

03 septembre 2026

Barry Flore

Rapport de stage pour obtention du diplôme d'ingénieur agronome de l'AgroToulouse, spécialisation Agro BioSciences Végétales.

Étude des mécanismes bioprotecteurs mis en œuvre par une plante de service et des champignons mycorhiziens à arbuscules dans le cadre de la gestion d'un ravageur de cultures maraîchères (*Myzus persicae*).

Tuteur-trices Agro Toulouse : Ollivier Mélodie, Pauly Nicolas



Sous la responsabilité de :

Célia HEROGUEZ - Hélène GAUTIER - Caroline DJIAN-CAPORALINO

Structure d'accueil :

Institut National de Recherche pour l'Agriculture,
l'Alimentation et l'Environnement.
UR 1115 PSH
Domaine Saint Paul, site Agroparc.
228 Route de l'aérodrome
CS 40509
84914 AVIGNON CEDEX 9

¹ Ce travail a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du **programme d'Investissements d'avenir** portant la référence **ANR-20-PCPA-0003** », du financement du GIS PIClég »

Remerciements

Tout d'abord je remercie le GIS PIClég qui a financé ce stage et m'a donc permis de faire ce stage. Ensuite, je remercie l'AgroToulouse qui m'a donné l'opportunité de réaliser un stage de fin d'étude pour découvrir un nouvel environnement de travail et m'inspirer sur mon futur projet de recherche.

Je remercie aussi tout particulièrement mes tutrices de stage Célia Heroguez, Hélène Gautier et Caroline Djian-Caporalino qui ont tout fait pour m'intégrer agréablement dans le projet doctoral de Célia. Je vous remercie notamment de m'avoir poussée à viser la clarté et la rigueur et d'avoir passé autant de temps à relire mon rapport pour qu'il gagne en légèreté. Mes tuteur.ices d'école Mélodie Ollivier et Nicolas Pauly, vous en serons, je pense, très reconnaissant.e.s. Je tiens d'ailleurs aussi à remercier Mélodie Ollivier qui m'a donné de bons conseils sur la gestion de mon temps pour ce stage et qui a aussi été une très bonne enseignante durant les 6 mois de spé et d'où je tiens une partie de mes connaissances pour ce rapport. Merci aussi à Nicolas Pauly de s'être proposé en second correcteur pour ce rapport et qui appréciera je l'espère l'aspect symbiose que j'ai adoré étudier en cours et lors de ce stage à travers de jolies lames au microscope ou dans des articles très intéressants.

Je remercie aussi le personnel des laboratoires de chimie Guy Costagliola, Céline Kim, Patricia Laugier et Doriane Dumont qui ont aussi pris du temps à m'expliquer le fonctionnement de différents instruments et qui se sont impliqués dans la réalisation des expérimentations du stage malgré les caprices des différentes machines (le GC-1 se fait vieux et la réparation du QTOF a duré plus de temps que prévu). Merci aussi à Jérôme Olivares de m'avoir accueillie sur l'autre site de l'INRAE et qui m'a accompagnée du développement de protocole jusqu'à la compréhension des mails de BMKGene, le tout avec une réactivité hors pair lorsque je lui envoyais des mails désespérés.

Merci à Enzo Carbonnel et Guillaume Garcia de l'UE expérimentale pour leur bonne humeur et leur grand sourire ainsi que d'avoir pris soin de nos plantes dans la serre 6 en s'occupant notamment de l'arrosage des plantes et du nettoyage des bécards. Merci à Kénia à l'insectarium de nous avoir appris la technique de production des cohortes de ses chers *Myzus* et d'avoir égayé notre bureau de si jolis dessins.

D'ailleurs je penserai souvent à ce bureau G030, notre beau "placard à stagiaire", ainsi qu'à ses habitant.e.s et voisins. Merci à Yanis pour tes blagues, PJ pour nous avoir forcé.e.s à manger à l'heure tous les midis, Mayeul pour nos débats sans fin, Ellaura pour ta bonne humeur, Pablo pour ton originalité et Camille d'avoir toujours été de bon conseil. Merci d'avoir rendu ce stage aussi agréable, je garde en tête tous nos souvenirs.

Merci aussi à toutes les autres personnes des unités PSH et Agroclim avec qui j'ai partagé repas et discussions.

Enfin, merci à mes collocs du Manoir Noémie et Mila d'avoir été là dans tous mes moments difficiles et de m'avoir réconfortée avec de bons repas, des discussions tardives ou simplement d'avoir été là.

Résumé

Avec l'urgence en agriculture de se tourner vers la protection agroécologique des cultures, il est devenu nécessaire de développer des stratégies de gestion des ravageurs de cultures qui soient durables et efficaces. Ainsi, cette étude porte sur la combinaison de 3 leviers agroécologiques que sont, le choix d'une variété plus ou moins résistante, l'association avec une plante de service, *Tagetes patula*, et de champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA) (*Rhizophagus irregularis*) sur la régulation de bioagresseurs du poivron (*Capsicum annuum*), avec comme cible principale le puceron vert du pêcher (*Myzus persicae*).

Dix modalités ont été testées en fonction de deux variétés de poivrons, de la présence de CMA, et de plantes de service et ont fait l'office d'un suivi régulier de sorte à estimer la colonisation mycorhizienne. Des captations de COV à plusieurs temps de l'expérience, des mesures de biomasses ainsi que des tests de choix sur les pucerons ont été réalisés. Un effet des CMA sur l'émission des COV ainsi qu'un effet de répulsion de la combinaison de leviers agroécologiques sur les pucerons ont été identifiés.

Abstract

In view of the pressing necessity within the agricultural sector to transition towards agroecological crop protection, there is an imperative to formulate sustainable and efficacious crop pest management strategies. The present study focuses on the combination of three agroecological approaches : the selection of a variety with varying levels of resistance, intercropping with a companion plant, *Tagetes patula*, and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) (*Rhizophagus irregularis*) on the control of pests of bell peppers (*Capsicum annuum*), with the peach aphid (*Myzus persicae*) as the primary target.

A total of ten treatment combinations were evaluated, with the combinations based on two pepper varieties, the presence of AMF, and companion plants. The combinations were monitored regularly in order to assess mycorrhizal colonization. The experiment involved the collection of VOC samples at various stages, the measurement of biomass, and the execution of aphid choice tests. The present study identified an effect of AMF on VOC emissions, as well as a repellent effect of the combination of agroecological measures on aphids.

Table des matières

Partie I	
Etat de l'art :	
I. Présentation de deux ravageurs de cultures maraîchères aux conséquences néfastes dans la région Provence-Alpes-Côtes d'Azur (PACA)	1
I.1 Présentation du puceron vert du pêcher <i>Myzus persicae</i>	1
I.2 Présentation du nématode à galles <i>Meloidogyne incognita</i>	2
I.3 Impacts économiques et dégâts causés sur le poivron en région PACA	3
II. Vers un changement de paradigme pour une diminution des pesticides	5
II.1 L'échec des plans Ecophyto	5
II.2 Changement de paradigme vers la protection intégrée des cultures	5
III. Caractéristiques et modes d'actions des composés organiques volatils végétaux.....	6
III.1 Les COV végétaux	6
III.2 Le rôle des COV dans la défense des plantes.....	7
IV. Etude d'une combinaison de leviers agro-écologiques dans la gestion de ravageurs de culture maraîchères	8
IV.1 La résistance du poivron aux nématodes à galles	8
IV.2 Les CMA (champignon mycorhizien à arbuscules), agissant comme SdP (stimulateur de défense des plantes)	9
IV.3 L'utilisation de PdS (plante de service)	10
IV.4 Schéma général du contexte du stage	11
V. Objectifs du stage et problématique	11
Partie II	
Matériel et Méthode :	
I. Matériel biologique	12
I.1 <i>Capsicum annuum</i> , le poivron sensible ou résistant.....	12
I.2 <i>Tagetes patula</i> , la plante de services	12
I.3 <i>Rhizophagus irregularis</i> , le champignon mycorhizien arbusculaire à action stimulatrice des défenses des plantes.....	12
I.4 <i>Myzus persicae</i> , le bioagresseur aérien	12
II. Expérimentation 1 : Modification du profil chimique (émissions, métabolisme, transcriptomique) de la tagète et du poivron dans différentes combinaisons culturales.....	12
II.1 Mise en place et organisation de l'expérimentation 1	12
II.2 Mesures de COV	16
II.3 Mesures physiologiques au cours et à la fin de l'expérimentation	19
II.4 Mesures complémentaires	21
III. Tests comportementaux sur <i>Myzus persicae</i>	22

III.1 Matériel biologique	22
III.2 Le protocole des tests comportementaux	22
III.3 Analyse statistique	23
Partie III	
Résultats :	
I. Effet de différents leviers agro-écologiques sur la biomasse des plantes	25
I.1 Effet de la variété sur la biomasse des poivrons	25
I.2 Effet du levier agro-écologique mycorhization sur la biomasse des plantes	25
I.3 Effet de la mise en co-culture avec une PdS sur la biomasse des plantes de la co-culture	25
II. Effet de différents leviers agro-écologique sur le volatilome des plantes	26
II.1 Effet de la variété sur le volatilome des poivrons	26
II.2 Effet du levier agro-écologique mycorhization sur le volatilome des plantes	26
II.3 Effet de la mise en co-culture avec une PdS sur le volatilome des plantes de la co-culture	27
II.4 Effet de la combinaison de 3 leviers agro-écologiques sur le volatilome des plantes	27
III. Effet de différents leviers agro-écologiques sur le comportement des pucerons	28
III.1 Effet de la variété de poivrons sur le comportement des pucerons	28
III.2 Effet de la mise en co-culture avec une PdS sur le comportement des pucerons ..	28
III.3 Effet de la combinaison de 3 leviers agro-écologiques sur le comportement des pucerons	28
Partie IV	
Discussion et conclusion :	
I. Retour sur les résultats	29
I.1. Objectif 1 : La modification des COV de la tagète lors de la combinaison des leviers	29
I.2 Objectif 2 : Les conséquences des émissions de tagètes sur le poivron	30
I.3 Objectif 3 : L'effet des CMA sur le poivron	30
I.4 Objectif 4 : Les conséquences de la combinaison de leviers sur les pucerons	30
II. Perspectives	
Partie V	
Enrichissement personnel :	
Partie VI	
Bibliographie :	
Partie VII	
Annexes :	

Table des Illustrations :

Figure 1 : Photos de *Myzus persicae*

Figure 2 : Cycle biologique annuel de *Myzus persicae*

Figure 3 : Photo au microscope d'une larve de second stade (J2) de *Meloidogyne incognita*

Figure 4 : Cycle de vie du nématode à galles *M. incognita*

Figure 5 : Classe des COV émis par les plantes

Figure 6 : Décomposition des différents types de terpènes

Figure 7 : Principaux composants trouvés dans les huiles essentielles des Tagètes

Figure 8 : Photo de la colonisation d'une racine de tagète par *R. irregularis*

Figure 9 : Photo d'un oeillet d'Inde (*Tagetes patula*)

Figure 10 : Schéma de la combinaison de leviers dans la lutte biologique contre deux bioagresseurs du poivron

Figure 11 : Plan expérimental des compartiments 3 et 4

Figure 12 : Photos de la stimulation de la pousse racinaire par le bas

Figure 13 : Photos des plans expérimentaux dans les deux compartiments de la serre

Figure 14 : Retroplanning des mesures de l'expérimentation 1

Figure 15 : Photo du dispositif de captation des plantes de l'expérimentation 1

Figure 16 : Photo d'extractions liquides de COV

Tableau 1 : Tableau des modalités prélevées pour chaque mesure de l'expérimentation 1

Figure 17 : Photographie présentant le GC-MS1

Figure 18 : Photographie présentant le GC-MS3

Figure 19 : Interfaces des logiciels d'identification de COV

Figure 20 : Schéma du suivi des étapes de pesées pour les plantes dont on prélève des échantillons

Figure 21 : Schéma du prélèvement des exsudats racinaires

Figure 22 : Photos illustrant les étapes pour extraire l'ARN depuis les feuilles et racines de poivrons

Figure 23 : Photo du dépôt de larves de pucerons âgées de 24h sur un plan sain de poivron

Figure 24 : Schéma du déroulement des actions pour obtenir des pucerons adultes de 8 jours au moment des tests de choix

Figure 25 : Schéma d'une cage lors d'un test de choix

Figure 26 : Photo de l'enceinte climatique dans laquelle les 12 tests sont réalisées en parallèle

Figure 27 : Bar-plot empilé de la masse fraîche moyenne des plantes du compartiment C4

Figure 28 : Bar-plot empilé de la masse fraîche moyenne des plantes du compartiment C3

Figure 29 : Diagramme des VIP-scores des modalités

Figure 30 : Box-plot des COV dont l'abondance est modifiée avec l'ajout de leviers agroécologiques

Figure 31 : Graphique de la proportion estimée de pucerons à 30 min, 4h et 22h

Partie I

Etat de l'art :

I. Présentation de deux ravageurs de cultures maraîchères aux conséquences néfastes dans la région Provence-Alpes-Côtes d'Azur (PACA)

I.1 Présentation du puceron vert du pêcher *Myzus persicae*

I.1.1 Biologie et cycle de vie de *Myzus persicae*

Myzus persicae est un insecte hémiptère appartenant à la famille des Aphididae. Il est généralement de couleur verte et mesure de 1 à 4 mm de long (*Figure 1a*). Comme les autres hémiptères, il possède des yeux composés, une paire d'antennes et un rostre, qui lui permettent à la fois d'acquérir des informations visuelles et olfactives sur son environnement et de se nourrir de la sève des plantes.

En général, *M. persicae* a une durée de vie moyenne de 20 à 30 jours et son cycle biologique annuel comporte une génération sexuée et jusqu'à 20 générations asexuées par an dites "télescopiques" (les nouvelles nées peuvent déjà être gravides) (Turpeau et al., 2009). C'est un cycle hétérométabole, c'est-à-dire sans stade larvaire radicalement différent de l'adulte qui comprend trois principaux stades (*Figure 2*) : un stade œuf qui permet à l'espèce de survivre en diapause aux conditions défavorables de l'hiver. Un stade larve après éclosion ou nymphe (pour les individus issus de parthénogenèse) de 0 à 8-10 jours et un stade adulte (à partir de 8-10 jours) qui se différencie de la larve ou de la nymphe par une plus grande taille et une capacité à se reproduire. La reproduction est sexuée lorsque les individus sexupares choisissent les plantes hôtes primaires sur lesquelles éclore leurs œufs après l'hiver. La reproduction se fait par parthénogenèse lorsqu'au printemps, ces œufs devenus femelles fondatrices, produisent des clones en série (entre 40 et 100 larves par individu) ce qui permet de coloniser le milieu de manière rapide (Blancard et al., 2026). Enfin, en été, lorsque les conditions sont moins favorables à la colonie (hôte moins vigoureux, surpopulation), des individus ailés se développent pour permettre la dispersion de la colonie sur les plantes hôtes secondaires (Turpeau et al., 2009).

I.1.2 Spectre d'hôtes et dégâts

M. persicae possède aussi un large spectre d'hôtes, avec près d'une cinquantaine de familles botaniques pouvant être colonisées. Cette caractéristique généraliste lui permet de s'adapter facilement à des environnements variés (Turpeau et al., 2009).

Il se nourrit en prélevant la sève élaborée directement dans le phloème grâce à son rostre (Emden & Harrington, 2017) et la colonisation de la plante est facilitée par son comportement grégaire (*Figure 1b*). En effet, en piquant simultanément la plante, le groupe manipule les flux de sève à son avantage (Giordanengo et al., 2023). Ainsi, la présence préalable de pucerons peut modifier les caractéristiques physico-chimiques de la plante et influencer le comportement et les performances des individus colonisant ultérieurement cette plante. Par exemple, chez le chou chinois, *Brassica pekinensis*, Cao et al., 2016 ont montré que la population avait augmenté de 110% lorsque la plante avait été pré-infestée comparé à une plante non infestée.

Ensuite, sur les plantes, les dégâts directs causés par *M. persicae* résultent principalement des nombreuses piqûres réalisées lors de la prise alimentaire et des effets des sécrétions salivaires injectées dans les tissus végétaux. En effet, la salive des pucerons contient différents composés phytotoxiques pouvant modifier les réponses physiologiques et défensives de la plante (Giordanengo et al., 2023). Les symptômes se traduisent par l'enroulement et la déformation, des feuilles qui limitent l'activité photosynthétique, la dépigmentation, l'apparition de taches nécrotiques.

