

Etude du comportement de *Macrosiphum euphorbiae*, le puceron ravageur du fraisier, en présence de plantes de service, en environnement contrôlé



Thomas Lepers

Master 2 Biologie Intégrative et Changements Globaux

INRAE – Unité de Recherche 1115 Plante et Système de Culture Horticole

Domaine Saint-Paul – Site Agroparc, 228 Route de l'aérodrome, 84914 Avignon
Cedex 9, France

Encadré par Louise Jeandroz

Résumé : L'augmentation de la production de fruits est nécessaire au vu des projections démographiques mondiales. Parmi eux on retrouve les cultures de fraises, sujettes à l'attaque de pucerons, capables de transmettre des virus. L'utilisation de méthodes conventionnelles pour lutter contre ces organismes présentent des inconvénients écologiques. Pour limiter leur utilisation, une approche agroécologique basée sur l'emploi de plantes dites de « service » émerge. Cette étude se focalise sur 2 effets potentiels des composés organiques volatils (COVs) émis par ces plantes. Premièrement, nous avons mené des tests sur la fécondité de *Macrosiphum euphorbiae* en boîte de Pétri. Puis au travers de tests en olfactomètre, nous avons montré que la tanaisie, la cataire et le fenouil induisait un comportement de fuite chez ce puceron. L'identification de COVs spécifiques à ces 3 plantes suggère des propriétés répulsives contre celui-ci. Ainsi, l'association de ces plantes avec les cultures principales peut jouer un rôle crucial dans la régulation de ces ravageurs. Les résultats mettent en évidence la pertinence de considérer à la fois les plantes entières mais aussi les composés organiques volatils émis par celles-ci afin de concevoir des méthodes de lutte durables et ciblées.

Mots Clés : agroécologie, COVs, olfactomètre, plantes compagnes, tests de fécondité

ABSTRACT

Increasing fruit production is a necessity in view of world population projections. These include strawberry crops, which are prone to aphid attack and are capable of transmitting viruses. The use of conventional methods to combat these organisms has ecological drawbacks. To limit their use, an agroecological approach based on the use of so-called "service" plants is emerging. This study focuses on 2 potential effects of volatile organic compounds (VOCs) emitted by these plants. Firstly, we tested the fecundity of *Macrosiphum euphorbiae* in Petri dishes. Then, using olfactometer tests, we showed that tansy, catnip and fennel induced avoidance behavior in this aphid. The identification of VOCs specific to these 3 plants suggests their repellent properties against the aphid. Thus, the association of these plants with the main crops may play a crucial role in the regulation of these pests. The results highlight the relevance of considering both whole plants and the volatile organic compounds emitted by them, in order to design sustainable, targeted control methods.

INTRODUCTION

La planète compte, depuis le 15 Novembre 2022, 8 milliards d'habitants. D'après le rapport 2022 des Nations Unies sur les projections démographiques mondiales, la population mondiale sera de 9.7 milliards en 2050 et atteindra les 10.4 milliards dans les années 2080 ([United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division 2022](#)). Cette croissance démographique va entraîner une augmentation de la demande en ressources énergétiques et alimentaires. Parmi ces dernières, nous pouvons retrouver les fruits, tels que les fraises, qui sont essentielles pour notre santé ([FAO 2021](#)). Leur production dans le monde ne cesse de croître depuis les années 80, passant de 2 millions de tonnes produites à 8 millions de tonnes en 2014. Les principaux producteurs de fraises au monde sont : la Chine, les Etats-Unis, le Mexique, la Turquie et l'Espagne. Ce dernier est le premier pays producteur de fraises en Europe devant la France qui se situe en septième position dans le classement des pays européens ([Fraise LabelRouge](#)). La production de fraises dans la métropole ne cesse d'augmenter depuis quelques années pour répondre à la demande des consommateurs, avec une augmentation d'environ 50% de la production annuelle en 10 ans (51 800 tonnes produites en 2010, pour 75 700 tonnes en 2021) ([FAOStat - Production Fraise en France](#)).

Cependant, la production de fraises n'est pas épargnée par les dommages liés aux organismes nuisibles. Parmi ceux-ci, nous pouvons retrouver les insectes piqueurs-suceurs, tels

que les pucerons. Les pucerons peuvent se reproduire par parthénogenèse et ainsi se multiplier très rapidement, ce qui représente un réel problème pour les cultures (Dedryver et al. 2010, Xu and Gray 2020). Parmi ces pucerons ravageurs de fraisiers, nous pouvons retrouver *Macrosiphum euphorbiae* (Thomas, 1878). En effet, il possède un rostre capable de percer les cellules de la plante pour se nourrir, causant ainsi des dommages directs (Ng and Perry 2004). Il peut entraîner la déformation de feuilles et ainsi condamner les jeunes plants ou les plants stressés à rester de petite taille tout au long de la période de production (Lahiri et al. 2022). Il peut également causer des dommages indirects, car lors de sa nutrition, il sécrète du miellat, proposant ainsi un environnement favorable pour le développement de champignons saprophytes (fumagine, ...) réduisant la photosynthèse et donc la production et la qualité des fruits (Evelyne Turpeau et al. 2011). *Macrosiphum euphorbiae* est également responsable de la transmission de 3 virus qui infectent le fraisier (*Fragaria spp.*) : « Strawberry crinkled virus » (SCV), « Strawberry mild yellow edge virus » (SMYEV) et « Strawberry mottle virus » (SMoV). Ces virus peuvent entraîner une perte de rendement de l'ordre de 30% pour une simple infection, mais parfois celle-ci peut être multiple (plusieurs virus à la fois), dans ce cas la perte s'élèverait à environ 80% (Thompson et al. 2003).

Pour pallier ce ravageur et face à la demande en ressource alimentaire croissante, l'utilisation d'intrants de synthèse s'est répandue afin de garantir une sécurité alimentaire (Oerke 2006). Leur utilisation reste la méthode la plus importante pour lutter contre ces organismes nuisibles (Griffiths et al. 1989).

L'utilisation de produits phytosanitaires pour lutter contre les pucerons en culture de fraises est nécessaire afin de garantir une production suffisante. La plupart des aphicides utilisés dans la lutte contre les pucerons du fraisier sont des neurotoxiques car ils s'avèrent être très efficaces (Miao et al. 2014). Les principaux appartiennent aux groupes des pyréthrinoïdes (agissant sur les canaux sodiques du système nerveux) et des néonicotinoïdes (qui interfèrent le fonctionnement des récepteurs nicotiniques de l'acétylcholine) (Inge Werner 2017, Bass and Field 2018). L'utilisation des pyréthrinoïdes dans les cultures de fraises métropolitaines est encore d'actualité (Myriam Carmentran-Délias / Chambre d'agriculture 47 2021). Quant aux néonicotinoïdes, leur utilisation par les producteurs était autorisée jusqu'en 2018 mais le gouvernement français a interdit tout insecticide contenant une molécule active appartenant à cette famille (Myriam Carmentran-Délias / Chambre d'agriculture 47 2017, Agnès Buzyn et al. 2018). Cependant, ils sont encore utilisés dans les cultures de fraises du Canada, du Québec et dans certains pays d'Europe (Stéphanie Tellier and CRAAQ 2019, Myriam Carmentran-Délias

/ Chambre d'agriculture 47 2021). Les agriculteurs utilisent également un insecticide appartenant à la famille des kétoénoles (Movento®, Bayer AG), qui va être interdit dans ces cultures en 2024-2025. Ces interdictions sont dues au fait que ces insecticides présentent des effets indésirables liés à leur utilisation. Par exemple, l'utilisation intensive des néonicotinoïdes a conduit à des effets néfastes sur des espèces non-cibles (pollinisateurs, macro-invertébrés du sol, ...), sur l'environnement mais aussi sur la santé humaine (toxicité neurologique, perturbation endocrinienne, ...) (Unal and Jepson 1991, Andrews et al. 2004, Cao et al. 2008). De plus, ces traitements intensifs ont exercé sur les ravageurs une sélection des individus les plus résistants. Le traitement perd de son intérêt car il ne s'avère plus être aussi efficace qu'auparavant (Bass et al. 2015).

A cause de ces restrictions, les producteurs seront en impasse de gestion efficace contre les pucerons.

Aujourd'hui, trouver des alternatives à l'utilisation de produits phytosanitaires est nécessaire afin de respecter l'environnement. C'est dans ce contexte que nous retrouvons la protection agroécologique des cultures définie comme : « la réduction des impacts des ravageurs par la réorganisation des pratiques culturales et l'amélioration de la durabilité de l'agroécosystème en exploitant ses fonctions écologiques » (Deguine, J. P. et al. 2020).

Parmi ces alternatives à la lutte conventionnelle, les agriculteurs peuvent avoir recours à l'utilisation d'auxiliaires de culture afin de lutter contre les ravageurs (Diehl et al. 2013). Ils peuvent également utiliser des biopesticides à partir d'huiles essentielles qui ont montré des résultats intéressants contre le puceron vert du pêcher *Myzus persicae* (Costa et al. 2013) tout en ayant peu d'impact sur l'abeille domestique *Apis mellifera* (Santos et al. 2018). De plus, la résistance chez les ravageurs exposés à des biopesticides d'origine végétale serait plus longue à apparaître contrairement aux pesticides de synthèse (Koul et al. 2008).

Par ailleurs, mettre en œuvre des techniques agricoles permettant une augmentation de la richesse spécifique dans une parcelle est aussi considéré comme une lutte alternative. En effet, l'augmentation du nombre d'espèces permet de multiplier les interactions biologiques bénéfiques et de générer différents agro-services environnementaux. Par exemple, l'association de cultures présente une alternative à la l'utilisation intensive de produits phytosanitaires (Zhang et al. 2017). Associer une culture d'intérêt à des espèces végétales susceptibles de jouer un rôle bénéfique dans le fonctionnement de l'agro-système s'avère intéressant. Ces espèces auxiliaires sont appelées « plantes de service » (PdS). En effet, leur association avec une culture

d'intérêt permet d'en tirer un ou des services écosystémiques. Ces services peuvent être multiples, tels que la régulation des bio-agresseurs, l'amélioration ou la restauration de la fertilité des sols, le contrôle des adventices ou bien encore la réduction des processus érosifs (Malézieux et al. 2009). Ces plantes présentent divers avantages qui sont régis par l'espèce de plante utilisée mais aussi par la culture concernée. Elles peuvent également interagir de différentes façons sur le patho-système plante-ravageur-auxiliaire :

- soit en ayant un effet indirect : elles peuvent stimuler les mécanismes de défense de la plante hôte ou bien attirer les ennemis naturels du ravageur en leur conférant des conditions favorables à leur développement (Fernández et al. 2008, Zhang et al. 2017, Sarkar et al. 2018)
- soit en ayant un effet direct : la plante de service peut agir sur la colonisation, l'alimentation et/ou la reproduction du ravageur (piégeage, répulsion, effet biocide ...) (Lopez and Shepard 2007, Zhang et al. 2017).

