiles en transportant du pollen sur leurs stigmates (CNTRL, consulté le 15/03/25).

Parmi eux, la famille des Apidae et plus précisément les abeilles domestiques, *Apis Mellifera*, sont connues de tous, elles sont les championnes de la pollinisation, grâce à leurs longs poils sur lesquels s'accrochent le pollen et leur langue adaptée à presque à toutes les fleurs. Néanmoins, il est essentiel de connaître le rôle et le fonctionnement d'autres pollinisateurs. En effet, la période d'activité des abeilles domestiques n'est pas non-stop et uniforme. Elles arrêtent par exemple de butiner quand il fait froid, venteux et sont plus actives au printemps et en été. Elles butinent près de 80 % des espèces à fleurs sauvages mais pour la part restante, d'autres pollinisateurs sont nécessaires (Gharbi M., 2023).

Cette espèce et cette famille ne sont donc qu'un groupe de pollinisateurs parmi tant d'autres. On peut compter les Syrphidés, les Hyménoptères ou encore les Plécoptères. En effet, beaucoup d'insectes sont capables de polliniser et parmi eux, certains insectes issus des milieux aquatiques. De plus, des études ont montré que plus la diversité des pollinisateurs est importante, plus la reproduction des plantes est efficace (Albrecht et al. 2012 ; Schurr et al. 2021). Néanmoins, ceux issus des milieux aquatiques représentent un milieu peu connu et peu étudié. Les milieux aquatiques sont des zones extrêmement sensibles à la pollution et vulnérables qui sont fortement impactés par le changement climatique. Les milieux aquatiques se caractérisent par la présence d'eau avec un faible taux de salinité (OFB).

Les zones aquatiques et humides abritent une grande richesse d'espèces animales et végétales qui ne sont pourtant pas toutes étudiées. En outre, des études montrent l'importance de ces insectes aquatiques dans les réseaux trophiques terrestres et tendent à montrer que leur rôle dans ces environnements recèle encore des surprises (Lafage et al. 2019).

Au-delà de leur rôle direct dans la reproduction des plantes, les insectes aquatiques pollinisateurs pourraient jouer un rôle clé dans le maintien des continuités écologiques, entre milieux aquatiques et terrestres. En se déplaçant des berges et des zones humides, ils pourraient collecter et transférer du pollen que les pollinisateurs classiques terrestres n'atteignent pas forcément. Ils contribueraient alors à la diversité génétique des populations végétales adaptées aux berges et aux zones humides. Ils contribueraient également aux interactions trophiques complexe, en représentant une ressource alimentaire pour d'autres communautés. Etudier leurs contributions à la pollinisation permettraient donc de mieux comprendre les liens complexes entre la biodiversité aquatique et terrestres.

Alors que le déclin des pollinisateurs est en cours, acquérir de nouvelles informations sur le rôle des milieux aquatiques dans la pollinisation pourrait être bénéfique à différents niveaux. S'ils sont reconnus comme vecteurs efficaces de pollinisation terrestre, peut-être seront-ils mieux protégés ainsi que leurs milieux de vie.

Il est alors possible de formuler la problématique suivante : **Les insectes aquatiques peuvent-ils être considérés comme des pollinisateurs ?**

Pour répondre à cette question, il a été nécessaire d'adopter une approche progressive, combinant synthèse bibliographique et collectes de données. Lors du premier semestre, l'idée était de d'identifier des paramètres (morphologiques, phénologiques, ...) existants dans la littérature scientifique concernant la capacité des insectes aquatiques à transporter le pollen et ainsi contribuer à la reproduction des plantes. Cette étape constitue la première partie du rapport et a permis de préparer une méthodologie adaptée pour estimer le rôle potentiel de ces insectes dans la pollinisation, ainsi que de commencer à recueillir les données.

Le second semestre a donc été consacré à compléter la collecte des données et à les analyser afin de mieux comprendre le rôle des insectes aquatiques dans la pollinisation. C'est la seconde partie de ce rapport, qui a permis de structurer nos observations et de préparer les résultats qui seront présentés dans la suite de ce rapport.

I-Etat de l'art

Nous allons commencer par présenter les paramètres existants dans la littérature scientifique concernant la capacité des insectes aquatiques à transporter le pollen et ainsi contribuer à la reproduction des plantes qui nous semblent intéressants.

A-Référencement des visites rendues à des fleurs

Nous allons nous intéresser en premier lieu aux visites rendues aux fleurs par certains insectes aquatiques.

Les insectes présents sur les fleurs peuvent rechercher une ressource alimentaire, le nectar. Le nectar est liquide, sucré et vient de la transformation de la sève par les glandes nectarifères des plantes. Les insectes viennent s'en nourrir. Le pollen est le gamète mâle de la plante, ce sont de minuscules grains libérés par les anthères et les étamines de la fleur. Si les insectes viennent boire le nectar, et non le pollen, comment est-il transporté de fleurs à fleurs ?

Nous pouvons penser aux abeilles et à leurs corbeilles spécialisées (structure sur leurs tibias qui sert à collecter et stocker le pollen) pour le transport du pollen. Néanmoins, celui-ci n'est généralement pas disponible pour la fécondation. C'est principalement le pollen qui est déposé sur la tête, le ventre ou les pattes avant des insectes pendant qu'ils se nourrissent qui pourra être déposé sur les stigmates des fleurs visitées ultérieurement (Anstett et al. 2019). En fonction de la morphologie de la plante, il est presque inévitable que l'insecte embarque involontairement du pollen. La morphologie des plantes ayant évolué pour forcer un contact.

Lorsque l'on observe des insectes posés sur des fleurs, cela peut alors sous-entendre qu'ils se sont peut-être nourris de leur nectar et qu'ils peuvent ensuite propager les grains de pollen retenus sur eux vers d'autres individus en allant butiner une prochaine fleur. La présence d'un insecte sur une fleur pourrait alors constituer une preuve théorique de pollinisation.

Néanmoins, la présence d'insectes sur les fleurs ne veut pas dire que ce sont des pollinisateurs. En effet, beaucoup d'insectes ne sont là que par opportunisme ou de façon temporaire. Les fleurs leur servant alors de lieux de refuge, de repos et de lieux de ponte (Pesson P. & Louveaux J., 1995). Par exemple les Diptères Trypetides et des Coléoptères du genre *Cleonus* sont souvent observés sur des chardons du genre *Cirsium*, ces fleurs étant des lieux de pontes de choix pour ces insectes.

En outre, il serait intéressant de savoir si les plantes recensées sont caractéristiques des zones humides ou sont des plantes qui peuvent être retrouvées sur des écosystèmes à caractère plus terrestre. En plus de nous apporter une information sur ce qu'ils butinent, cela peut nous éclairer sur leurs distances de vol, nous le verrons par la suite.

En plus de chercher sur quelles fleurs ils se posent, nous chercherons si des informations relatives au transport ou l'ingestion de pollen est recensée. En nous renseignant, nous avons effectivement vu que 5 des dissections de l'estomac des insectes sont possibles et pouvaient révéler une ingestion de pollen et même le nombre de grains ingérés (Leereveld et al. 1981). Ceci constituerait une preuve d'alimentation et donc potentiellement une preuve de pollinisation. Un insecte observé sur une plante, peut s'y être nourri et donc devenir un vecteur de pollinisation théorique. Néanmoins nous allons voir dans la prochaine partie qu'un insecte qui prélève du nectar d'une fleur ne la pollinise pas forcément.

B-Traits fonctionnels morphologiques

1. Pièces buccales

Morphologie des fleurs

Il existe une grande variété de fleurs avec des morphologies différentes. Certaines facilitent l'accès au nectar ou non pour les insectes. Certaines offrent de grands pétales, garantissant confort et accessibilité, d'autres en revanche ont des pétales soudés limitant alors l'accès au nectar et au pollen, c'est le cas des Lamiacées ou des Scrophulariacées. Les coléoptères apprécient par exemple les larges inflorescences de petits fleurs réunies et les fleurs à larges corolles ouvertes qui leurs permettent un atterrissage facile (Fayet A., 2016).

C'est dans le but d'éloigner les espèces non adaptées que les formes des corolles et la distance par rapport au nectar est si variable. Les corolles à longs tubes abritant au fond leur nectar sont réservées aux papillons et quelques bourdons à longue trompe. Les fleurs à nectar découvert sont, elles, accessibles aux insectes ayant une langue plus courte (Bonnier G., 1879).

Toutes les espèces qui peuvent se nourrir de nectar, ne peuvent pas accéder à toutes les plantes. Il serait intéressant de savoir à quelles espèces elles peuvent accéder en fonction de leur morphologie. Si certains insectes présentent des pièces buccales aptes à l'ingestion de nectar, il est possible qu'en se nourrissant, ils soient des vecteurs de pollinisation.

Type d'appareil buccal

L'accès à une plante dépend de son agencement floral mais aussi des pièces buccales de l'insecte. L'appareil buccal des insectes est un ensemble d'appendices souvent articulé servant à la préhension de la nourriture ainsi qu'à leur ingestion. La forme des pièces varie énormément en fonction du régime alimentaire de l'insecte (Anfel Hadjer R. & Saida C, 2024). En observant la structure des pièces buccales d'un insecte, on est donc capable de savoir quelles ressources florales lui sont théoriquement accessibles (Basli N & Djellab K, 2017).

Voyons succinctement la structure d'un appareil buccal d'insecte (figure 1) et les fonctions des différents éléments.

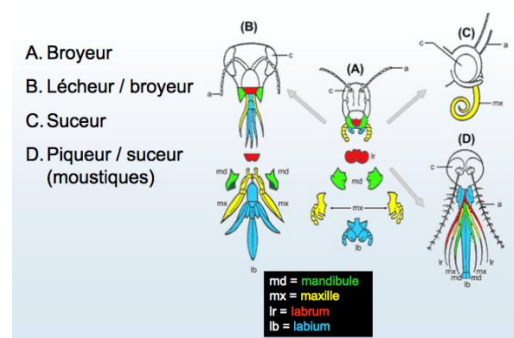


Figure 1 : Les quatre types d'appareils buccaux

On y distingue le labre, les mandibules, les maxilles et le labium. En fonction de la forme et du fonctionnement de ces pièces buccales, on peut distinguer les insectes « broyeurs » des « suceurs ».

Chez les « broyeurs », les mandibules sont grandes, développées et tranchantes, en forme de pyramide triangulaire. Parmi les « broyeurs », on retrouve les « broyeurs-suceurs », qui ont des mandibules 6 fortement développées mais se nourrissent exclusivement d'aliments liquides. Leurs mandibules sont percées d'un étroit canal leur permettant d'injecter de la salive dans le corps de leur proie pour la liquéfier puis l'aspirer. Il y a aussi les « broyeurs-lécheurs », dont font partie les abeilles et les bourdons, qui lèchent leur nourriture grâce à une langue venant de la fusion du labium et des maxilles. Ici leurs mandibules ne servent qu'à pétrir la cire pour en faire des alvéoles et non à la découpe d'aliments. Les premières maxilles sont allongées en lame de sabre et ils possèdent une langue velue creusée d'une rigole.

Enfin, il y a les insectes « suceurs », qui sont incapables de broyer ou de couper et ingèrent seulement du liquide. Chez eux, les mandibules et les maxilles sont généralement allongées en forme de tubes appelés « stylets » par lesquels les aliments liquides sont aspirés. Chez les « suceurs-lécheurs », de type « suceur-labial » le labium est très développé, et forme une trompe molle se repliant en Z sous la tête et permet de pomper des aliments liquides. Ceux de type « suceurs maxillaires », ont des maxilles soudées formant une longue trompe spiralée. Pour finir, il y a les « piqueurs-suceurs » qui ont des pièces buccales en stylet, leur permettant de percer la peau des animaux et des tissus végétaux afin d'en prélever le liquide.

Développement de stratégies

Certains insectes ont développé des stratégies pour accéder au nectar.

Certaines plantes à corolles longues empêchent les langues courtes de les visiter comme *le Bombus terrestris* qui possède une langue plus courte que la plupart des bourdons. Celui-ci contourne alors le problème en perçant la base de la corolle afin d'accéder au nectar. Dans ce cas, il n'y a pas ou peu de contact avec le pollen et l'insecte ne constitue pas un vecteur de pollinisation efficace.

La plupart des coléoptères possèdent des pièces buccales de type broyeur, et non des langues longues comme celle des abeilles, il présente donc quelques difficultés à accéder au nectar et abîme les fleurs. On nomme cette relation plante-pollinisateur, cantharophilie, c'est la relation la plus archaïque du point de vue de l'évolution. Nous verrons par la suite que ce type de comportement quelque peu destructeur peut lui être pardonné.

Néanmoins, certains coléoptères comme les longicornes, ont eux, évolué morphologiquement. Ils ont développé un cou et des mâchoires dirigées vers l'avant, ce qui leur permet d'accéder plus facilement au nectar situé en profondeur (Pas de Calais et al., 2020). De même, des différences existent entre les groupes. Les abeilles comme les Mellitidae présentant des langues courtes ne peuvent prélever du nectar que dans des fleurs peu profondes comme les Apiacées. À l'inverse, les abeilles à langue longue, comme les Megachilidae, peuvent prélever du nectar de fleurs plus profondes (Chifflet R. 2010).

La morphologie des pièces buccales des insectes est donc un facteur qui nous permet de savoir vers quelles ressources florales ils peuvent se tourner. Il serait intéressant de mettre en relation les espèces vivant dans les milieux humides et les cultures de champs aux alentours. En fonction du type de fleurs présent et des insectes, on pourrait ainsi savoir si une potentielle pollinisation est possible.

2 . Poids et taille

Le poids et la taille d'un insecte peuvent aussi avoir un impact sur ses capacités de pollinisation. En effet, nous pouvons poser l'hypothèse que plus un insecte est grand et plus son corps a de chances de se frotter contre les étamines ou le pistil d'une fleur, et donc de récupérer du pollen en quantité importante. Un insecte trop petit pourrait se faufiler jusqu'au nectar sans toucher la fleur. De plus, un insecte lourd qui se pose sur une fleur a plus de chance de s'enfoncer dedans qu'un insecte léger qui resterait en périphérie, pour se reposer ou pondre par exemple.

Pour une relation mutualiste entre la fleur et l'insecte, il ne faut pas que l'insecte abîme la fleur en cherchant le nectar. Les coléoptères par exemple, ont un appareil buccal de type « broyeur » mais peuvent se nourrir d'un peu de nectar. Le problème réside dans leur poids important, qui peut causer des dommages aux fleurs en abîmant leurs pistils ou stigmates (AREM P4, 2011). On peut citer la Cétoine dorée (*Cetonia aurata*), qui ne fait pas non plus dans la dentelle ! A l'observer, on pourrait croire qu'elle détruit la fleur en tordant ses étamines et le pistil et c'est ce qu'elle fait mais il y a une bonne raison. En se nourrissant de pollen, des grains se collent sur son corps et pourront se déposer sur le pistil d'une autre fleur lors d'une prochaine visite. Ce comportement a tout de même un impact négatif sur les cultures quand les insectes sont trop nombreux, dans ce cas les dégâts causés ne sont pas compensés par l'acte de pollinisation. (Sauvage du Poitou, Insectes pollinisateurs, 2018) .

En résumé, un insecte trop petit passe inaperçu, un insecte trop lourd risque de causer des dégâts mais un insecte avec un poids et une taille adaptée pourrait être un bon vecteur de pollinisation.

3.Distance de vol

Le vol est très important dans l'accomplissement de leur cycle de vie, de reproduction et de dispersion. La distance de vol est la distance qu'ils peuvent parcourir depuis leur lieu de naissance. C'est en volant qu'ils vont chercher de la nourriture, coloniser de nouveaux habitats, échapper aux prédateurs et diversifier génétiquement les populations. Les distances de vol des odonates ont été beaucoup étudiées en raison de leurs prouesses mais peu d'informations existent sur les insectes ailés.

La distance de vol des espèces est un paramètre intéressant à connaître car si une espèce a une distance de vol de quelques mètres, elle pourra difficilement aller polliniser un champ situé près de son milieu. A l'inverse si un essaim a une distance de vol importante, il constitue un avantage non négligeable dans l'activité de pollinisation.

La distance de vol dépend des espèces mais varie aussi entre les individus d'une même espèce. Elle dépend par exemple de la ressource florale. En effet, l'abeille *Apis Mellifera* est capable de voler jusqu'à 4000 mètres autour de sa ruche, néanmoins 40% des ouvrières butinent à 100 mètres de la ruche (Chifflet R., 2010).

Pour les insectes aquatiques, des études ont montré que les adultes préféraient voler vers l'amont pour compenser les larves partant vers l'aval, à la dérive. Certains, comme les mâles Plécoptères *Alloperla ishikariana*, sont capable de voler vers l'amont des cours d'eau à plus de 7 kilomètres !

Des études ont permis de montrer des variations importantes dans les capacités de vol des insectes aquatiques adultes. En outre, selon (Muehlbauer et al. 2014) la majorité des individus restent cantonnés aux berges, environ 10% de l'abondance de ces insectes peut être retrouvée à 550 mètres de la rive (Gerber R., 2022).