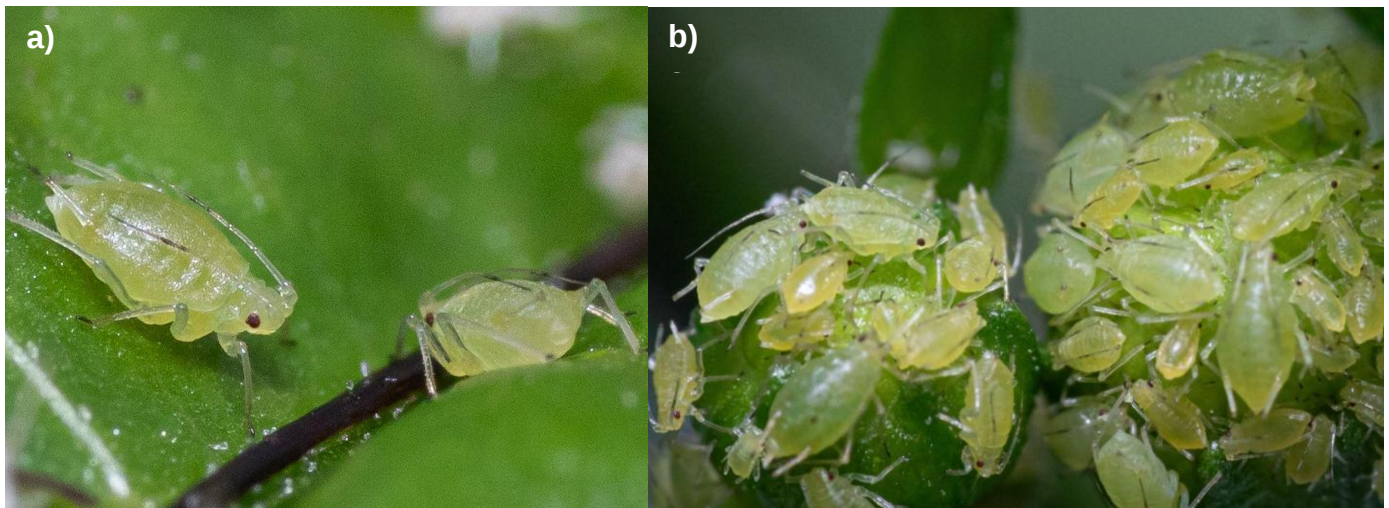


Figure 1 : Photos de *Myzus persicae*, **a)** Photo macro de deux individus sur une feuille, **b)** Photo illustrant le comportement grégaire de *M. persicae* sur des bourgeons axillaires de poivron (Poulin S., 2024)

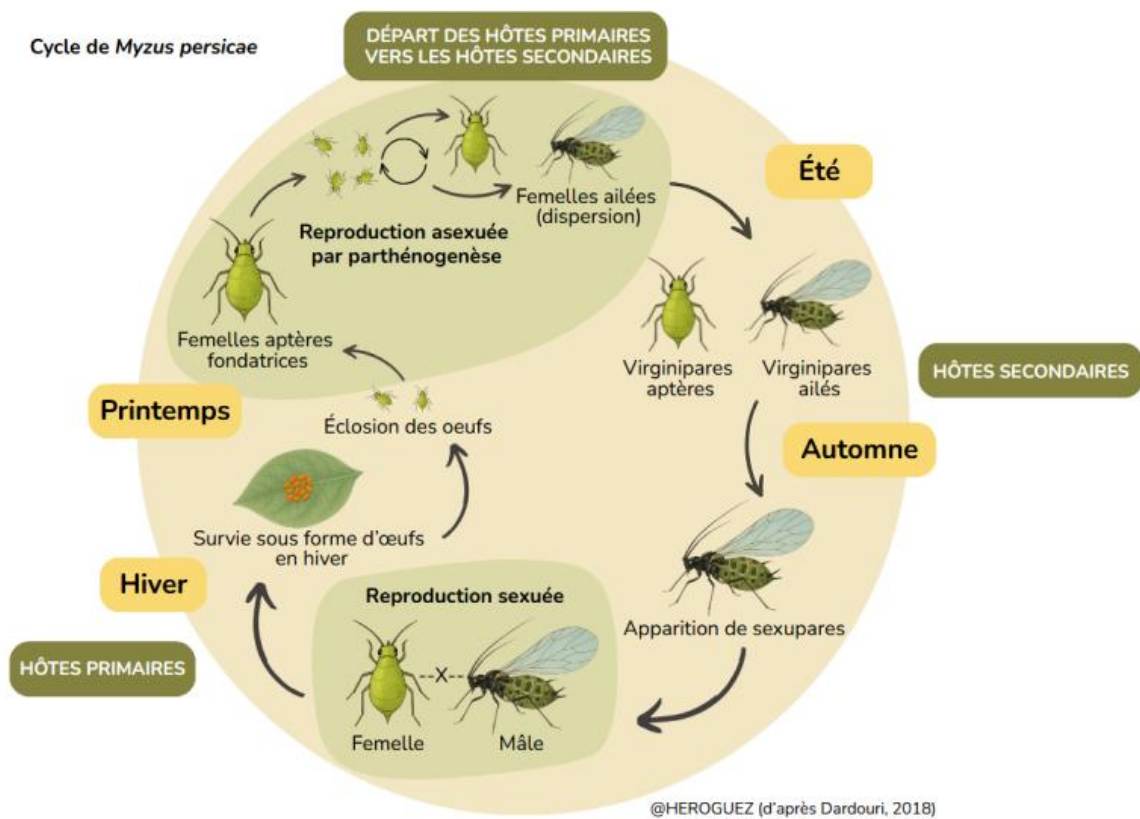


Figure 2 : Cycle biologique annuel de *Myzus persicae* (Heroguez, 2025)

La croissance de la plante peut être significativement freinée et le développement des bourgeons floraux affecté, entraînant une mauvaise fructification (Blancard et al., 2026).

M. persicae occasionne également des dégâts indirects particulièrement importants aux plantes en raison de sa capacité à transmettre une centaine de phytovirus. Ces derniers, pouvant provoquer des baisses de rendements bien supérieures à celles directement imputables à l'alimentation des pucerons. Par exemple, le virus de la jaunisse nanisante transmis par *M. persicae* peut provoquer jusqu'à 85% de perte pour les orges infectés (Turpeau et al., 2024). De plus, lors de leur alimentation, ils sécrètent un miellat sur les feuilles qui favorise le développement des champignons saprophytes responsables de la fumagine. Les moisissures noires causées par ces champignons inhibent l'activité photosynthétique des feuilles et rendent les plantes impropres à la commercialisation (Dedryver et al., 2010; Sharma et al., 2022).

Toutes ces caractéristiques contribuent à faire de *M. persicae*, l'espèce avec le meilleur succès reproducteur et évolutif des Aphididae. Elle est ainsi présente dans de nombreuses régions du monde (Bragard et al., 2021) ce qui en fait l'une des espèces aux conséquences les plus néfastes pour l'agriculture à l'échelle mondiale (Sharma et al., 2022).

1.1.3 Processus de sélection de la plante hôte

Durant leur recherche d'une plante-hôte, les individus ailés virginipares ou sexupares se laissent majoritairement porter passivement par le vent, à cause de leur faible taille et de leur capacité de vol limitée. L'atterrissage peut être aléatoire sur n'importe quelle plante, surtout par vent fort (Storer et al., 1999). Une fois à proximité d'une plante, les pucerons mettent en œuvre différents mécanismes sensoriels leur permettant d'évaluer sa qualité en tant que plante hôte. Cette sélection repose sur la perception de signaux visuels, physiques et chimiques tels que la forme et la couleur des organes végétaux, la texture de la feuille et la composition chimique de la plante (Han et al., 2021).

Lorsque sa perception visuelle est limitée, par exemple à cause d'une couverture végétale dense, il peut avoir recours à d'autres systèmes sensoriels tels que des récepteurs olfactifs situés sur ses antennes. C'est ainsi que les substances volatiles odorantes émises par les plantes jouent un rôle important dans leur localisation (Dardouri, 2018). Ces molécules volatiles peuvent agir comme des signaux sémiochimiques qui peuvent attirer, repousser ou même affecter le comportement des insectes en fonction de leur nature et de leur concentration (Jamin, 2022).

1.2 Présentation du nématode à galles *Meloidogyne incognita*

1.2.1 Caractéristiques et cycle de vie du nématode à galles

Les nématodes sont des vers ronds non segmentés et effilés, généralement microscopiques (Figure 3). Ils ont colonisé tous les milieux en se déplaçant dans des milieux très diversifiés : eaux douces, saumâtres et marines, ainsi que dans les sols. Certaines espèces sont libres, tandis que d'autres sont parasites d'animaux ou de végétaux.

Meloidogyne incognita est une espèce de nématodes à galles (NàG) appartenant au genre *Meloidogyne* qui comprend une centaine d'espèces décrites. Les NàG sont des parasites obligatoires des plantes et constituent des bioagresseurs telluriques majeurs de nombreuses cultures.



Figure 3 : Photo au microscope d'une larve de second stade (J2) de *Meloidogyne incognita*. Barre d'échelle = 30 μm . (Castagnone-Sereno et al., 2015)

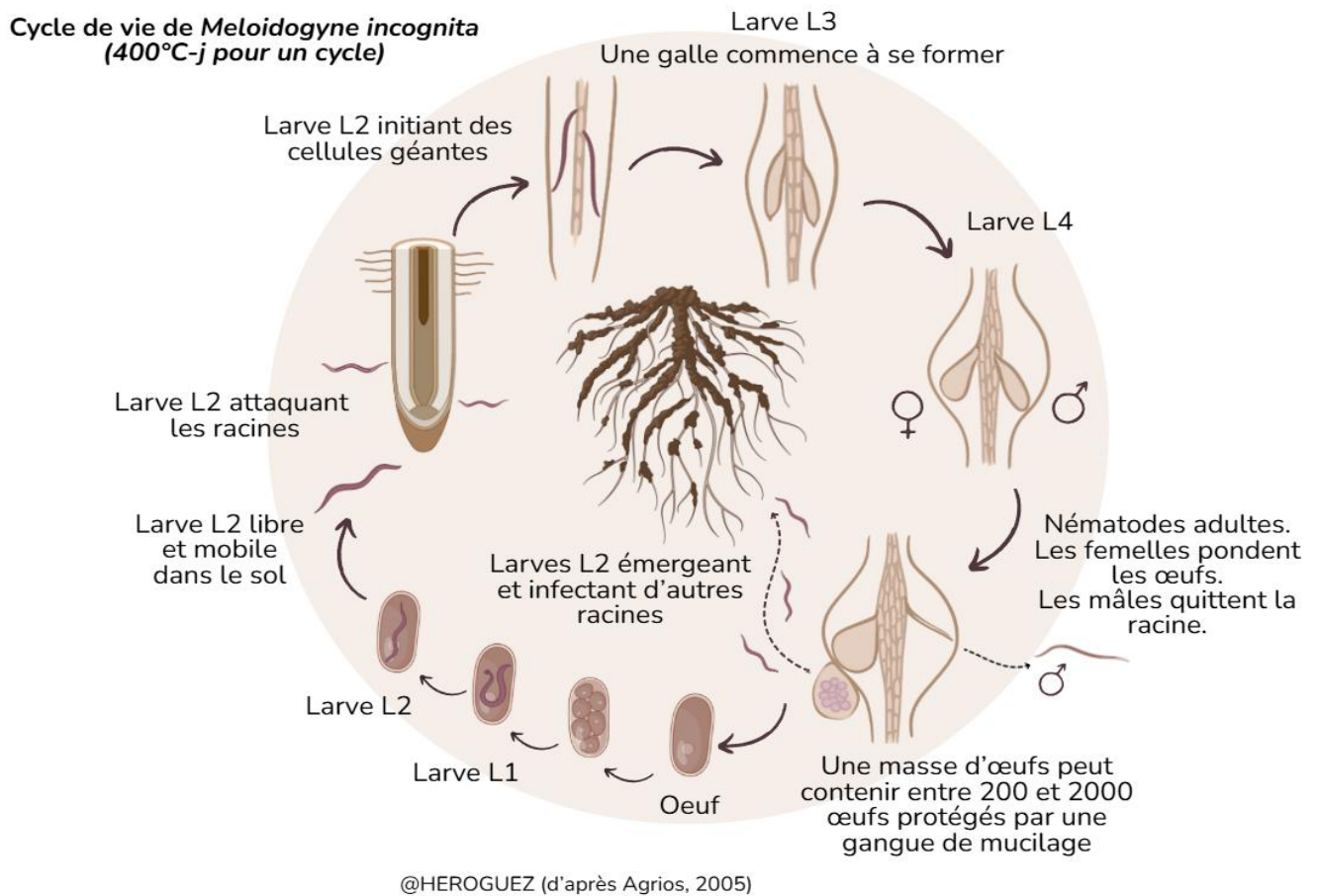


Figure 4 : Cycle de vie du nématode à galles *M. incognita* (C. Heroguez 2025)

Le cycle biologique de *M. incognita* débute par les œufs regroupés en masse et protégés par une gangue mucilagineuse produite par la femelle. Les œufs peuvent se maintenir plusieurs années dans le sol puis émerger lorsque les conditions sont plus favorables (sols chauds et humides) sous sa seule forme libre, le 2ème stade larvaire (J2) pouvant se déplacer dans le sol à la recherche d'une racine hôte (Blancard, 2023). Cette larve infestante pré-parasitaire se déplace par des mécanismes de chimiotactisme permettant de percevoir différents signaux chimiques émis par les racines.

Pour pénétrer les racines, la larve utilise son stylet (*Figure 3*) mais également des enzymes cellulolytiques et pectolytiques qui dégradent les parois.

Ensuite, elle migre entre les cellules jusqu'au cylindre central où elle initie la formation d'un site nourricier permanent constitué de cinq à sept cellules hypertrophiées et multinucléées, appelées « cellules géantes ». Le développement du site nourricier et l'hypertrophie des tissus racinaires conduisent à la formation de galles caractéristiques de l'infestation par *Meloidogyne* (*Figure 4*). Après plusieurs mues, les volumineuses femelles piriformes produisent de nombreux œufs, de 300 à 3000 selon les conditions environnementales (Blancard, 2023; Djian-Caporalino, 2009). Plusieurs générations peuvent se succéder au cours d'une même année et l'infestation peut alors atteindre 100 à 200 000 larves par kg de sol, s'étalant sur des profondeurs pouvant être supérieures à 30 cm, en fonction des caractéristiques du sol et du système de culture (De Guiran, 1983). Ces caractéristiques, associées à la large gamme d'hôtes de *M. incognita*, en font un bioagresseur tellurique particulièrement redoutable pour les cultures maraîchères.

1.2.2 Leur effets sur les plantes de l'agro écosystème

Grâce à sa polyphagie, *M. incognita* peut parasiter un très grand nombre d'espèces végétales cultivées et sauvages (jusqu'à 5 500 espèces répertoriées) au sein des nombreuses familles botaniques (Solanacées, Fabacées, Cucurbitacées, Asteraceae...) (Blancard, 2023).

Lors de l'infection, les interactions entre le nématode et les tissus racinaires, notamment sous l'action de molécules sécrétées par le nématode au niveau de son stylet, entraînent d'importantes modifications physiologiques et anatomiques des racines. Les systèmes racinaires infestés peuvent ainsi présenter des déformations et une réduction de leur capacité d'absorption de l'eau et des éléments minéraux (Sikandar et al., 2020). Ces dégâts entraînent une forte diminution de la croissance et biomasse aérienne, un flétrissement ainsi que des symptômes de carence ou de stress hydrique (Bernard et al., 2017; Chandra et al., 2010). Ces symptômes peuvent être difficiles à distinguer de ceux provoqués par d'autres facteurs, notamment les carences minérales ou les déficits hydriques. À l'échelle de la parcelle dans un champ infesté, on peut voir apparaître des zones de croissance réduite, appelées « tâches » ou « foyers » d'infestation. Le « seuil de nuisibilité » ou « limite de tolérance » de la plante a été reporté à environ 100 à 1000 individus par kg de sol en fonction de la sensibilité de la culture, des conditions environnementales et de la durée de la culture (Djian-Caporalino et al., 2019).