Ces effets directs peuvent être induits par l'émission des Composés Organiques Volatiles (COVs) que certaines espèces émettent. Ces COVs peuvent agir par allélopathie entraînant une réduction de l'acceptation de la plante hôte par le ravageur. Ils peuvent également impacter la capacité du ravageur à localiser son hôte en masquant le bouquet olfactif de la plante hôte ou en ayant un effet répulsif (Zhang et al. 2017). L'utilisation des COVs émis par les plantes de service pour lutter contre les pucerons peut s'avérer intéressante. En effet, lorsque les pucerons ailés sont à la recherche d'une plante hôte, ils se basent sur des indices visuels et olfactifs, grâce à leurs yeux et leurs antennes (Döring 2014). De ce fait, si les pucerons ne reconnaissent pas le bouquet olfactif de leur plante hôte ou s'ils reconnaissent un bouquet qui leur est répulsif, ils ne s'installeront pas. Ainsi, l'utilisation de ces plantes de service peut être efficace pour lutter contre les pucerons.

De récents travaux ont démontré la capacité de plantes de service à freiner la colonisation de la plante hôte par deux espèces de pucerons *Myzus persicae* et *Dysaphis plantaginea*, en environnement contrôlé (laboratoire) et semi-contrôlé (tunnel insect-proof) (Ben Issa et al. 2017, Dardouri et al. 2019, Dieudonné et al. 2022). Il serait donc intéressant de trouver ce type de plantes pour freiner les populations de *Macrosiphum euphorbiae* dans les cultures de fraises. C'est dans ce contexte que se déroule cette étude dont l'objectif est d'évaluer l'efficacité de plusieurs plantes sur le comportement de fuite et sur la fécondité de *Macrosiphum euphorbiae*.

L'objectif principal est d'identifier des plantes aux propriétés répulsives et ayant un impact sur la démographie du puceron, toutes choisies en se basant sur des données bibliographiques. Cette étude a eu pour but de savoir si les bouquets olfactifs dégagés par ces plantes pouvaient repousser les pucerons en observant leur comportement. Nous avons également cherché à déterminer si ce comportement était lié aux profils d'émission de ces composés volatiles. Enfin, nous avons exploré la possibilité que ces mêmes plantes puissent réduire la fécondité de *Macrosiphum euphorbiae*.

MATERIELS ET METHODES

Macrosiphum euphorbiae

Modèle biologique

Macrosiphum euphorbiae (Thomas, 1878) ou puceron vert et rose de la pomme de terre (Figure 1) appartient à la famille des Aphididae. Ce puceron, originaire d'Amérique du Nord, est très polyphage. En effet, 200 plantes hôtes sont connues, regroupant 20 familles différentes dont les Solanaceae et les Rosaceae.

Il mesure de 1,7 à 3,6 mm et peut être rencontré sous forme aptère ou ailée. Il s'agit d'une espèce principalement anholocyclique, c'est-à-dire qu'il se reproduit principalement par parthénogénèse toute l'année. Mais ce puceron peut aussi être holocyclique diécique (alternance entre un hôte primaire et secondaire mais aussi d'une reproduction sexuée et parthénogénèse) (Evelyne Turpeau et al. 2010).

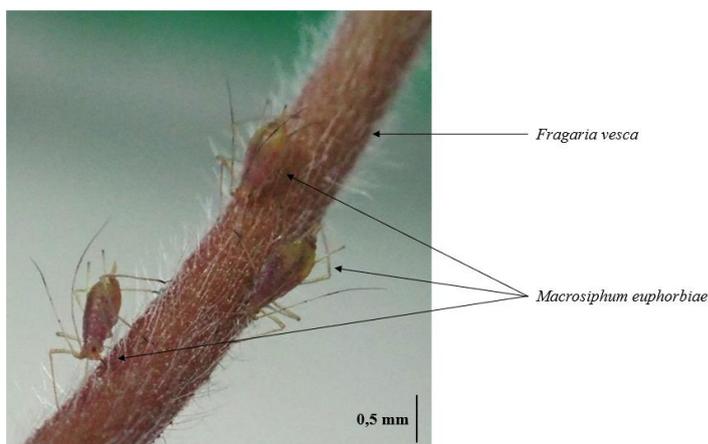


Figure 1 : Femelles aptère parthénogénétique du puceron rose de la pomme de terre (*Macrosiphum euphorbiae*) sur un plant de fraisier (*Fragaria vesca*)

Lorsqu'il est sous forme aptère, le puceron passe par 5 stades larvaires, tous séparés par une mue, et atteint l'âge adulte après environ 10 jours sous 21°C. En moyenne, le puceron produit 67 individus par parthénogénèse en une période d'environ 20 jours (MacGillivray and Anderson 1958).

Elevage des pucerons

Deux souches verte et rose de *Macrosiphum euphorbiae* ont été obtenues en mars auprès de l'élevage de Frais'Nat Brest (29). Les pucerons sont maintenus sous forme de femelles vivipares aptères dans une chambre à $22^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et à photopériode stable (16:8 J:N). Elles sont élevées sur des fraisiers *var. Cirafine* dans des cages insect-proof.

Pour les tests comportementaux et de fécondité, des cohortes sont effectuées en respectant le protocole établi par [Mélanie Cabrol \(2019\)](#). Des feuilles de fraisiers sont déposées face abaxiale vers le haut dans des boîtes de Petri (l : 12 cm x L : 12 cm x h : 2 cm) avec du papier filtre humide. Sur chaque feuille est disposée une quinzaine de femelles matures de *M. euphorbiae*. Afin d'éviter toute fuite d'individus, toutes les boîtes sont scellées avec du scotch micropore. Après 8h pour les tests de fécondité ou 24h pour les tests répulsifs, les femelles des boîtes sont transférées dans de nouvelles boîtes avec de nouvelles feuilles de fraisier. Les larves pondues sont transférées sur des fraisiers afin qu'elles puissent se développer jusqu'à leur utilisation lors des tests.

L'objectif des cohortes est d'homogénéiser l'âge de la population afin de minimiser un biais par rapport à leur stade de développement.

Matériel végétal

Fraisier var. Cirafine

Fragaria vesca, le fraisier *var. Cirafine* nous a été fourni par INVENIO SOLUTIONS (24). Les vitro-plants de fraisiers sont conservés dans des bocaux en verre dans une chambre froide entre 2 et 4°C. Les vitro-plants sont sortis au fur et à mesure des besoins pour les manipulations. Tout d'abord, une phase d'acclimatation est effectuée : les vitro-plants sont placés pendant 1 semaine dans une plaque alvéolée contenant du terreau de semis Klasman Deilmann 080® dans un incubateur (25°C, 5 LS, 60% HR). La deuxième phase est le repiquage des fraisiers en serre insect-proof avec ventilation et apport régulier d'eau par un système de goutte à goutte automatisé comprenant en plus un apport de fertilisant (SOLUVEG® Orange 23-6-10 + 2 MgO + OE + Orto Fer 6) pour le développement des plantes. Ils sont repiqués dans un pot de 1L contenant un mélange de substrat :

- 35 % de terreau spécial semis Klasman Deilmann 080®
- 35% de terreau « special mixture » Klasman Deilmann 564®
- 30 % de pouzzolane

Les vitro-plants âgés d'environ 1 mois et demi sont utilisés pour les expérimentations.

Plantes de service

Les plantes de service sont issues de semis réalisés à l'INRAE ou de pépinières. Le tableau en **Annexe I** synthétise la provenance des plantes de service utilisées au cours des manipulations.

Les graines sont placées dans des terrines contenant du terreau de semis (Klasman Deilmann 080®) puis placées dans un incubateur (25°C, 5 LS, 60% HR) jusqu'à l'apparition des premières feuilles. Elles sont ensuite repotées dans des pots de 1L contenant du terreau spécial motte (Klasman Deilmann 047®) et placés sous serre insect-proof avec ventilation et apport régulier d'eau grâce un système de goutte à goutte automatisé. Ce système permet également de réaliser un apport de fertilisant (SOLUVEG® Orange 23-6-10 + 2 MgO + OE + Orto Fer 6) pour le développement des plantes. Quant aux rhizomes de citronnelle, ils ont été placés dans de l'eau afin que des racines puissent se développer, puis ils ont également été placés dans des pots de 1L contenant du terreau spécial motte (Klasman Deilmann 047®).

Enfin, les cultures de fraisiers et de plantes de service réalisent leur croissance séparément dans 2 serres différentes afin d'éviter toute interaction allélopathique avant la réalisation des tests.

Tests de répulsions

Présentation de l'olfactomètre tubulaire dynamique

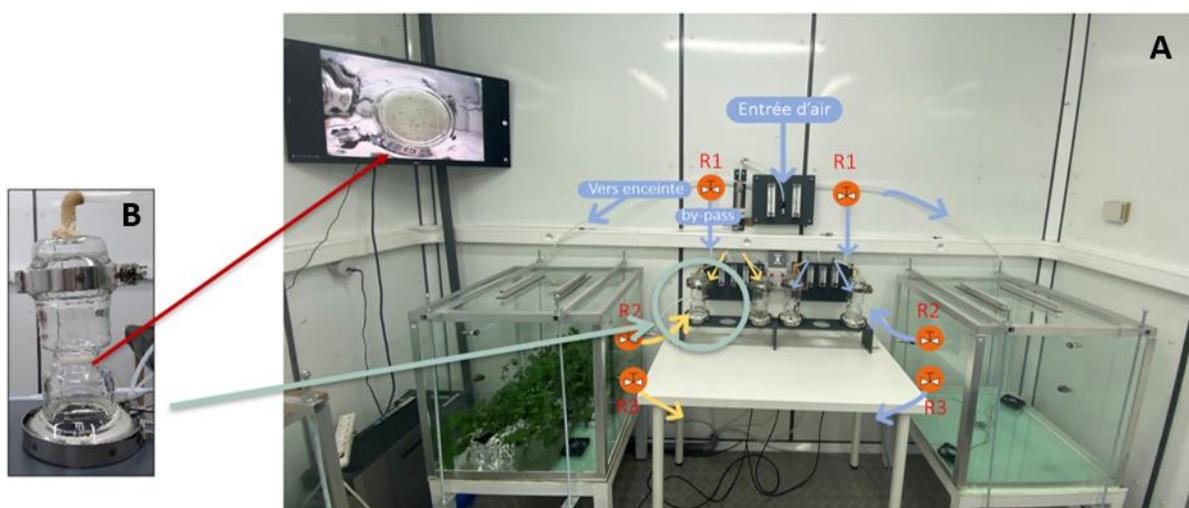


Figure 2 : Schéma explicatif du fonctionnement de l'olfactomètre tubulaire dynamique (A) (Rx : robinet) ainsi qu'une photo d'une chambre d'olfactomètre (B)

L'olfactomètre tubulaire dynamique (Figure 2A) est installé dans une pièce à température constante (22°C). Le système fonctionne avec une entrée d'air calibrée par une première station de débitmètres, elle-même calibrée à 10 L.min⁻¹. Ensuite, ce flux est séparé sur 2 réseaux indépendants identiques, vers la cuve témoin (à droite, ici du vide) et vers la cuve où se situent les plantes de service testées (à gauche). Le flux d'air passe d'abord au travers d'un flacon de charbon actif, puis est soit envoyé dans l'enceinte soit directement vers la station de débitmètres secondaire (DMS) via le by-pass R1. Au niveau de l'enceinte, l'air peut être envoyé soit directement vers le DMS grâce au by-pass R2, soit à l'extérieur du dispositif grâce à un tuyau d'évacuation R3.