Cette distance de vol dépend aussi de la morphologie de l'individu. Dans l'article de Rémy Chifflet (Chifflet R., 2010), un lien a été établi pour les abeilles par Cane 1987, van Nieuwstadt et al. 1996, Gathmann & Tschardt 2002, Greenleaf 2007, Kuhn-Neto et al 2009, Zurbuchen et al. 2010, entre leur taille et leur distance de vol. Ils ont démontré que les abeilles ayant une plus grande taille ont une distance de vol et de butinage beaucoup plus importante que les abeilles de petite taille.

C-Période d'émergence des insectes issus des milieux aquatiques

Comme mentionné précédemment, nous nous intéressons à des espèces qui ont eu un stade larvaire aquatique.

La période d'émergence correspond, pour ces insectes, au passage du milieu aquatique au milieu terrestre. Durant cette période, la larve vit exclusivement dans l'eau, où elle assure des fonctions vitales telles que l'alimentation, la croissance et l'accumulation de réserves énergétiques nécessaires aux stades ultérieurs. La grande majorité des espèces ont une larve aquatique qui émerge de l'eau sous la forme d'un adulte ailé (Gerber R., 2010), les larves se fixent à des végétaux aquatiques (figure 1), qui offrent un support solide et vertical, facilitant la sortie progressive de l'eau au moment de l'émergence. La larve peut s'y accrocher fermement pendant que son enveloppe larvaire se rompt et que l'adulte ailé se dégage. Cette métamorphose s'accompagne de profondes modifications morphologiques, telles que le développement des ailes, la transformation des pièces buccales et la réorganisation des appendices locomoteurs, ainsi que de changements physiologiques importants, notamment au niveau du système respiratoire, qui passe d'une respiration aquatique à une respiration aérienne. C'est la métamorphose d'une larve en imago qui comprend donc diverses modifications physiologiques et morphologiques.



Figure 2 : Cycle de vie d'une Phrygane

Les insectes aquatiques sont connus pour avoir des périodes d'émergence précoces. Ils émergent toute l'année, dans les régions tempérées, principalement au printemps (de mars à juin), puis diminuent légèrement en été et en début d'automne (de juillet à octobre) et s'arrêtent presque pendant les mois d'hiver (Raitif J. et al. 2018). La période d'émergence est différente selon les espèces. Les Chironomidés, de l'ordre des Diptères ont une émergence particulièrement longue qui peut avoir lieu entre 5 et 10 mois de l'année dans la zone tempérée du Nord. Dans l'hémisphère sud, comme en Nouvelle-Zélande, les Chironomidés émergent toute l'année (Armitage P.D et al, 1995). Il serait intéressant de trouver les périodes d'émergences de quelques insectes afin de voir si certains ont une émergence

particulièrement précoce ou si d'autres émergent tard dans l'année, dans des conditions plus fraîches, là où les pollinisateurs communs sont inefficaces.

A titre de comparaison, les colonies d'abeilles sortent de leur torpeur hivernale au printemps et c'est à ce moment que la reine recommence à pondre (Imdorf et al. 1996). Les différences d'émergences entre les insectes aquatiques pourraient être bénéfiques pour l'agriculture. Les cultures ne fleurissant pas toutes à la même période, il est judicieux d'avoir des insectes qui peuvent polliniser les fleurs au moment où les abeilles sont encore au repos

II-Matériel et méthodes

A-Création d'une base de données via l'état de l'art

Nous avons détaillé ci-dessus, certains points clés (distance de vol, émergence, ...) qui nous semblaient pertinents pour déterminer si les insectes aquatiques peuvent être considérés comme des pollinisateurs. Nous allons à présent expliquer la méthode que nous allons mettre en place afin de trouver les données de ces paramètres pour différentes espèces.

Nous allons nous intéresser à différents ordres et familles d'insectes aquatiques : les Trichoptères, les Syrphidés, les Plécoptères et les Ephéméroptères. Ces insectes étant peu étudiés, cela nous permettra de constater les lacunes scientifiques à leur sujet et nous permettra d'apporter de nouvelles connaissances.

Pour chaque famille, un tableau de données sera réalisé pour un certain nombre d'espèces qui commencera à être complété en 4A et qui sera fini et analysé en début de 5A. Nous aurons alors 5 tableaux de données. La réflexion quant à la façon d'analyser ces données sera faite en 5A.

Premier tableau

D'abord, un premier tableau (Annexe 1) sera fait avec les espèces de Syrphes françaises. Pour ce semestre nous nous sommes concentrées sur les syrphes français qui possèdent un stade larvaire retrouvé :

- Dans, ou parmi des sédiments ou des débris immergés en permanence dans des eaux courantes ou stagnantes.

Ou

- Sur des plantes vivants entièrement ou partiellement dans l'eau, y compris les espèces flottantes, immergées et émergentes. Nous avons laissé de côté les syrphes ayant un stade larvaire se déroulant dans des sols saturés en eau, nous les reprendrons en 5A. Nous chercherons pour chaque espèce, les espèces végétales sur lesquelles elles ont été retrouvées dans la littérature. Nous chercherons aussi si il est fait mention de transport de pollen ou d'absorption de pollen et de nectar. Chaque information de plante recensée devra être étoffée avec le pays de l'observation.

Récolte des données

Pour trouver les données, les recherches seront faites sur Google Scholar en utilisant des mots clés principalement en anglais et en français. Nous utiliserons le genre et le nom de l'espèce, ou simplement

le genre afin d'élargir le champ des informations possibles, + « flower » OU « crop » OU « visit », pour trouver les espèces végétales sur lesquelles elles ont été retrouvées.

Nous utiliserons de la même façon le nom de l'espèce + « pollen » OU « pollen load » OU « nectar » OU « pollination » pour trouver des informations relatives au pollen.

Ce qui donne par exemple : *Anasimyia contracta* pollen ou *Anasimyia* crop

De plus nous utiliserons des sources telles que la version 2024 du recueil de Martin Speight sur les Syrphes d'Europe qui procure une description des espèces végétales visitées par certains syrphes européens.

Nous avons déjà commencé à compléter ce tableau, en raison de sa taille, il peut être visualisé dans l'annexe à la page 16. La mise en page de celui-ci n'est pas finie, de même que la mise en forme des données.

Deuxième, troisième et quatrième tableau

Nous chercherons ensuite des informations sur la taille, le poids, la distance de vol, la période d'émergence et des informations sur les pièces buccales pour certaines espèces de Tricoptères, Plécoptères, Ephéméroptères et Syrphidés. Pour la période d'émergence, nous veillerons à renseigner le pays, car l'émergence d'une espèce varie selon sa localisation (Annexes 1,2,3,4,).

Récolte des données

Voici la liste des requêtes pour chaque information.

Taille : nom espèce + « size » OU « length »

Poids : nom espèce + « weight »

Distance de vol : nom espèce + « flight distance » OU « flight length » OU « flight » OU « dispersal distance » OU « dispersion distance »

Période d'émergence : nom de l'espèce + « emergence » OU « emergence period » OU « start-up period »

Pièces buccales : nom espèce + « mouthpiece » OU « buccal part » OU « jaw » OU « mandibles » OU « labium »

Pour des informations telles que la taille, les données de l'INPN peuvent être utilisées. Les informations sont très précises, parfois difficiles à trouver ou peuvent ne pas être renseignées pour certaines espèces. Quand l'information n'est pas trouvée, une croix (X) pourra être placée dans la case.

B- Utilisation d'une base de données de terrain

B.1-Sites d'étude

Afin de compléter ce premier jeu de données, un second a été acquis auprès de ma tutrice. Il a été constitué grâce à un travail de terrain en 2025, qui avait pour but de mieux comprendre les interactions fleurs/pollinisateurs, en observant les insectes qui étaient posés sur des fleurs :

Cinq sites d'étude ont été sélectionnés dans le quart nord-ouest de la France : Blois, Fao, Louroux, Roudoudour et Timbertière (figure 3). Sur chaque site, quatre habitats ont été sélectionnés (zone riparienne, prairie permanente, prairie temporaire et culture). Dans chaque habitat, 6 transects de 20m² ont été créés. Pour chaque transect, une prospection de 5 minutes a été réalisée afin d'identifier tous les insectes qui atterrissaient sur les fleurs. Au sein de chaque transect, huit quadrats de 0,25m² ont été positionnés de façon aléatoire. Dans chaque quadrat, les espèces en fleurs ont été identifiées et le nombre d'unités florales dénombré.

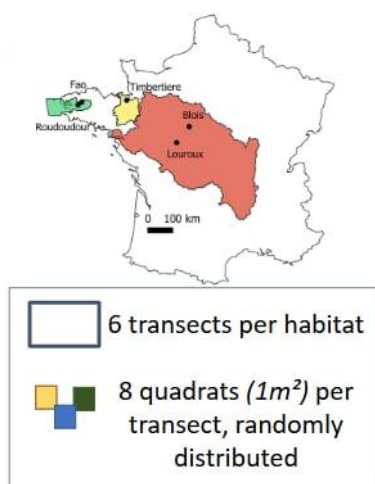


Figure 3 : Sites d'études

De plus, dans chaque quadrat, des mesures relatives aux traits floraux ont été recueillies. La hauteur maximale, la couleur et la surface de l'unité florale afin de caractériser l'attractivité. Pour caractériser l'accessibilité, la profondeur de la corolle, la largeur de la corolle, le volume des anthères ont été choisis. Enfin, la teneur en sucre a été analysée afin de représenter la récompense. En plus des traits floraux, la surface florale, l'abondance d'espèces et la couverture florale a été recensées pour chaque transect.

B.2-Analyses des données

Deux jeux de données vont donc être utilisés :

- Le premier rassemblant les données issues de mon projet de recherche individuel (PRI), concernant les traits morphologiques et phénologiques (Taille, Masse, Période d'émergence, Pièces buccales, Distance de vol) de plusieurs familles d'insectes : Trichoptères, Syrphes, Plécoptères et Ephéméroptères.
- Le second rassemblant les données d'identifications d'insectes et de traits floraux acquis auprès de ma tutrice (2025).

Les analyses statistiques et les visualisations ont été réalisées à l'aide du logiciel Rstudio (version 2025-06-13), un environnement de développement intégré. Les packages utilisés incluent notamment : ggplot2, glmmTMB, DHARMA, car, FactoMineR, factoextra, igraph et ggraph. Le logiciel Microsoft Excel a également été utilisé pour le traitement des données ainsi que certaines statistiques descriptives.

B.2.1- Modèle linéaire généralisés (GLM)

Afin d'explorer l'effet des traits floraux sur la présence des insectes aquatiques et non aquatiques, des modèles linéaires généralisés (GLM) ont été réalisés. Le package glmmTMB a été utilisé pour l'ajustement des modèles. La qualité des modèles a été évaluée à l'aide du package DHARMA, et les analyses de variance ont été effectuées avec le package car.

B.2.2 – Kruskal-Wallis

Le test de Kruskal-Wallis a été réalisé pour voir l'effet des couleurs de fleurs sur leurs traits morphologiques. Le test de Shapiro a montré que les données n'étaient pas distribuées normalement ($p\text{-value} < 0,05$), donc le test Anova n'était pas envisageable.

B.2.3- Analyse en Composantes Principales (ACP)

Afin de réduire la dimensionnalité et d'explorer le jeu de données sur les insectes aquatiques et les traits floraux, une analyse en composantes principales a été réalisée. Afin de réaliser l'ACP, le package FactoMineR ainsi que factoextra ont été utilisés pour la visualisation des données. L'ACP a été réalisée à l'aide du package FactoMineR, et les résultats ont été visualisés avec factoextra.

B.3.4- Représentation graphiques descriptives

Des statistiques descriptives ont été réalisées afin de mieux comprendre la structure des données. Des diagrammes en barres ont été produits sous Excel pour représenter la taille des différentes familles d'insectes ainsi que les familles de plantes les plus visitées par les Syrphes.

Une heatmap représentant les périodes d'émergence des insectes a été réalisée sous Rstudio, avec les packages « igraph » qui crée le graphe bipartite et « ggraph », basé sur ggplot2, pour la visualisation.

Enfin, les barplots empilés ont été réalisés afin d'illustrer la distribution des insectes aquatiques et non aquatiques selon la couleur des fleurs, en utilisant le package ggplot2.

III-Résultats

A-Limites de l'état de l'art

Les recherches venant de l'état de l'art, ont permis de constater que, comme dit en introduction, la plupart des espèces sont peu étudiées, et un grand nombre de données concernant les traits morphologiques et phénologiques n'ont pas été trouvées. Ce manque de données est un résultat en lui-même, en montrant la méconnaissance des espèces.

D'un autre côté, ce manque de résultats rend difficile la possibilité de faire des analyses sur toutes les variables. Ils peuvent néanmoins permettre de montrer la diversité présente au sein de chaque famille.

Au total, sur **23 espèces de Trichoptères**, les informations sur la taille des espèces ont été trouvées pour 9 espèces, pour le poids : 2, pour la période d'émergence : 18, pour les pièces buccales : 6, pour la distance de vol : 7. Sur les **16 espèces d'Ephéméroptères**, les informations sur la taille des espèces ont été trouvées pour 6 espèces, pour le poids : 1, pour la période d'émergence : 9 et pour les distances de vol : 2. Au total, sur **7 espèces de Syrphes**, les informations sur la taille des espèces ont été trouvées pour 6 espèces, pour le poids : 1, pour la période d'émergence : 7, pour les distances de vol : 1. Au total, sur **8 espèces de Plécoptères**, les informations sur la taille des espèces ont été trouvées pour 1 espèce, pour la période d'émergence : 8. Enfin, sur **71 espèces de Syrphes**, des observations sur des plantes ont été recueillies pour 68 d'entre eux.

1- Distance de vol

Concernant les **distances de vol**, le plus de données a été trouvé pour les Trichoptères. Cette famille montre une grande hétérogénéité, avec des espèces montrant des capacités de déplacement allant de

40 mètres à 2,5 kilomètres. Concernant les éphéméroptères, ils ont été retrouvés principalement dans un rayon de 10 mètres des cours d'eau, pouvant aller jusqu'à 150 mètres.

Une distance de vol élevée montre la capacité physique d'une espèce à relier les milieux aquatiques aux milieux terrestres, ce qui augmente la probabilité de contacts avec des fleurs terrestres. Cette distance parcourue peut couvrir différents milieux (ripisylve, prairie, lisière de forêt, ...) avec des espèces florales différentes.

La différence de capacité de vol entre les familles peut coïncider avec leur différence de taille et donc avec leur durée de vie. En effet, les trichoptères peuvent vivre de plusieurs semaines à quelques mois (Morse J et al, 2019), ce qui leur permet d'avoir le temps de parcourir une certaine distance. Les éphéméroptères, eux, ont une durée de vie allant de 1 à 2 h, à quelques jours, ce qui limite leur possibilité de déplacement (Brittain J, Sartori M., 2009).

Les Plécoptères peuvent vivre de quelques jours pour les espèces qui ne se nourrissent pas, à quelques semaines pour celles qui le peuvent (Tierno de Figuera JM, Lopez-Rodriguez MJ, 2018). La durée de vie des Syrphes, elle, est d'environ 35 jours (Rodrigues de Miranda S., 2023). À titre de comparaison, l'abeille domestique, *Apis Mellifera*, qui est déjà en milieu terrestre, vit entre 4 et 5 semaines.

Les espèces susceptibles de pouvoir s'aventurer vers les milieux terrestres de façon « importante », sont alors les Trichoptères et les Syrphes. Les Plécoptères et les Ephéméroptères semblent relégués à des intervalles plus courts autour des cours d'eau.

2-Taille et poids des insectes

Le graphique ci-dessous montre la taille moyenne des 4 familles étudiées selon le sexe. Comme indiqué sur le graphique, les données d'un faible nombre d'individus sont présentes, ce qui ne permet pas d'officialiser une taille moyenne par famille, mais plutôt de donner une idée de l'échelle.