1.3 Impacts économiques et dégâts causés sur le poivron en région PACA

1.3.1 Impact en région PACA

Le poivron, *Capsicum annuum*, constitue la culture étudiée lors de ce stage. Il s'agit d'un légume très populaire sur les marchés avec une hausse significative de la demande des consommateurs depuis les années 2000 (Agreste, 2025). Or, la région PACA est le leader français en termes de production de fruits et de légumes et le deuxième producteur national de poivrons notamment grâce à son système maraîcher sous-abris et sous-serre, qui permet d'optimiser les conditions de production et d'allonger les périodes de culture (Agreste, 2025).

Le marché repose donc en grande partie sur ce système intensif fragile car dépendant presque uniquement de l'utilisation de pesticides. En effet, les rotations culturales intensives et peu diversifiées ainsi que le climat doux et humide exposent particulièrement le maraîchage provençal au développement de plusieurs bioagresseurs telluriques et aériens (Djian-Caporalino et al., 2019).

Concernant les NàG, *M. incognita* et *M. arenaria* figurent parmi les principales espèces des exploitations maraîchères en région PACA, touchant déjà plus de 30% des exploitations en 2009 (Djian-Caporalino, 2009), avec une augmentation notable des fermes mentionnant des attaques de ces bioagresseurs ces dernières années. Les infestations peuvent entraîner des pertes de rendement allant de 10 à 70%, selon la pression parasitaire, et la sensibilité de la culture et les conditions de production (Boulestreau, 2021). Ce développement très important sous abris en Provence est notamment favorisé par des conditions climatiques optimales (températures et humidité du sol souvent élevées), l'absence ou la faible diversification des rotations et la présence fréquente de cultures hôtes (salades, melons, concombres, courgettes, tomates, poivrons, etc...). De plus, le changement climatique, qui augmente les températures moyennes, accélère le développement des populations de nématodes qui peuvent désormais se multiplier en période hivernale. Ce phénomène augmente le risque de sélection de populations capables de contourner les résistances variétales (Collange et al., 2011).

De même pour les pucerons, le changement climatique leur est favorable avec une accélération de leur vitesse de multiplication lorsque les températures atteignent ou excèdent 22°C. Ainsi, en région PACA, comme dans certaines régions françaises, les pucerons vivent en dessous de leur optimum thermique et pourraient gagner 5 générations par an (Ahn et al., 2025).

1.3.2 Les moyens de lutte actuels contre ces deux bioagresseurs

En maraîchage, la gestion des populations de bioagresseurs constitue un enjeu majeur en raison de la diversité des organismes nuisibles et de la complexité des systèmes de culture (Messelink et al., 2014). C'est pourquoi depuis la seconde moitié du XXème siècle, la protection des cultures a largement reposé sur l'utilisation de produits phytosanitaires. Mais, en plus des effets néfastes de ces derniers sur la biodiversité, l'environnement et la santé humaine, des résistances aux pesticides ont été développées par *M. persicae* et *M. incognita*, remettant en question l'efficacité de ces produits (Bass et al., 2014; Matson et al., 1997).

Pour la lutte contre les NàG, les systèmes maraîchers intensifs sont toujours majoritairement "verrouillés" autour de l'utilisation de techniques de désinfection radicale des sols. Concernant les pucerons, l'utilisation répétée d'insecticides a déjà entraîné l'apparition de premiers individus résistants aux néonicotinoïdes qui sont des insecticides de dernière génération (Barrès & Mottet, 2017; Boulestreau, 2021).

Pourtant, différentes techniques agroécologiques existent (désinfection à la vapeur, solarisation, antagonistes naturels, biofumigation, intercultures, variétés résistantes, plantes de services, etc...), mais du fait de leur efficacité individuelle insuffisante, elles sont jugées comme trop "inefficaces" et sont finalement peu employées. Toutefois, leur combinaison au sein d'une stratégie de protection intégrée, adaptée aux caractéristiques du territoire et du système de culture, peut permettre d'améliorer leur efficacité et de réduire la dépendance aux produits phytosanitaires (Boulestreau, 2021; Djian-Caporalino et al., 2009).

II. Vers un changement de paradigme pour une diminution des pesticides

II.1 L'échec des plans Ecophyto

En réponse aux problématiques liées aux pesticides (évoquées en 1.3.2), en 2008, l'État français lance le premier plan Ecophyto (Ecophyto 2018). Ce plan fait suite à une directive européenne (directive 2009/128/CE) et a pour objectif de réduire de 50% en 10 ans l'usage des produits phytosanitaires ou pesticides en agriculture, ainsi que de retirer du marché certaines substances actives. Vingt ans plus tard, malgré la volonté symbolique du gouvernement de continuer de s'engager sur ce problème, notamment par la mise à jour du plan à trois reprises (Ecophyto 2, Ecophyto 2+ et Ecophyto 2030), les objectifs fixés en 2008 ne sont toujours pas atteints. Une tendance à la hausse de l'usage des produits phytosanitaires a même été identifiée. Entre 2011 et 2017, la quantité de substances actives vendues (QSA) a augmenté de 7%, et le nombre de doses unités (NODU), qui est l'indicateur officiel d'Ecophyto, a augmenté de 10% (Jacquet et al., 2022).

Cet échec est notamment dû à des verrous socio-techniques, qui ont été évoqués en 1.3.2 pour la région provençale, mais qui sont généralisables à l'ensemble de la France. En effet, les pesticides concernent tous les acteurs de la filière agricole. Agir uniquement sur les agriculteurs, par leur engagement dans les fermes du réseau DEPHY, première grande mesure phare d'Ecophyto 2018, et sur leurs conseillers, à travers la rédaction des bulletins de santé du végétal, 2ème grande mesure phare d'Ecophyto 2018, dans une logique de diffusion des solutions par les pairs, n'a pas suffi à enclencher un changement des pratiques agricoles. En effet, les stratégies visant à diminuer l'usage des pesticides ont souvent été jugées trop alternatives par la filière, en partie parce que les plans Ecophyto n'ont pris en compte que les aspects techniques, en négligeant les dimensions culturelles, cognitives, sociales ou territoriales (Guichard et al., 2017).

II.2 Changement de paradigme vers la protection intégrée des cultures

Afin de permettre une réelle diminution de l'usage des produits phytosanitaires, il est donc nécessaire de changer la logique même de la filière agricole, en amont comme en aval, et notamment de changer de paradigme concernant la lutte contre les bioagresseurs. C'est ce que propose la protection intégrée des cultures (PIC) qui s'insère dans une approche plus globale de protection agroécologique des cultures (PAEC). La PIC considère les bioagresseurs comme faisant partie de l'écosystème et donc comme pouvant être régulés. Le but n'est plus d'exterminer les populations de ravageurs, mais de maintenir leur niveau de population en dessous d'un seuil de nuisibilité économique pour l'agriculteur. Ce seuil correspond au passage des "dommages" aux "pertes" : les dégâts dus à l'activité d'un bioagresseur ne provoquent pas nécessairement une perte économique (Ollivier, 2026).

Dans la PIC, on cherche à développer dans l'espace et le temps, des stratégies de lutte basées sur le couplage de techniques agroécologiques déjà existantes ou innovantes dans une grande "traque aux innovations" (Boulestreau, 2021). Lors de ce stage, l'approche ascendante, ou "bottom up", de la PIC est particulièrement étudiée. Elle consiste à utiliser les caractéristiques de la plante hôte pour limiter le développement des ravageurs et leurs dégâts (Gurr et al., 2003).

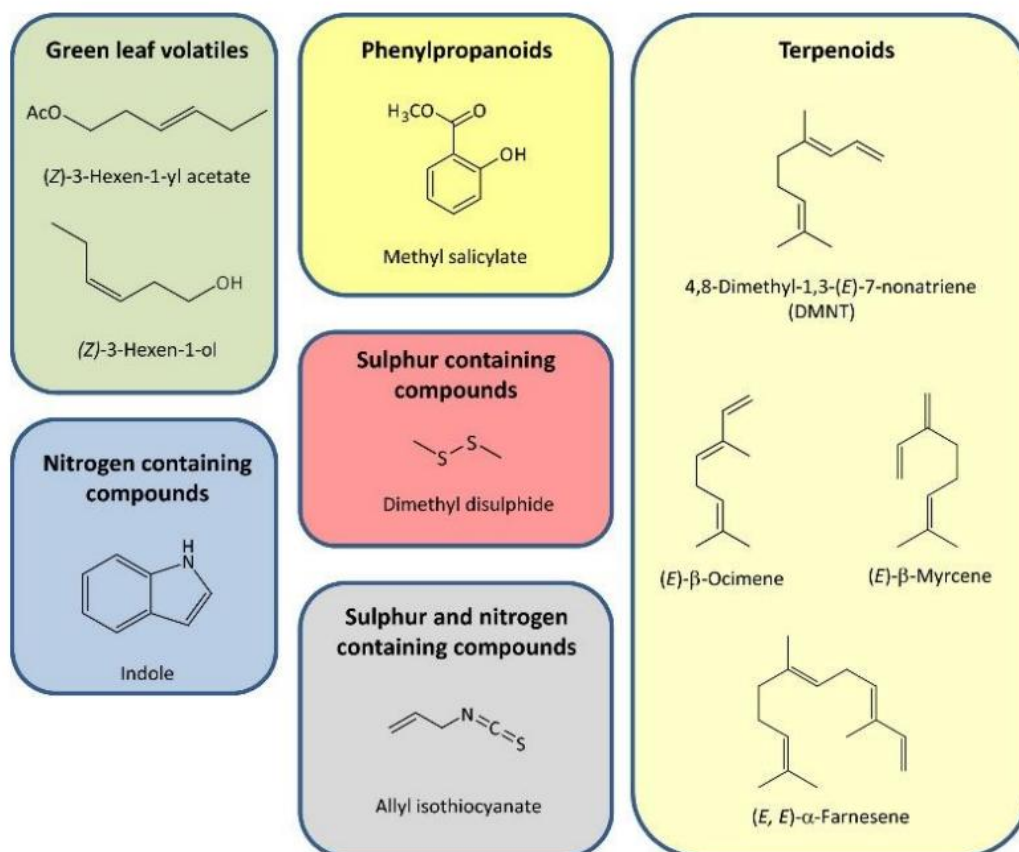


Figure 5 : Classe des COV émis par les plantes (Le Boulch, 2022)

II.3.1 Le projet CAP ZERO PHYTO

Le développement de stratégies de protection agroécologiques des cultures est au cœur même du projet CAP ZERO PHYTO (2021-2027). Ce projet est coordonné par Hélène Gautier, Directrice de recherche à l'INRAE d'Avignon, et résulte de l'association de plusieurs organismes de recherche, dont l'INRAE et le CTIFL. Il s'articule autour de cinq leviers agroécologiques : résistance génétique, plantes de services, solutions de biocontrôle avec une action SdP (stimulation des défenses des plantes), flashes d'UV-C et régulation azotée (PSH, 2025).

II.3.2 Insertion de mon stage dans un projet doctoral plus large de combinaison de leviers agro-écologiques

Durant ces six mois, j'ai rejoint le projet doctoral mené par Célia Heroguez, visant à élaborer une stratégie combinant trois leviers (résistance génétique, plante de services et solution de biocontrôle à action SdP) pour lutter principalement contre *M. incognita* et secondairement contre *M. persicae*, deux bioagresseurs des cultures maraîchères (poivron et tomate). Mon stage s'est alors focalisé sur la partie consacrée à la lutte biologique contre les pucerons, via l'étude des composés organiques volatils (COV) émis par les plantes étudiées.

Ce stage a été rendu possible grâce aux savoirs, savoir-faire et instruments de chimie analytique (GC-MS, HPLC, etc..) de l'unité PSH (Plantes et Systèmes de culture Horticoles), dont l'une des spécialités est l'étude des COV. En effet, cette unité a pour mission de contribuer, par des approches d'écophysiologie et d'agroécologie, à la mise au point de systèmes de cultures de fruits et légumes et de scénarios paysagers en zone méditerranéenne, qui allient qualité des produits récoltés et respect de l'environnement (PSH, 2025).

III. Caractéristiques et modes d'actions des COV (composés organiques volatils) végétaux

III.1 Les COV végétaux

III.1.1 Généralités sur les COV végétaux

Les composés organiques volatils sont des molécules se retrouvant facilement à l'état gazeux. Dans le contexte de ce stage, seuls les COV d'origine végétale, dont certains peuvent agir comme composés sémiochimiques, sont étudiés. Dans la littérature, 1 700 COV d'origine végétale sont décrits et représentent 75% des émissions totales de COV dans l'atmosphère, mais il en existe probablement encore davantage qui n'ont pas encore été décrits à ce jour (Guenther et al., 1995). Ces émissions représentent 1 % des métabolites secondaires produits par la plante, c'est-à-dire des molécules qui n'assurent pas directement sa nutrition et son développement. Les COV sont en général lipophiles ce qui leur confère un faible poids moléculaire, une bonne diffusion dans le milieu environnant et une capacité à traverser librement les membranes cellulaires. Ce sont en majorité des terpenoïdes (homo-, mono-, di- et sesquiterpenoïdes), c'est-à-dire des hydrocarbures à 5, 10, 15 ou 20 carbones (*Figure 5 et 6*), qui jouent un rôle primordial dans la diversité chimique des composés volatils végétaux (Jamin, 2022).

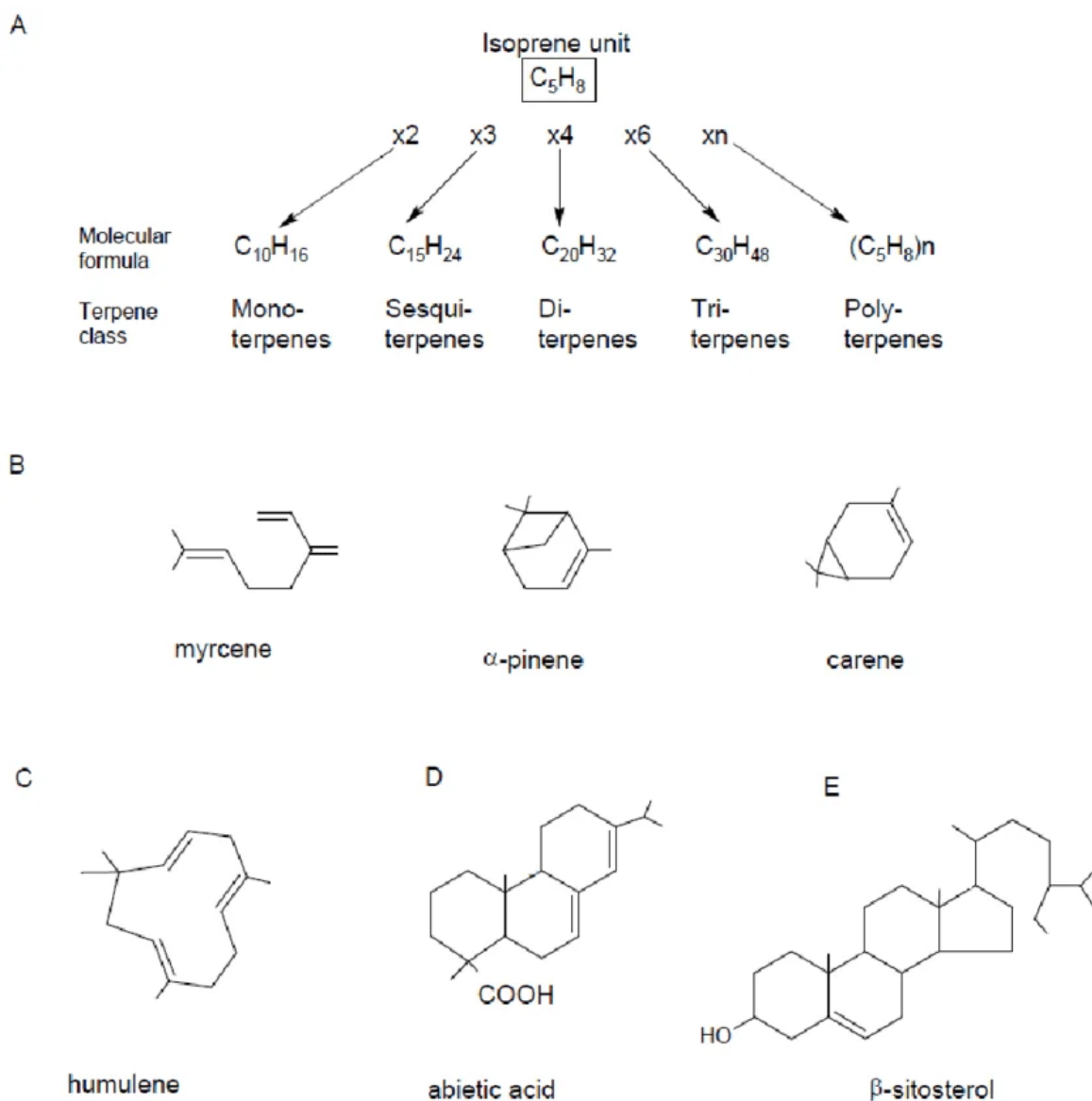


Figure 6 : Décomposition des différents types de terpènes ; **A)** Classification des terpènes **B)** exemple de monoterpènes **C)** exemples de sesquiterpènes, **D)** de diterpènes et **E)** de triterpènes (Adamczyk, 2016)

III.1.2 Mécanismes de libération des COV végétaux dans leur environnement

Les COV sont libérés de manière passive par diffusion à travers les membranes végétales ou émis en réponse à un stimulus dans l'atmosphère par les feuilles, les fleurs et les fruits, ou dans le sol par les racines. En général, les fleurs émettent la plus grande diversité de COV et les COV émis par les parties végétatives sont induits par des blessures causées par un stress mécanique, la phytophagie ou une infection microbienne (Jamin Ali, 2022).