Chaque cuve est connectée à 2 chambres. Une chambre (Figure 2B) est constituée d'un cylindre de verre ($\varnothing = 70$ mm) séparé en son centre, par un verre fritté ($\varnothing = 40$ mm, épaisseur = 5 mm). Les bords du cylindre sont évasés afin de recevoir de part et d'autre une coiffe en verre, connectée par le dessus au réseau de distribution d'air et par dessous à une évacuation. Afin d'éviter toute fuite d'air, l'étanchéité de l'ensemble est assurée par des serre-joints métalliques. Une mini-caméra USB est positionnée entre le cylindre et la coiffe inférieure, cette dernière permet de prendre des photos lors du test.

Protocole

Les différentes étapes du protocole sont expliquées dans la figure 3 ci-dessous. Les pots et le substrat des plantes testées sont recouverts de papier aluminium avant d'être placés dans les cuves afin de limiter une pollution olfactive. Dans chaque cuve sont disposés délicatement 4 à 6 plants, qui sont ensuite fermés hermétiquement. Afin de ne pas avoir de biais liés au développement des plantes, seules des plantes du même âge et au même stade (végétatif, floraison) sont choisies. Un brassage de l'air est assuré en continu au sein des cuves par 2 ventilateurs. Ensuite débute une période de repos de 1h afin de réduire l'accumulation de COVs probablement provoquée par le stress lié au transport des plantes. Pour la réalisation d'un test, 2 cuves sont nécessaires : un témoin (fraisier ou vide) et une contenant des plantes testées. Ces cuves sont connectées chacune à 2 chambres d'olfactomètres.

Au sein de ces chambres sont disposées vingt femelles âgées de 8 jours issues de cohorte de 24h. Elles sont déposées délicatement à l'aide d'un pinceau sur la face inférieure du disque de verre fritté des chambres d'olfactomètres. Pour chaque test, 80 pucerons sont ainsi utilisés. Ensuite, les chambres sont reliées au circuit et sont fermées hermétiquement. Puis, un repos de 10 minutes est respecté afin de laisser les pucerons se stabiliser dans le noir avec un flux d'air à 0.3 L.min⁻¹ filtré au charbon. Des photographies sont ensuite réalisées grâce aux micro-

caméras USB afin d'observer la disposition des pucerons sur le verre fritté au moment de l'installation (t_{-10}) et à l'état initial (t_i). Un premier paramètre est ainsi calculé, la proportion de pucerons répondant favorablement à la stabilisation (S) est obtenue à partir du rapport : (t_i/t_{-10}).

$$S = \frac{t_i}{t_{-10}}$$

A la fin de la phase de stabilisation, le test commence avec l'ouverture des by-pass permettant aux pucerons d'être exposés à l'air provenant des cuves avec un flux de $0.3 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. L'ensemble est laissé dans le noir afin d'éviter toute stimulation visuelle. Des photographies sont réalisées à la fin de l'expérience (t_f).

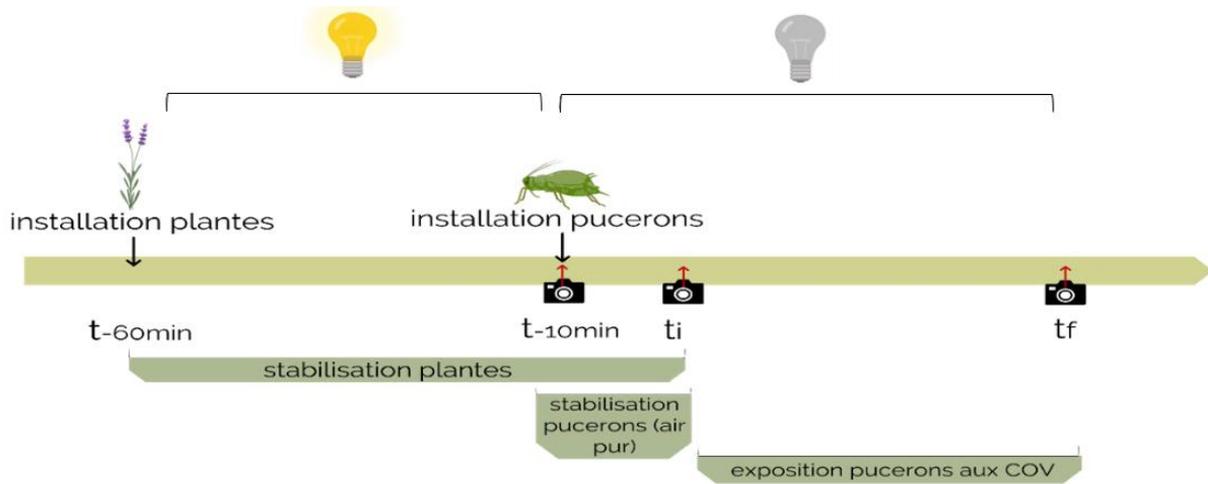


Figure 3 : Schéma explicatif du protocole des tests de répulsion

Le dénombrement des pucerons est ensuite réalisé grâce au traitement des photographies par le logiciel ImageJ (version 1.53K). Les pucerons comptés sont ceux qui sont positionnés sur le verre fritté. Pour chaque chambre d'olfactomètre un indice de répulsion à 60 minutes (IR_{60}) est calculé à t_f selon la formule suivante :

$$IR_{60} = \frac{(n \text{ à } t_i - n \text{ à } t_f)}{n \text{ à } t_i}$$

n : nombre de puceron sur le verre fritté
 f : 60 minutes après le début du test
 Co : contrôle
 T : test

A la fin de chaque test, l'air provenant des 2 cuves est prélevé via des cartouches de Tenax TA 60/80 (Perkin-Elmer) sous un flux de $0.3 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ pendant 5 minutes grâce à des mini-pompes (PAS-500 SUPELCO®). Les cartouches sont ensuite conservées à 5°C jusqu'à l'analyse par TD-GC-MS.

Analyse des Composés Organiques Volatils (COVs)

Les cartouches sont analysées à l'aide d'un CPG-SM Trace-ISQ (Thermo Fisher) équipé d'un désorbeur thermique Turbomatrix ATD 650 et d'une colonne capillaire en silice fondue Elite 5-MS 0,25 mm x 30 m x 0,5 µm (PerkinElmer). L'analyse se réalise en 3 phases distinctes :

- une désorption thermique (TD) permettant d'extraire les COVs des cartouches ;
- une séparation des composés suivant leur affinité avec les différentes phases gazeuses (GC) de la colonne ;
- une identification et une quantification des composés selon leur rapport masse sur charge (MS).

L'analyse se termine par l'obtention de chromatogrammes qui sont ensuite interprétés sur le logiciel AMDIS (Davies 1998) avec implémentation des données recueillies sur la bibliothèque NIST (base de données standard de référence numéro 69 (Ed 2003)). L'association des indices de répulsion à t60 à chaque prélèvement permet de déterminer l'influence des composés sur les comportements de fuite des pucerons.

Tests de fécondité

La figure 4 résume le protocole des tests de fécondité. Pour étudier la fécondité des pucerons sur une période de 5 jours, les larves issues des cohortes de 8h sont placées sur des plants de fraisiers. Après 14 jours de développement, les individus sont transférés sur une feuille de fraisier, face abaxiale vers le haut, dans des boîtes de Pétri (l : 12 cm x L : 12 cm x h : 2 cm) contenant du papier filtre humidifié. Dans le but d'évaluer l'effet de la plante de service, une feuille de celle-ci est ajoutée dans chaque boîte en veillant à toujours prendre la même quantité.

Les boîtes sont ensuite disposées dans des caissettes pour éviter toute interaction entre les différents bouquets olfactifs. Celles-ci sont ensuite placées dans des chambres maintenues à une température constante de 20 °C et à une photopériode stable (16:8 J:N).

Les femelles commencent à pondre après environ 14 jours. Les larves obtenues sont comptées puis éliminées chaque jour de la semaine. Nous observons également 2 autres paramètres : la survie des individus ainsi que leur position dans la boîte. Trois modalités (2 potentielles plantes de services et 1 contrôle) sont testées toutes les 2 semaines, avec un effectif de 30 individus par modalité. Par conséquent, chaque semaine, il est nécessaire d'avoir au minimum 45 individus issus des cohortes de 8h pour mener à bien les expérimentations.

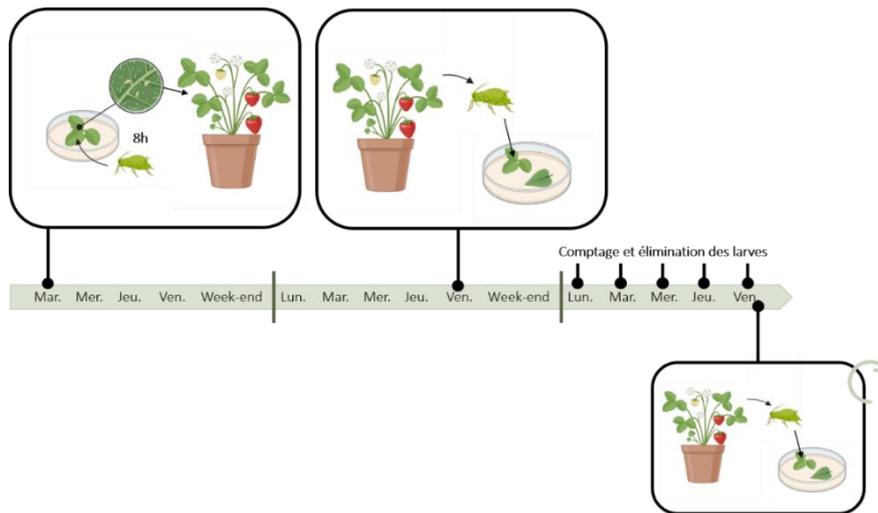


Figure 4 : Schémas explicatifs du protocole des tests de fécondité

Analyses statistiques

Les analyses ont été réalisées avec le logiciel R version 4.2.2 (R Core Team, 2022). Pour l'analyse des composés organiques volatiles, des analyses en composantes principales (ACP) ont été réalisées en utilisant le package « FactoMiner » (Lê et al. 2008). De plus, le post-hoc de la PERMANOVA a été effectué à l'aide du package « RVAideMémoire » (Herve M. 2023). Pour les tests de fécondité et de répulsion, la normalité de la distribution des données a été vérifiée à l'aide du test de Shapiro-Wilk. Les différentes modalités ont été comparées grâce à un test non paramétrique de Kruskal-Wallis. Si le test indiquait une différence significative, les indices de répulsion ainsi que de ponte étaient comparés deux à deux, avec le test post-hoc de Nemenyi du package « PMCMRplus » (Pohlert T. 2022). Le test post-hoc de Dunn a été réalisé sur les données de position des tests de fécondité à l'aide du package « dunn.test » (Dinno A. 2017) en appliquant la méthode d'ajustement de Bonferroni. Tous mes graphiques ont été créés à l'aide du package ggplot2 (H. Wickham 2016).

Le seuil de significativité statistique retenu pour chacun des tests présentés est de 5%.

RESULTATS

Tests de répulsion

Pour chaque plante testée, chaque indice de répulsion a été calculé en faisant la moyenne de 8 répétitions. Cependant, pour le fraisier, l'indice de répulsion a été obtenu en prenant la moyenne de 91 répétitions.