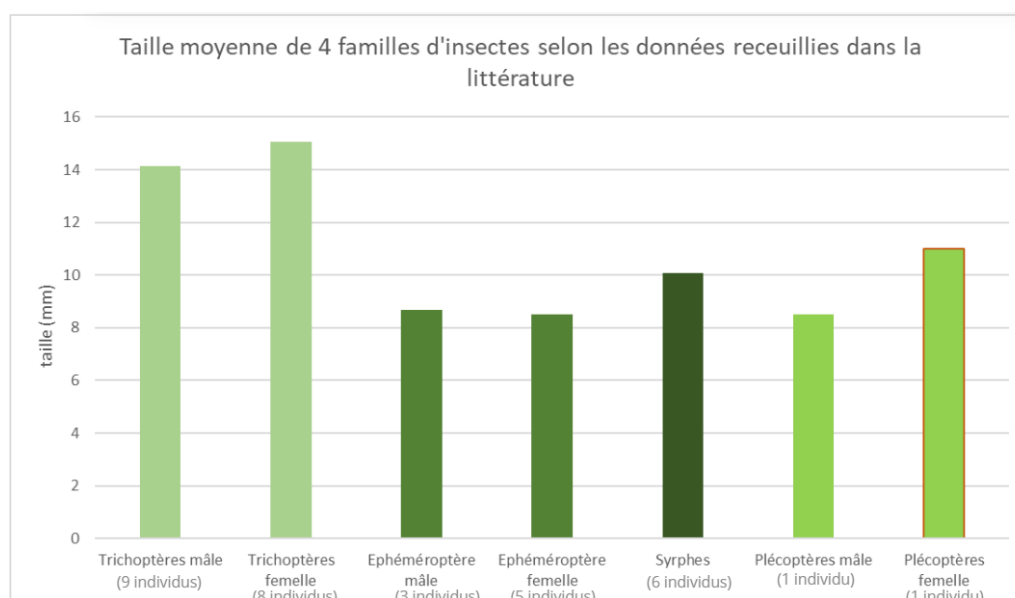


Figure 4 : Taille moyenne des insectes

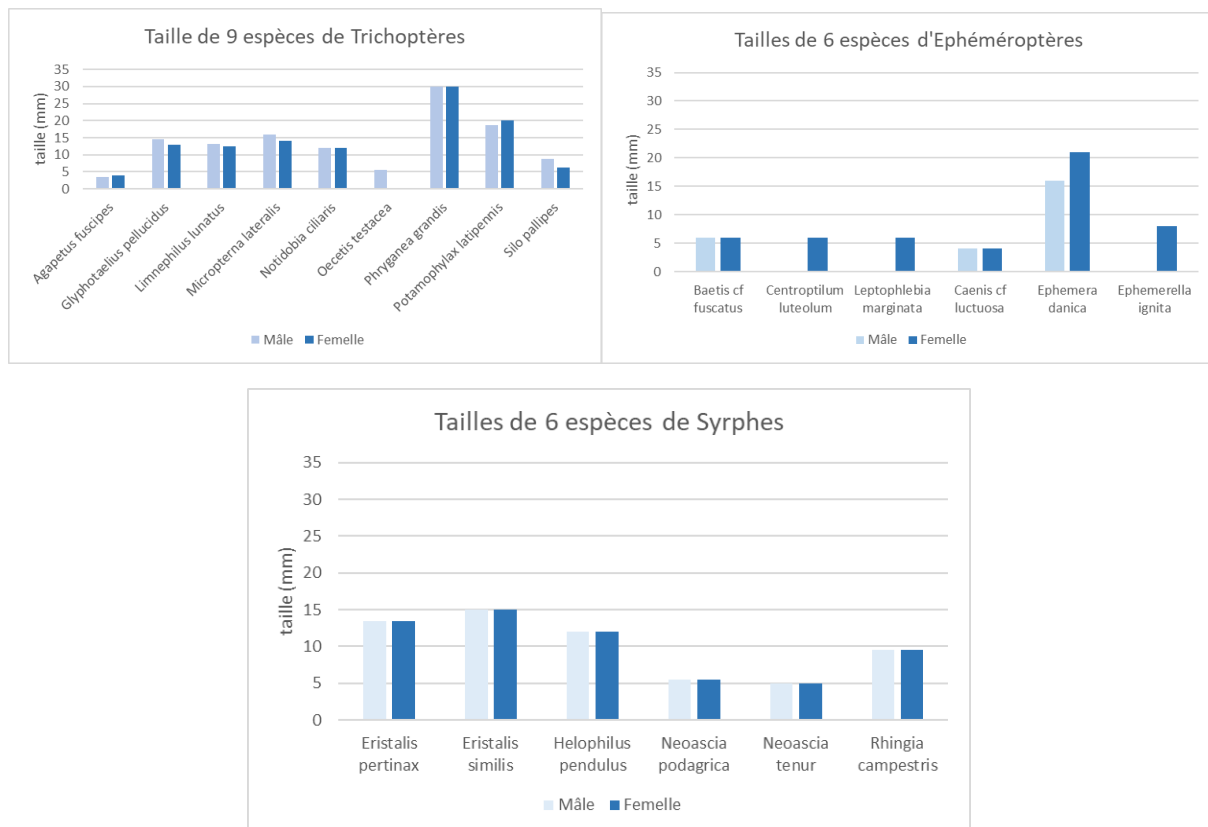


Figure 5: Graphiques des tailles d'espèces de Trichoptères, Ephéméroptères et Syrphes (1 individu par espèce)

Ces résultats permettent de montrer la diversité de taille importante présente au sein de chaque famille. C'est le cas des Trichoptères, avec *Agapetus fuscipes* qui fait environ 4 mm (figure 7) et *Phryganea grandis* qui en mesure environ 30 (figure 8). La taille des éphéméroptères et des plécoptères mâles est faible et laisse présager une capacité plus faible à transporter le pollen. Les syrphes, Plécoptères femelles et Trichoptères montrent une taille plus importante, proche, voire supérieure pour les Trichoptères des pollinisateurs classiques. *Apis Mellifera* mesure environ 12 mm et les bourdons (*Bombus terrestris*) mesurent entre 1,4 et 2 cm. Néanmoins, même si la taille des insectes est parfois équivalente à celle des pollinisateurs classiques, le potentiel de pollinisation est différent en raison de leurs caractéristiques corporelles différentes : pas de corbeilles spécialisées (figure 6), moins de poils, ...



Figure 6 : Corbeille à pollen remplie d'une abeille

Le manque de données montre que même si l'intérêt est grandissant pour ces espèces, les études semblent se concentrer sur leurs rôles dans les interactions terrestres et leur pollinisation, en délaissant l'étude de leurs caractères morphologiques.

Cette différence de tailles corporelles pourrait avoir une influence sur le type de fleurs que visitent les différentes familles.



Figure 7 : *Agapetus fuscipe*



Figure 8 : *Phryganea grandis*

		Poids mâle (mg)	Poids femelle (mg)	Poids sexe inconnu (mg)
Trichotères	Potamophylax latipennis	59,3	90,9	
	Silo pallipes	4,84	10,54	
Syrphes	Helophilus pendulus			82
Ephéméroptères	Ephemera danica	99,6 ± 30,7	147 ± 13	

Figure 9 : Poids des familles d'insectes

Les données disponibles sur la masse corporelle des Trichoptères, Syrphes, Plécoptères et Ephéméroptères sont rares dans la littérature. Les quelques valeurs observées (figure 9) indiquent des masses faibles, avec un maximum de 147 mg, retrouvé pour une femelle Ephéméroptère. Les données étant faibles, elles ne permettent pas d'avoir une vision globale mais des familles mais semblent présager un poids faible, ce qui leur permet d'exercer une faible contrainte sur les fleurs. À titre de comparaison, les abeilles pèsent entre 90-110 mg selon l'espèce (Snubel F et al, 2019), et le bourdon terrestre peut faire jusque 400 mg.

La taille et la masse corporelle des insectes constituent un trait pertinent pour étudier le potentiel pollinisateur de l'espèce, mais devrait être couplées avec d'autres traits morphologiques tels que la pilosité ou la présence d'outils qui captureraient le pollen. En effet, même si la taille peut être comparable, l'enveloppe externe de l'insecte peut ne pas être apte à retenir des grains de pollen.

Ces recherches ont permis de mettre en évidence la nécessité de développer des bases de données sur les traits morphologiques de ces insectes issus des milieux aquatiques. Les seuls paramètres documentés et exploitables sont : la **période d'émergence et les visites rendues à des fleurs** pour les syrphes, dont nous parlerons après. Les données des traits morphologiques et phénologiques sont disponibles en annexe (Annexes 1,2,3,4).

Grâce au second jeu de données récupéré, nous allons maintenant chercher à mieux comprendre ces insectes issus des milieux aquatiques, en ne nous basant plus sur la littérature scientifique et de la théorie, mais à travers d'observations de terrain.

B-Analyse comparative des insectes aquatiques et terrestres en milieu terrestre.

1-Traits floraux quantitatifs

L'objectif de cette partie est d'examiner si la répartition des insectes aquatiques diffère de celle des insectes terrestres en zone terrestre, d'identifier la manière dont ces différences s'expriment et d'évaluer si les deux groupes réagissent différemment aux traits floraux.

Pour rappel, les insectes aquatiques adultes ne sont pas considérés comme des pollinisateurs spécialisés mais peuvent quand même visiter des fleurs pour s'alimenter. C'est par exemple le cas du Syrphe *Tropidia scita*, où l'on a retrouvé du pollen de *Scirpus* (Cypéracée) dans le contenu de son estomac (Leereveld H. et al., 1981). Le choix des visites à des fleurs peut être associé à des traits floraux spécifiques, à des contraintes morphologiques propres aux insectes, ou encore être influencé par leur capacité de déplacement, comme leur distance de vol.

Comparer la manière dont les deux groupes se comportent face aux traits floraux permet de nous donner des informations sur leurs préférences écologiques et donc leur potentielle activité de pollinisateur.

Afin d'étudier ces différences, un modèle statistique à réponse binomiale qui modélise la proportion d'insectes aquatiques observés par transect, par rapport au total des insectes (aquatiques + non aquatiques) a été utilisé. Les transects étudiés étaient situés à des distances comprises entre 0 et 130 mètres des cours d'eau. Pour chaque transect, la moyenne des traits morphologiques a été réalisée, ce qui limite la précision du modèle.

Ce modèle teste l'effet de plusieurs variables explicatives liées aux ressources florales :

- L'abondance de fleurs (Abund_FLO) : le nombre de fleurs par transects,
- La diversité florale (FLO_RICHNESS) : le nombre d'espèces de fleurs par transects,
- La couverture florale (CouvF_MOY_PLOT) : la couverture florale par transect,
- Le volume des anthères (vol_anthere) mm³,
- Le rapport Profondeur/Largeur de la corolle (raport_corolle),
- La hauteur (hauteur) : hauteur de l'unité florale la plus élevée d'un individu par rapport au sol (cm),
- La largeur de la corolle (larg_corolle) en mm,
- La profondeur de la corolle (prof_corolle) en mm.

L'intérêt de ce modèle est de considérer la proportion d'insectes et non le nombre, qui peut être biaisé par l'abondance globale des visiteurs. En raison du nombre plus faible de données, la variable « teneur en sucre » a été enlevée. A la suite du GLM (figure 10), un test Anova est réalisé (figure 11) afin d'analyser les résultats. Le code est disponible en annexe (Annexe 5).

```
Coefficients:
              Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept)   -1.556e-01  1.182e+00  -0.132  0.8953
FLO_RICHNESS  -7.569e-02  1.110e-01  -0.682  0.4953
Abund_FLO      -5.178e-04  1.996e-03  -0.259  0.7953
CouvF_MOY_PLOT  4.282e-07  6.914e-06   0.062  0.9506
larg_corolle    1.182e-02  5.604e-02   0.211  0.8330
hauteur        -1.836e-02  9.227e-03  -1.990  0.0466 *
vol_anthere    -1.657e-03  1.485e-02  -0.112  0.9112
prof_corolle   -1.924e-02  7.234e-02  -0.266  0.7903
raport_corolle  -6.179e-02  6.304e-02  -0.980  0.3270
Watercourse_distance -3.716e-03  1.690e-03  -2.198  0.0279 *
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Figure 10 : Résultat du GLM

```
Response: cbind(Aquatic, `Non Aquatic`)
              LR Chisq Df Pr(>Chisq)
FLO_RICHNESS    0.4810  1  0.4879815
Abund_FLO        0.0703  1  0.7908666
CouvF_MOY_PLOT   0.0039  1  0.9503775
larg_corolle     0.0451  1  0.8317386
hauteur         3.9260  1  0.0475455 *
vol_anthere      0.0127  1  0.9104076
prof_corolle     0.0722  1  0.7881016
raport_corolle   1.1991  1  0.2735075
Watercourse_distance 11.1933 1  0.0008209 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Figure 11 : Résultat du test Anova

La distance à un cours d'eau apparaît comme étant un effet hautement significatif négatif. Plus un quadrat est éloigné d'un cours d'eau, plus la proportion d'insectes aquatiques diminue. Ce résultat est écologiquement attendu, la distance la plus grande est de 131 mètres par rapport au cours d'eau et nous avons vu que les distances de vol pouvaient être de quelques mètres pour ces insectes. Il est donc cohérent, au regard de ces données, d'en trouver moins, à mesure que l'on s'éloigne des cours d'eau.

La hauteur moyenne des fleurs est le seul trait morphologique qui présente un effet sur la proportion d'insectes aquatiques. Son coefficient indique que plus la hauteur des fleurs du quadrat est élevée, moins les insectes aquatiques sont retrouvés dessus. Les fleurs sur lesquelles les insectes se sont posés mesuraient entre 1 et 166 cm de haut. Les insectes issus des milieux aquatiques semblent alors préférer les fleurs basses. Néanmoins, on peut se demander si la hauteur des fleurs ne varie pas en fonction de l'habitat. Il est possible que les fleurs proches des cours d'eau soient dans un habitat plus ouvert, et aient donc moins besoin de hauteur afin d'être compétitives. Il y aurait donc une proportion plus grande d'insectes (proches des cours d'eau), qui visiteraient ces fleurs basses et une proportion plus faible dans les milieux terrestres, qui visiteraient des fleurs basses présentent en moins grand nombre à cause du milieu.

On peut également se demander si les insectes issus des milieux aquatiques évitent les hautes fleurs afin de limiter une perte énergétique. Il est possible que ceux-ci préfèrent par exemple des fleurs basses avec des ressources en sucre importantes. Par exemple, certains éphéméroptères ne se nourrissent pas, une fois devenus adultes (Brittain, J.E. et al, 2009).

2-Impact des couleurs entre les insectes aquatiques et terrestres

Nous venons de nous concentrer sur des variables quantitatives, nous allons maintenant nous intéresser au qualitatif, en particulier à la couleur des fleurs. De plus, dans l'analyse précédente, la teneur en sucre n'a pas été analysée, nous allons nous y intéresser, en combinaison avec d'autres facteurs. Nous allons voir s'il y a des différences dans l'attraction des couleurs entre les insectes terrestres et ceux issus des milieux aquatiques.

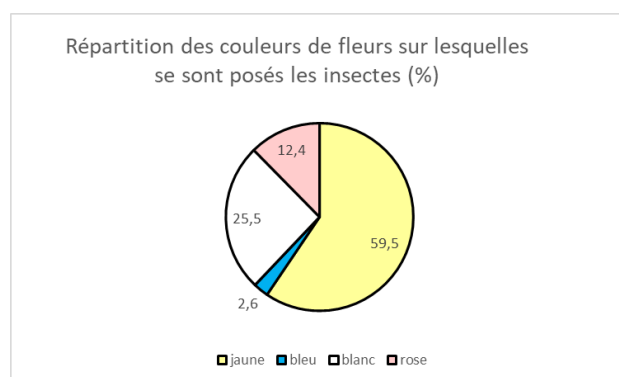


Figure 12 : Répartition des couleurs de fleurs sur lesquelles les insectes se sont posés

Premièrement, en observant la répartition des données (figure 10, code en Annexe 6), on voit que le jaune est la couleur sur laquelle les insectes se sont le plus posés, avec 59,5% des observations. Si l'on distingue les insectes aquatiques et non aquatiques (figure 13), des différences apparaissent. On peut voir que la répartition des insectes aquatiques est plus équitable, avec presque 1/3 d'observations sur le jaune, 1/3 sur le rose et 1/3 sur le blanc. La proportion d'observations sur la couleur jaune est plus importante pour les insectes terrestres, et la couleur rose plus faible. Ces observations

suggèrent que les insectes terrestres ont une préférence pour le jaune, mais une limite existe en raison de la différence du nombre d'observations importantes entre les aquatiques et les terrestres. Il est également possible qu'il y ait simplement plus de fleurs jaunes en milieu terrestre, que proche des cours d'eau.

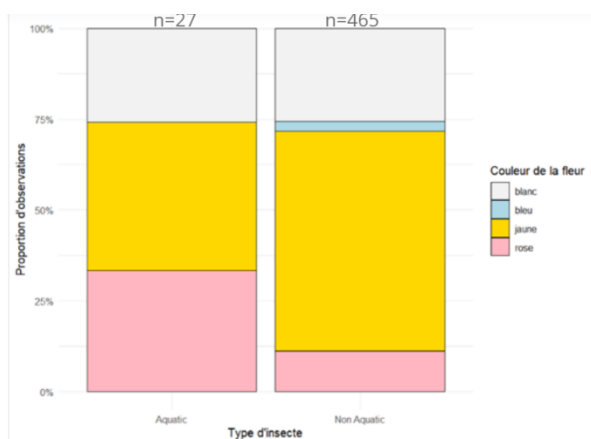


Figure 13 : Proportion d'insectes observés selon la couleur des fleurs

Si l'on fait une moyenne des traits floraux par couleur (figure 14), il est possible d'observer que le jaune a la plus grande largeur de corolle. Les fleurs jaunes ont en moyenne un volume d'anthères plus grand, une hauteur assez élevée ainsi qu'une teneur en sucres plutôt faible par rapport au rose ou au bleu. De plus, les fleurs jaunes présentent la plus grande abondance (836 individus) et le plus grand nombre d'espèces observées (18 espèces) (figure 14).

Les insectes aquatiques ne semblent pas particulièrement attirés par la teneur en sucre des fleurs, contrairement aux abeilles. En effet, une expérience dans une étude a montré que les

abeilles privilégiaient la couleur de fleurs offrant la récompense la plus importante, et visitaient les fleurs de façon aléatoire quand la récompense (teneur en sucre) était la même (Hernández, J. C., 2025).