Ces COV peuvent être stockés dans des structures particulières de la plante comme les trichomes (majoritairement des monoterpènes, sesquiterpènes et composés aromatiques), directement dans les jeunes feuilles (majoritairement des alcools à 6 carbones saturés ou insaturés, des aldéhydes ou des esters) ou dans les racines au niveau des cellules bordantes, sous forme d'exsudats racinaires aux propriétés fongicides ou bactéricides (majoritairement des terpénoïdes). Ces composés peuvent protéger la plante contre les attaques de pathogènes de manière basale ou être exsudés en réponse à un stress (Djian-Caporalino et al., 2020).

III.1.3 Influence de l'environnement sur la synthèse des COV

Enfin, les facteurs biotiques et abiotiques peuvent fortement influencer la synthèse des COV. Ainsi, les variations de température et de lumière peuvent avoir un effet sur l'activité enzymatique des isoprènes et des monoterpènes synthases, qui sont impliquées dans la synthèse des terpénoïdes. C'est en fait l'activité photosynthétique de la plante qui, dans un premier temps, va être impactée par un changement de température ou de lumière. L'activité de certaines voies métaboliques ainsi que la production d'ATP peuvent alors être affectées ce qui perturbe le déroulement de nombreuses réactions chimiques, dont la production des COV (Niinemets et al., 2004).

La sécheresse et le taux de salinité sont des facteurs de stress importants pour la plante ayant pour conséquence de limiter la production de COV (Possell & Loreto, 2013). De la même manière, la lumière et la température ont une influence sur la conductance stomatique de la plante et donc sur la photosynthèse (Loreto & Schnitzler, 2010). Le taux d'ozone (O_3) dans l'atmosphère peut également entraîner une variation de la production d'isoprènes et de monoterpènes. Ainsi, un taux élevé d' O_3 stimule l'émission de COV via l'augmentation de l'expression d'un ARNm impliqué dans la régulation de ces molécules (Loreto & Schnitzler, 2010).

Lorsque la plante se défend contre un bioagresseur, le profil chimique des COV qu'elle libère peut être modifié. Par exemple, lorsqu'un ravageur dépose ses œufs sur la feuille d'une plante, un bouquet spécifique de COV peut être émis, attirant les parasitoïdes des œufs (Maffei, 2010). De plus, selon Holopainen et Gershenzon (2010), les émissions de COV d'une plante ayant subi un stress mécanique peuvent être 2,5 fois supérieures à celles d'une plante intacte.

Enfin, le stade de développement de la plante et la saisonnalité influencent également l'émission de COV, tant d'un point de vue qualitatif que quantitatif. Par exemple, l'émission de certaines molécules comme l'isoprène devient particulièrement élevée durant la période estivale, lorsque les feuilles sont matures, alors que les jeunes feuilles ne possèdent pas l'enzyme nécessaire à la synthèse de cette molécule (Baghi, 2013).

III.2 Le rôle des COV dans la défense des plantes

Le caractère volatil des COV leur confère des propriétés intéressantes pour la communication entre les plantes et les autres organismes vivants, et leur permet notamment de jouer un rôle crucial dans la défense directe ou indirecte des plantes (Dicke & Baldwin, 2010).

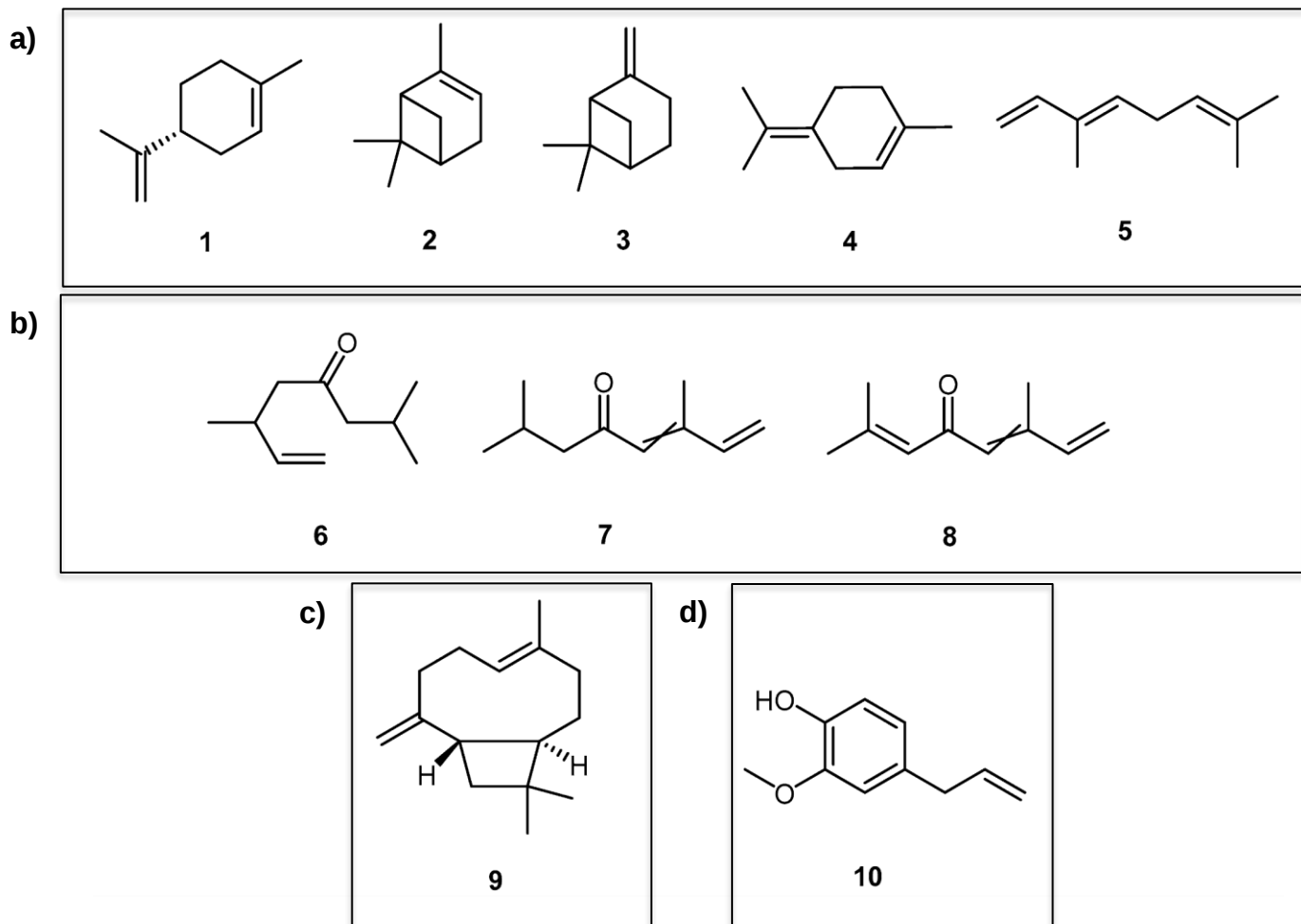


Figure 7 : Principaux composants trouvés dans les huiles essentielles des *Tagetes.spp* :

a) Monoterpènes : (1) limonène, (2) α -pinène, (3) β -pinène, (4) terpinolène, (5) (E)- β -ocimène

b) Monoterpènes acycliques : (6) dihydrotagétone, (7) tagétone (représentant de manière schématique les isomères (E)- et (Z)), (8) tagetenone (représentant de manière schématique les isomères (E)- et (Z)),

c) Sesquiterpènes : (9) β -caryophyllene,

d) Phénols : (10) eugenol. (Salehi et al., 2018)

III.2.1 Mécanismes de défenses basés sur les COV

Quatre catégories de COV peuvent avoir un effet particulier dans la défense des plantes :

- 1/ ceux qui dissuadent les nuisibles de s'alimenter, de s'approcher ou de pondre sur la plante émettrice, ayant ainsi un effet *bottom-up* sur la chaîne trophique (Ben Issa et al., 2016).
- 2/ ceux qui recrutent les ennemis naturels des cultures ayant un effet *top-down* sur la chaîne trophique et ;
- 3/ ceux qui alertent les plantes voisines d'un danger afin qu'elles puissent également se protéger de manière passive ;
- 4/ ceux qui sont émis par des plantes voisines saines et transforment le volatilome des plantes hôtes en un volatilome répulsif (Djian-Caporalino et al., 2020).

III.2.2 Mise en évidence de COV importants dans la défense des plantes

Parmi les COV majoritairement reconnus pour leurs activités insecticides, on trouve l'allo-ocimène, le *p*-cymène, le bisabolène, le β -caryophyllène, l'eucalyptol (1,8-cinéole), le limonène, le linalol, le β -ocimène et l' α -pinène ainsi que l'eugénol et l' α terpinéol qui ont des propriétés neurotoxiques (Figure 7) (Dardouri, 2018; Regnault-Roger & Vincent, 2011). Néanmoins, la fonction des COV peut varier en fonction de leurs combinaisons spécifiques : un composé qui est répulsif dans un certain contexte peut devenir neutre ou même attractif dans un autre, selon la présence d'autres composés susceptibles d'inhiber ou masquer son effet (Webster et al., 2010).

Il existe aussi des COV attractifs pour les ennemis naturels du puceron comme le β -farnésène (EBF). Cette molécule constitue un signal « d'alarme » du puceron qui lui permet de communiquer lorsqu'il subit une perturbation (Herrbach, 1985). Or, elle est reconnue par les prédateurs des pucerons pour localiser les colonies : elle joue donc un rôle de kairomone pour les insectes aphidiphages (coccinelles, syrphes, chrysopes) (Francis et al., 2004). Or l'EBF est aussi libéré au niveau des trichomes des plantes subissant une attaque. Ces plantes bénéficient alors d'une plus grande attractivité pour les ennemis naturels des pucerons (Pickett et al., 2003).

IV. Etude d'une combinaison de leviers agro-écologiques dans la gestion de ravageurs de culture maraîchères

Initialement ces leviers ont été choisis dans le cadre du projet doctoral de Célia Heroguez dont la cible principale est le NàG *M. incognita* et la cible secondaire est le puceron *M. persicae*. Dans ce stage, ces leviers sont étudiés au regard d'un potentiel effet bottom-up sur *M. persicae*.

IV.1 La résistance du poivron aux nématodes à galles

La résistance génétique est un premier moyen de lutte efficace contre les bioagresseurs et présente plusieurs avantages. Elle permet de réduire la dépendance aux pesticides de manière durable et ainsi de limiter leurs impacts sur l'environnement et la santé. De plus, il s'agit d'un levier facile à mettre en place dans l'agroécosystème car il dépend essentiellement du choix de la variété ou du porte-greffe cultivé.

Nous utiliserons donc une variété de poivron sensible et une variété résistante aux NàG. La résistance aux NàG se définit par une inhibition ou une diminution de la pénétration (résistance précoce) ou de la reproduction (résistance tardive) des nématodes dans les racines et se caractérise par une réaction d'hypersensibilité locale (Hajihassani et al., 2019).

Quelques gènes dominants (*N* et *Me(s)*) ont été identifiés dans des espèces cultivées et sauvages de poivrons et sont connus pour avoir des mécanismes de résistance indépendants contre plusieurs espèces de NàG. La résistance conférée par ces gènes repose sur le mécanisme de “gene-for-gene interaction” : l’hérédité de la capacité de résistance de l’hôte ainsi que la pathogénicité du parasite sont contrôlées par des paires de gènes correspondants. Ainsi, la plante hôte synthétise un produit R (résistance) issu de l’expression du gène de résistance, qui interagit avec le produit Avr (avirulence) issu de l’expression du gène d’avirulence du pathogène.

Aujourd’hui, parmi ces gènes de résistance, trois gènes principaux (*N*, *Me1* et *Me3*) sont efficaces contre plusieurs espèces de NàG, dont *M. incognita* (Djian-Caporalino et al., 2007; Hajihassani et al., 2019) et déjà utilisés dans les programmes de sélection. Pourtant, des populations de *M. incognita* contournant la résistance de lignées de poivrons contenant les gènes *Me3* et *N* ont déjà été rapportées (Castagnone-Sereno et al., 2015; Thies, 2011). Or, le nombre de variétés commerciales porteuses de gènes de résistance contre les nématodes à galles est très limité (Barbary et al., 2014). Il est donc important de protéger ces résistances génétiques. Un des moyens serait de les “pyramider” dans une même variété ou porte-greffe (Djian-Caporalino et al., 2014). Mais du fait de leur position dans un cluster de gènes de résistance de 28 cM sur le chromosome 9 du poivron (Djian-Caporalino et al., 2007), l’opération est rendue difficile même en utilisant des marqueurs moléculaires proches (Celik et al., 2016). Une autre méthode serait de diminuer la pression de sélection exercée sur ces gènes majeurs en combinant ce levier à d’autres méthodes de lutte (Djian-Caporalino et al., 2019).

Enfin, certains gènes ont des actions sur plusieurs bioagresseurs. C’est le cas du gène *Mi-1* de la tomate, qui contrôle non seulement la résistance à *M. incognita* mais aussi la résistance à certaines espèces de pucerons (Rossi et al., 1998). Or, des gènes homologues aux gènes *Mi* de la tomate sont présents sur le chromosome 6 de poivrons résistants (Celik et al., 2016). Lors de ce stage, il serait donc intéressant d’étudier l’effet des génotypes de poivrons résistants contre *M. incognita* sur *M. persicae*.

IV.2 Les CMA (champignon mycorhizien à arbuscules), agissant comme SdP (stimulateur de défense des plantes)

Les champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA) sont des Eumycètes appartenant à la classe des Gloméromycètes, qui forment exclusivement des symbioses endomycorhiziennes avec les racines des plantes (Figure 8). Ces endomycorhizes à arbuscules sont les plus répandues des mycorhizes et peuvent coloniser plus de 80% des plantes vasculaires terrestres (Selosse, 2017). On dit “endomycorhizes” car ces champignons pénètrent dans les cellules, et “à arbuscules” car la structure d’échange entre les deux partenaires ressemble à un petit arbuste (Trouvelot et al., 2021). Les CMA forment donc une relation mutualiste avec la plante, dans laquelle celle-ci bénéficie notamment du réseau mycélien pour étendre son système d’absorption et avoir un meilleur accès à l’eau et à certains nutriments, comme le phosphore (Liu et al., 2007). Le champignon, quant à lui, bénéficie des produits de la photosynthèse sous forme d’hexoses.

Dans des conditions environnementales riches en eau et en nutriments, la symbiose peut ne pas avoir lieu car, pour les deux partenaires, le coût de l’association peut être plus élevé que l’allocation des ressources à leur propre métabolisme. C’est pourquoi, dans un agroécosystème irrigué et fertilisé, ou soumis à des problématiques liées au sol (travail intense du sol, utilisation de pesticides réduisant la biodiversité microbienne), les mycorhizes peuvent se développer moins bien.