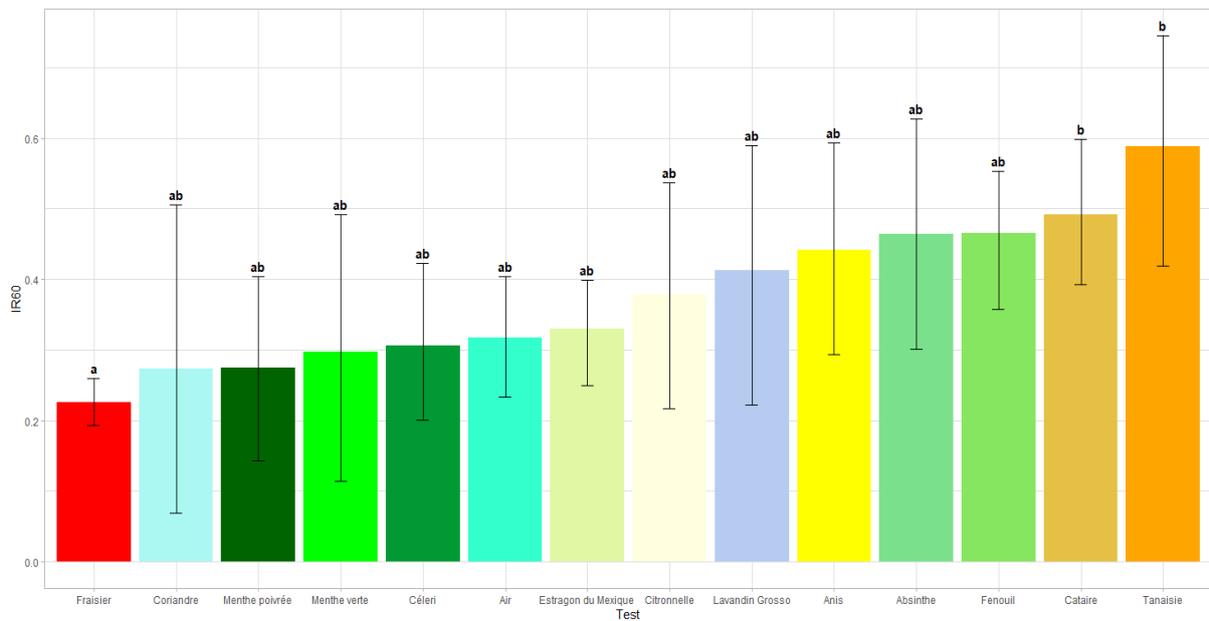


Figure 5 : Indices de répulsion à 60 minutes de *M. euphorbiae* en fonction de la plante testée. Les moyennes ne partageant aucune lettre sont significativement différentes ($p < 0.05$).

Les indices de répulsion à 60 minutes obtenus varient entre 0.23 pour le fraisier et 0.59 pour la tanaïs (Figure 5). Parmi les plantes testées, seules deux d'entre elles présentent une différence significative (Test de Kruskal Wallis : $\chi^2_{14} = 41.356$, $p < 0.001$) par rapport au fraisier. Ces deux plantes sont la cataire (*Nepeta cataria*) et la tanaïs (*Tanacetum vulgare*) avec des valeurs de p respectives de 0.047 et 0.01. De plus, une autre plante, le fenouil, présente une différence marginalement significative avec le fraisier ($p = 0.095$).

Toutes les autres plantes testées ne sont pas significativement différentes par rapport au fraisier. De plus, ces plantes ne présentent pas de différence significative avec la cataire et la tanaïs non plus.

Analyses des Composés Organiques Volatils (COVs)

Les résultats de l'analyse GC-MS ont conduit à l'identification de 99 composés distincts. Une analyse multivariée des variances par permutation a été réalisée pour valider les

différences observées des centroïdes et de dispersion en fonction des différentes modalités ($F = 13.074, p = 0.001$). Ensuite, une analyse post-hoc par paires a été menée, mettant en évidence des différences significatives entre chacune des modalités ($0.001 \leq p \leq 0.041$), à l'exception de la modalité citronnelle où les différences ne sont pas significatives ($0.167 \leq p \leq 0.667$) (**Annexe II**).

Bien que le pourcentage d'inertie expliquée soit relativement faible dès les deux premières dimensions (25,72%, soit 6 dimensions pour couvrir environ 55% de la variance expliquée), l'analyse en composante principale (ACP) parvient néanmoins à une discrimination notable entre les échantillons prélevés pour le Lavandin Grosso et ceux prélevés pour l'absinthe, le céleri, ainsi que la tanaïsie (Figure 6.A). En effet, il est notable que parmi les 20 composés contribuant le plus aux dimensions 1 et 2, des composés spécifiques au lavandin apparaissent fortement associés à la première dimension, tandis que des composés caractéristiques de l'absinthe se lient à la seconde dimension (Figure 7.A) (**Annexe III.A**).

Les dimensions 3 et 4 (expliquant 16,4% d'inertie) permettent une distinction plus nette entre les composés émis par la menthe poivrée et l'absinthe par rapport au fenouil et à la tanaïsie (Figure 6.B). De plus, dans ces deux dimensions, nous retrouvons des composés spécifiques à la menthe poivrée et à l'absinthe, tandis que la dernière dimension est marquée par des composés caractéristiques du fenouil et de la tanaïsie (Figure 7.B) (**Annexe III.B**).

Les profils moyens d'émission ont été déterminés pour deux plantes avec les indices moyens de répulsion les plus élevés à 60 minutes : la cataïre et le fenouil (Figure 8). Cependant, la tanaïsie n'a pas pu être incluse ici en raison d'un problème de lecture des cartouches au TD-GC-MS, entraînant une perte des données correspondant à des indices de répulsion précis.

En ce qui concerne la cataïre, l'indice de répulsion le plus élevé est associé à des niveaux plus élevés de benzaldéhyde, d'eucalyptol, de camphre et de décanal. En revanche, pour les autres indices de répulsion, ces COVs sont émis en quantités plus faibles.

Pour les échantillons de fenouil, les cinq prélèvements ont montré une émission importante de limonène. Toutefois, l'indice de répulsion le plus faible obtenu avec le fenouil correspond aux prélèvements où l'on retrouve les niveaux les plus bas de ce composé.

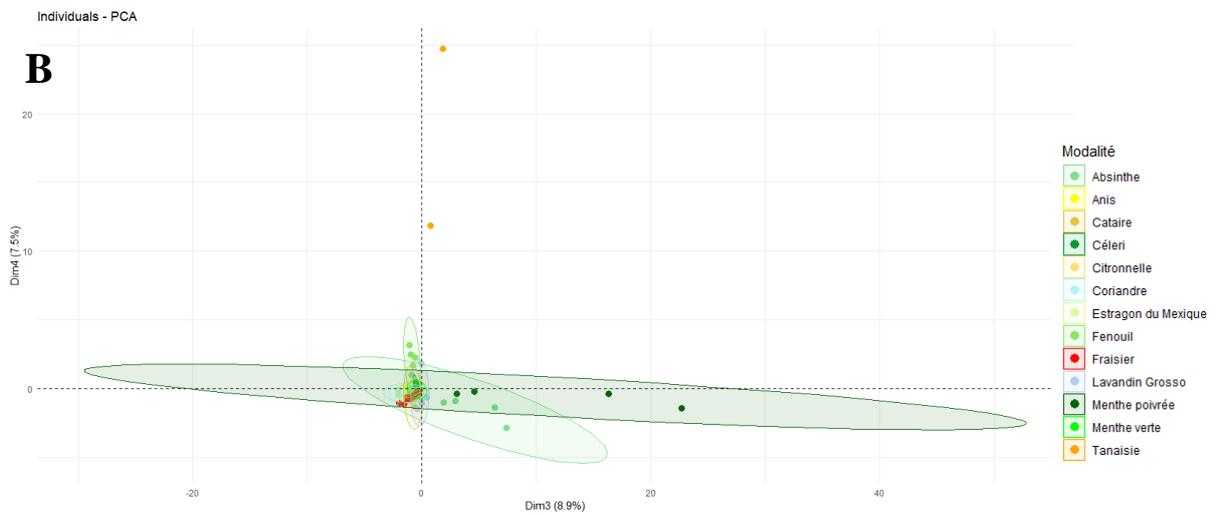
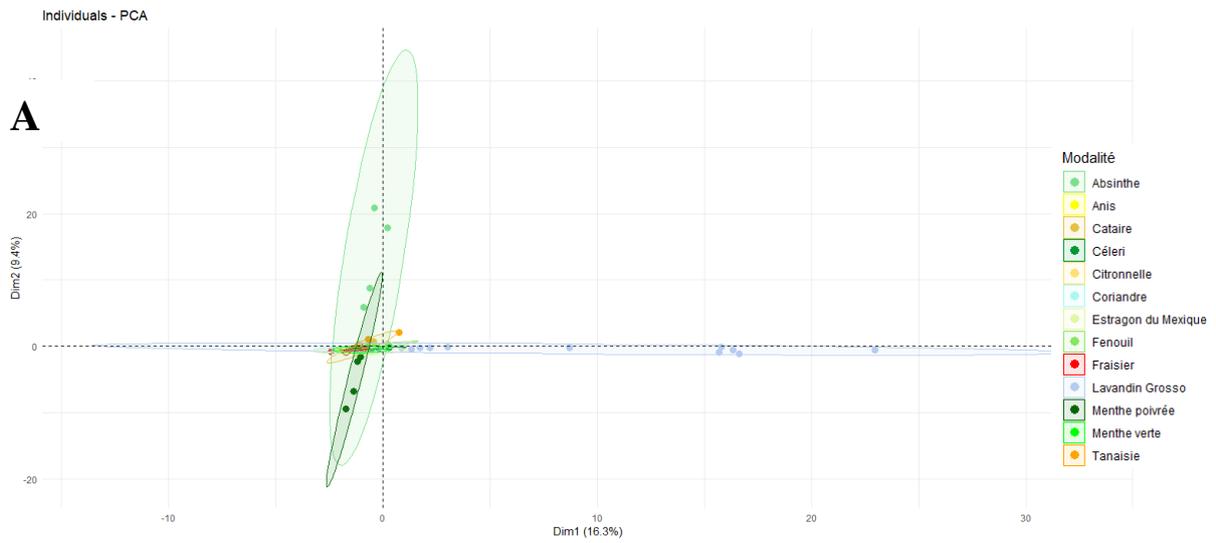


Figure 6 : ACP en fonction des modalités par rapport aux Axes 1 : 2 (A) et 3 : 4 (B).

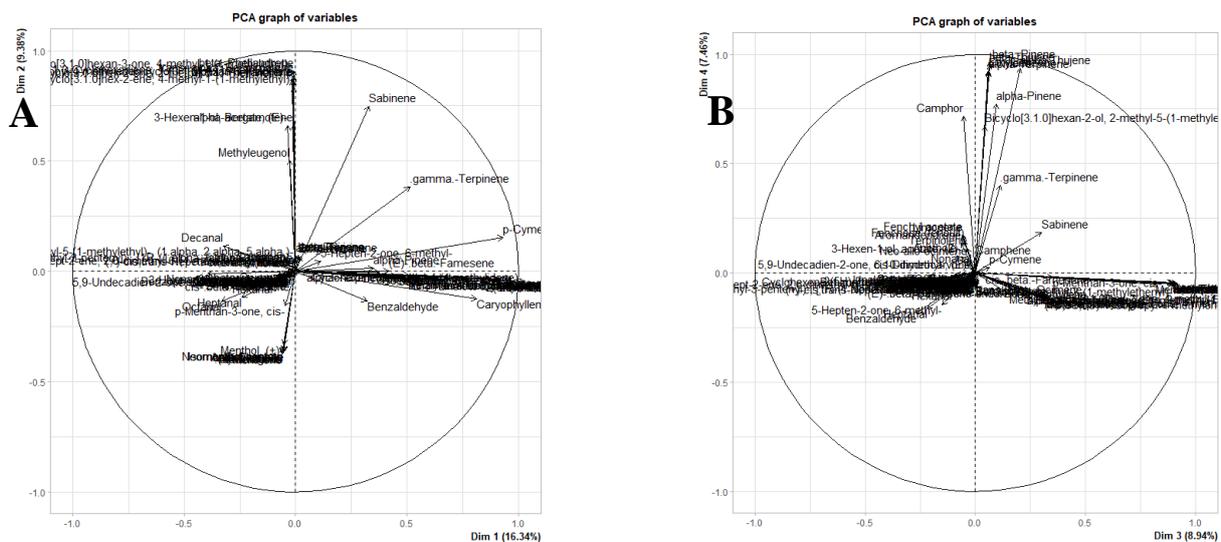


Figure 7 : Représentation des composés par rapport aux Axes 1 : 2 (A) et 3 : 4 (B).