Couleur	Volume anthère (mm ³)	Rapport corolle	Hauteur(m m)	Largeur corolle(mm)	Profondeur corolle(mm)	Teneur sucre (ug/UF)	Somme des abondances	Nombre d'espèces de fleurs
Blanc	10,67	2,02	45,89	5,19	7,65	59,60	736	15
Bleu	5,38	7,74	23,95	2,38	16,04	286,59	119	4
Jaune	28,52	4,60	64,26	7,97	10,76	184,23	836	18
Rose	31,30	126152,66	76,94	5,16	14,37	544,48	317	13

Figure 14 : Moyenne des traits morphologiques, abondance et nombre d'espèces des fleurs selon leur couleur

Néanmoins, l'impact des couleurs sur les traits floraux doit être vérifié avec un test statistique, une moyenne des traits ne suffisant pas pour déterminer s'il existe vraiment une différence de morphologie entre les couleurs.

Après avoir testé la normalité des données avec la fonction Shapiro.test (toutes les p-values<0,05), nous réalisons pour chaque trait morphologique, le test de Kruskal-Wallis afin de voir si un groupe diffère des autres (Annexe 7). Les couleurs bleu, marron et vert, ont été retirées du jeu de données, à cause d'un trop faible nombre de données qui pouvait biaiser les résultats.

Le test du Kruskal-Wallis montre que la couleur a seulement une influence sur le volume des anthères. Néanmoins, le test de Dunn, qui a pour objectif de savoir quel groupe est différent, ne montre pas lequel (figure 15). Ce résultat est étonnant et montre peut-être que la significativité n'est peut-être pas si importante. Ces différents tests nous montrent qu'il n'existe pas, dans la palette de fleurs étudiées, de différences significatives de morphologie entre les couleurs, à part peut-être pour le volume des anthères.

	Comparison	Z	P.unadj	P.adj
1	blanc - jaune	-2.2992605	0.02149015	0.06447045
2	blanc - rose	-2.0524007	0.04013073	0.12039220
3	jaune - rose	-0.2361601	0.81330841	1.00000000

Figure 15 : DunnTest sur le volume des anthères

Il est intéressant d'étudier la répartition des couleurs des fleurs selon la distance au cours d'eau. En se basant sur les atterrissages des insectes, on obtient la figure suivante :

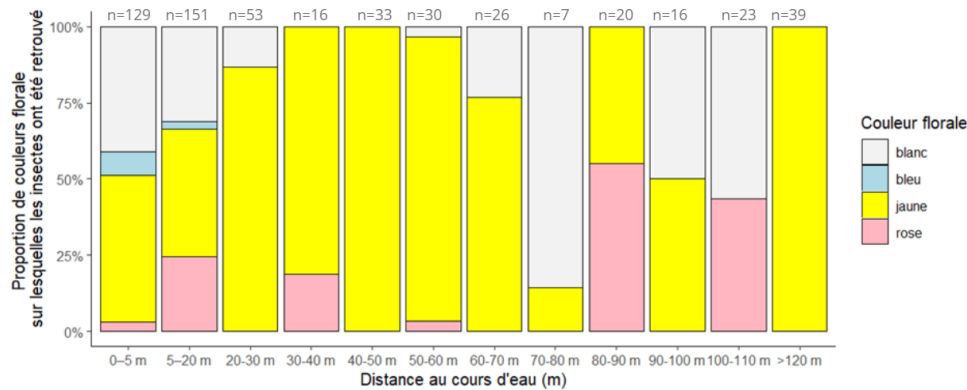


Figure 16 : Répartition des couleurs en fonction de la distance au cours d'eau (m)

Comme dit précédemment, le jaune est la couleur présentant la plus forte abondance et la plus grande diversité d'espèces observées. On retrouve bien cette couleur comme prédominante, particulièrement entre 20 et 70 mètres des cours d'eau. Entre 0 et 20 mètres, le jaune, rose et bleu sont présents, ce qui semble montrer que les insectes les visitant, potentiellement plus aquatiques, sont assez diversifiés dans leurs visites, et qu'il y a peut-être plus de diversité de couleur près des cours d'eau qu'en milieu terrestre. Le code est présenté en annexe (Annexe 8).

Nous venons de comparer les préférences des traits floraux des insectes issus des milieux aquatiques, par rapport aux insectes terrestres, nous allons maintenant nous centrer sur les insectes issus des milieux aquatiques et sur leurs différentes familles.

C-Différences de fréquentation florale entre les familles d'insectes aquatiques.

Nous allons maintenant nous intéresser aux différences de fréquentation florale qui peuvent exister en fonction des familles issues des milieux aquatiques.

1-ACP

Les graphes présentés ci-dessous ont été réalisés à partir d'une base de données recensant l'ensemble des insectes aquatiques identifiés sur des fleurs lors d'une sortie de terrain. Ces données ont été couplées avec des informations relatives à chaque fleur ainsi que des données relatives au transect. Pour cette analyse les variables suivantes ont été retenues :

- La famille de l'insecte (FAMILY)

- L'abondance de fleurs (Abund_FLO) : le nombre de fleurs par transects
- La diversité florale (FLO_RICHNESS) : le nombre d'espèces de fleurs par transects
- La couverture florale (CouvF_MOY_PLOT) : la couverture florale par transect
- Le Volume des anthères (vol_anthere) mm³
- Le rapport Profondeur/Largeur de la corolle (raport_corolle)
- La hauteur (hauteur) : hauteur de l'unité florale la plus élevée d'un individu par rapport au sol (cm)
- La largeur de la corolle (larg_corolle) en mm
- La profondeur de la corolle (prof_corolle) en mm
- La teneur en sucre de la fleur (teneur_sucre) : quantité de sucre dans le nectar produit par la fleur en 24h

Les figures ci-dessous sont des ACP (Analyse en Composantes Principales). Cette méthode est utilisée dans l'analyse exploratoire de données afin d'explorer et analyser un jeu de données comprenant des variables quantitatives. Ces analyses ne visent pas à fournir une réponse statistique mais à en faciliter l'interprétation. Le code de chaque figure réalisée sous R est fourni en annexe (Annexes 10 et 11).

Le premier ACP analyse la répartition des familles de Chironomidés, Limoniidés, Nemouridés, Pediciidés et Trichoptères en fonction des traits floraux présentés ci-dessus (figure 16). Les Syrphes ont été exclus du graphes car leur forte contribution rendait le graphe moins lisible (Annexe 9). L'ACP présentant les Syrphes est disponible en dessous (figure 18).

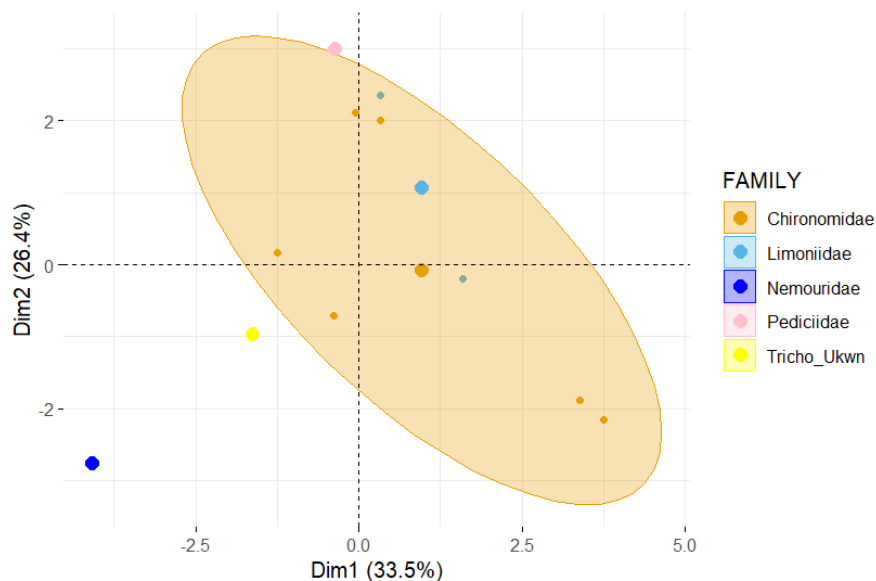


Figure 17 : ACP des familles d'insectes aquatiques en fonction des traits floraux

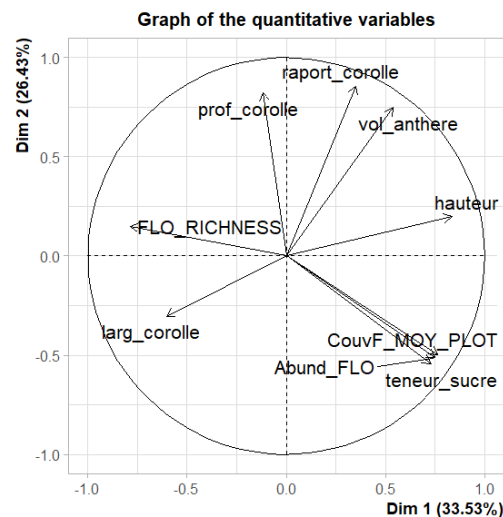


Figure 18 : Graphe des variables quantitatives des traits floraux

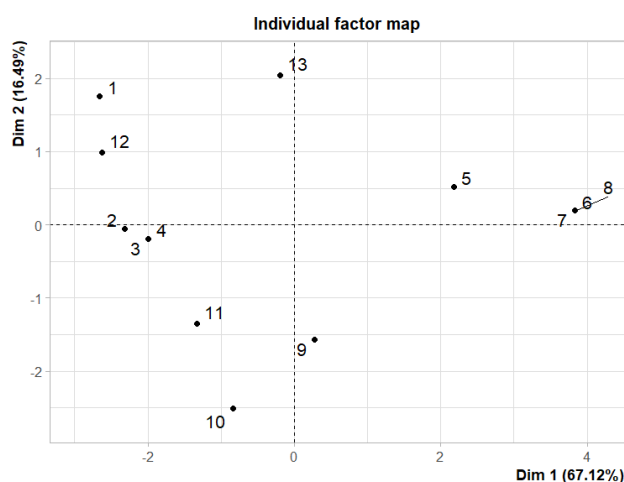


Figure 19 : Carte factorielle des individus Syrphes suivant les traits floraux

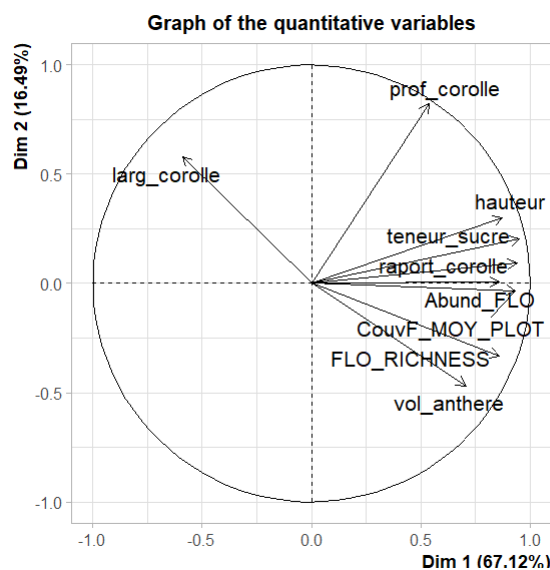


Figure 20 : Graphe des variables quantitatives des traits floraux

Ces analyses ont pour but de mieux comprendre les caractéristiques florales qui attirent ces espèces et les variations entre les familles. En effet, les insectes issus des milieux aquatiques sont nombreux, et ne répondent pas forcément aux mêmes traits floraux. Chez les Syrphes, des études ont montré qu'ils ont des préférences en matière de couleur et que leur alimentation en nectar était influencée par des contraintes morphologiques liées à la morphologie de la fleur (Klecka et al., 2018).

Afin de réaliser cette analyse, à chaque fois qu'une information sur les traits floraux était absente de la base de données, la ligne complète était effacée. Après nettoyage du fichier, les informations florales étaient exploitables pour 25 insectes aquatiques. De plus il n'y a que deux espèces de Limoniidés, une des Nemouridés, une des Pediciidés et deux Trichoptères. Les faibles données sur ces deux familles permettent d'avoir une idée du genre de fleurs qu'elles visitent mais ne montreront pas leur diversité comme celles des Syrphidés et des Chironomidés qui ont un nombre d'observations plus important.

Ces deux familles montrent un attrait différent aux vecteurs floraux. Les **Syrphidés** dévoilent une sensibilité aux larges corolles et dans une moindre mesure, la teneur en sucre et le rapport corolle. Concernant l'attrait pour les larges corolles, il peut s'expliquer par plusieurs facteurs, notamment l'accès au nectar qui est plus facile quand l'insecte peut se poser et atterrir correctement. Les larges corolles facilitent donc l'accès à la nourriture, ce qui est particulièrement adapté à certains syrphes qui ont un proboscis (organe buccal) court et préfèrent les fleurs ouvertes comme on peut le voir sur la figure 18 (*Eristalis transversa*). D'autres ont un proboscis plus long ce qui leur permet d'accéder aux fleurs plus profondes (*Rhingia campestris*, figure 19) (Zanin J. 2023). Comme le montre l'ACP, la profondeur des corolles ne semble, en effet, pas être déterminante dans leurs choix. Les préférences pour les larges corolles peuvent aussi être liée à une meilleure visibilité de la fleur, plus détectable que de petites fleurs. Cette variabilité morphologique au sein de la famille confère un avantage morphologique aux Syrphes et suggère une capacité d'exploitation assez large du spectre des ressources florales.



Figure 21 : *Eristalis transversa*

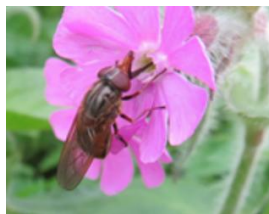


Figure 22 : *Rhingia campestris*

La répartition des **Chironomidés** est différente des Syrphes. Contrairement à ce groupe, ils ne semblent pas dépendants d'un trait floral particulier. Leur ellipse de dispersion est large, et tend vers plusieurs variables, notamment : Richesse florale, Profondeur de corolle, Couverture florale moyenne, Abondance florale et Teneur en sucre. À l'inverse des Syrphes, la largeur de la corolle ne semble pas être déterminante pour les Chironomidés. Les Chironomidés semblent répondre davantage aux caractéristiques du milieu et à la disponibilité des fleurs. Les transects riches en espèces florales, avec une couverture florale et une abondance forte semblent plus fortement les attirer qu'un caractère morphologique précis. On pourrait les considérer comme des visiteurs floraux généralistes, avec une faible spécialisation morphologique, qui se comportent de façon opportuniste par rapport à la disponibilité des fleurs.

Cette première analyse exploratoire générale permet de mieux comprendre les liens qui peuvent exister entre une famille et les traits floraux et les caractéristiques d'un milieu.

Les résultats suggèrent que les syrphes ne se tournent pas vers une morphologie florale spécifique, mais exploitent une diversité de fleurs, ce qui soulève plusieurs questions complémentaires. Il s'agit notamment de déterminer si cette diversité correspond à des familles botaniques distinctes, et, le cas échéant, d'identifier lesquelles.

2- Analyse des familles visitées par les Syrphes

L'objectif de cette analyse est de déterminer si les Syrphidés présentent une large gamme de familles botaniques visitées, et d'identifier si certaines de ces familles sont associées aux cultures agricoles. Pour chacune des 71 espèces de Syrphes identifiées, des informations relatives aux plantes visitées ont été recherchées dans la littérature scientifique. Les espèces végétales mentionnées ont ensuite été regroupées par familles botaniques (Annexe 12). À partir de la récurrence des familles observées, le graphique présenté ci-dessous (figure 20) illustre la diversité des familles botaniques visitées par les Syrphidés.

Représentation des familles de plantes les plus retrouvées dans la littérature scientifique, sur laquelle des syrphes ont été observés

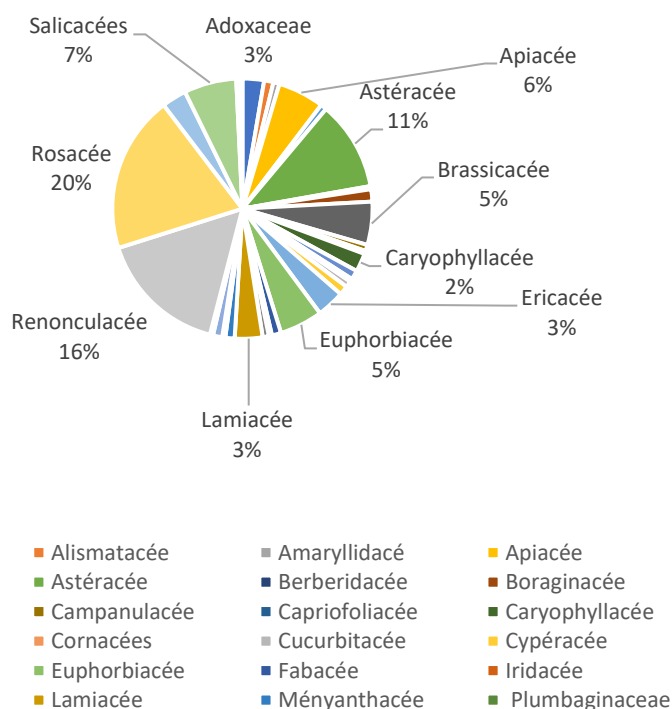


Figure 23 : Représentation des familles de plantes les plus retrouvées dans la littérature scientifique, sur lesquelles des syrphes ont été retrouvées

La présence de 24 familles différentes suggère que les Syrphes présentent un comportement de butinage majoritairement **généraliste** et une capacité d'adaptation à une grande diversité de morphologies florales. Les Syrphes ont été le plus retrouvées sur des Rosacées, des Renonculacées et des Astéracées. Les fleurs de Rosacées présentent une symétrie radiale, interprétée comme une corolle ouverte, permettant aux pollinisateurs d'aborder la fleur sous différents angles (Kalkman C, 2004). Ces fleurs sont également souvent de grande taille, facilitant l'accès au nectar et au pollen pour des insectes de tailles variées (Hafid Boussouf Mila A., 2021). De même, les Renonculacées sont majoritairement caractérisées par des fleurs actinomorphes (à symétrie radiale), avec une structure florale ouverte, accessible aux insectes (Le coin du BAPA, 2022). Cette symétrie radiale des deux familles correspond à une disposition ouverte des pétales, qui peut correspondre à une large corolle.