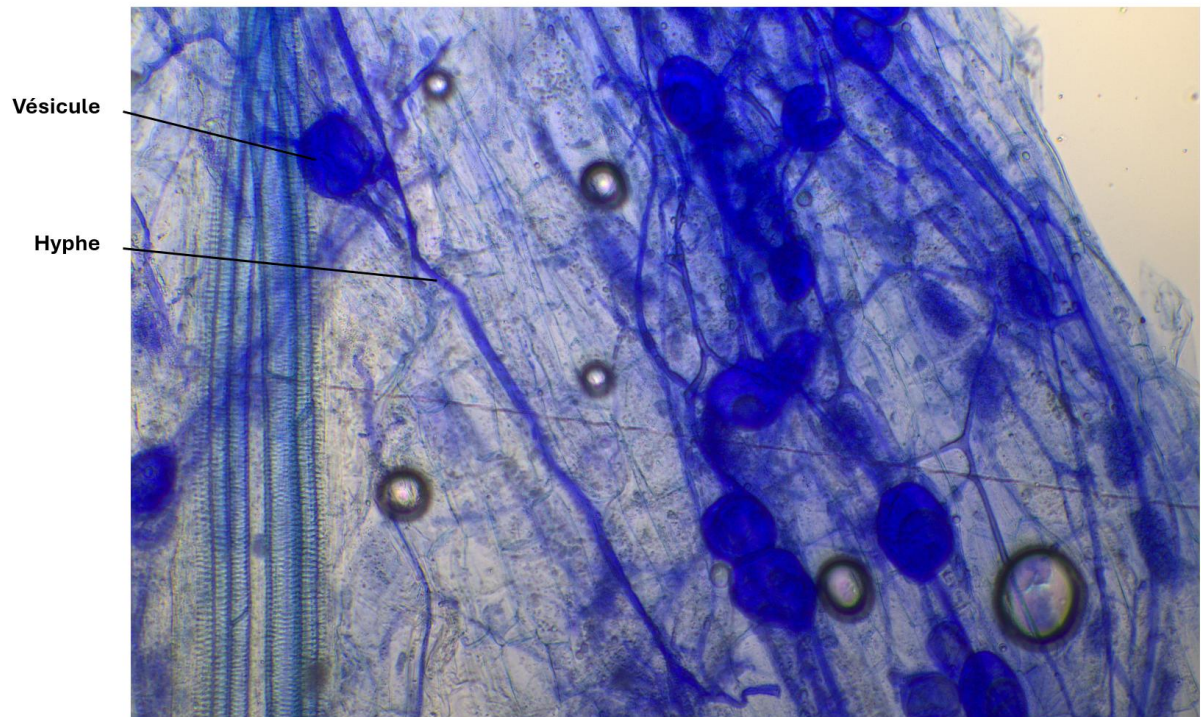


Figure 8 : Photo de la colonisation d'une racine de tagète par *R. irregularis* (Barry F., 2026)

Pourtant, le rendement de cultures mycorhizées peut augmenter de 10 à 40% par rapport à celui de cultures non mycorhizées (Tarigan et al., 2022). C'est pourquoi, les spores de CMA sont désormais commercialisées et apportées à la culture sous forme de "solution biostimulante". Ces produits sont intéressants mais les méthodes d'inoculation ne sont pas toujours simples à mettre en place et même si leurs effets biostimulants semblent aussi efficaces que ceux des souches indigènes propres aux agro-écosystèmes, les souches indigènes montrent de meilleurs résultats sur le biocontrôle de population de champignons pathogènes que les souches commercialisées (André et al., 2026). Par ailleurs, il est démontré que les CMA peuvent aussi avoir un rôle dans le biocontrôle ou la stimulation des défenses des plantes contre un ensemble de bioagresseurs, dont les NàG (Rodriguez-Heredia et al., 2020) et les pucerons (Selosse, 2017). C'est notamment le cas de *Rhizophagus irregularis*, de l'ordre des *Glomerales*, qui possède des propriétés de biocontrôle vis-à-vis de certains insectes (Tarigan et al., 2022).

IV.3 L'utilisation de PdS (plante de service)

D'après le dictionnaire d'agroécologie (Jouhet et al., 2022) et l'ouvrage récent sur les plantes de services (PdS) (Djian-Caporalino & Lavoie, 2024), les PdS sont un ensemble d'espèces végétales cultivées, ayant pour objectif d'améliorer des fonctions de l'agroécosystème, sans vocation à être récoltées ou pâturées. Elles sont très utilisées en PIC en tant que culture intermédiaire multi-services (CIMS) comme couvert végétal ou plante compagne associée dans le temps et l'espace à la culture principale.

Les tagètes aromatiques, qui font partie de la famille des *Asteracea*, sont des plantes compagnes multi-services (Djian-Caporalino & Lavoie, 2024). En effet, ce sont des plantes mycorhizotrophes, c'est-à-dire qu'elles attirent et favorisent l'installation des CMA autour de leurs racines et de celles des plantes voisines. Elles permettent donc à la culture principale de bénéficier des effets décrits en IV.2. Les tagètes émettent également des composés nématocides dans le sol et des COV insecticides dans l'air (Vasudevan et al., 1997).

La tagète utilisée lors de ce stage, *Tagetes patula*, semble être l'une des espèces de tagète les plus efficaces pour lutter contre les NàG, dont *M. incognita* (Piedra Buena et al., 2008). En effet, les racines de tagètes libèrent dans le sol des composés nématocides, notamment l' α -terthienyl, qui inhibent le développement des œufs et des larves de nématodes à galles, induisant un état de diapause et bloquant la poursuite de l'infection (Wu et al., 2020). De plus, ce sont des plantes non-hôtes des NàG, limitant la pénétration des larves dans les racines, qui ne peuvent ensuite s'y développer (Njekete et al., 2025). Cette capacité, combinée à leurs propriétés nématocides, en font de potentielles plantes assainissantes contre ces ravageurs.

Ensuite, dans le contexte de la lutte contre *M. persicae*, il est largement démontré que les COV de *T. minuta* appartiennent au cas 1/ décrit en III-2 avec une rapide diminution de la fécondité des pucerons lorsqu'ils sont exposés aux COV de la tagète (notamment le limonène, (Z)-ocimène, and β -caryophyllène). Par ailleurs, l'émission de β -ocimène et de (E)- β -ocimène peut induire un changement dans les mécanismes de défense de la plante co-cultivée (Kang et al., 2018). En effet, en tant que PdS, la tagète peut également influencer l'expression de gènes de défenses chez la plante co-cultivée (Stupar et al., 2021).

Néanmoins, l'effet des COV de *T. patula* sur *M. persicae* est moins clair. En effet, Dardouri (2018), a démontré que seuls, les COV de *T. patula* (la plante compagne) ou *Capsicum annuum* (la culture principale) n'ont pas d'effets d'attraction ou de répulsion sur *M. persicae*. En revanche, lorsque les 2 plantes sont cultivées en mélange, les COV émis par *T. patula* rendent la co-culture répulsive pour *M. persicae*, jusqu'à perturber le comportement alimentaire du puceron si celui-ci reste sur la plante. Ainsi, Dardouri (2018) propose deux mécanismes qui pourraient alors entrer en jeu : 1/ le cocktail de COV de la combinaison a un effet répulsif ;



Figure 9 : Photo d'un oeillet d'Inde (*Tagetes patula*) (Barry F., 2026)

2/ *T. patula* change le volatilome de *C. annuum*, faisant passer celui-ci d'un profil neutre à un profil répulsif. Il s'agirait donc du cas 4/ décrit en III-2 où le poivron deviendrait répulsif à la suite d'une exposition à *T. patula*.

Enfin, malgré tous ces services agronomiques, les tagètes peuvent attirer d'autres bioagresseurs comme les limaces et les acariens ou entrer en compétition avec la plante cultivée (Djian-Caporalino et al., 2020).

IV.4 Schéma général du contexte du stage

Dans le cadre de la conception d'un système de maraîchage agroécologique, de nombreux travaux ont montré l'effet bénéfique de la combinaison de leviers associant résistance variétale et autres méthodes de lutte, pour diminuer la quantité d'agents pathogènes et accroître ainsi la durabilité des gènes de résistance contre les NàG (Djian-Caporalino et al., 2019). Par exemple, l'association entre des poivrons et des tagètes (*T. patula*) mycorhizées en conditions semi-contrôlées en serre, peut permettre une réduction de 72% de l'infection par les NàG par rapport à des poivrons seuls (André, 2024).

Tous les avantages et inconvénients de la combinaison de leviers présentée lors de ce stage sont résumés dans la *Figure 10*.

V. Objectifs du stage et problématique

Ainsi, ce stage centré sur l'étude des COV a permis d'étudier les effets individuels et combinés de trois leviers agroécologiques : 1/ la résistance génétique du poivron aux NàG, 2/ l'utilisation d'une PdS, 3/ une solution de biocontrôle (CMA) à action SdP, dans le cadre de la protection intégrée du poivron contre le puceron vert du pêcher *Myzus persicae*, en premier lieu, et contre le NàG *Meloidogyne incognita*, en second lieu. Dans ce contexte, nous nous sommes demandés :

*Comment la co-culture, en conditions semi-contrôlées, de tagète et de poivron, combinée à l'inoculation de champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA), influence-t-elle les émissions de composés organiques volatils (COV) et l'exsudation racinaire propres aux deux plantes, dans le cadre de la lutte contre le puceron vert du pêcher *Myzus persicae* ?*

Les objectifs étaient d'étudier :

- 1/ La modification des COV de la tagète lors de la combinaison des leviers

Hypothèse 1 : Les tagètes émettent naturellement des COV présentant des propriétés insecticides ou répulsives.

Hypothèse 2 : Les CMA influencent l'émission de certains COV à activité insecticide ou répulsives chez les tagètes.

Hypothèse 3 : De nouveaux COV émis lors de la co-culture, ou le mélange des COV émis individuellement par la tagète et le poivron peuvent avoir un effet insecticide ou répulsif.

- 2/ Les conséquences des émissions de tagètes sur le poivron

Hypothèse 4 : Le profil de COV dépend du génotype de poivron.

*Hypothèse 5 : L'émission de COV de *T. patula* modifie le volatilome du poivron en le faisant passer d'un profil neutre à un profil répulsif (extrait liquide).*

- 3/ L'effet des CMA sur le poivron

Hypothèse 6 : Les CMA influencent l'émission de certains COV à activité insecticide ou répulsive chez le poivron

- 4/ Les conséquences de la combinaison de leviers sur les pucerons

Hypothèse 7 : Le poivron résistant a un effet répulsif sur les pucerons.

Hypothèse 8 : Le cocktail de COV émis par la co-culture exerce un effet répulsif sur les pucerons.

Hypothèse 9 : Le cocktail de COV résultant de la combinaison des 3 leviers exerce un effet synergique répulsif sur le comportement des pucerons.

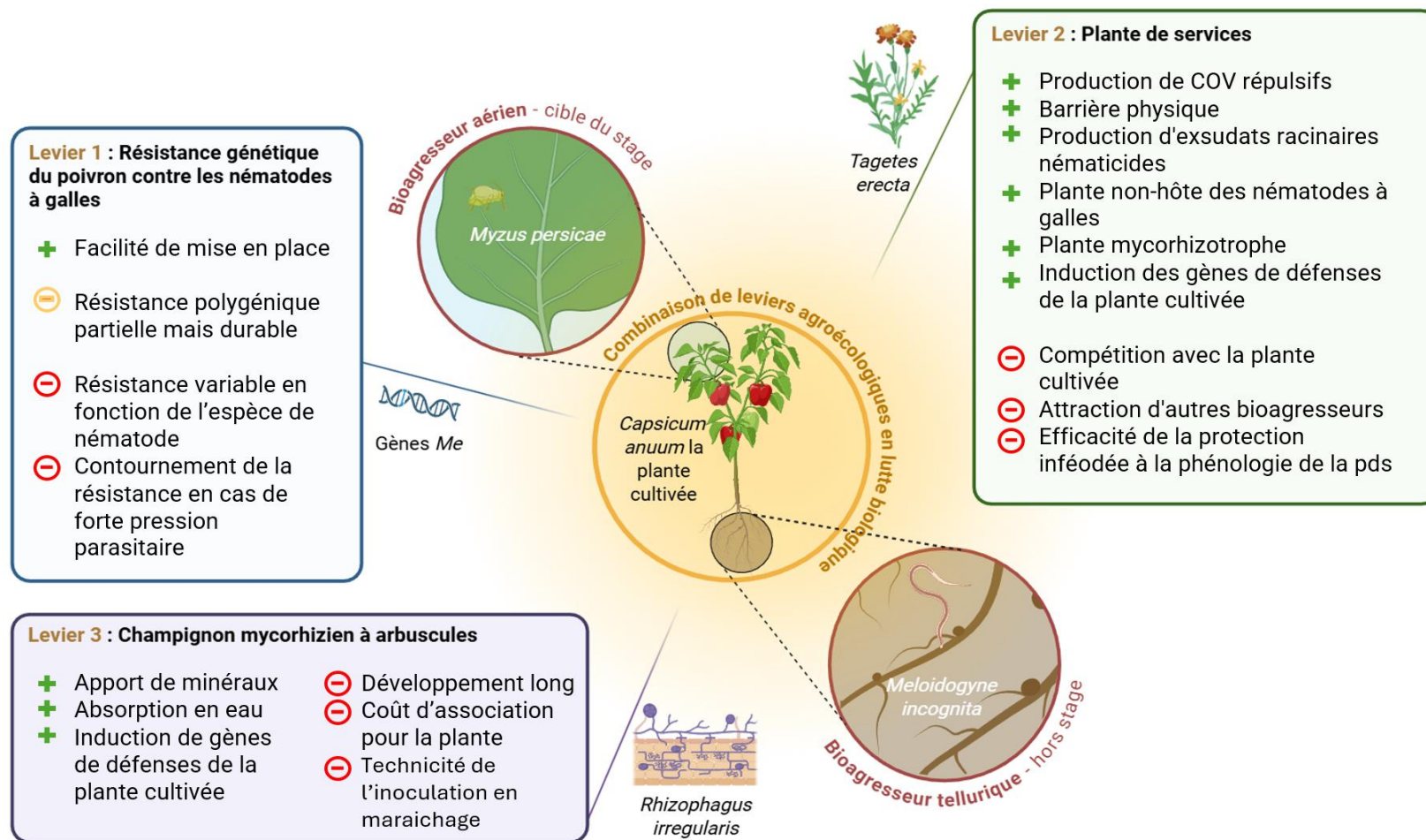


Figure 10 : Schéma de la combinaison de leviers dans la lutte biologique contre deux bioagresseurs du poivron (Barry F., 2026, d'après Heroguez C.)

Partie II

Matériel et Méthode :

I. Matériel biologique

I.1 *Capsicum annuum*, le poivron sensible ou résistant

Le choix du poivron comme plante cultivée à protéger s'est fait car il est à la fois un hôte du bioagresseur aérien *Myzus persicae* et du bioagresseur tellurique *Meloidogyne incognita* ((Shivalingaswamy et al., 2022), une plante emblématique de la région PACA du fait de sa phénologie, et enfin qu'il se prête bien à l'expérimentation en serre grâce à son cycle relativement court et sa biomasse peu étendue.

Deux variétés de poivrons (*Capsicum annuum*) ont été utilisées :

- une variété résistante aux NàG ("Criptonio", semencier : Rjik Zwaan), qui présente une morphologie de fruits carrés.
- et une variété sensible aux NàG ("Doux très Long des Landes" (DTLL), grainetier : Graines Baumaux) qui présente une morphologie de fruits longs et triangulaires.

I.2 *Tagetes patula*, la plante de services

L'espèce de tagète utilisée est *Tagetes patula* et la variété est "Double naine orange" (Graines Girerd). Comme son nom l'indique, cette variété reste de petite taille et fleurit rapidement, ce qui constitue un avantage pour des expérimentations conduites en serre. Cette variété a également été sélectionnée parmi d'autres lors de pré-tests réalisés en janvier en amont du stage, car elle développait une forte colonisation mycorhizienne plus rapidement que les autres variétés.

I.3 *Rhizophagus irregularis*, le champignon mycorhizien arbusculaire à action stimulatrice des défenses des plantes

Des spores de *Rhizophagus irregularis* nous ont été procurés par l'INRAE de Dijon sous forme d'une solution liquide. Ces spores ont été produites par la société Premier Tech, une entreprise qui commercialise les CMA à destination des agriculteurs.