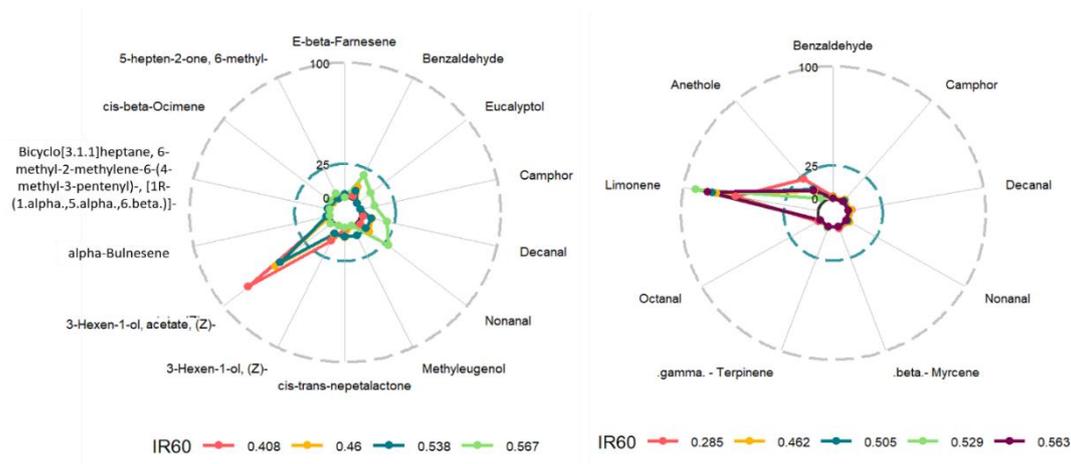


Figure 8 : Profil d'émissions des 4 prélèvements de la cataire (à gauche) et des 5 prélèvements du fenouil (à droite) selon l'indice de répulsion après 60 minutes d'exposition aux COVs.

Tests de fécondité

La figure 9 représente le nombre de larves produites par semaine de *M. euphorbiae* sur la modalité fraisier. Le premier jour de suivi n'est pas inséré dans l'intégralité des résultats puisque la temporalité de la première larviposition n'est pas certaine.

Le nombre total de naissances par boîte varie significativement (Test de Kruskal Wallis : $\chi^2_{10} = 25.505$, $p > 0.01$) entre la semaine 23 et le semaine 29 ($p = 0.006$). Cependant, malgré l'évolution de l'âge des femelles au lundi, aucune différence significative entre les autres semaines a été observée.

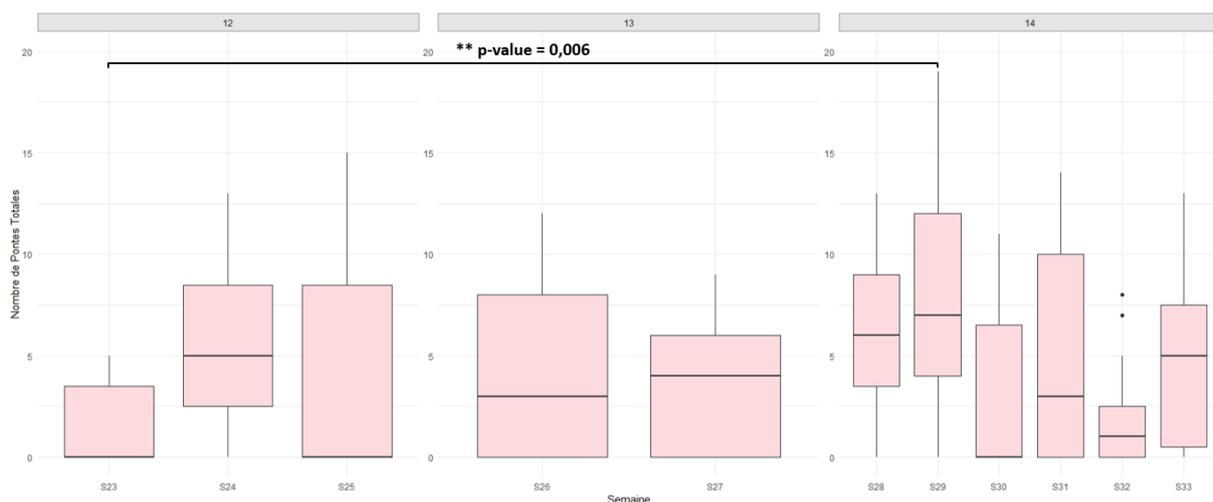


Figure 9 : Evolution du nombre de larves pondues par femelle sur 4 jours lors des tests de fécondité sur la modalité fraisier selon la semaine. Les valeurs 12, 13 et 14 indiquent l'âge (en jours) des femelles au lundi.

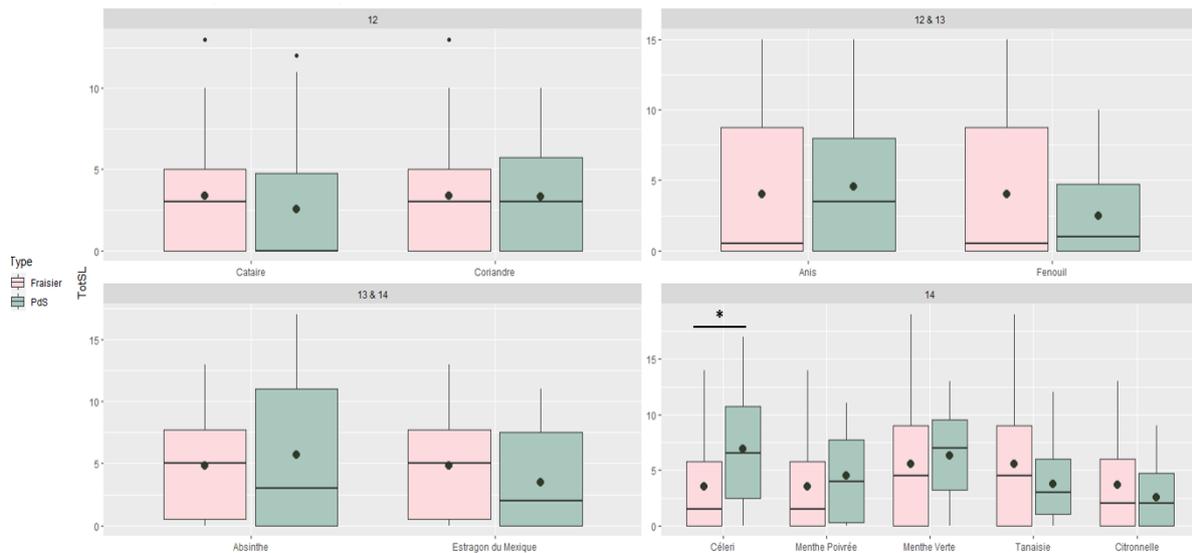


Figure 10 : Nombre de larves produites en 4 jours par une femelle selon la modalité. Les valeurs 12, 12 & 13, 13 & 14 et 14 indiquent l'âge (en jours) des femelles au lundi.

Une différence significative (Test de Wilcoxon, $W = 281.5$) apparaît entre la modalité céleri et son témoin avec une évolution du nombre moyen de ponte sur 4 jours avec respectivement une moyenne de 6.9 larves et 3.53 larves en 4 jours ($p = 0.012$) (Figure 10). Aucune autre modalité n'a été significativement différente par rapport à son témoin.

La figure 11 offre une perspective plus détaillée sur les résultats des tests de fécondité par rapport à la modalité céleri. Ils mettent en évidence la variation quotidienne des pontes moyennes par femelle sur une semaine d'expérimentation.

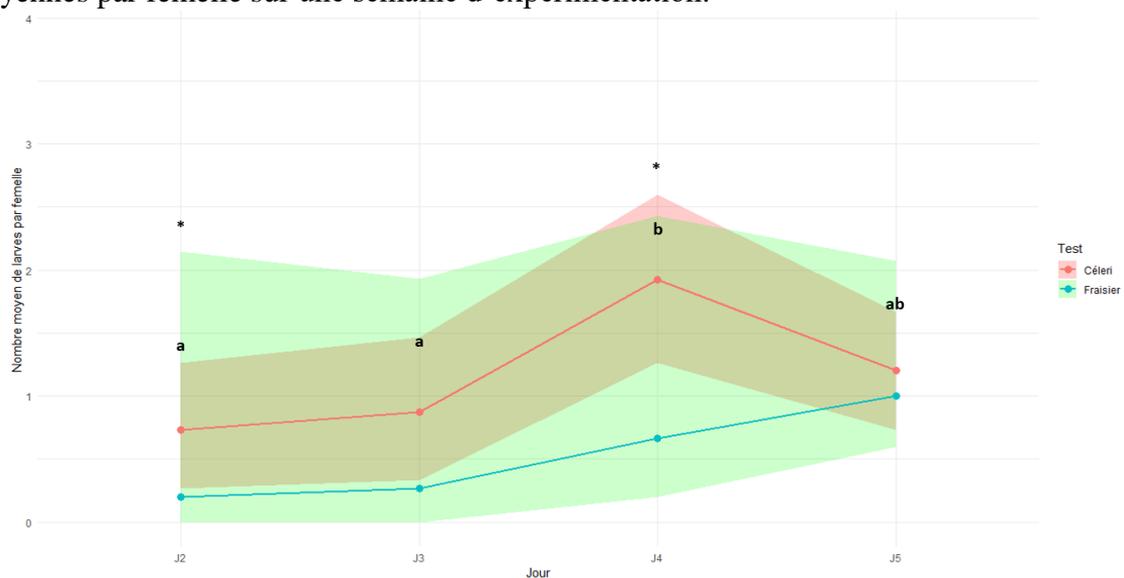


Figure 11 : Cinétique de fécondité selon le céleri et son témoin lors de la semaine 32. Les étoiles marquent une différence significative entre les données du fraisier et celles du céleri pour une même journée. Dans le cas du céleri, les jours qui présentent des différences significatives selon le test de rang signé n'ont aucune lettre en commun.

Au cours de la semaine 32 (Figure 11), des différences significatives émergent pour le nombre moyen de larves entre le céleri et le fraisier, spécifiquement à J2 et J4 ($p = 0.05$ et 0.02). En outre, on constate une augmentation significative du nombre moyen de pontes pour le céleri entre le mardi, le mercredi et le jeudi ($p = 0.02$ et 0.04).