L'analyse exploratoire précédente, nous ayant montré que les Syrphes avaient un attrait pour les larges corolles, les observations de terrain concordent avec les observations de la littérature scientifique. De plus, une étude a montré que la symétrie radiale et les fleurs ouvertes étaient associées à des pollinisateurs généralistes (Lazarto et al. 2014).

La famille la plus visitée par les syrphes, les Rosacées sont une famille de 85 genres et plus de 2000 espèces qui regroupe une proportion importante de nos arbres et arbustes fruitiers, tels que les : pommiers, amandiers, pruneliens, framboisiers, aubépines, ... En agriculture, la pollinisation de ces arbres est essentielle pour obtenir des récoltes. La visite d'insectes généralistes comme les Syrphes, peuvent donc contribuer au succès reproducteur des cultures, en complément des pollinisateurs spécialisés. Il convient néanmoins de souligner que ces résultats reflètent la fréquence des

observations rapportées et pas nécessairement les préférences réelles des Syrphes. Certaines espèces végétales étant par exemple plus facilement observable que d'autres.

Il semble important de rappeler que les données issues de la littérature sur les Syrphes ne précisent pas toujours si l'observation concernait la fleur de l'espèce végétale. De plus, la date de l'observation n'est souvent pas renseignée. Or, la visite d'un insecte sur une plante ne coïncide pas forcément avec la période de floraison de celle-ci. Si un insecte visite une plante hors de sa floraison, il ne participe pas au processus de pollinisation.

Il est donc nécessaire de s'assurer qu'il existe une fenêtre temporelle où les insectes et les fleurs peuvent effectivement se rencontrer. Cette considération introduit la notion clé de la période d'émergence des insectes et de la fenêtre de floraison des plantes.

4 - Période d'émergence des insectes et période de floraison

Parmi ces paramètres, la période d'émergence des insectes est celle pour laquelle le plus de données ont été trouvées dans la littérature scientifique. Comme rappelé précédemment, connaître les périodes d'émergence permet d'analyser l'activité des insectes en relation avec la floraison et de comparer leur disponibilité avec celle d'autres pollinisateurs.

Avec les périodes d'émergence trouvées dans la littérature pour différentes espèces pour 4 familles d'insectes (Trichoptères, Syrphes, Plécoptères, Ephéméroptères), un graphique « heatmap » a été réalisé (figure 25), montrant la proportion d'émergence au cours des mois (Annexe 13). Ces données d'émergence ne permettent pas de définir la phénologie précise des familles, il faudrait plus de données (figure 24), mais permettent d'en avoir une idée générale.

Famille	Nombre d'espèces étudiées
Trichoptères	18
Syrphes	7
Ephéméroptères	9
Plécoptères	8

Figure 24: Nombre d'individus de chaque espèce étudiée pour la réalisation de la Heatmap.

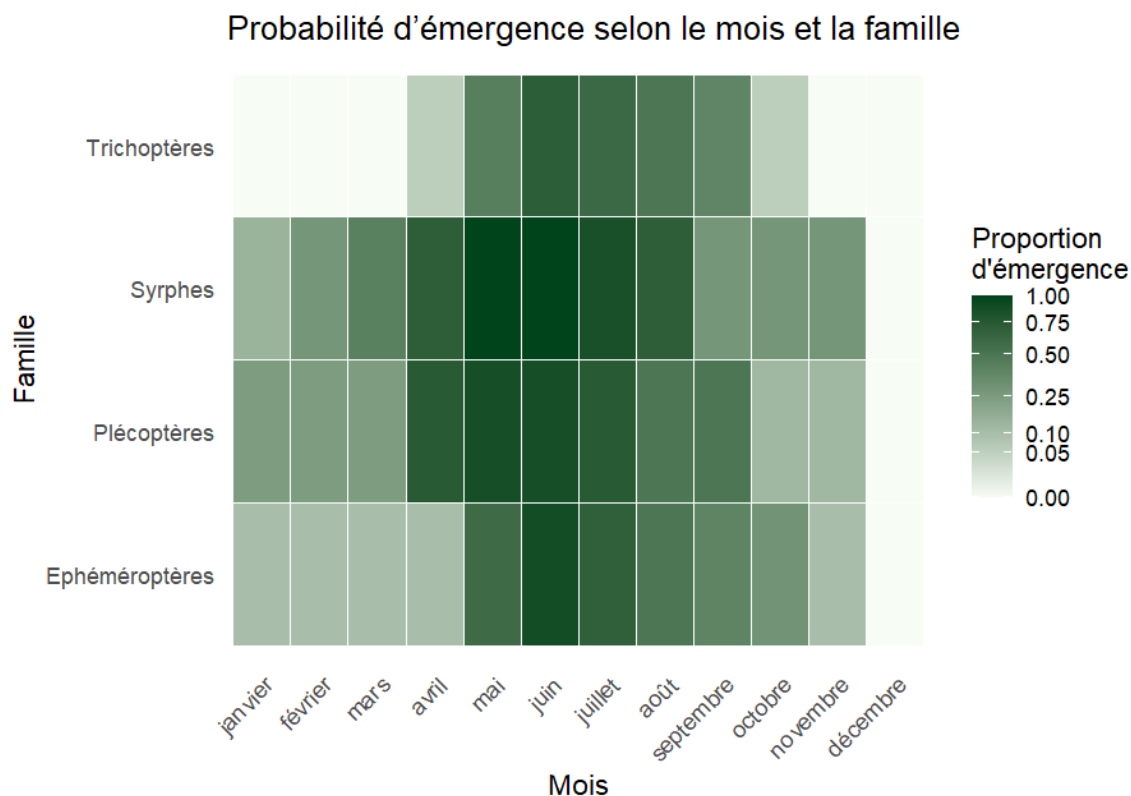


Figure 25: Heatmap de la probabilité d'émergence des familles selon les mois

En premier lieu, il est possible de constater que les familles ont des émergences variées et couvrent presque tous les mois à l'exception de décembre. Les trichoptères sont la famille avec le moins de mois d'émergence, avec une absence totale sur les mois de janvier à mars. Viennent ensuite les Ephéméroptères, qui ont une émergence centrée de mai à octobre. Les Plécoptères arrivent un peu plus tôt, autour d'avril, et les Syrphes sont présents dès mars. C'est ce groupe qui montre des émergences plus abondantes tout au long de l'année.

Pour rappel, l'émergence est le moment où l'insecte sort du stade larvaire aquatique pour devenir un adulte volant qui peut coloniser le milieu terrestre. L'insecte est donc « fini » et apte à visiter les fleurs. A titre de comparaison, pour les pollinisateurs phares, les abeilles, la ponte d'œufs a généralement lieu fin mars, et il faut 21 jours à une abeille pour pouvoir être prête à sortir de la ruche (Imdorf A et al, 1996). La nouvelle génération d'abeilles de l'année est donc opérationnelle à partir de mi-avril. Sur les quatre familles étudiées, trois sont donc présentes avant l'arrivée des abeilles et peuvent profiter des fleurs présentes pour se nourrir.

Et qu'en est-il des fleurs ? Le second jeu de données, issu du travail de terrain dans le quart nord-ouest de la France et qui identifie notamment les insectes qui se sont posés sur les fleurs des quadrats nous permet de répondre à cette question.

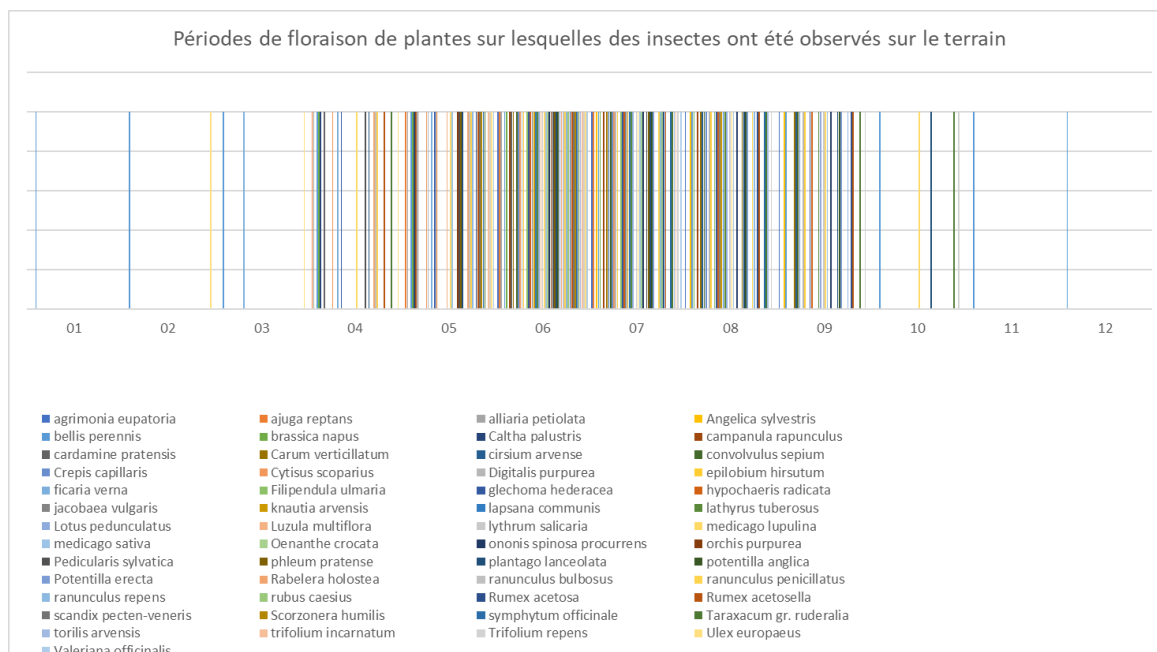


Figure 26 : Période de floraison

Comme dit précédemment, à partir de mi-avril, les abeilles sortent des ruches et trois des quatre familles d'insectes aquatiques étudiées sont présentes. Durant cette période, de nombreux arbres et plantes sont en fleurs et ont besoin d'une pollinisation. C'est le cas de certains Rosacées (comme indiqué dans l'analyse exploratoire), comme les pêchers, pommiers, pruniers, cerisiers, mais également les noisetiers, aulnes, et certaines cultures comme le colza.

La figure 23 montre la période de floraison des plantes sur lesquelles ont été retrouvés les insectes lors du travail de terrain. Elle permet de visualiser le pic de floraison et le déclin à mesure qu'on se rapproche de la fin de l'année. Le pic d'émergence des 4 familles d'insectes aquatique (avril à août) corrobore bien avec celui de floraison (mai à août). Cette synchronisation renforce l'hypothèse selon laquelle les fleurs constituent une ressource alimentaire essentielle pour les adultes émergents, tout en bénéficiant potentiellement d'un service de pollinisation.

Enfin, alors qu'il n'y a plus de couvain (larves d'abeilles) dans les ruches à partir de début novembre et que la population d'abeille décline, les Ephéméroptères, Plécoptères et Syrphes montre encore une proportion faible d'émergence. Ils peuvent profiter des quelques plantes encore en fleurs, comme Bellis Perennis, Trifolium repens, Taraxacum gr ruderalia, Plantago Lanceolata et Medicago lupulina (figure 23) mais la plupart des végétaux sont au repos.

Discussion

L'objectif principal de ce rapport était d'évaluer si les insectes issus des milieux aquatiques peuvent être considérés comme des pollinisateurs potentiels, en analysant d'une part leurs traits biologiques, leurs capacités de déplacement, leurs interactions avec les fleurs et leurs préférences florales. Les résultats obtenus permettent d'apporter des éléments de réponse nuancés à cette problématique, tout en mettant en évidence de fortes limites liées à la disponibilité des données. Les résultats mettent en évidence que les milieux aquatiques ne sont pas des habitats « passifs », mais abritent certains insectes aquatiques qui peuvent interagir avec des plantes terrestres, ce qui rejoint certaines études récentes (Lafague et al., 2019).

Des insectes aquatiques capables d'explorer les milieux terrestres

L'étude des distances de vol montre que certaines familles, notamment les Syrphidés et les Trichoptères, possèdent une capacité de vol suffisante pour s'aventurer dans les milieux terrestres sur des distances pouvant parfois atteindre le kilomètre. Cette avancée vers les milieux terrestres, augmente alors la rencontre avec les fleurs terrestres et donc de potentielles activités de pollinisation. Néanmoins, le manque de données sur les autres familles rend difficile une prise de position.

Taille et masse, une grande diversité

Les analyses morphologiques montrent une grande diversité de tailles et de masses au sein des différentes familles étudiées. Les Trichoptères et Syrphidés montrent des tailles comparables à certains pollinisateurs classiques, comme l'abeille ou le bourdon, ce qui suggère une capacité, non pas équivalente mais peut-être significative pour le transport de pollen. Néanmoins, ils ne sont pas pourvus d'une morphologie spécialisée, comme les corbeilles à pollen chez les abeilles. Une étude plus détaillée sur leur enveloppe externe serait nécessaire, afin d'étudier par exemple leur pilosité et d'autres variables pour étudier l'adhésion du pollen et mieux estimer leur rôle réel. La variabilité morphologique entre les familles montre que certaines espèces aquatiques pourraient être de bons pollinisateurs, tandis que d'autres contribueraient plus marginalement.

Une réponse différente aux traits floraux, entre insectes issus des milieux aquatiques et terrestres

L'analyse GLM montre que la distance au cours d'eau est déterminante dans la proportion d'insectes aquatiques observés sur les fleurs. Ce résultat était prévisible, étant donné le cycle de vie de ces insectes. Parmi les traits floraux, seule la hauteur des fleurs montre un effet significatif négatif sur la proportion d'insectes aquatiques. Ils semblent préférer les fleurs basses, peut-être pour limiter les coûts énergétiques liés au vol. Le manque de résultats vient certainement aussi de la simplification des données par moyenne par transect. Une analyse plus fine, pourrait révéler des préférences significatives. Il est également possible de se demander si cette préférence pourrait aussi être indépendante d'eux : les fleurs des zones proches des cours d'eau sont peut-être influencées par le milieu plus ouvert, qui limite la compétition entre espèces et donc la taille. Enfin, une analyse statistique aurait pu être réalisée afin de voir s'il existait une corrélation entre la taille des fleurs et leur teneur en sucre.

Couleur des fleurs, abondance et disponibilité des ressources

L'analyse des couleurs montre que le jaune est la couleur la plus visitée, tant par les insectes aquatiques que terrestres. Toutefois, les insectes aquatiques présentent une répartition plus équilibrée entre le jaune, le rose et le blanc, ce qui suggère une spécialisation chromatique plus faible que les insectes terrestres. Néanmoins, cette observation doit être considérée avec prudence. Les fleurs jaunes sont les plus abondantes et les plus diversifiées dans les milieux étudiés. Le résultat pourrait alors ne montrer que la disponibilité de la ressource, sans montrer les réelles préférences des insectes. La question de l'attraction des couleurs pourrait être complétée par une vraie expérience de terrain, avec des bacs de couleurs contenant des récompenses, en milieu terrestre mais aussi à côté d'un cours d'eau pour avoir une proportion d'insectes aquatiques plus grande et une meilleure fiabilité des résultats. De plus, le graphique montrant la répartition des couleurs sur lesquelles atterrissent les insectes, en fonction de la distance au cours d'eau pourrait être remplacé, de même, par des observations de terrain. Le graphique montre plus de diversité de couleurs près des cours d'eau, mais simplement du point de vue des atterrissages d'insectes.

Des stratégies florales différentes entre les familles aquatiques

Les analyses exploratoires (ACP), montrent des différences entre les familles aquatiques. Les Syrphes semblent préférer de larges corolles, les Chironomidés sont davantage influencés par les caractéristiques globales du milieu (abondance, richesse et couverture florale). Ces résultats montrent que les insectes aquatiques ne forment pas un groupe homogène et que leur potentiel rôle de pollinisation dépend fortement de leur famille. En raison du nombre restreint de données disponibles, nous avons été limités au Syrphes et Chironomidés. Néanmoins, il serait très intéressant de refaire une analyse statistique, avec un jeu de données plus grand afin de voir si des différences existent entre les familles et leur attraction pour des traits floraux particuliers.

De plus, lors de l'état de l'art, nous avons décidé de chercher des informations sur les pièces buccales des insectes, afin de les comparer avec la morphologie des plantes. Ceci s'est avéré compliqué, nous n'avons pas mis suffisamment de temps à bien comprendre la morphologie des pièces buccales, les données étaient compliquées à trouver. De plus, avec les quelques données trouvées, nous n'avons pas su comment les utiliser face aux traits morphologiques des fleurs.