I.4 *Myzus persicae*, le bioagresseur aérien

L'unité PSH possède son propre élevage de *Myzus persicae* (Dardouri et al, 2019) à partir duquel nous avons réalisé nos expérimentations. L'élevage est réalisé en conditions contrôlées dans des cages insectproof à 22°C ± 1°C, avec une photopériode de 16h de jour et 8h de nuit, permettant la production d'individus aptères. Cette condition anatomique constitue un pré-requis pour faciliter l'étude du comportement du puceron.

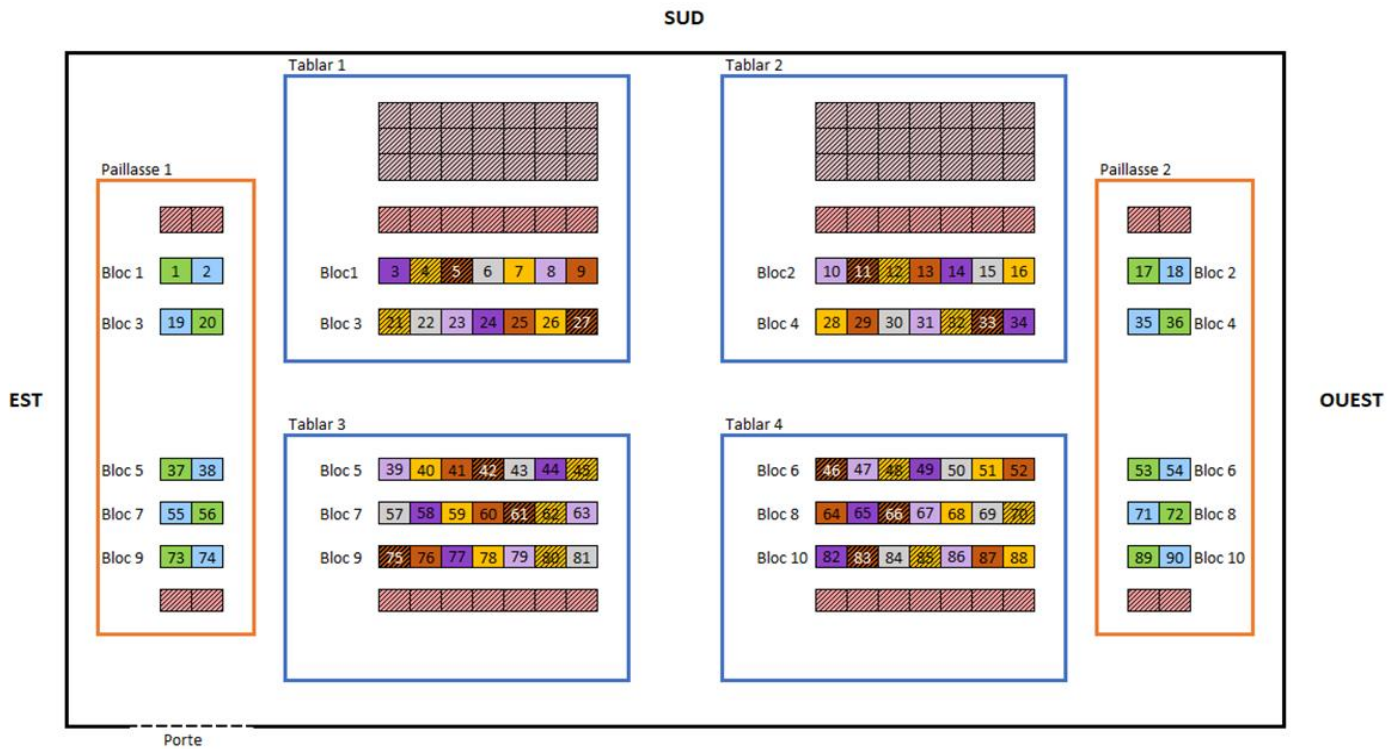
II. Expérimentation 1 : Modification du profil chimique (émissions, métabolisme, transcriptomique) de la tagète et du poivron dans différentes combinaisons culturales

Toute l'expérimentation 1 décrite ci-dessous a été répétée deux fois dans le temps. La première répétition a été réalisée de février à juin et la seconde répétition de mars à juillet. La première répétition a permis de mettre en place et d'adapter les protocoles pour la seconde répétition.

II.1 Mise en place et organisation de l'expérimentation 1

II.1.1 Plan expérimental et présentation des modalités

COMPARTIMENT 3



T	T : Tagètes seules
T/M	T/M : Tagètes + CMA
R-/T	R-/T : Plante cultivée sensible + Tagète
R+/T	R+/T : Plante cultivée résistante + Tagète
R-/T/M	R-/T/M : Plante cultivée sensible + CMA + Tagète
R+/T/M	R+/T/M : Plante cultivée résistante + CMA + Tagète
R-(C3)	R- : Plante cultivée sensible seule
R+(C3)	R+ : Plante cultivée résistante seule
C	C : Contrôle (pot sans plante)
	Bande tampon
	Suivi CMA

R-(C4)	R- : Plante cultivée sensible seule
R+(C4)	R+ : Plante cultivée résistante seule
(R-)+M	(R-)+M : Plante cultivée sensible + CMA
(R+)+M	(R+)+M : Plante cultivée résistante + CMA
C	C : Contrôle (pot sans plante)
	Bande tampon
	Suivi CMA

COMPARTIMENT 4

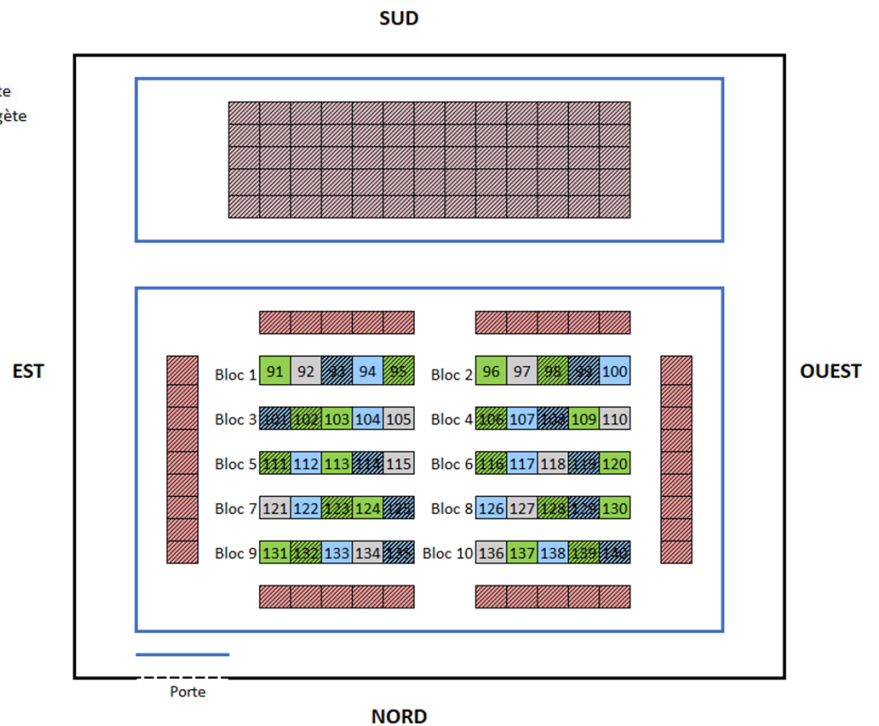


Figure 11 : Plan expérimental des compartiments 3 et 4

Pour cette expérimentation, deux manipulations ont été mises en place en parallèle pour répondre à des objectifs distincts dans deux compartiments de serres différents. La première manipulation, appelée "ManipC3", s'est déroulée dans le compartiment 3 (C3) et permet de répondre aux objectifs 1 et 2, c'est-à-dire à l'étude chimique des modalités comprenant des tagètes. La deuxième manipulation, appelée "ManipC4", s'est déroulée dans le compartiment 4 (C4) et permet de répondre à l'objectif 4, c'est-à-dire à l'étude chimique des poivrons uniquement.

La séparation des objectifs avec et sans tagètes dans deux compartiments isolés hermétiquement était nécessaire afin de limiter le potentiel impact lié à la volatilité des composés émis par la PdS sur le profil chimique des poivrons. Les données récoltées dans chacun des deux compartiments ont été traitées séparément et de manière indépendante du fait d'une différence environnementale entre les compartiments. En effet, suite à un dysfonctionnement du système de refroidissement, le compartiment C4 a subi une augmentation de sa température de 2°C à 6°C par rapport au compartiment C3. En prévision, des modalités témoins (pot sans plantes) et des poivrons témoins seuls ont été installés dans chacun des deux compartiments.

Chaque compartiment a été aménagé selon un plan expérimental en bloc complet et randomisé (*Figures 13a, 13b*). Chacune des 8 modalités du compartiment C3 ou des 4 modalités du compartiment C4, ainsi qu'une modalité témoin (pot sans plantes), sont répétées dans 10 blocs orientés Est-Ouest pour s'affranchir du gradient de température principal (*Figure 11*).

Initialement, 6 répétitions de chaque modalité étaient prévues afin de permettre la réalisation d'analyses statistiques robustes. Cependant, il a été choisi de répéter les modalités 10 fois afin de conserver une marge d'erreur en cas de mortalité accidentelle des plantes ou de mauvais développement. Ainsi, sur les 10 répétitions, seules 6 répétitions sont suivies tout au long de l'expérimentation et utilisées lors des mesures, tandis que la biomasse de l'ensemble des plantes est comptabilisée à la fin de l'expérimentation.

Les 8 modalités du compartiment C3 sont (*Figure 11*) :

- tagète seule (T),
- tagète mycorhizée (T/M),
- poivron résistant aux NàG en co-culture avec une tagète (R+/T),
- poivron sensible aux NàG en co-culture avec une tagète (R-/T),
- poivron résistant aux NàG en co-culture avec une tagète mycorhizée (R+/T/M),
- poivron sensible aux NàG en co-culture avec une tagète mycorhizée (R-/T/M),
- poivron résistant aux NàG seul dans le compartiment C3 (R+(C3)),
- et poivron sensible aux NàG seul dans le compartiment C3 (R-(C3)),

Les 4 modalités du compartiment C4 sont (*Figure 11*) :

- poivron résistant aux NàG seul dans le compartiment C4 (R+(C4)),
- poivron sensible aux NàG seul dans le compartiment C4 (R-(C4)),
- poivron résistant aux NàG mycorhizé ((R+)/M),
- et poivron sensible aux NàG mycorhizé ((R-)/M),

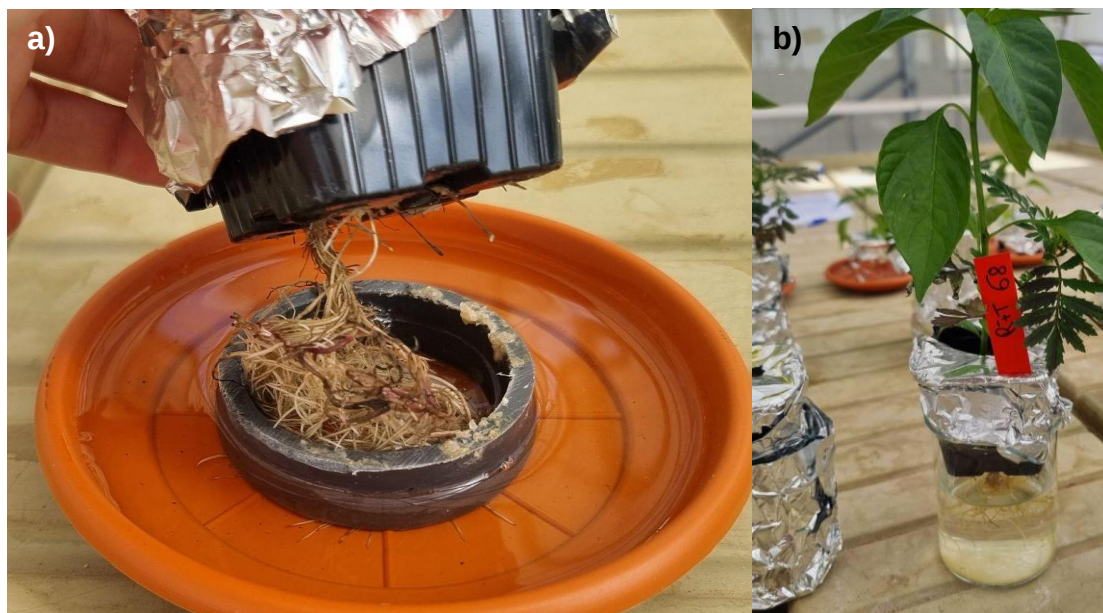


Figure 12 : Photos de la stimulation de la pousse racinaire par le bas ; **a)** Photo de racines sortant du pot grâce au dispositif cylindrique, **b)** Photo d'une co-culture de poivron et de tagète dont les racines sont immergées dans la solution (Barry F., 2026)



Figure 13 : Photos des plans expérimentaux dans les deux compartiments de la serre ; **a)** Photo du plan expérimental de la ManipC3, **b)** Photo du plan expérimental de la ManipC4 (Barry F., 2026)

II.1.2 Technique culturale hydroponique innovante en condition semi-controlée : le protocole "plante à traire"

Les semis de poivrons ont été réalisés dans des plaques alvéolées de 42 trous, dans lesquelles deux à trois graines ont été semées. Les semis de tagètes ont été réalisés dans des barquettes où les graines ont été déposées à la surface puis recouvertes d'une fine couche de terreau humidifié. Les semis ont été placés dans un incubateur à une température de 22°C et une photopériode de 16 h de jour et 8 h de nuit pendant deux semaines avant d'être placés en serre. Le semis des poivrons a été réalisé 1 à 2 semaines avant le semis des tagètes du fait de leur germination plus longue. Puis, 4 à 5 semaines après germination, les tagètes et les poivrons ont été repiqués au même stade, dans des pots remplis d'un mélange de perlite et de sable (50/50). Le choix d'un substrat minéral est important car il favorise le développement des CMA et perturbe peu les émissions racinaires.

Une fois les modalités individualisées dans des pots de 7 x 7 x 6,2 cm, elles ont été surélevées grâce à un dispositif cylindrique dans une coupelle remplie de solution (*Figure 12*). Les racines vont donc chercher l'eau par le bas, ce qui les incite à se développer hors du pot. Cette technique a été mise en place suite aux difficultés rencontrées lors de la première répétition. En effet, avec un arrosage par le bas mais sans surélévation, l'eau est absorbée par le substrat, ce qui ne stimule pas la sortie des racines du pot. Cette mise à jour du protocole a permis l'obtention plus rapide de racines à l'extérieur du pot.

Une semaine plus tard, les pots ont été disposés en fonction du plan expérimental et selon le protocole "plante à traire" développé par Célia Heroguez durant sa thèse. Ils ont été enfoncés sur des béciers de 250 mL et 7,5 cm de diamètre. Les béciers ont été remplis d'une solution nutritive de sorte à ce que les racines qui sortent déjà des pots soient en contact avec l'eau mais que les pots eux-mêmes ne touchent pas l'eau. Ceci évite que le substrat, de nature très poreuse, ne s'imbibe trop, et qu'il y ait un développement d'algues, de champignons ou que les spores de CMA soient lessivées. De plus, pour limiter le développement d'algues sur le substrat ou dans l'eau des béciers, les pots et béciers ont été recouverts d'aluminium pour les protéger de la lumière.

L'irrigation des plantes a donc été faite principalement par le bas, en remplissant les béciers par une solution nutritive jusqu'au niveau choisi. Le niveau des béciers a été contrôlé deux fois par semaine au début de l'expérimentation, puis une fois tous les deux jours à la fin de l'expérimentation lorsqu'il faisait plus chaud et que les plantes, plus grandes, puisaient davantage d'eau. Lors de la première répétition, le remplissage des béciers n'a pas été fait durant le weekend, ce qui a provoqué une sécheresse puis une nécrose des racines de certaines modalités qui vidaient toute l'eau en 2 jours. La mise à jour du protocole a permis d'obtenir des racines de meilleures qualités pour les mesures d'exsudats racinaires (*II.4.1*) et les prélèvements de transcriptomique (*II.4.2*). L'eau des béciers a été changée une fois par semaine afin de réoxygéner les racines. La solution nutritive utilisée était une solution faible en phosphore (solution Hoagland avec 10% de phosphore) afin de favoriser le développement mycorhizien, tout en apportant les nutriments nécessaires au développement de la plante.