Le tableau II condense les données relatives à la fécondité de *M. euphorbiae*, en corrélation avec sa position durant les essais de fécondité. Seules les plantes démontrant des différences significatives sont incluses.

Tableau II : Analyse de la fécondité de *M. euphorbiae* en relation avec sa position lors des essais de fécondité.

Modalité	Boîte	Position	Nombre puceron	Ponte totale	Ponte moyenne par femelle et par jour	p-value
Cataire	Témoin	Fraisier	96	103	1.07	0.002
	Test	Cataire	34	9	0.26	
		Fraisier	65	66	1.02	0.011
Céleri	Témoin	Fraisier	146	129	0.88	> 0.001
	Test	Céleri	90	167	1.88	
		Fraisier	57	30	1.05	0.001
Tanaisie	Témoin	Fraisier	131	229	1.75	0.062
	Test	Tanaisie	28	29	0.79	
		Fraisier	117	92	0.79	0.72

En prenant en considération la position du puceron lors des relevés de fécondité, des variations significatives (Test de Kruskal Wallis, $p < 0.05$) sont observées en ce qui concerne la ponte.

Par exemple, lorsque le puceron est positionné sur la cataire, il y a une baisse significative dans la ponte moyenne d'une femelle entre la feuille de fraisier de la boîte témoin ($p = 0.002$) et celle de la boîte test ($p = 0.011$). En outre, nous remarquons une différence marginalement significative entre la ponte d'une femelle sur une feuille de tanaisie et une feuille de fraisier seule ($p = 0.062$).

De plus, lorsque la femelle est positionnée sur une feuille de céleri, une augmentation significativement différente est observée dans la ponte moyenne par rapport à une femelle se positionnant sur une feuille de fraisier dans la même boîte ($p = 0.001$) ou par rapport à une feuille de fraisier seule ($p < 0.001$).

DISCUSSION

Le protocole technique utilisant l'olfactomètre tubulaire dynamique avait déjà donné des résultats prometteurs avec d'autres types de pucerons, tels que le puceron cendré du pommier *Dysaphis plantaginea* (Dieudonné et al. 2022). En appliquant ce même système au puceron vert et rose de la pomme de terre, *Macrosiphum euphorbiae*, les expériences ont montré qu'après 60 minutes, il y avait un faible niveau de répulsion obtenu avec le fraisier. Le fraisier étant la plante hôte utilisée en élevage, il correspond au témoin négatif, ce faible indice de répulsion (inférieur à 0.3) confirme l'efficacité du protocole technique. Ainsi, ce protocole peut être utilisé pour évaluer de potentielles plantes qui pourraient aider à lutter contre ce puceron.

La tanaïsie (*Tanacetum vulgare*) s'est avérée être la plante avec le niveau le plus élevé d'indice de répulsion. Des extraits de tanaïsie avaient déjà démontré des effets répulsifs et toxiques contre deux autres espèces de pucerons : *Myzus persicae*, le puceron vert du pêcher, et *Aphis fabae*, le puceron noir de la fève, comme l'ont montré les travaux de Ikeura et al. 2012 et Kwiecień et al. 2020. La cataire (*Nepeta cataria*), quant à elle, s'est classée en deuxième position en termes d'indice de répulsion. De manière similaire à la tanaïsie, l'emploi d'huile essentielle de cataire avait déjà démontré des effets toxiques contre le puceron cendré du chou, *Brevicoryne brassicae*, selon les recherches de Pavela 2006. De plus, des observations ont été faites concernant le fenouil (*Foeniculum vulgare*), montrant une réduction de l'infestation de la moutarde *Brassica juncea* par le puceron du navet, *Lipaphis erysimi*, lorsqu'il était cultivé en intercalaire Singh and Kothari 1997.

Tous ces résultats sont intéressants en lien avec ceux obtenus dans notre étude. Nous avons montré que la plante entière permet d'obtenir un effet répulsif et pourrait être une alternative à l'utilisation d'huile essentielle. Cette approche pourrait ainsi contribuer à limiter l'infestation par ce puceron de manière bénéfique.

Toutefois, selon les recherches menées par Cantó-Tejero et al. 2022, l'utilisation d'huile essentielle d'anis et de citronnelle présente des effets répulsifs marqués contre *M. euphorbiae* (Indice de Répulsion > 75%). Cependant, au sein de notre protocole nous n'avons pas révélé de répulsion significative lorsque ces deux plantes ont été employées. Une des hypothèses serait que les composés répulsifs seraient plus concentrés au sein des huiles essentielles, ce qui entraînerait une libération plus importante de ces composés par rapport à l'utilisation des plantes entières.

La constatation d'une différenciation marquée dans les indices de répulsion en fonction de la plante testée suggère la possibilité de formuler des hypothèses concernant l'influence des

composés identifiés sur le comportement de *M. euphorbiae*. En particulier, il est envisageable que les composés spécifiques à la tanaïsie, à la cataire ou encore au fenouil jouent un rôle dans leur capacité à provoquer un comportement de fuite.

Dans cette étude, deux composés ont été détectés exclusivement dans la tanaïsie : l' α -Terpinene et l' α -Thujène. Ces deux composés ont été suggérés par les travaux de [Yarou et al. 2020](#), comme ayant un rôle dans la répulsion de deux espèces de pucerons, *Myzus persicae* et *Aphis fabae*. En ce qui concerne le fenouil, deux composés pertinents ont été identifiés : le Fenchone et l'Anethole. Selon l'étude menée par [Taglienti et al. 2023](#), ces deux composés pourraient induire un comportement de fuite chez *Aphis gossypii*, tout en présentant une toxicité avérée pour *Myzus persicae*.

En ce qui concerne la cataire, trois composés spécifiques se sont démarqués : la Népétalactone, l' α -Bulnesene et le β -Ocimene. Ce dernier pourrait déclencher des mécanismes de défense chez les plantes, réduisant dans cette étude la taille de *Macrosiphum euphorbiae* tout en attirant le parasitoïde *Aphidius ervi* ([Cascone et al. 2015](#)). Par ailleurs, la Népétalactone présente un double intérêt : elle attire les parasitoïdes et agit comme une phéromone sexuelle pour les pucerons mâles, permettant ainsi de les piéger ([Hardie et al. 1991](#), [Gabryś et al. 1997](#)). L' α -Bulnesene, quant à lui, agirait comme une phéromone sexuelle pour les coccinelles, augmentant potentiellement leur attraction et donc leur prédation des pucerons ([Fassotte et al. 2014](#)).

Enfin, le camphre a été détecté pour ces trois plantes. Ce composé a déjà été lié à des comportements de fuite chez *Myzus persicae* ([Hori 1998](#)). Cependant, il est important de souligner que l'effet d'un composé ne dépend pas uniquement de sa présence, mais aussi de sa proportion d'émission. De plus, les interactions avec d'autres composés peuvent engendrer des effets synergiques ou antagonistes influençant leur efficacité en matière de répulsion. En effet, des exemples de compensation de l'effet répulsif d'un composé par un autre ont déjà été observés ([Bruce and Pickett 2011](#), [Dardouri et al. 2019](#), [Dieudonné et al. 2022](#)).

Les conséquences des interactions entre ces composés interrogent sur le comportement de fuite des pucerons, mais aussi sur l'impact qu'ils ont sur la fécondité de ceux-ci. L'objectif des tests de fécondité était de trouver rapidement et simplement des plantes qui pourraient réduire la capacité de reproduction de *M. euphorbiae*. Cependant, aucune des plantes testées n'a présenté de tels résultats. Nous avons même observé que le céleri avait tendance à augmenter le nombre de pontes du puceron.

Dans l'ensemble des tests de fécondité, nous avons tenté de déterminer le moment où

Macrosiphum euphorbiae commencerait à pondre le lundi, jour de début des tests. Pour ce faire, nous avons fait varier l'âge des pucerons le lundi, en commençant par 12 jours pendant les premières semaines et en augmentant jusqu'à 14 jours à la fin des expériences.

Seules deux semaines se sont avérées significativement différentes l'une de l'autre. Aucune autre variation n'a été observée même en modifiant l'âge du puceron. Lorsque nous avons réalisé nos expériences avec des cohortes que nous maintenions sur des fraisiers issus de vitro-plants, les fraisiers avaient tendance à produire rapidement des stolons, ce qui a eu pour conséquence d'attirer un grand nombre de pucerons. Les pucerons se nourrissant des stolons semblaient plus grands que ceux se nourrissant des feuilles. Selon [Karley et al. 2002](#), il est possible que le développement des pucerons soit accéléré lorsqu'ils se nourrissent de jeunes plants. En effet, le ratio d'acides aminés circulant dans le phloème ne sont pas les mêmes entre différents stades de développement des plantes. Il est donc plausible de supposer que le phloème transporté au travers des stolons était plus nutritif pour les pucerons, ce qui pourrait expliquer les différences de phénotype observées entre les individus.

Cependant, en prenant en considération la position du puceron par rapport à son nombre de pontes, nous avons observé que certaines plantes avaient un impact sur la fécondité lorsque le puceron se nourrissait d'elles, comme la tanaisie ou la cataire. Cependant, nous ne pouvons pas être totalement certains que le puceron se nourrissait réellement de la feuille, même si les larves pondues restaient dessus, suggérant qu'elles consommaient réellement celle-ci. Il pourrait être intéressant de valider ces résultats en positionnant des pucerons sur une potentielle plante de service et en observant leurs nombres de pontes. Ceci nous permettrait d'obtenir des résultats plus fiables sur l'impact de la plante sur la fécondité du puceron.

Pour clore sur les tests de fécondité chez *Macrosiphum euphorbiae*, il serait intéressant de tester d'autres plantes ou même d'adopter une méthode d'expérimentation similaire à celle mentionnée par [Morgane Enea \(2022\)](#), c'est-à-dire en associant des plantes entières avec une plante de service où des clip-cages, contenant un puceron, sont fixés sur la plante hôte. Cela offrirait une approche plus complète pour évaluer l'effet des plantes sur la ponte des pucerons.

En conclusion, les tests de répulsion ont démontré l'efficacité du protocole d'olfactomètre dynamique pour évaluer l'effet de plantes sur le comportement de fuite de *M. euphorbiae*. La tanaisie, la cataire ainsi que le fenouil se sont distingués comme plantes intéressantes dans la répulsion de ce puceron, probablement expliquée par leurs composés organiques volatils spécifiques identifiés. Quant aux tests de fécondité, ils n'ont pas montré d'effets significatifs sur sa reproduction. Cependant ces découvertes ouvrent des perspectives

prometteuses pour exploiter les propriétés de ces plantes dans la lutte contre ce puceron en limitant l'utilisation de produits phytosanitaires.

Si l'association de plantes de services aux cultures d'intérêt s'avère complexe du fait de leur phénologie mais aussi du travail supplémentaire pour le producteur, il est néanmoins intéressant d'avoir associé les comportements de fuite aux composés organiques volatils émis par ces plantes. Cette étude des profils olfactifs spécifiques pourrait être utile pour développer des dispositifs de diffusion d'extraits de plantes dans le but de les utiliser de manière ciblée.

L'utilisation de plusieurs leviers agroécologiques, dont l'utilisation de ces plantes de service et la libération de prédateurs naturels, combinée à la sélection de variétés moins sensibles, émerge comme une approche encourageante pour réduire les intrants agricoles. Mais sommes-nous prêts à relever ce défi ?

REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord PICLEG pour l'opportunité qu'ils m'ont donnée pour réaliser ce stage.

Je tiens d'abord à remercier de tout cœur Louise JEANDROZ pour ces qualités de tutrice. Je la remercie pour la confiance qu'elle m'a accordée tout au long de ce stage, pour les connaissances qu'elle m'a partagées mais également pour sa bonne humeur. Travailler à ces côtés pendant ces 6 mois a été tout aussi agréable qu'enrichissant. De plus, toutes les sorties que nous avons pu faire resteront de très bons souvenirs.

Je remercie également Hélène GAUTIER et Laurent GOMEZ pour la confiance qu'ils m'ont accordée mais également pour leurs conseils qui m'ont aidé tout au long du stage. Leur bienveillance ainsi que leur bonne humeur resteront un exemple pour la suite de ma vie professionnelle.

Je veux adresser un remerciement particulier à Inessa BUCH pour m'avoir aidé dans l'élevage des pucerons mais aussi dans la gestion de mes plantes. Elle a toujours été de bonne humeur et très gentille. Nos échanges m'ont permis d'apprendre énormément sur divers sujets. Je lui souhaite une bonne continuation et plein de réussites dans sa future expérience professionnelle. Je tiens également à remercier Didier et Guillaume pour avoir veillé sur mes fraisiers et sur les plantes de service. J'ai beaucoup appris en travaillant à leur côté.

Je remercie également Claude CASTELLA, Guy COSTAGLIOLA et Louna RIZZI pour leurs aides dans mes analyses au TD-GC-MS.

Je remercie enfin toute l'équipe de PSH pour la bonne humeur qu'ils ont apporté à mes pauses café. Je remercie également tous les doctorants et les stagiaires pour tous ces repas riches en discussion et en rire qu'on a partagés. Je leur souhaite plein de réussites dans leurs futurs projets.

Pour finir je tiens à remercier Anaïs pour m'avoir soutenu et pour avoir relu ce rapport de nombreuses fois afin de corriger mes erreurs. Enfin, je tiens à remercier mes parents pour m'avoir aidé tout au long de ce stage mais également de m'avoir soutenu durant mes études. Sans eux, je ne serais pas là où je suis actuellement, merci du fond du cœur.

REFERENCES

- Agnès Buzyn, Stéphane Travert, Brune Poirson (2018) Entrée en vigueur de l'interdiction des néonicotinoïdes le 1er septembre. <https://agriculture.gouv.fr/entree-en-vigueur-de-linterdiction-des-neonicotinoides-le-1er-septembre> (17 March 2023, date last accessed).
- Andrews MC, Callaghan A, Field LM, Williamson MS, Moores GD (2004) Identification of mutations conferring insecticide-insensitive AChE in the cotton-melon aphid, *Aphis gossypii* Glover. *Insect Mol Biol* 13:555–561.
- Bass C, Denholm I, Williamson MS, Nauen R (2015) The global status of insect resistance to neonicotinoid insecticides. *Pestic Biochem Physiol* 121:78–87.
- Bass C, Field LM (2018) Neonicotinoids. *Curr Biol* 28:R772–R773.
- Ben Issa R, Gautier H, Gomez L (2017) Influence of neighbouring companion plants on the performance of aphid populations on sweet pepper plants under greenhouse conditions. *Agric For Entomol* 19:181–191.
- Bruce TJA, Pickett JA (2011) Perception of plant volatile blends by herbivorous insects – Finding the right mix. *Phytochemistry* 72:1605–1611.
- Cantó-Tejero M, Casas JL, Marcos-García MÁ, Pascual-Villalobos MJ, Florencio-Ortiz V, Guirao P (2022) Essential oils-based repellents for the management of *Myzus persicae* and *Macrosiphum euphorbiae*. *J Pest Sci* 95:365–379.
- Cao C-W, Zhang J, Gao X-W, Liang P, Guo H-L (2008) Overexpression of carboxylesterase gene associated with organophosphorous insecticide resistance in cotton aphids, *Aphis gossypii* (Glover). *Pestic Biochem Physiol* 90:175–180.
- Cascone P, Iodice L, Maffei ME, Bossi S, Arimura G, Guerrieri E (2015) Tobacco overexpressing β -ocimene induces direct and indirect responses against aphids in receiver tomato plants. *J Plant Physiol* 173:28–32.
- Costa AV, Pinheiro PF, Rondelli VM, de QUEIROZ VT, Tuler AC, Brito KB, Stinguel P, Pratisoli D (2013) *Cymbopogon citratus* (Poaceae) ESSENTIAL OIL ON *Frankliniella schultzei* (Thysanoptera: Thripidae) AND *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae). *Biosci J* 29
- Dardouri T, Gautier H, Ben Issa R, Costagliola G, Gomez L (2019) Repellence of *MYZUS PERSICAE* (Sulzer): evidence of two modes of action of volatiles from selected living aromatic plants. *Pest Manag Sci* 75:1571–1584.

- Davies AN (1998) The new Automated Mass Spectrometry Deconvolution and Identification System (AMDIS). *Spectrosc Eur*
- Dedryver C-A, Le Ralec A, Fabre F (2010) The conflicting relationships between aphids and men: A review of aphid damage and control strategies. *C R Biol* 333:539–553.
- Deguine, J. P., Ratnadass, A., Robin, M.-H., Sarthou, J.P. (2020) Agroecological Crop Protection. Definition. *Dictionary of Agroecology*. <https://dicoagroecologie.fr/en/dictionnaire/agroecological-crop-protection/> (20 March 2023, date last accessed).
- Diehl E, Sereda E, Wolters V, Birkhofer K (2013) Effects of predator specialization, host plant and climate on biological control of aphids by natural enemies: a meta-analysis Paynter Q (ed). *J Appl Ecol* 50:262–270.
- Dieudonné E, Gautier H, Dardouri T, Staudt M, Guy Costagliola, Gomez L (2022) Establishing repellent effects of aromatic companion plants on *Dysaphis plantaginea* , using a new dynamic tubular olfactometer. *Entomol Exp Appl* 170:727–743.
- Döring TF (2014) How aphids find their host plants, and how they don't: Aphid host finding. *Ann Appl Biol* 165:3–26.
- Ed LPJ (2003) NIST Standard Reference Database Number 69. NIST Chem WebBook. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1570291225225470336> (24 May 2023, date last accessed).
- Evelyne Turpeau, Maurice Hullé, Bernard Chaubet (2010) *Macrosiphum euphorbiae* (Thomas, 1878) Puceron vert et rose de la pomme de terre. <https://www6.inrae.fr/encyclopedie-pucerons/Especes/Pucerons/Macrosiphum/M.-euphorbiae> (22 May 2023, date last accessed).
- Evelyne Turpeau, Maurice Hullé, Bernard Chaubet (2011) Fumagine. <https://www6.inrae.fr/encyclopedie-pucerons/Qu-est-ce-qu-un-puceron/Glossaire/Fumagine> (29 March 2023, date last accessed).
- FAO (2021) FAO. 2021. Fruits et légumes - éléments essentiels de ton alimentation. Année internationale des fruits et des légumes, 2021 Note d'information. Rome. <https://www.fao.org/publications/card/fr/c/CB2395FR/> (20 March 2023, date last accessed).
- FAOStat - Production Fraise en France. <https://www.fao.org/faostat/fr/#data/QCL> (20 March 2023, date last accessed).
- Fassotte B, Fischer C, Durieux D, Lognay G, Haubruge E, Francis F, Verheggen FJ (2014) First Evidence of a Volatile Sex Pheromone in Lady Beetles d'Ettorre P (ed). *PLoS ONE* 9:e115011.
- Fernández DE, Cichón LI, Sánchez EE, Garrido SA, Gittins C (2008) Effect of Different Cover Crops on the Presence of Arthropods in an Organic Apple (*Malus domestica* Borkh) Orchard. *J Sustain Agric* 32:197–211.
- Fraise LabelRouge La Fraise en chiffres. <https://www.fraiselabelrouge.fr/la-fraise-en-chiffres/> (20 March 2023, date last accessed).
- Gabryś BJ, Gadomski HJ, Klukowski Z, Pickett JA, Sobota GT, Wadhams LJ, Woodcock CM (1997) Sex Pheromone of Cabbage Aphid *Brevicoryne brassicae*: Identification and Field Trapping of Male Aphids and Parasitoids. *J Chem Ecol* 23:1881–1890.
- Griffiths DC, Pickett JA, Smart LE, Woodcock CM (1989) Use of insect antifeedants against aphid vectors of plant virus disease. *Pestic Sci* 27:269–276.
- Hardie J, Nottingham SF, Powell W, Wadhams LJ (1991) Synthetic aphid sex pheromone lures female parasitoids. *Entomol Exp Appl* 61:97–99.

- Hori M (1998) *Myzus persicae* IN A LABORATORY AND IN A.
- Ikeura H, Kobayashi F, Hayata Y (2012) Repellent Effect of Herb Extracts on the Population of Wingless Green Peach Aphid, *Myzus persicae* Sulzer (Hemiptera: Aphididae). *J Agric Sci* 4:p139.
- Inge Werner (2017) Les pyréthriinoïdes dans l'environnement.
https://www.centrecotox.ch/media/189995/2017_pyrethroide_fr.pdf (27 March 2023, date last accessed).
- Karley AJ, Douglas AE, Parker WE (2002) Amino acid composition and nutritional quality of potato leaf phloem sap for aphids. *J Exp Biol* 205:3009–3018.
- Koul O, Walia S, Dhaliwal GS (2008) Essential Oils as Green Pesticides: Potential and Constraints. 4
- Kwiecień N, Gospodarek J, Boligłowa E (2020) The Effects of Water Extracts from Tansy on Pea Leaf Weevil and Black Bean Aphid. *J Ecol Eng* 21:220–227.
- Lahiri S, Smith HA, Gireesh M, Kaur G, Montemayor JD (2022) Arthropod Pest Management in Strawberry. *Insects* 13:475.
- Lê S, Josse J, Husson F (2008) **FactoMineR** : An R Package for Multivariate Analysis. *J Stat Softw* 25.
<http://www.jstatsoft.org/v25/i01/> (28 August 2023, date last accessed).
- Lopez R, Shepard BM (2007) Arthropods associated with medicinal plants in coastal South Carolina. *Insect Sci* 14:519–524.
- MacGillivray ME, Anderson GB (1958) Development of Four Species of Aphids (Homoptera) on Potato. *Can Entomol* 90:148–155.
- Malézieux E, Crozat Y, Dupraz C, Laurans M, Makowski D, Ozier-Lafontaine H, Rapidel B, Tourdonnet S, Valantin-Morison M (2009) Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. *Agron Sustain Dev* 29:43–62.
- Mélanie Cabrol (2019) Mémoire de stage - Etude de l'effet de plantes de service sur la dynamique de population du puceron cendré du pommier (*Dysaphis plantaginea*) et de ses ennemis naturels.
- Miao J, Du Z-B, Wu Y-Q, Gong Z-J, Jiang Y-L, Duan Y, Li T, Lei C-L (2014) Sub-lethal effects of four neonicotinoid seed treatments on the demography and feeding behaviour of the wheat aphid *Sitobion avenae*: Sub-lethal Effects of neonicotinoids on *Sitobion avenae*. *Pest Manag Sci* 70:55–59.
- Morgane Enea (2022) Régulation de bioagresseurs telluriques et aériens (*Méloidogyne incognita* et *Myzus persicae*) du poivron (*Capsicum annuum*) par une plante de service (*Tagetes patula*).
- Myriam Carmentran-Délias / Chambre d'agriculture 47 (2017) FRAISE : Produits de traitement 2017-2018.
- Myriam Carmentran-Délias / Chambre d'agriculture 47 (2021) FRAISE : Produits de traitement 2021/2022.
https://lot-et-garonne.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Nouvelle-Aquitaine/102_Inst-Lot-et-Garonne/ACTU/FRAISES/2021_Fiche_PHYTO_Fraise.pdf (17 March 2023, date last accessed).
- Ng JCK, Perry KL (2004) Transmission of plant viruses by aphid vectors. *Mol Plant Pathol* 5:505–511.
- Oerke E-C (2006) Crop losses to pests. *J Agric Sci* 144:31–43.
- Pavela R (2006) Insecticidal Activity of Essential Oils Against Cabbage Aphid *Brevicoryne brassicae*. *J Essent Oil Bear Plants* 9:99–106.