Une grande diversité de familles visitées par les Syrphes

Les données recueillies pour les 71 espèces de syrphes, dans la littérature scientifique, ont mis en évidence que les Syrphes visitaient un grand nombre de familles différentes, 24 ! Principalement des Rosacées, Renonculacées et Astéracées. Dans la famille des Rosacées, on retrouve les fruitiers cultivés, les syrphes participent donc potentiellement déjà à la pollinisation de ces espèces et ont donc déjà un rôle important dans nos agrosystèmes. Si nous avions eu plus de temps, nous aurions également pu faire ces mêmes recherches pour d'autres familles. Les syrphes étant déjà un des groupes d'insectes aquatiques les plus étudiés.

Une synchronisation temporelle favorable à la pollinisation

Enfin, l'analyse des périodes d'émergence des insectes et de floraison montre une synchronisation importante. Plusieurs familles émergent avant ou en même temps que les abeilles domestiques, ce qui suggère un rôle de pollinisateur complémentaire ou même précoce, qui serait utile pour de nombreuses espèces dont la floraison est tout juste assurée par les pollinisateurs classiques

Conclusion

L'objectif de ce rapport était d'évaluer si les insectes issus des milieux aquatiques pouvaient être considérés comme des pollinisateurs potentiels. Les résultats ont montré que certaines familles, notamment les Syrphidés et les Trichoptères, présentent des caractéristiques favorables à la pollinisation, grâce à leur capacité de vol suffisante pour atteindre les fleurs terrestres, leur taille comparable à des pollinisateurs classiques, leurs préférences florales variées et leur période d'émergence synchronisée avec la floraison. Néanmoins, des limites sont présentes, notre analyse s'est au fur et à mesure concentrée sur les Syrphes, en raison de la disponibilité des données et des choix à faire en fonction du temps imparti.

Pour les autres familles étudiées (Plécoptères, Ephéméroptères et Trichoptères) et pour d'autres, les informations sur les traits morphologiques, leurs comportements et leurs interactions avec les fleurs sont encore très mal documentés. Cela souligne l'importance des futures recherches afin de mieux connaître ces familles pour mieux comprendre leurs interactions avec le monde terrestre. Comme rappelé dans l'introduction, la pollinisation représente un service écosystémique dont la valeur économique est considérable. Le rôle des insectes issus des milieux aquatiques étant mal connu et sous-estimé, il est probable que le coût réel lié au déclin de la pollinisation ne soit encore plus élevé que ce qu'on a modélisé aujourd'hui.

Annexes

Annexe 1 : Tableau récapitulatif sur les Trichoptères

Trichoptera	Taille insecte (mm)	Masse insecte (mg)	Période d'émergence	Pays	Information pièces buccales	Distances de vol
Agapetus fuscipes	nt : M: 3,50+/-0,12 F:4,02	x	Larval development is stimulated by higher water temperature. If summer water temperature is high emergence	Allemagne	length variation labial palp sensilla et maxillary palp sensilla	rarely found even as little as 20—40 m from the brook
Athripsodes bilineatus	x	x	mai- juin-juillet	Croatie	x	x
Athripsodes cinereus	x	x	juin	Croatie	x	x
Glyptotaelius pellucidus	14,61-M/12,84F/7,91-M	x	avril	Suède	x	x
Goera pilosa	x	x	x	X	x	x
Hydropsyche angustipennis	x	x	mai-juin	Croatie	mandibule longueur = 3,01mm / largeur = 1,99mm net mesh opening : 152 mm	x
Hydropsyche siltalai	x	x	juin	Danemark	mandibule longueur = 2,65mm / largeur = 1,95 mm net mesh opening : 242 mm	A short distance upstream flight of females (c. 0.1-0.4 km / Female Hydropsyche siltalai Dohler have frequently been caught in light traps situated 1.5-2.5km
Hydroptila sparsa	x	x	x	X	x	x
Hydroptila tineoides	x	x	x	X	x	x
Limnephilus centralis	x	x	adults emerging mostly in spring and autumn, but in lesser number in summer as well	Kosovo	x	x
Limnephilus lunatus	13,15M - 12,14 F		mai-juin-juillet-août-septembre	Croatie	x	x
Lype phaeopa	x	x	mai-juin-juillet-août	Croatie		x
Micropterna lateralis	15,8 M /14,01F	x	juin-juillet	Islande	x	x
Mystacides azurea	x	x	mai-juin-juillet-août-septembre	Islande	x	x
Notidobia ciliaris	12 mm		mai-juillet	Croatie		
Oecetis testacea	M: forewing length 5,5mm	x	juin-juillet-septembre	Croatie	Scape stout; pedicel short; maxillary palps pale yellow, 5-segmented; labial palps pale yellow, 3-segmented	x
Oxyethira frici	x	x	x	x	x	A short distance upstream flight of females (c. 0.1-0.4 km --- Oxyethira frici in this group was the only species
Phryganea grandis	25-35 mm	x	mai-juin	x	x	x
Polycentropus flavomaculatus			juin-juillet-août-septembre-octobre	Croatie	Mandible: only left has internal brish of hairs. Maxilla : palp long, 4-segmented, third one much longer. Labium : conical, palp absent. Labrum : transverse, sclerotized	Polycentropus flavomaculatus had a significant upstream flight.
Potamophylax latipennis	M:18,6mm F:20mm	M : 59,3 mg F:90,9mg	septembre	Suède	x	500- 1000 m
Ryacophila dorsalis	x	x	R. dorsalis had the most extended flight period, as it was taken until late October with a maximum in lateJuly-early August. In the British Isles R. dorsalis has a long flight period, from May to November; in Scotland with maximum catches in September and October (Crichton et al., 1978).	Russie	taille labial palps max, blunt chaetoid(gustatory): 69,1+/-8,2 micromètres	
Sericostoma personatum	x	x	may-juin-juillet-août	Britain	x	rarely dispersed more than a few metres from the brook
Silo pallipes	Body : M: 8,65+/-0,71 F: 6,31+/-0,37Forewing length : M: 8,73 F: 7,80mm					adult A. fuscipes rarely ventured more than 1 m from their home brook, and female S. pallipes were rarely caught in light traps located 450-600 m from the nearest larval habitat at two Funen streams / S. pallipes is found mostly above a brook and in the bankside vegetation, but only rarely as far as 20-40 m from the brook
		10,54 F - 4,84 M	mai-juin-juillet-août	Danemark	x	

Annexe 2 : Tableau récapitulatif sur les Ephéméroptères

Ephemeroptera	Taille insecte (mm)	Masse insecte (mg)	Période d'émergence	Pays	Information pièces buccales (taille)	Distances de vol (taille, profondeur)
Leptophlebiidae	x	x	x	x	x	x
Heptageniidae	x	x	x	x	x	x
Baetis sp.	x	x	x	x	x	x
Baetis cf digitatus	x	x	mi juin fin juin	Suède	x	x
Baetis cf niger	x	x	The winter generation emergend from	Angleterre	x	x
Baetis cf rhodani	x	x	may-june-october	Angleterre	x	x
Baetis cf fuscatus	5-7mm (sans cerques)	x	début mai à début novembre (plus fréq	x	x	x
Centroptilum luteolum	6 mm F	x	late june, beginning of july	Suède	x	x
Habrophlebia sp.	x	x	x	x	x	x
Leptophlebia marginata	7,5mm F	x	début et fin juin	Suède	x	généralement < 10 m, parfois 100-150m
Caenis sp.	x	x	x	Suède	x	x
Caenis cf luctuosa	3-5 mm (sans cerques)	x	début mai à début octobre (plus en été	x	x	x
Ephemera danica	M: 14/16/17,5mm F:21/	fresh mass of 99.6 ± 30.7	Mai-juin et juillet-août	x	x	x
Siphonurus sp.	x	x	x	Angleterre	x	x
Siphonurus cf aestivalis	x	x	x	x	x	l'espèce était abondante dans les collect
Ephemerella ignita	8mm F	x	Mai-juin-juillet	Ecosse	x	x

Annexe 3 : Tableau récapitulatif sur les Syrphes

Syrphidae	Taille insecte (mm)	Masse insecte (mg)	Période d'émergence
Eristalis jugorum	x	x	Mai à juin
Eristalis pertinax	11-16 mm	x	février-novembre
Eristalis similis	14-16mm	x	Mi mars jusque fin août
Helophilus pendulus	10-14 mm	82.0mg	April/October (March in southern Europe and stragglers on into November)
Neoascia podagrica	5-6mm	x	avril-septembre avec un pic de juin à août
Neoascia tenur	4-6mm	x	fin avril-septembre, pic en juin juillet
Rhingia campestris	8-11 mm , wing length 7.	X	mais-septembre, pic en juin et août

**La colonne sur les pièces buccales n'est pas présente car aucune information n'a été trouvée*

*** Les pays ne sont pas indiqués, car le site de l'INPN étant en panne, je n'ai pas pu remonter les liens que j'avais sauvegardé.*

Annexe 4 : Tableau récapitulatif sur les Plécotères

Plecoptera	Taille insecte (mm)	Masse insecte (mg)	Phénologie (période d'émergence)	pays
Isoperla cf grammatica	x	x	fin de printemps et en été	France
Siphonoperla cf torrentium	x	x	avril à juillet	Espagne
Chloroperla sp.	x	x	Chloroperla torrentium, emerging during May, June and July,	Royaume-Uni
Leuctra sp.	x	x	septembre/nov and janvier aout, tout sauf decembre	Autriche
Protonemura sp.	x	x	Leur période de vol connue s'étend d'avril à octobre pour P. d	France, corseS
Nemurella sp.	x	x	sept/oct et avril/aout	Autriche
Nemoura sp.	x	x	sept/oct et avril/aout	Autriche
Brachyptera sp.	7-10 mâles 9-13 femelle	x	à partir de fin janvier, mars sûr , autre source mars -juin début	Pays-bas / Suisse

**Les colonnes sur les pièces buccales et les distances de vol ne sont pas présentes aucune information n'a été trouvée.*

Annexe 5 : GLM traits floraux

```
library(ggplot2)
library(plyr)
library(dplyr)
library(tidyr)
library(tidyverse)
library(glmmTMB)
```

#Manipulation Excel grâce à un tableau croisé dynamique pour établir les moyennes des traits floraux par quadrat.

```
DATA_NETWORK <- nvjdd
GLMM_DF <- DATA_NETWORK %>%
  select(transect, FLO_RICHNESS, Abund_FLO, `WATERCOURSE`,
    `Non Aquatic`, Aquatic,
    larg_corolle, teneur_sucres, hauteur, vol_anthere, prof_corolle) %>%
  distinct() %>%
  mutate(across(c(larg_corolle,
```

```
teneur_sucre, hauteur, prof_corolle, `WATERCOURSE, DIST`),
as.numeric))
```

```
GLM_global <- glmmTMB(
  cbind(Aquatic, `Non Aquatic`) ~ FLO_RICHNESS + `WATERCOURSE, DIST` + Abund_FLO +
  larg_corolle + hauteur + teneur_sucre + prof_corolle +
  vol_anthere,
  data = GLMM_DF,
  family = binomial(link = "logit"))
```

```
#family = binomial(link = "logit"))
```

```
simulationOutput <- simulateResiduals(fittedModel = GLM_global)
plot(simulationOutput)
```

```
summary(GLM_global)
library(car)
Anova(GLM_global, type = "II")
```

Annexe 6 : Impact des couleurs entre les insectes aquatiques et terrestres

```
ggplot(jaunedata, aes(x = dist_classe, fill = Couleur)) +
  geom_bar(position = "fill", color = "black", linewidth = 0.2) +
  scale_y_continuous(labels = scales::percent_format()) +
  scale_fill_manual(
    values = c(
      "blanc" = "grey95",
      "jaune" = "yellow",
      "rose" = "lightpink",
      "bleu" = "lightblue"
    )
  ) +
  labs(
    title = "Répartition des couleurs de fleurs visitées
    en fonction de la distance au cours d'eau",
    x = "Distance au cours d'eau (m)",
    y = "Proportion de couleurs florales",
    fill = "Couleur des fleurs"
  ) +
  theme_minimal() +
  theme(axis.text.x = element_text(angle = 45, hjust = 1))
s
```

Annexe 7 : Test de Kruskal-Wallis

```
shapiro.test(Couleur_traitsmorpho_anova$vol_anthere)
shapiro.test(Couleur_traitsmorpho_anova$rapport_corolle)
shapiro.test(Couleur_traitsmorpho_anova$hauteur)
shapiro.test(Couleur_traitsmorpho_anova$larg_corolle)
shapiro.test(Couleur_traitsmorpho_anova$prof_corolle)
```

```
shapiro.test(Couleur_traitsmorpho_anova$teneur_sucre)
#tout < 0,05, Kruskal wallis
```

```
Couleur2<-Couleur_traitsmorpho_anova %>%
  na.omit()
kruskal.test( vol_anthere ~ Colonne1, data = Couleur2)
# p-value = 0.03522
library(FSA)
dunnTest(vol_anthere ~ Colonne1, data = Couleur2, method = "bonferroni")
```

```
kruskal.test( rapport_corolle ~ Colonne1, data = Couleur_traitsmorpho_anova)
#p-value = 0.1661
```

```
kruskal.test( hauteur ~ Colonne1, data = Couleur_traitsmorpho_anova)
# p-value = p-value = 0.1089
```

```
kruskal.test( larg_corolle ~ Colonne1, data = Couleur_traitsmorpho_anova)
# p-value = 0.6966
```

```
kruskal.test( teneur_sucre ~ Colonne1, data = Couleur_traitsmorpho_anova)
# p-value = 0.3587
```

Annexe 8 : Répartition des couleurs en fonction de la distance au cours d'eau

```
data <- JDD %>%
  mutate(dist_classe = cut(
    `WATERCOURSE,DIST`,
    breaks = c(0, 5,20,30,40,50,60,70,80,90,100,110,120 , max(`WATERCOURSE,DIST`, na.rm = TRUE)),
    labels = c("0-5 m", "5-20 m", "20-30 m", "30-40 m", "40-50 m", "50-60 m", "60-70 m", "70-80 m", "80-
90 m", "90-100 m", "100-110 m", "110-120 m", ">120 m"),
    include.lowest = TRUE
  ))

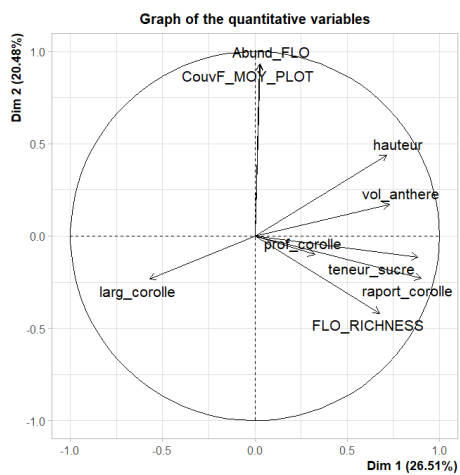
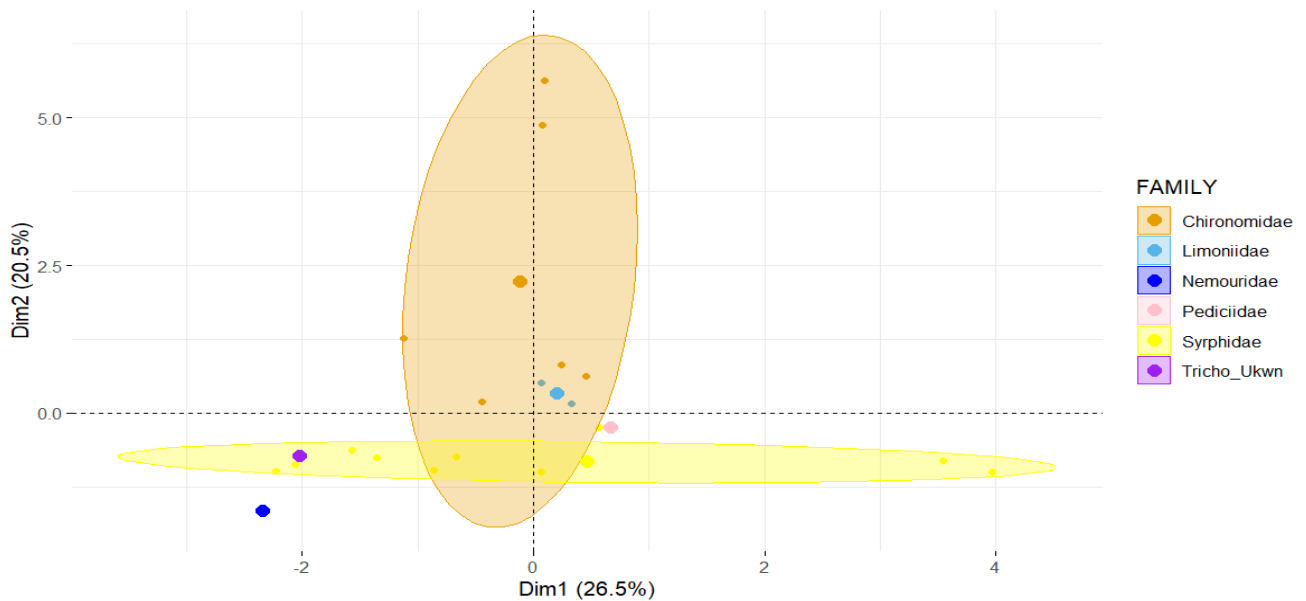
ggplot(data, aes(x = dist_classe, fill = Couleur)) +
  geom_bar(position = "fill", color = "black", linewidth = 0.2) +
  scale_y_continuous(labels = scales::percent) +
  scale_fill_manual(
    values = c(
      "blanc" = "grey95",
      "jaune" = "yellow",
      "rose" = "lightpink",
      "bleu" = "lightblue"
    )
  ) +
```

labs(

x = "Distance au cours d'eau (m)",

y = "Proportion de couleurs florale")