Figure 14 : Retroplanning des mesures de l'expérimentation 1

	Mai					Juin				Juillet
	S18	S19	S20	S21	S22	S23	S24	S25	S26	S27
	04-mai	11-mai	18-mai	25-mai	01-juin	08-juin	15-juin	22-juin	29-juin	06-juil
Mesures réalisées au cours de l'expérimentation 1										
Suivi de la floraison des tagètes			T0 : découpe des bourgeons pour retarder la floraison	T0 : découpe des bourgeons pour retarder la floraison	T1 : aucune fleur	T1 : quelques fleurs	T2 : Fleurs sur toutes les modalités avec tagètes			
Suivi de la mycorhization	inoculation en CMA			T0 : aucune structure mycorhizienne	T1 : début de colonisation mycorhizienne par les hyphes		T2 : développement mycorhizien avec hyphes, vésicules et arbuscules			
Prélèvements de COV Sous cloche			T0		T1		T2			
Mesure du volume des plantes			T0		T1		T2			
Extraits liquides à l'acétate d'éthyle et alcool					T1		T2			
Mesure des masses sèches des extraits liquides					T1		T2			
Récolte d'exsudats racinaires					T1		T2			
Fin de manip C3 : récolte pour transcriptomique (feuilles et racines intérieur pot poivron), récolte racines hors-pot pour extraits racinaires, récolte racines intérieur pot pour analyse de la mycorhization, Biomasses fraîches								Destruction de la ManipC3		
Suivi de la mycorhization	inoculation en CMA			T0 : aucune structure mycorhizienne	T1 : début de colonisation mycorhizienne par les hyphes		T1 : début de colonisation mycorhizienne par les hyphes	T2 : développement mycorhizien avec hyphes, vésicules, arbuscules et filaments visible à l'œil nu dans le		
Prélèvements de COV Sous cloche			T0		T1				T2	
Mesures du volume des plantes			T0		T1				T2	
Extraits liquides à l'acétate d'éthyle et alcool					T1				T2	
Mesure des masses sèches des extraits liquides						T1			T2	
Récolte d'exsudats racinaires						T1			T2	
Fin manip C4 : récolte pour transcriptomique (feuilles et racines intérieur pot poivron), récolte racines hors-pot pour extraits racinaires, récolte racines intérieur pot pour analyse de la mycorhization, Biomasses fraîches										Destruction de la ManipC4

Compartiment 3

Compartiment 4

II.1.3 Inoculation, suivi et comptage des CMA

Les CMA ont été inoculés sous forme de spores dans une solution liquide à une concentration de 400 spores/pot en deux fois. Les deux injections de 1 mL ont été réalisées de chaque côté de la plante au niveau des racines, 6 semaines après le semis des poivrons et 5 semaines après le semis des tagètes. Les modalités comprenant une co-culture associée à des CMA ont été inoculées au niveau de la tagète de sorte à bénéficier des effets mycorhizotrophes de la tagète, qui permet aux CMA de coloniser plus rapidement le poivron.

Un suivi de la mycorhization a été réalisé chaque semaine à partir de 3 semaines après l'inoculation, grâce à des plants de tagètes et des deux variétés de poivrons, qui ont été mycorhizés dans les mêmes conditions que ceux de l'expérimentation. Les racines de ces plantes ont été lavées puis colorées afin d'observer l'établissement du champignon au microscope.

A la fin de l'expérimentation, pour chaque modalité mycorhizée, un échantillon de racines séchées a été conservé par répétition (5 modalités x 6 répétitions = 40 échantillons) de sorte à pouvoir réaliser une quantification de la colonisation mycorhizienne selon la méthode de Trouvelot (**Annexe 2**).

II.1.4 Organisation et temporalité de l'expérimentation 1

Au cours de cette expérimentation, trois périodes de prélèvement ont été définies :

- **T0** : Stade végétatif après acclimatation des plantes au dispositif expérimental et avant développement de la mycorhization.
- **T1** :
 - o compartiment C3 : Stade végétatif avant la floraison des tagètes et à un stade précoce du développement de la mycorhization.
 - o compartiment C4 : Poivrons à un stade précoce du développement de la mycorhization.
- **T2** :
 - o compartiment C3 : Stade après floraison des tagètes et à un stade plus évolué de la mycorhization.
 - o compartiment C4 : Poivrons à un stade plus évolué de la mycorhization.

Toutes les mesures réalisées aux différents temps sont représentées dans le planning de l'expérimentation 1 (*Figure 14*).

Au temps T2, un décalage est apparu entre le compartiment C3 et le C4 car les poivrons seuls du C4 ne présentaient pas une mycorhization assez développée pour marquer une différence entre les modalités. Il a donc été décidé d'attendre deux semaines de plus dans ce compartiment pour réaliser les mesures propres au temps T2.

Lors des prélèvements de COV ou d'extraits liquides, les mêmes plantes ont été suivies à T0, T1 et T2. Les 6 meilleures répétitions d'une modalité ont été choisies à T0 en fonction de leur développement racinaire (nécessaire au prélèvement d'exsudats) et de leur bon aspect général.

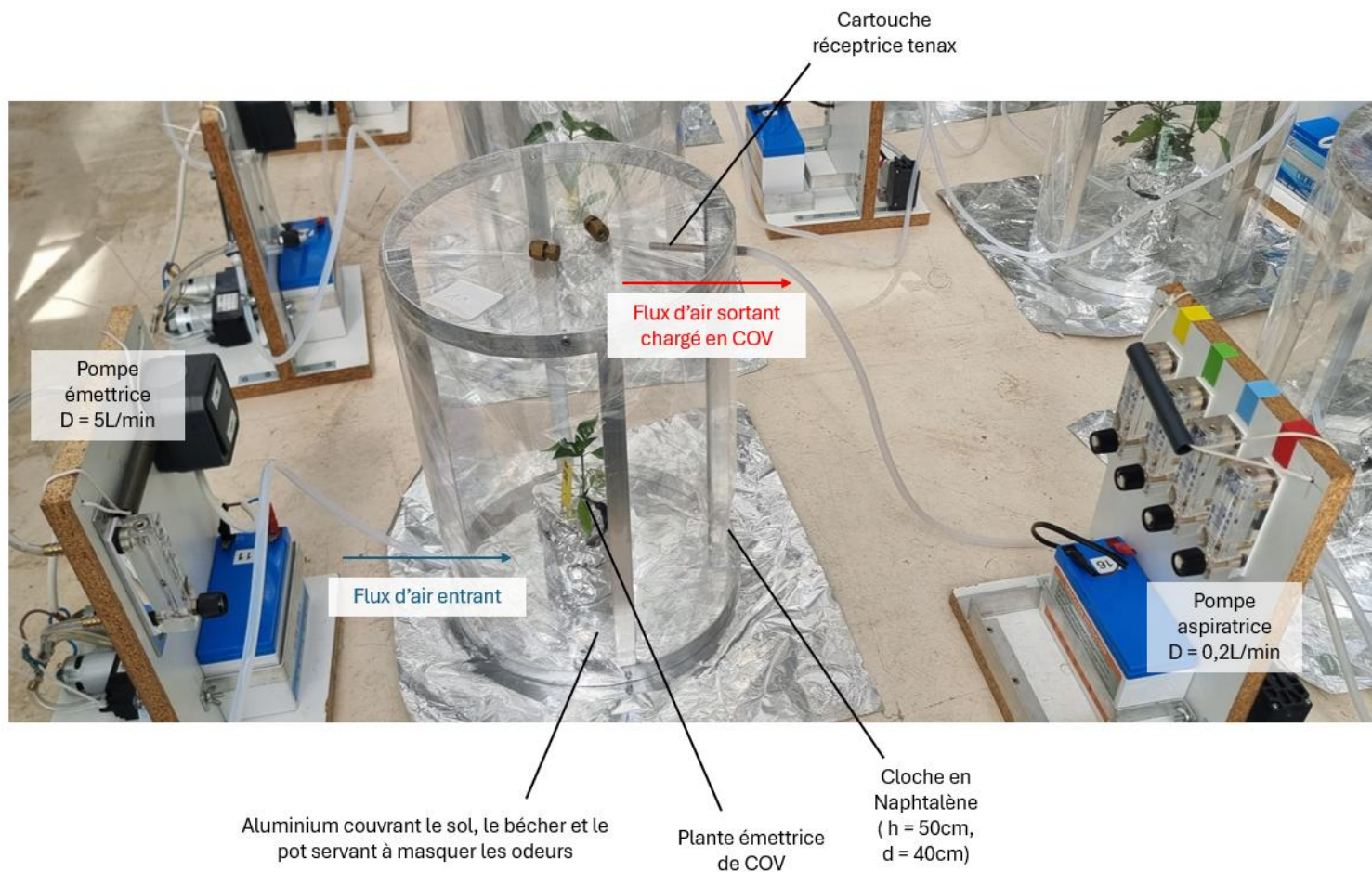


Figure 15 : Photo l g nd e du dispositif de captation des plantes de l'expérimentation 1 (Barry F., 2026)

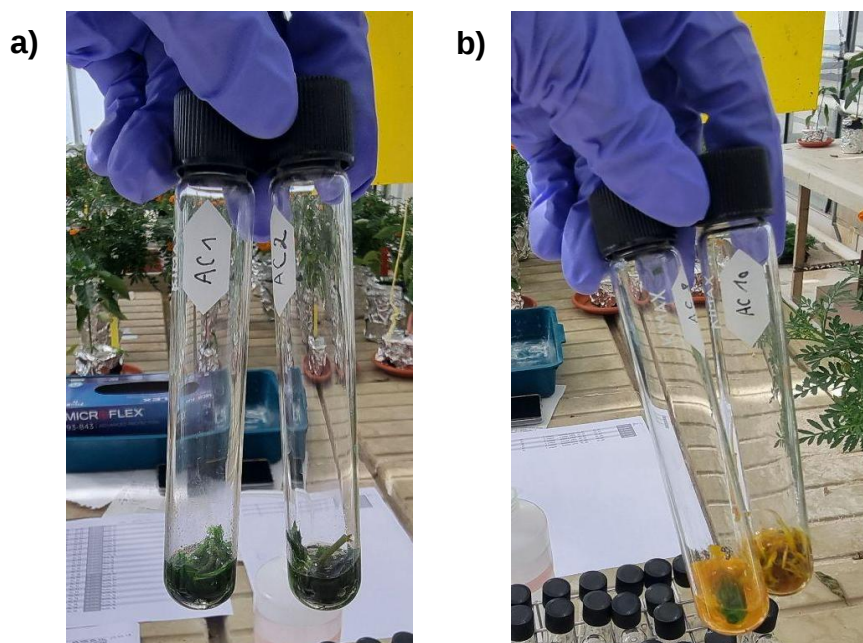


Figure 16 : Photo d'extractions liquides de COV ; a) Photo de l'extraction liquide à l'acétate liquide des feuilles de poivrons, b) Photo de l'extraction liquide à l'acétate liquide des fleurs de tagète (Barry F., 2026)

II.2 Mesures de COV

II.2.1 Prélèvements

Pour les mesures de COV, différentes techniques ont été utilisées pour cibler différents objectifs.

La première technique est la captation active par cartouche tenax qui permet d'obtenir le profil d'émission réel des plantes. Le système de capture est composé d'une cloche avec une armature métallique et recouverte d'un film plastique spécial (naphthalène) qui n'émet aucun composé susceptible de contaminer l'échantillon, ainsi que de deux pompes (*Figure 15*). Un flux d'air est formé grâce au travail de la pompe émettrice qui relâche de l'air à un débit de 5 L/min, et de la micro-pompe (PAS-500 Micro Air Sampler) qui aspire l'air à un débit de 200 mL/min. Les pompes sont calibrées à l'aide d'un débitmètre au début de chaque journée de prélèvement. Une cartouche cylindrique Tenax® est reliée à la micro-pompe aspirante. Les propriétés du Tenax permettent de fixer des molécules en phase gazeuse, et donc de capturer les COV émis par la plante. Chaque prélèvement dure 40 minutes. La durée ainsi que le volume des cloches (20L à T0 et 25L à T1 et T2) ont été déterminés par des pré-tests, dans le but de capturer le maximum de COV sans saturer la cartouche. Après le prélèvement, la cartouche est récupérée et stockée à 4°C jusqu'à son analyse.

La seconde technique est l'extraction liquide d'un organe de la plante étudiée (*Figure 16a, b*). Cette technique permet d'obtenir un profil d'émissions potentielles de COV par plante (tagète ou poivron) et par organe (feuille à T1 et feuille et fleur à T2). Elle permet également d'étudier des profils chimiques plus larges, et donc d'intégrer des molécules qui n'auraient pas été capturées lors des captations sous cloches pour différentes raisons (durée de prélèvement trop courte, molécule émise en faible quantité, etc.). L'extraction a été réalisée avec deux solvants différents pour atteindre des objectifs différents. L'acétate d'éthyle est un solvant performant pour les analyses GC-MS car il est peu polaire, ce qui atténue les bruits de fond et fait ressortir les petits pics. C'est le solvant principal que l'on utilise pour étudier les potentiels d'émissions de COV des plantes de chaque modalité. L'éthanol est un solvant moins performant pour les analyses GC-MS, mais dont l'odeur est neutre pour les pucerons. Ainsi, il permet de comparer le profil de COV des extraits liquides avec leurs effets sur le comportement des pucerons. Ces tests n'ont pas pu être réalisés durant mon stage. Les extraits à l'éthanol ont donc été analysés au GC-MS puis conservés au congélateur pour des tests ultérieurs.

Le nombre de modalités initiales étant multiplié par les variables organes et espèces, on a choisi de ne pas extraire toutes les modalités par un souci de temps et de nombre de tubes disponibles (*Tableau 1*). Ainsi, à T1, dans les compartiments C3 et C4, les feuilles des poivrons des 6 répétitions (choisies en *II.1.4*) des modalités seules ou en co-culture ont été extraites, ainsi que les feuilles de tagètes pour les modalités avec tagètes seules. À T2, dans le compartiment C3, les modalités en co-culture avec un poivron résistant n'ont pas été prélevées, de sorte à avoir suffisamment de tubes pour réaliser les extractions de feuilles de poivrons sensibles, de feuilles de tagètes et de fleurs de tagètes des modalités en co-culture. Les fleurs et/ou feuilles des modalités seules du compartiment C3 et les modalités du compartiment C4 ont été extraites normalement. Il a été choisi d'étudier uniquement le poivron sensible en co-culture afin de s'assurer que la différence de volatilité provienne d'un effet de la co-culture et non de la résistance génétique.

Mesure réalisée	Temporalité	Modalités	Nombre de répétitions
Captation active de COV et mesure du volume des plantes	T0, T1, T2	Toutes les modalités	6
Extraction liquide de COV à l'acétate d'éthyle et à l'Ethanol	T1	- R-(C3) (feuille) - R+(C3) (feuille) - T(feuille) - T/M (feuille) - R-(C4) (feuille) - R+(C4) (feuille) - R-/M(C4) (feuille) - R+/M(C4) (feuille)	6 pour l'acétate d'éthyle et 3 pour l'éthanol
	T2	- T(feuille et fleur) - T/M (feuille et fleur) - R-(C3) (feuille) - R+(C3) (feuille) - R-/T (feuille poivron, feuille tagète, fleur tagète) - R-/T/M (feuille poivron, feuille tagète, fleur tagète) - R-(C4) (feuille) - R+(C4) (feuille) - R-/M(C4) (feuille) - R+/M(C4) (feuille)	
Récolte d'exsudats racinaires	T1, T2	Toutes les modalités	6
Échantillonnage de matériel génétique	Fin de la manipulation	- R-(C3) (feuilles et racines) - R+(C3) (feuilles et racines) - R-/T (feuilles et racines de poivron) - R-/T/M (feuilles et racines de poivron) - R-(C4) (feuilles et racines) - R+(C4) (feuilles et racines) - R-/M(C4) (feuilles et racines) - R+/M(C4) (feuilles et racines)	6
Biomasse fraîche totale	Fin de la manipulation	Toutes les modalités	10

Tableau 1 : Tableau des modalités prélevées pour chaque mesure de l'expérimentation 1

Pour réaliser ces extractions liquides, l'organe est découpé au niveau du pédoncule puis rapidement plongé dans un tube contenant un des deux solvants, ce qui permet de conserver le maximum de COV contenus dans l'organe. Les plantes sur lesquelles n'ont pas été réalisées d'extractions liquides ont également été blessées, de sorte à ne pas introduire de biais dans l'expérimentation. Le volume de solvant, déterminé par des pré-tests, était de 2 mL pour l'acétate d'éthyle et de 6 mL pour l'éthanol. Le volume était 3 fois plus grand pour les extractions à l'éthanol, car pour une modalité, on mettait 3 échantillons par tube, de sorte à réaliser des "pool" à cause d'un nombre insuffisant de tubes pour réaliser des répétitions individuelles.