- Santos ACC, Cristaldo PF, Araújo APA, Melo CR, Lima APS, Santana EDR, de Oliveira BMS, Oliveira JWS, Vieira JS, Blank AF, Bacci L (2018) *Apis mellifera* (Insecta: Hymenoptera) in the target of neonicotinoids: A one-way ticket? Bioinsecticides can be an alternative. *Ecotoxicol Environ Saf* 163:28–36.
- Sarkar SC, Wang E, Wu S, Lei Z (2018) Application of Trap Cropping as Companion Plants for the Management of Agricultural Pests: A Review. *Insects* 9:128.
- Singh D, Kothari SK (1997) Intercropping Effects on Mustard Aphid (*Lipaphis erysimi* Kaltendahl) Populations. *Crop Sci* 37:cropsci1997.0011183X003700040039x.
- Stéphanie Tellier, CRAAQ (2019) Guide Traitements Phytosanitaires 2019 Fraisier. https://www.agrireseau.net/documents/Document_105586.pdf (17 March 2023, date last accessed).
- Taglienti A, Donati L, Dragone I, Ferretti L, Gentili A, Araniti F, Sapienza F, Astolfi R, Fiorentino S, Vecchiarelli V, Papalini C, Ragno R, Bertin S (2023) In Vivo Antiphytoviral and Aphid Repellency Activity of Essential Oils and Hydrosols from *Mentha suaveolens* and *Foeniculum vulgare* to Control Zucchini Yellow Mosaic Virus and Its Vector *Aphis gossypii*. *Plants* 12:1078.
- Thompson JR, Wetzel S, Klerks MM, Vašková D, Schoen CD, Špak J, Jelkmann W (2003) Multiplex RT-PCR detection of four aphid-borne strawberry viruses in *Fragaria* spp. in combination with a plant mRNA specific internal control. *J Virol Methods* 111:85–93.
- Unal G, Jepson PC (1991) The toxicity of aphicide residues to beneficial invertebrates in cereal crops. *Ann Appl Biol* 118:493–502.
- United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2022) United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2022). World Population Prospects 2022 : Summary of Results. UN DESA/POP/2022/TR/NO. 3. https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa.pd/files/wpp2022_summary_of_results.pdf (20 March 2023, date last accessed).
- Xu Y, Gray SM (2020) Aphids and their transmitted potato viruses: A continuous challenges in potato crops. *J Integr Agric* 19:367–375.
- Yarou BB, Bokonon-Ganta AH, Verheggen FJ, Lognay GC, Francis F (2020) Aphid Behavior on *Amaranthus hybridus* L. (Amaranthaceae) Associated with *Ocimum* spp. (Lamiaceae) as Repellent Plants. *Agronomy* 10:736.
- Zhang Z, Zhou C, Xu Y, Huang X, Zhang L, Mu W (2017) Effects of intercropping tea with aromatic plants on population dynamics of arthropods in Chinese tea plantations. *J Pest Sci* 90:227–237.

ANNEXES

Annexe I : Provenance et type pour chaque plante de services testées

Plante	Provenance	Type
Lavandin Grosso <i>Lavandula x intermedia 'Grosso'</i>	Pépinière Quissac	Pot
Coriandre <i>Coriandrum sativum</i>	Ferme Sainte-Marthe	Graine
Anis Vert <i>Pimpinella anisum</i>	Ferme Sainte-Marthe	Graine
Cataire <i>Nepeta cataria</i>	Ferme Sainte-Marthe	Graine
Estragon du Mexique <i>Tagetes lucida</i>	Ferme Sainte-Marthe	Graine
Fenouil <i>Foeniculum vulgare</i>	Ferme Sainte-Marthe	Graine
Citronnelle <i>Cymbopogon citratus</i>	Ferme Sainte-Marthe	Rhizome
Menthe verte <i>Mentha spicata</i>	Ferme Sainte-Marthe	Graine
Absinthe <i>Artemisia absinthium</i>	Ferme Sainte-Marthe	Graine
Tanaisie <i>Tanacetum vulgare</i>	Ferme Sainte-Marthe	Graine
Céleri <i>Apium graveolens</i>	Ferme Sainte-Marthe	Graine
Aneth <i>Anethum graveolens</i>	Ferme Sainte-Marthe	Graine
Menthe poivrée <i>Mentha x piperita</i>	SARL du Tilleul	Boutures

Annexe II : Tableau récapitulatif de l'analyse multivariée des variances par permutation par paire.

	Absinthe	Anis	Cataire	Céleri	Citronnelle	Coriandre	Estragon du Mexique	Fenouil	Fraisier	Lavandin Grosso	Menthe poivrée	Menthe verte
Anis	* 0,037	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cataire	* 0,031	* 0,032	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Céleri	** 0,002	** 0,005	* 0,013	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Citronnelle	0,4	0,2	0,4	0,167	-	-	-	-	-	-	-	-
Coriandre	** 0,005	** 0,006	** 0,01	** 0,004	0,564	-	-	-	-	-	-	-
Estragon du Mexique	* 0,034	* 0,025	* 0,037	** 0,01	0,4	* 0,012	-	-	-	-	-	-
Fenouil	* 0,035	* 0,029	* 0,029	0,07	0,167	** 0,003	** 0,007	-	-	-	-	-
Fraisier	*** 0,001	*** 0,001	*** 0,001	*** 0,001	0,283	** 0,002	*** 0,001	*** 0,001	-	-	-	-
Lavandin Grosso	* 0,026	* 0,021	* 0,031	* 0,012	0,242	* 0,014	* 0,027	* 0,011	*** 0,001	-	-	-
Menthe poivrée	* 0,028	* 0,032	* 0,032	** 0,007	0,4	** 0,003	* 0,021	* 0,023	*** 0,001	* 0,024	-	-
Menthe verte	* 0,041	* 0,028	* 0,039	** 0,006	0,4	** 0,002	* 0,033	* 0,024	*** 0,001	* 0,021	* 0,03	-
Tanaisie	0,067	0,067	0,133	* 0,038	0,667	* 0,034	0,133	0,087	** 0,002	0,073	0,133	0,067

Annexe III.A : Tableaux récapitulatifs des 20 composés contribuant le plus aux axes 1, 2.
Les composés spécifiques au lavandin sont représentés en violet tandis que ceux de l'absinthe sont en vert.

Dimension 1		Dimension 2	
COV	Contribution	COV	Contribution
Borneol formate	0,97	.beta.-Phellandrene	0,92
Camphene	0,97	Bicyclo[3.1.0]hexan-3-one, 4-methyl-1-(1-methylethyl)-	0,91
D-Limonene	0,96	1,3-Cyclohexadiene, 1-methyl-4-(1-methylethyl)-	0,89
(+)-2-Bornanone	0,95	trans-.alpha.-Bergamotene	0,89
trans-.beta.-Ocimene	0,95	(1S,3S,5S)-1-Isopropyl-4-methylenebicyclo[3.1.0]hexan-3-yl acetate	0,88
Eucalyptol	0,94	.alpha.-Phellandrene	0,87
p-Cymene	0,93	Bicyclo[3.1.0]hex-2-ene, 2-methyl-5-(1-methylethyl)-	0,87
Lavandulol acetate	0,92	Bicyclo[3.1.0]hex-2-ene, 4-methyl-1-(1-methylethyl)-	0,84
(+)-Nopinone	0,91	Sabinene	0,75
Benzene, 1-methyl-3-(1-methylethenyl)-	0,91	alpha-Bergamotene	0,67
Bornyl acetate	0,88	3-Hexen-1-ol, acetate, (E)-	0,67
endo-Borneol	0,88	Methyleugenol	0,51
2(5H)-Furanone, 5,5-dimethyl-	0,86	.gamma.-Terpinene	0,39
Caryophyllene	0,81	p-Cymene	0,15
o-Cymene	0,79	Decanal	0,11
Linalool oxide	0,64	.beta.-Pinene	0,08
Nerol acetate	0,64	beta-Thujone	0,08
.gamma.-Terpinene	0,51	alpha-Terpinene	0,08
Linalool	0,51	o-Xylene	0,07
Linalyl acetate (lavande)	0,51	Ethylbenzene	0,07

Annexe III.B : Tableaux récapitulatifs des 20 composés contribuant le plus aux axes 3, 4.
Les composés spécifiques à menthe poivrée sont représentés en vert foncé, ceux de l'absinthe en vert clair, ceux de la tanaïse en orange et ceux du fenouil en vert.

Dimension 3		Dimension 4	
COV	Contribution	COV	Contribution
(±)-Pulegone	0,92	.beta.-Pinene	0,96
Levomenthol	0,92	beta-Thujone	0,95
l-Menthone	0,92	alpha-Thujene	0,93
Menthofuran	0,92	Ethylbenzene	0,92
Acetophenone	0,91	o-Xylene	0,92
beta-Elemene	0,91	alpha-Terpinene	0,91
Isomenthol acetate	0,91	alpha-Pinene	0,77
Neomenthol acetate	0,9	Camphor	0,72
Menthol, (±)-	0,83	Bicyclo[3.1.0]hexan-2-ol, 2-methyl-5-(1-methylethyl)-, (1.alpha.,2.alpha.,5.alpha.)-	0,67
p-Menthan-3-one, cis-	0,36	.gamma.-Terpinene	0,4
.beta.-Phellandrene	0,31	Sabinene	0,18
Bicyclo[3.1.0]hexan-3-one, 4-methyl-1-(1-methylethyl)-	0,3	Fenchyl acetate	0,18
1,3-Cyclohexadiene, 1-methyl-4-(1-methylethyl)-	0,3	Limonene	0,18
trans-.alpha.-Bergamotene	0,3	Fenchone (fenouil)	0,15
(1S,3S,5S)-1-Isopropyl-4-methylenebicyclo[3.1.0]hexan-3-yl acetate	0,29	Aromandendrene	0,14
.alpha.-Phellandrene	0,29	Terpinolene	0,12
Bicyclo[3.1.0]hex-2-ene, 2-methyl-5-(1-methylethyl)-	0,29	3-Hexen-1-ol, acetate, (Z)-	0,08
Bicyclo[3.1.0]hex-2-ene, 4-methyl-1-(1-methylethyl)-	0,28	Anethole	0,08
Sabinene	0,28	Neo-allo-ocimene	0,07
alpha-Bergamotene	0,22	Camphene	0,06