Annexe 9: ACP avec les Syrphidae et les Chironomiidae



Annexe 10 : Code pour l'ACP sur les familles aquatiques :

res_acp3<-PCA (famillesaqua, graph=TRUE)

```
fviz_famd_ind(res_acp3,title="", label="none", habillage="FAMILY",  
addEllipses=TRUE,ellipse.level=c(0.7),ellipse.alpha = 0.3, palette = c("#E69F00", "#56B4E9", "blue",  
"pink", "yellow", "purple"))
```

Annexe 11: Code pour l'ACP sur les Syrphes

```
res_acp3<-PCA (syrphesaqua, graph=TRUE)
```

Annexe 12 : Tableaux des visites rendues aux fleurs par les Syrphes

Syrphe	espèce végétale	pays	information pollen	source	Syrphe	espèce végétale	pays	information pollen	source
Eristalinus taeniops (Wiedemann), 1818	umbellifers;	Europe		Speight	Eristalis horticola (De Geer), 17	Calluna vulgaris,	Europe		Speight
	Calluna vulgaris	Europe		Speight		Cardamine,	Europe		Speight
	Cistus,	Europe		Speight		Cirsium	Europe		Speight
	Daphne,	Europe		Speight		Crataegus	Europe		Speight
	Eryngium,	Europe		Speight		Eupatorium	Europe		Speight
	Euphorbia,	Europe		Speight		Gallum,	Europe		Speight
	Hedera	Europe		Speight		Jasione,	Europe		Speight
	Mentha,	Europe		Speight		Pyrus communis	Europe		Speight
	Rubus	Europe		Speight		Ranunculus,	Europe		Speight
	Senecio,	Europe		Speight		Rubus fruticosus	Europe		Speight
Eristalis abusiva Collin, 1931	Solidago	Europe		Speight		R. idaeus	Europe		Speight
						Sambucus,	Europe		Speight
	Calluna vulgaris	Europe		Speight		Sorbus aucuparia	Europe		Speight
	Caltha	Europe		Speight		Stellaria,	Europe		Speight
	Cirsium	Europe		Speight		Succisa	Europe		Speight
	Erica	Europe		Speight		Viburnum opulus	Europe		Speight
	Potentilla erecta	Europe		Speight					
	Ranunculus,	Europe		Speight					
	Rubus fruticosus agg	Europe		Speight	Eristalis intricaria (L.), 1758	Armeria maritima	Europe		Speight
	Salix repens	Europe		Speight		Cakile	Europe		Speight
	Stellaria	Europe		Speight		Calluna vulgaris	Europe		Speight
	Spartina	Europe		Speight		Cirsium,	Europe		Speight
Eristalis alpina (Panzer), 1798						Crataegus	Europe		Speight
	Aruncus asiaticus,	Europe		Speight		Filipendula	Europe		Speight
	Crataegus,	Europe		Speight		Jasione,	Europe		Speight
	Heracleum	Europe		Speight		Ligustrum	Europe		Speight
	Prunus spinosa	Europe		Speight		Lythrum,	Europe		Speight
	Sambucus	Europe		Speight		Mentha,	Europe		Speight
	Sorbus aucuparia	Europe		Speight		Polygonum cuspidatum	Europe		Speight
	Trollius riederanus	Europe		Speight		Prunus spinosa	Europe		Speight
						Pyrus communis,	Europe		Speight
						Rhododendron	Europe		Speight
Eristalis anthophorina (Fallen), 1817						Rubus	Europe		Speight
	Bellis	Europe		Speight		Salix	Europe		Speight
	Caltha,	Europe		Speight		Succisa	Europe		Speight
	Cardamine	Europe		Speight	Eristalis jugorum Egger, 1858	Chrysanthemum leucanthemum	Europe		Speight
	Cirsium	Europe		Speight		Euphorbia	Europe		Speight
	Crataegus,	Europe		Speight		Knautia,	Europe		Speight
	Lycopus	Europe		Speight		Polygonum	Europe		Speight
	Menyanthes	Europe		Speight		Rubus idaeus	Europe		Speight
	Prunus,	Europe		Speight		Scabiosa	Europe		Speight
	Ranunculus,	Europe		Speight		Sorbus aucuparia	Europe		Speight
	Rubus,	Europe		Speight		Succisa	Europe		Speight
	Salix,	Europe		Speight					
	Solidago canadensis,	Europe		Speight	Eristalis pertinax (Scopoli), 178	visits the flowers of a wide ran	Europe		Speight
Eristalis cryptarum (Fabricius), 1794	Taraxacum,	Europe		Speight		low-growing plants, bushes, shrubs and trees			
	Valeriana	Europe		Speight					
	Calluna vulgaris,	Europe		Speight					
	Caltha,	Europe		Speight					
	Cardamine	Europe		Speight					
	Crataegus,	Europe		Speight					
	Menyanthes	Europe		Speight					
	Potentilla erecta,	Europe		Speight					
	P. palustris,	Europe		Speight	Eristalis picea (Fallen), 1817	Anemone	Europe		Speight
	Ranunculus,	Europe		Speight		Brassica	Europe		Speight
	Succisa	Europe		Speight		Caltha,	Europe		Speight
	Sorbus aucuparia	Europe		Speight		Cardamine	Europe		Speight
						Crataegus,	Europe		Speight
						Euonymus,	Europe		Speight
						Myosotis,	Europe		Speight
						Prunus,	Europe		Speight

Syrphe	espèce végétale	pays	information pollen	source	Syrphe	espèce végétale	pays	information pollen	source
	Pyrus communis	Europe		Speight		Succisa	Europe		Speight
	Ranunculus	Europe		Speight		Taraxacum	Europe		Speight
	Rorippa,	Europe		Speight		Valeriana.	Europe		Speight
	Rosa canina	Europe		Speight		Helophilus pendulus (L.), 1758	Berberis	Europe	Speight
	Salix	Europe		Speight		Menyanthes,	Europe		Speight
	Scilla verna	Europe		Speight		Polygonum	Europe		Speight
	Sorbus aucuparia	Europe		Speight		Salix	Europe		Speight
Eristalis similis (Fallen), 1817						Cirsium	Europe		Speight
	Angelica	Europe		Speight		Succisa	Europe		Speight
	Buxus	Europe		Speight					
	Chaerophyllum	Europe		Speight					
	Convolvulus	Europe		Speight					
	Cornus	Europe		Speight					
	Crataegus,	Europe		Speight		Helophilus trivittatus (Fabricius)	Armeria	Europe	Speight
	Euonymus	Europe		Speight		Aster	Europe		Speight
	Hypericum	Europe		Speight		Lakile	Europe		Speight
	Mentha aquatica	Europe		Speight		Centaurea	Europe		Speight
	Mespilus	Europe		Speight		Chrysanthemum	Europe		Speight
	Parnassia	Europe		Speight		Cirsium	Europe		Speight
	Ranunculus	Europe		Speight		Crataegus,	Europe		Speight
	Salix,	Europe		Speight		Epilobium angustifolium	Europe		Speight
	Sambucus ebulus	Europe		Speight		Eryngium,	Europe		Speight
	Sorbus aria	Europe		Speight		Eupatorium	Europe		Speight
	Tilia	Europe		Speight		Euphorbia	Europe		Speight
						Ligustrum	Europe		Speight
						Lychnis	Europe		Speight
						Lythrum	Europe		Speight
						Mentha	Europe		Speight
						Menyanthes	Europe		Speight
Eurimya lineata (Fabricius), 1787	Alisma plantago-aquatica,	Europe		Speight		Origanum,	Europe		Speight
	Anthriscus sylvestris,	Europe		Speight		Plumbago	Europe		Speight
	Caltha	Europe		Speight		Polygonum persicaria	Europe		Speight
	Cardamine pratense,	Europe		Speight		Potentilla,	Europe		Speight
	Cicuta virosa	Europe		Speight		Ranunculus	Europe		Speight
	Crataegus	Europe		Speight		Rubus fruticosus agg.	Europe		Speight
	Lychnis flos-cuculi	Europe		Speight		Salix	Europe		Speight
	Lythrum salicaria,	Europe		Speight		Succisa,	Europe		Speight
	Menyanthes trifoliata	Europe		Speight		Sorbus	Europe		Speight
	Nymphaea alba	Europe		Speight					
	Potentilla anserina	Europe		Speight					
	Ranunculus	Europe		Speight					
	Sorbus aucuparia	Europe		Speight					
Helophilus hybridus Loew, 1846									
	Calluna vulgaris	Europe		Speight					
	Cirsium	Europe		Speight					
	Convolvulus	Europe		Speight					
	Crataegus	Europe		Speight					
	Echium	Europe		Speight					
	Euphorbia	Europe		Speight					
	Limonium	Europe		Speight					
	Lycopus	Europe		Speight					
	Mentha aquatica	Europe		Speight					
	Menyanthes,	Europe		Speight					
	Nartheclium	Europe		Speight					
	Parnassia palustris	Europe		Speight					
	Plantago	Europe		Speight					
	Pulicaria	Europe		Speight					
	Rosa,	Europe		Speight					
	Rubus,	Europe		Speight					
	Salix repens	Europe		Speight					
	Salix spp	Europe		Speight					
	Senecio,	Europe		Speight					
	Sorbus,	Europe		Speight					

Syrphe	espèce végétale	pays	information pollen	source	Syrphe	espèce végétale	pays	information pollen	source
Lejogaster metallina (Fabricius), 1781	Cochlearia	Europe		Speight	Myanthopa florea	apicaea	Europe		file:///C:/Users/Utilisateur/Dow
	Convolvulus	Europe		Speight		brassicacea	Europe		file:///C:/Users/Utilisateur/Dow
	Leontodon	Europe		Speight		flowering crop of fennel	Europe		file:///C:/Users/Utilisateur/Dow
	Polygonum	Europe		Speight		olive crops	Europe		file:///C:/Users/Utilisateur/Dow
	Symphoricarpos,	Europe		Speight		celery and radish crops	Europe	efficient pollinators	file:///C:/Users/Utilisateur/Dow
	Valeriana.	Europe		Speight		avocado crop	Europe	efficient pollinators	file:///C:/Users/Utilisateur/Dow
Lejogaster tarsata (Meigen), 1822						Castanea,	Europe		Speight
	Crataegus	Europe		Speight		Convolvulus	Europe		Speight
	Matricaria	Europe		Speight		Crataegus	Europe		Speight
Lejops vittatus (Meigen), 1822	Ranunculus	Europe		Speight		Chaerophyllum	Europe		Speight
						Euonymus	Europe		Speight
	Bolboschoenus maritimus,	Europe		Speight		Filipendula	Europe		Speight
Melanogaster aerea (Loew), 1843	Phragmites	Europe		Speight		Hedera	Europe		Speight
	Schoenoplectus lacustris,	Europe		Speight		Rhododendron	Europe		Speight
						Rubus	Europe		Speight
Melanogaster hirtella (Loew), 1843	Cirsium,	Europe		Speight	Neoascia geniculata (Meigen),	Sambucus	Europe		Speight
	Hieracium	Europe		Speight					
	Leontodon	Europe		Speight		Alisma plantago-aquatica	Europe		Speight
Melanogaster nuda (Macquart), 1829						Baldellia ranunculoides	Europe		Speight
	Caltha	Europe		Speight		Caltha palustris,	Europe		Speight
	Euphorbia	Europe		Speight		Potentilla erecta	Europe		Speight
	Iris pseudacorus	Europe		Speight		Ranunculus	Europe		Speight
	Menyanthes,	Europe		Speight	Neoascia interrupta (Meigen),				
	Mimulus guttatus	Europe		Speight		Alisma plantago-aquatica	Europe		Speight
	Potentilla erecta	Europe		Speight		Bellis	Europe		Speight
	Pyrus communis	Europe		Speight		Myosotis palustris	Europe		Speight
	Ranunculus	Europe		Speight		Ranunculus	Europe		Speight
	Sorbus aucuparia	Europe		Speight		Rubus,	Europe		Speight
	Taraxacum	Europe		Speight		Stachys	Europe		Speight
	Viburnum opulus	Europe		Speight		Stellaria	Europe		Speight
						Taraxacum	Europe		Speight
Melanogaster parumplicata	Caltha	Europe		Speight	Neoascia meticulosa (Scopoli),	Anemone nemorosa,	Europe		Speight
	Carex	Europe		Speight		Caltha,	Europe		Speight
	Chaerophyllum	Europe		Speight		Cardamine	Europe		Speight
	Crataegus,	Europe		Speight		Ficaria verna,	Europe		Speight
	Ranunculus	Europe		Speight		Galium	Europe		Speight
						Prunus avium	Europe		Speight
						Ranunculus	Europe		Speight
						Salix	Europe		Speight
						Sorbus aucuparia	Europe		Speight
						Taraxacum	Europe		Speight
Mesembrius peregrinus (Loew), 1846	jaegopodium podagraria	Europe		Speight	Neoascia obliqua Coe, 1940				
	anthriscus sylvestris	Europe		Speight		Galium	Europe		
	Bunias orientalis	Europe		Speight		Ranunculus	Europe		Speight
	caltha palustris	Europe		Speight	Neoascia podagrica (Fabricius),	Taraxacum.	Europe		Speight
	crataegus laevigata	Europe		Speight					
	myrrhis odorata	Europe		Speight		Achillea millefolium	Europe		Speight
	prunus spinosa	Europe		Speight		Allium ursinum	Europe		Speight
	ranunculus acris	Europe		Speight		Caltha	Europe		Speight
	taraxacum	Europe		Speight		Chelidonium	Europe		Speight
	sorbus aucuparia	Europe		Speight		Convolvulus	Europe		Speight
	Prunus spinosa	Europe		Speight		Crataegus,	Europe		Speight
						Euphorbia,	Europe		Speight
						Leontodon,	Europe		Speight
						Menyanthes	Europe		Speight
						Plantago,	Europe		Speight
						Potentilla erecta	Europe		Speight

Syrphe	espèce végétale	pays	information pollen	source	Syrphe	espèce végétale	pays	information pollen	source
	Ranunculus	Europe		Speight	Orthonevra nobilis (Fallen), 18	Fragaria	Europe		Speight
	Salix repens	Europe		Speight		Galium,	Europe		Speight
	Senecio jacobaea,	Europe		Speight		Potentilla erecta	Europe		Speight
	Taraxacum	Europe		Speight		Ranunculus	Europe		Speight
Neoascia tenur (Harris), 1780	Caltha	Europe		Speight	Orthonevra plumbago (Loew),	no data			Speight
	Carex	Europe		Speight					
	Cicuta virosa	Europe		Speight	Parhelophilus consimilis (Malm				
	Filipendula ulmaria	Europe		Speight		Bidens cernua	Europe		Speight
	Potentilla erecta	Europe		Speight		Menyanthes	Europe		Speight
	Ranunculus	Europe		Speight		Potentilla palustris	Europe		Speight
	Salix repens	Europe		Speight		Ranunculus	Europe		Speight
					Parhelophilus crocoronatus	Cistus	Europe		Speight
					Parhelophilus frutetorum (Fab				
						Cornus	Europe		Speight
						Crataegus	Europe		Speight
						Filipendula	Europe		Speight
Neoascia unifasciata (Strobl), 1898	Caltha	Europe		Speight		Frangula alnus	Europe		Speight
	Carex	Europe		Speight		Ranunculus,	Europe		Speight
	Cicuta virosa	Europe		Speight		Rubus	Europe		Speight
	Filipendula ulmaria	Europe		Speight		Sambucus	Europe		Speight
	Potentilla erecta,	Europe		Speight		Viburnum opulus	Europe		Speight
	Ranunculus	Europe		Speight					
	Salix repens	Europe		Speight					
					Parhelophilus versicolor (Fabr	Aegopodium podagraria	Europe		Speight
Orthonevra brevicornis Loew, 1843	Acer	Europe		Speight		Cardamine,	Europe		Speight
	Crataegus,	Europe		Speight		Cistus,	Europe		Speight
	Photinia	Europe		Speight		Crataegus	Europe		Speight
	Prunus avium	Europe		Speight		Euphorbia	Europe		Speight
	Salix	Europe		Speight		Filipendula ulmaria	Europe		Speight
	Sorbus	Europe		Speight		Galium	Europe		Speight
						Leontodon	Europe		Speight
						Lychnis	Europe		Speight
Orthonevra elegans (Meigen), 1822	umbellifers	Europe		Speight		Scirpus sylvaticus	Europe		Speight
	Berula,	Europe		Speight		Sorbus aucuparia	Europe		Speight
	Filipendula,	Europe		Speight					
	Saxifraga hirculus	Europe		Speight					
	Viburnum opulus.	Europe		Speight					
				Speight					
Orthonevra frontalis (Loew), 1843	Crataegus	Europe			Platycheirus angustatus (Zetter	Aegopodium	Europe		Speight
	Euphorbia	Europe		Speight		Leontodon	Europe		Speight
	Ranunculus	Europe		Speight		Lycopus europaeus	Europe		Speight
						Polygonum cuspidatum	Europe		Speight
						Ranunculus	Europe		Speight
Orthonevra geniculata (Meigen), 1830						Rubus fruticosus	Europe		Speight
	Anemone nemorosa	Europe		Speight					
	Bells	Europe		Speight					
	Caltha,	Europe		Speight					
	Cardamine	Europe		Speight					
	Malus sylvestris,	Europe		Speight					
	Menyanthes,	Europe		Speight					
	Prunus spinosa	Europe		Speight					
	Ranunculus	Europe		Speight					
	male flowers of Salix species	Europe		Speight					

Syrphe	espèce végétale	pays	information pollen	source	Syrphe	espèce végétale	pays	information pollen	source
Platycheirus angustipes Goeldlin, 1974	Caltha palustris	Europe		Speight	Sericomyia superbiens (Muller)	; Centaurea	Europe		Speight
Platycheirus fulviventris (Macquart), 1829	Graminae	Europe		Speight		Cirsium vulgare	Europe		Speight
	Juncus	Europe		Speight		Mentha aquatica,	Europe		Speight
	Plantago	Europe		Speight		Ranunculus	Europe		Speight
						Rubus,	Europe		Speight
Platycheirus occultus Goeldlin, Maibach & Speight,	Carex spp	Europe		Speight		Scabiosa	Europe		Speight
	Salix repens	Europe		Speight		Succisa pratensis	Europe		Speight
						Sonchus.	Europe		Speight
Platycheirus perpallidus Verrail, 1901	Rubus chamaemorus	Europe		Speight	Sphaerophoria loewi Zetterste	Butomus,	Europe		Speight
	Cyperaceae;	Europe		Speight		Eupatorium	Europe		Speight
	Juncus	Europe		Speight		Filipendula,	Europe		Speight
	Salix repens	Europe		Speight		Lythrum	Europe		Speight
						Persicaria,	Europe		Speight
Platycheirus scambus (Staeger), 1843	Carex	Europe		Speight		Ranunculus	Europe		Speight
	Ranunculus	Europe		Speight		Schoenoplectus	Europe		Speight
	Schoenoplectus	Europe		Speight		Scirpus,	Europe		Speight
	Scirpus lacustris	Europe		Speight		Triglochin.	Europe		Speight
	Spartina	Europe		Speight					Speight
	Urtica dioica	Europe		Speight					
					Tropidia fasciata Meigen, 1822	Chrysanthemum leucanthemum	Europe		Speight
Riponnensia longicornis (Loew), 1843	Asteraceae	Europe		Speight		Daucus	Europe		Speight
	; Foeniculum	Europe		Speight		Euphorbia	Europe		Speight
	Tamaris	Europe		Speight		Mentha	Europe		Speight
						Ranunculus	Europe		Speight
Riponnensia splendens (Meigen), 1822	Lepidium draba	Europe		Speight		Scorzonera humilis.	Europe		Speight
	Matricaria	Europe		Speight					
	Ranunculus	Europe		Speight					
Sericomyia bombiforme (Fallen), 1810	Carduus,	Europe		Speight	Tropidia scita	scirpus			Speight
	Cirsium,	Europe		Speight		Iris pseudocorus		ingestion de pollen de scirpus (2%)	Speight
	Echium vulgare	Europe		Speight		Cardamine,	Europe		Speight
	Knautia	Europe		Speight		Corydalis	Europe		Speight
	Succisa,	Europe		Speight		Euphorbia	Europe		Speight
	Trifolium,	Europe		Speight		Galium	Europe		Speight
	Verbascum.	Europe		Speight		Iris pseudacorus	Europe		Speight
						Lepidium draba	Europe		Speight
Sericomyia hispanica Peris Torres, 1962	no data	Europe		Speight		Myosotis,	Europe		Speight
						Potentilla erecta	Europe		Speight
						Ranunculus	Europe		Speight
Sericomyia lappona (L.), 1758	Caltha,	Europe		Speight		Rubus,	Europe		Speight
	Cardamine	Europe		Speight		Sorbus aucuparia,	Europe		Speight
	Cirsium	Europe		Speight		Symphytum	Europe		Speight
	Crataegus	Europe		Speight		Tamarix gallica	Europe		Speight
	Ligustrum	Europe		Speight		Vaccinium,	Europe		Speight
	Ranunculus,	Europe		Speight		Valeriana	Europe		Speight
	Rubus fruticosus	Europe		Speight					
	Sorbus aucuparia	Europe		Speight					
	Taraxacum	Europe		Speight					
	Vaccinium myrtillus	Europe		Speight					
Sericomyia silentis (Harris), 1776	Calluna	Europe		Speight					
	Filipendula	Europe		Speight					
	Knautia	Europe		Speight					
	Ligustrum	Europe		Speight					
	Polygonum cuspidatum	Europe		Speight					
	Ranunculus	Europe		Speight					
	Rubus fruticosus agg	Europe		Speight					
	Salix repens	Europe		Speight					
	Sorbus aucuparia	Europe		Speight					
	Succisa	Europe		Speight					

Annexe 13 : Heatmap : Période d'émergence des insectes et période de floraison

```
df_long$Mois <- factor(
  df_long$Mois,
  levels = c(
    "janvier", "février", "mars", "avril", "mai", "juin",
    "juillet", "août", "septembre", "octobre", "novembre", "décembre"
  )
)

df_sum <- df_long |>
  dplyr::group_by(Famille, Mois) |>
  dplyr::summarise(
    prop_emergence = mean(Emergence, na.rm = TRUE),
    .groups = "drop"
  )
library(ggplot2)

ggplot(df_sum, aes(x = Mois, y = Famille, fill = prop_emergence)) +
  geom_tile(color = "white", linewidth = 0.4) +
  scale_fill_gradient(
    low = "#f7fcf5",
    high = "#00441b",
    trans = "sqrt",
    breaks = c(0, 0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 1),
    labels = scales::number_format(accuracy = 0.01),
    na.value = "grey90",
    name = "Proportion\nd'émergence"
  ) +
  labs(
    title = "Probabilité d'émergence selon le mois et la famille",
    x = "Mois",
    y = "Famille"
  ) +
  theme_minimal(base_size = 12) +
  theme(
    axis.text.x = element_text(angle = 45, hjust = 1),
    panel.grid = element_blank()
  )
```

Bibliographie

Albrecht, M., Schmid, B., Hautier, Y., & Müller, C. B. (2012). *Diverse pollinator communities enhance plant reproductive success*. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 279(1748), 4845–4852.

<https://doi.org/10.1098/rspb.2012.1621>

Anfel Hadjer, R., & Saida, C. (2024). *Régime alimentaire des insectes et adaptation des pièces buccales*. Mémoire de recherche en sciences agronomiques, Université Mohammed El Bachir El Ibrahim (B.B.A.), Algérie.

<https://dspace.univ-bba.dz/server/api/core/bitstreams/f03f4e89-7485-4f57-8ab1-366f4cb6bf91/content>

Anstett, M., Léon de Tréveret, M., & Louapre, P. (2019). *La pollinisation du cassis : état des lieux dans un contexte de changements anthropiques*. *Bourgogne-Franche-Comté Nature*, 29, 194–205. HAL: hal-02390639.

AREM P4 – 91^e promotion. (2021). *Enjeux de la pollinisation pour la production agricole en Tarn-et-Garonne*. Projet CAPSTONE, p. 8–12.

<https://www.agroforesterie.fr/wp-content/uploads/2022/07/projet-beeware-enjeux-de-la-pollinisation-pour-la-production-agricole.pdf>

Armitage, P. D., Cranston, P. S., & Pinder, L. C. V. (1995). *The Chironomidae: Biology and Ecology of Non-biting Midge*. Dordrecht: Springer Netherlands.

<https://books.google.fr/books?id=DHPyCAAAQBAJ>

Basli, N., & Djellab, K. (2017). *Relation entre la faune entomophile pollinisatrice à pièces buccales longues et la flore de Bekkaria*. Mémoire de recherche en écologie animale, Université Larbi Tebessi, Tebessa.

Ben Aissa, B., & Grimed, R. (2022). *Identification et caractérisation des grains de pollen de quelques espèces de la famille des Rosacées*. Mémoire de Master, Centre Universitaire Abdel Hafid Boussouf – Mila, Algérie, 62 p.

<https://dspace.univ-mila.dz/jspui/bitstream/123456789/1946/1/IDENTIFICATION%20ET%20CARACTERISATION%20DES%20GRAINS%20DE%20POLLEN%20DE%20QUELQUES%20ESPECES%20DE%20LA%20FAMILLE%20DES%20ROSACEES.pdf>

Bonnier, G. (1879). *Les nectaires : étude critique, anatomique et physiologique*. Paris : G. Masson.

<https://books.google.fr/books?id=DaFbAAAAMAAJ>

Brittain, J., & Sartori, M. (2009). *Ephemeroptera (Mayflies)*. In A. P. Gupta (Ed.), *Encyclopedia of Insects* (2^e éd., pp. 328–334). Academic Press.

<https://www.sciencedirect.com/science/chapter/edited-volume/abs/pii/B9780123741448001004>

Chifflet, R. (2010). *Faune pollinisatrice, paysage et échelle spatiale des flux de pollen chez Brassica napus L. (Brassicaceae)*. Thèse de doctorat, Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse.

https://theses.hal.science/tel-00633180v1/file/These_RemyChifflet.pdf

Delgado, T., et al. (2023). *Flower size affects bee species visitation pattern on flowers with poricidal anthers across pollination studies*. *Flora*, 299, 152198.

<https://doi.org/10.1016/j.flora.2022.152198>

Fayet, A. (2016). Les vecteurs de pollinisation des plantes. https://www.cari.be/IMG/pdf/171_fiche_pollinisation.pdf

Gerber, R. (2022). *Mouvement des insectes aquatiques émergents dans les environnements terrestres : influence de la morphologie, des réserves énergétiques et du paysage*. Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, p. 8–25. <https://theses.hal.science/tel-04339286v1/document>

Gharbi, M. (2023). *La pollinisation par les abeilles certes, mais n'oubliez pas les autres pollinisateurs !* Bulletin de l'Académie Vétérinaire de France, 176(1), 79–82. https://www.persee.fr/doc/bavf_0001-4192_2023_num_176_1_18253

Gruau, K. (2020). *Les interactions plantes-pollinisateurs et leurs effets sur la reproduction d'*Hypericum elodes* (Hypericaceae) sur la Réserve naturelle du Pinail (86)*. Rapport de stage de Master 2, Université de Poitiers / GEREPI – Réserve naturelle du Pinail, 44 p. https://www.reserve-pinail.org/wp-content/uploads/2020/09/RapportStageGEREPI_K.Gruau_M2-GHBV.pdf

Hernández, J. C. (2025). *Honey Bee Foraging Decisions Are Shaped by Floral Trait Differences: Color Cues and Reward Quality Influence Flower Choice in *Apis mellifera**. *Insects*, 16(9), 884. <https://doi.org/10.3390/insects1609884>

Imdorf, A., Rickli, M., & Fluri, P. (1996). *Dynamique des populations d'abeilles*. Centre Suisse de Recherches Apicoles – Station de Recherches Laitières. <https://www.documents.abeille-du-gatinais.fr/wp-content/uploads/2021/03/Dynamique-de-la-population-dabeille-Inconnue.pdf>

Lafage, D., Bergman, E., Eckstein, R. L., Österling, E. M., Sadler, J. P., & Piccolo, J. J. (2019). *Local and landscape factors driving aquatic-terrestrial subsidies in riparian ecosystems: a global meta-analysis*. *Ecosphere*, 10(4), e02697. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2697>

Lázaro, A., & Totland, Ø. (2014). *The influence of floral symmetry, dependence on pollinators and pollination generalization on flower size variation*. *Annals of Botany*, 114(1), 157–165. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4071101/>

Leereveld, H., Meeuse, A. D. J., & Stelleman, P. (1981). *Anthecological relations between reputedly anemophilous flowers and syrphid flies*. *Acta Botanica Neerlandica*, 30(5–6), 465–473. <https://natuurtijdschriften.nl/pub/540387/ABN1981030005008.pdf>

Morse, J. C., Frandsen, P. B., Graf, W., & Thomas, J. A. (2019). *Diversity and ecosystem services of Trichoptera*. *Insects*, 10(5), 125. <https://www.mdpi.com/2075-4450/10/5/125>

Murail, C., Baude, M., Bergerot, B., Geslin, B., Legay, N., Villalta, I., & Greulich, S. (2024). *From Stream to Bloom: Exploring the Potential Role of Aquatic Insects for Pollination in Wetland Environments*. *Journal of Applied Entomology*. <https://doi.org/10.1111/jen.13359>

Pas-de-Calais, Interreg, & SAPOLL. (2020). *Les pollinisateurs sauvages : mieux les connaître pour mieux les protéger !* <http://sapoll.eu/wp-content/uploads/2020/03/livret-pédagogique.pdf>

Pesson, P., & Louveaux, J. (1984). *Pollinisation et productions végétales*. Paris : Éditions Quae.
<https://www.quae.com/produit/1868/9782759238590/pollinisation-et-productions-vegetales>

Raitif, J., Plantegenest, M., Agator, O., Piscart, C., & Roussel, J. (2018). *Seasonal and spatial variations of stream insect emergence in an intensive agricultural landscape*. *Science of the Total Environment*, 644, 594–601.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.021>

Rodrigues de Miranda, S. (2023). *The Hidden Pollinators of Inner Hardanger: a study in Hoverfly (Syrphidae) Diversity, Abundance, and Phenology*. *Bikuben Student Journal*, University of Bergen.
<https://bikuben.w.uib.no/the-hidden-pollinators-of-inner-hardanger-a-study-in-hoverfly-syrphidae-diversity-abundance-and-phenology/>

Schubnel, F., Hummel, R., & Feltin, M. (2019). *Des abeilles et des chiffres*. Syndicat des Apiculteurs de Thann et environs (Rucher École Enchenberg).
http://rucherecole68.thann.free.fr/Calendrier%20apicole/des_abeilles_des_chiffres.pdf

Schurr, L., Geslin, B., Affre, L., et al. (2021). *Landscape and local factors affecting flying insects along fennel crops (*Foeniculum vulgare*, Apiaceae) and implications for yield*. *Insects*, 12(5), 404.
<https://doi.org/10.3390/insects12050404>

Tierno de Figueroa, J. M., & López-Rodríguez, M. J. (2019). *Trophic ecology of Plecoptera (Insecta): a review*. *The European Zoological Journal*, 86(1), 79–102.
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/24750263.2019.1592251>

Zanin, J. (2023). *Étude de la diversité spécifique des syrphes dans les coupes à blanc de la forêt boréale du Québec le long d'un gradient de latitude*. Travail de fin d'études, Université de Liège.
https://matheo.uliege.be/bitstream/2268.2/21372/5/TFE_ZANIN_Juliette.pdf

Sitographie

Botanistes Amateurs du Pays d'Arles (B.A.P.A.). (2022, 19 janvier). *Renonculacées* (n° 13). *Le journal des botanistes amateurs du Pays d'Arles*, 24 p.
<https://botanistesamateursdupaysdarles.e-monsite.com/medias/files/renonculacees.pdf>
Consulté le 20/01/2026.

Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales (CNRTL). *Définition de la pollinisation*.
<https://www.cnrtl.fr/definition/pollinisation>
Consulté le 15/03/2025.

Office Français de la Biodiversité (OFB). *Les milieux aquatiques*.
<https://www.ofb.gouv.fr/les-milieus-aquatiques>
Consulté le 07/03/2025.

Sauvages du Poitou. *Insectes pollinisateurs (1) : la sauvage et le coléoptère*.
<https://www.sauvagesdupoitou.com/105/662>
Consulté le 10/04/2025.

Cités, Territoires,

Environnement et Sociétés

Directrice de recherche :

Cassandra Murail-Zimmermann

Judith Looten

PRI/DAE5

DAE /ADAGE

2025-2026

Les insectes aquatiques issus des milieux aquatiques et la pollinisation

Résumé :

Ce rapport s'intéresse au potentiel de pollinisation des insectes issus des milieux aquatiques. Mal connus, et peu étudiés, ils sont aujourd'hui une source de curiosité et d'intérêt face aux menaces du changement climatique sur les pollinisateurs. Ce déclin des pollinisateurs a un impact fort sur nos écosystèmes, nos agrosystèmes. Face à ce constat, il est nécessaire de mieux les connaître, afin d'anticiper leur déclin. De plus, il est nécessaire d'étudier les autres pollinisateurs, moins connus que les abeilles, et ceux qu'on soupçonne de jouer des rôles dans les interactions terrestres, sans avoir assez d'études pour le confirmer. Ceux qu'on soupçonne, ce sont les insectes issus des milieux aquatiques. Après un stade de vie larvaire, certains adultes, ailés, s'aventurent vers les milieux terrestres. C'est le cas des Syrphes, Plécoptères, Ephéméroptères, Ce rapport cherche ainsi à répondre à plusieurs questions : à quoi ressemblent-ils, jusqu'où se déplacent-ils, à quelles périodes émergent-ils, et quels sont leurs traits floraux susceptibles d'influencer leur rôle dans la pollinisation ? En rassemblant et en analysant ces informations, ce rapport vise à mieux comprendre leur potentiel de pollinisation et leur contribution possible aux interactions écologiques terrestres.

Mots Clés : Insectes aquatiques, pollinisation, terrestre