II.2.2 Analyse des COV par GC-MS (Gas Chromatography - Mass Spectrometry)

Pour l'analyse des cartouches sur le GC1 (*Figure 17*), le tourniquet ne possédant que 50 places, les cartouches ont été analysées en deux lots successifs de 26 cartouches durant deux journées consécutives. Une durée de 30 minutes était nécessaire pour analyser une cartouche, et donc de 13 heures pour analyser un lot. Pour l'analyse des extraits liquides sur le GC3 (*Figure 18*) le tourniquet possédant 150 places, les échantillons ont donc tous pu être analysés consécutivement après chaque prélèvement.

La détection des COV contenus dans les échantillons a été réalisée par GC-MS, une technique d'analyse et de quantification des composés organiques volatiles et semi-volatiles. Pour les COV capturés sous cloche, le GC a été couplé à un thermodésorbeur et à un piège froid qui a permis d'extraire les COV du Tenax puis de les concentrer avant injection. Ensuite, pour les deux types d'échantillonnage (Tenax ou extrait liquide), les COV ont été injectés dans une colonne apolaire. Ils ont d'abord été séparés par chromatographie selon leur affinité par rapport à la colonne puis ils ont été ionisés dans le spectromètre de masse où les ions produits ont été analysés selon leur rapport masse/charge (m/z). Il a alors été possible de détecter les composés selon leur spectre de masse et leur temps de rétention linéaire (RI), calculé en fonction du temps de rétention des alcanes (C8-C20), puis de les identifier grâce à la bibliothèque de référence NIST 2017 (*Figure 19b*).

II.2.3 Interprétation des chromatogrammes

Le GC a produit un chromatogramme par échantillon, dans lequel chaque pic correspond à une molécule (*Figure 19a*). Une partie du chromatogramme correspond au bruit de fond, à cause de pollutions par la colonne en silice et de molécules présentes dans l'air de la serre avant captation. Certains pics n'ont pas pu être identifiés avec la méthode de détection et la bibliothèque mise à disposition. D'autres pics ont été identifiés comme étant des COV émis par les plantes. La stratégie d'analyse choisie n'était pas de cibler des molécules spécifiques, mais d'étudier les différences de mélange de COV entre modalité. Ainsi, l'analyse des chromatogrammes était non ciblée et chaque pic a dû être analysé individuellement. Ensuite, c'est l'aire de pic correspondant à l'abondance de la molécule émise par la plante qui a été analysée.



Figure 17 : Photographie présentant le GC-MS1 (1 : TD (thermodésorbeur PerkinElmer®) ; 2 : GC (chromatographe en phase gazeuse) ; 3 : MS (spectromètre de masse Thermo scientific®) ; 4 : tourniquet pour déposer les cartouches) (Barry F., 2026).



Figure 18 : Photographie présentant le GC-MS3 (1 : injecteur automatique) ; 2 : GC (chromatographe en phase gazeuse) ; 3 : MS (spectromètre de masse Thermo scientific®) ; 4 : tourniquet pour déposer les échantillons) (Barry F., 2026)

II.2.4 Analyse statistique

En amont de toute analyse statistique, le jeu de données a été pré-traité. Les molécules issues de la colonne (contenant du silicium), les molécules ayant un ratio de signal/bruit (S/N) inférieur à 3, ainsi que les molécules identifiées avant 5 min et après 26 min ont été retirées du jeu de données. Ensuite, pour s'affranchir de la pollution des COV présents dans les deux compartiments de la serre ou émis par d'autres éléments (algues, plastique, etc...), la valeur d'aire de pic de chaque molécule a été corrigée par la moyenne d'aire de pic des témoins. Par exemple, si à T2 dans le compartiment C3, l'échantillon 20 contient du 5-Hepten-2-one, 6-méthyl avec une aire de pic de 133 210 et que pour cette molécule la moyenne des aires de pics des témoins à T2 du compartiment C3 est de 113 242.25, alors après correction, l'aire de pic du 5-Hepten-2-one, 6-méthyl de l'échantillon 20 est de 19 967.75.

Pour les plantes qui n'étaient pas en co-culture, les données ont été normalisées par rapport au volume des plantes mesuré lors des captations, (II.3.1), ce qui permet de limiter la variabilité intra-groupe et de limiter les biais d'interprétation. Néanmoins, pour les plantes en co-culture, diviser par la somme des volumes des deux plantes signifiait sous-estimer l'aire de pic des molécules spécifiques d'une des deux plantes de la co-culture. C'est pourquoi, pour les modalités en co-culture, les échantillons n'ont pas été normalisés.

Les données ont également toutes été log-transformées (base de 2), ce qui a permis de réduire leur asymétrie à droite (beaucoup de 0 et des valeurs extrêmes d'un ordre de grandeur de 100 000) et de stabiliser la variance de chaque COV dans chaque modalité. Enfin, les données ont été centrées-réduites, comme préconisé pour un jeu de données d'aire de pic brute en GC-MS (van den Berg et al., 2006; Wold et al., 2001).

L'étude statistique a été réalisée avec le logiciel Metaboanalyst6.0 qui est une plateforme dédiée aux analyses métabolomiques, qui a permis de réaliser une étude descriptive multivariée du jeu de données complétée par des tests univariés.

L'analyse multivariée a été réalisée avec une méthode statistique supervisée de réduction de dimension et de classification : l'analyse discriminante des moindres carrés partiels (PLS-DA). Cette méthode permet de mettre en évidence les molécules participant le plus à la création de groupes indiqués (c'est-à-dire les modalités) dans les dimensions résumant le mieux l'information. Elle a été choisie pour sa robustesse face au risque de multicollinéarité qui est présent dans un jeu de données de GC-MS où le nombre de facteurs est très supérieur au nombre d'échantillons ($p \gg n=6$). Néanmoins, elle requiert une validation du modèle par des tests préalables comme un test de validation croisée et un test de permutation. Le test de validation croisée fournit une estimation interne de l'erreur souvent résumée par des métriques comme le Q^2 et R^2 . Le R^2 mesure la qualité de l'ajustement, c'est-à-dire la variabilité expliquée par le modèle, et le Q^2 permet de mesurer la capacité du modèle à prédire les données. Ensuite, le test de permutation utilise les résultats du test de validation croisée pour conclure sur la significativité de la différence entre les groupes. C'est-à-dire qu'il permet de vérifier si l'ordination par groupe permet de mieux séparer les molécules que le hasard. Cette méthode permet de mettre en évidence les molécules participant le plus à la création de groupes indiqués (c'est-à-dire les modalités) dans les dimensions résumant le mieux l'information (Hervé et al., 2018).

Une fois le modèle validé, il est possible d'analyser les graphiques bidimensionnels ainsi que les scores VIP (importance de la variable dans la projection). Usuellement, les molécules ayant un VIP-score dépassant le seuil de 1 sont considérées comme de bonnes candidates (Anwardeen et al., 2023).

Ensuite, une analyse univariée a été menée pour mesurer les différences d'abondance des COV entre les modalités. Pour mesurer les différences de moyennes, des tests de limma (linear models for microarray data), qui sont des t-test utilisant des statistiques bayésiennes empiriques, ont été utilisés. Le package limma est un package initialement développé pour des jeux de données de séquençage d'ARN et robuste aux petits échantillons ($n < 5$), qui est parfaitement compatible avec les données GC-MS. Ce test nécessite des données log-transformées. Les p-values obtenues ont ensuite été corrigées selon la méthode FDR (False Discovery Rate), qui permet de détecter les faux positifs lors de tests multiples.

II.3 Mesures physiologiques au cours et à la fin de l'expérimentation

II.3.1 Mesures physiologiques au cours de l'expérimentation 1

A chaque captation active de COV, le volume des plantes, considéré comme un parallélépipède rectangle, est mesuré comme la multiplication de la hauteur de la plante par sa longueur et sa largeur. Les fleurs et bourgeons sont aussi comptés. Ces mesures permettent d'obtenir un proxy rapide du volume et du stade phénologique des plantes. De plus, à chaque prélèvement de COV par extraction liquide, les masses sèches des organes sont pesées.

II.3.2 Mesures de fin d'expérimentation

A la fin des ManipC3 et ManipC4, les différents organes (racines dans le b cher, racines dans le pot, partie aérienne et fruits des poivrons) de toutes les plantes ont été pesés avant et après passage à l'étuve, de sorte à obtenir les biomasses fraîches et sèches.

Une partie des feuilles et racines de poivrons a néanmoins été prélevée et congelée en amont dans de l'azote liquide pour des mesures de transcriptomique (II.4.1). Ces échantillons ont été pesés congelés et leur poids a été ajouté à la biomasse fraîche totale du poivron correspondant. Ainsi, les poivrons qui ont été prélevés pour la transcriptomique ont une masse fraîche totale calculée comme l'addition de deux pesées. Cette différence de manipulation a été prise en compte lors de l'analyse statistique des données.

De plus, des échantillons de racines de poivrons et de tagètes ont également été prélevés pour réaliser une quantification mycorhizienne (**Annexe 2**). Ces racines ont été pesées avant et après leur prélèvement afin d'obtenir la biomasse fraîche totale de la plante, ainsi que la biomasse fraîche après prélèvement. La teneur en matière sèche de l'organe a alors pu être calculée comme étant le rapport entre la masse sèche et la masse fraîche mise à l'étuve. Ensuite, une approximation de la masse sèche totale a été calculée grâce à cette teneur et la masse fraîche totale de la plante (*Figure 20*). Les plantes qui ont subi un prélèvement racinaire ont donc une masse fraîche totale pesée et une masse sèche totale calculée, et les plantes qui n'ont pas subi de prélèvement racinaire ont une masse fraîche et une masse sèche totales pesées. Cette différence de manipulation a été prise en compte lors de l'analyse statistique des données.

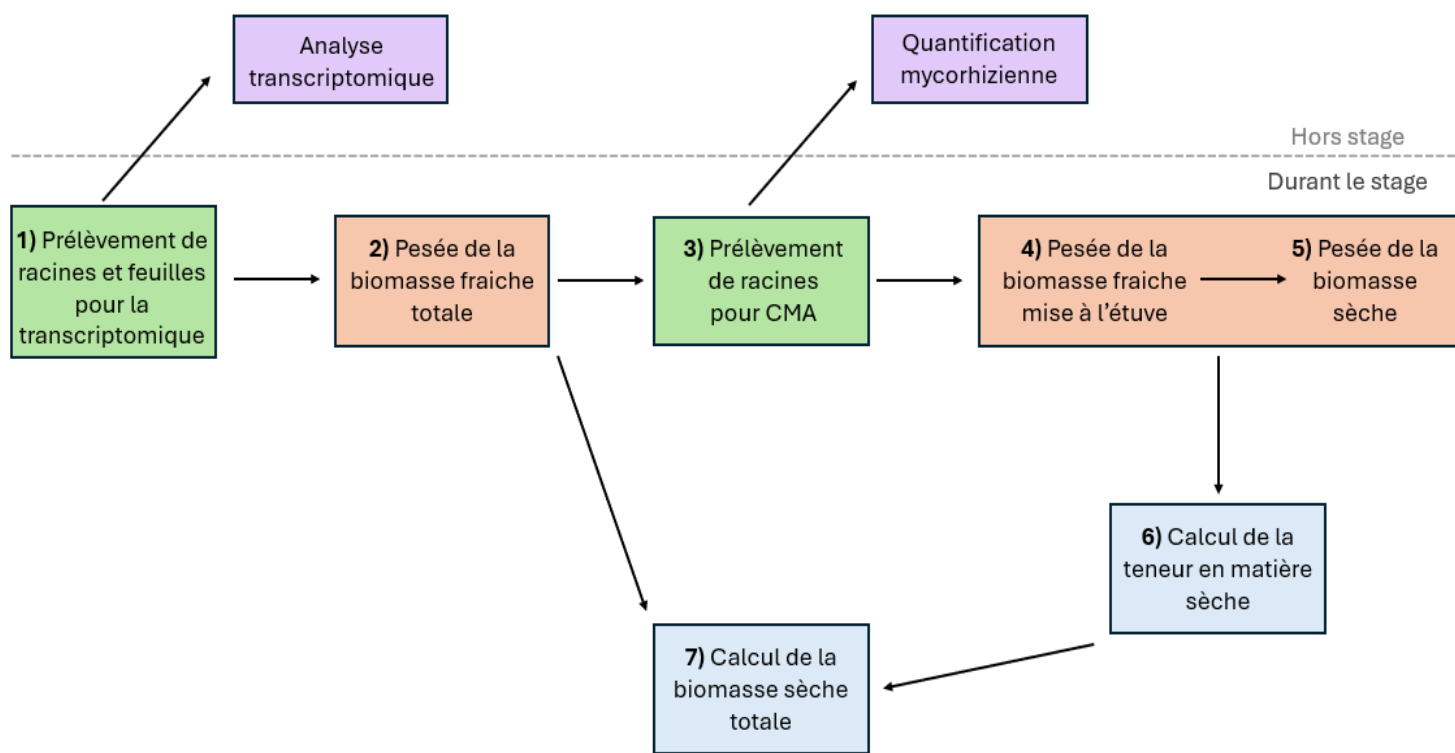


Figure 20 : Schéma du suivi des étapes de pesées pour les plantes dont on prélève des échantillons (Barry F., 2026)

II.3.3 Analyses statistiques

Pour tout le reste des analyses statistiques de ce rapport, le logiciel R version 4.5.2 a été utilisé. Les analyses ont été réalisées à l'aide des packages “stats” déjà chargé dans R pour l'ajustement des modèles, “emmeans” et “ARTool” pour les comparaisons post-hoc, “car” pour la validation des modèles, et “ggplot2” pour les représentations graphiques.

Pour la ManipC4, il a été choisi de présenter l'effet des modalités sur la biomasse fraîche totale du poivron. Tandis que pour la ManipC3, il a été choisi de présenter l'effet des modalités sur les biomasses fraîches aériennes et des racines strictement dans les pots des poivrons et des tagètes. Cette différence résulte du fait que dans le cas des modalités en co-cultures, les racines de tagètes et de poivrons qui sortaient du pot étaient mélangées. Il était alors impossible de les intégrer au calcul de la biomasse fraîche totale de chacune des deux plantes. Tandis que les racines dans les pots étaient distinguables et permettaient donc de calculer la biomasse fraîche racinaire intra-pot par plante.

Concernant l'analyse statistique des données de biomasse, les modèles ont été optimisés grâce à l'ajout de covariables. La covariable “bloc” (dans quel bloc se trouve la modalité, II.1.1) et “prélèvement pour transcriptomique” (si l'échantillon a subi un prélèvement de feuille ou de racine pour les mesures de transcriptomiques, II.4.2) ont systématiquement été comparées avec le modèle le plus simple par une anova grâce au paramètre de Fisher, après vérification des hypothèses de normalité des résidus et d'homogénéité de la variance sur le modèle le plus complet. Ces hypothèses ont été vérifiées par observation visuelle des graphiques de diagnostic, ainsi que par des tests de Shapiro, Levene et Breush-Pagan. Dans le modèle choisi, lorsque les hypothèses étaient validées, des tests d'ANOVA factorielles, suivis de tests post-hoc du package “emmeans” avec correction de Tukey, ont permis d'évaluer l'effet des modalités sur les différentes mesures de biomasses. Lorsque les hypothèses étaient rejetées, un modèle non paramétrique de Transformation par rangs alignés (Aligned Rank transform, ART) a été employé, suivi par le test post-hoc associé (fonction art.con du package “ARTool”) avec correction de Tukey.

Pour la ManipC3, l'étude de la masse fraîche aérienne totale des poivrons (sans les fruits) a été modélisée par un modèle linéaire simple (lm) avec comme variables explicatives : la variété de poivron (facteur à 2 niveaux : Criptonio ou Doux Très Long des Landes), le traitement agroécologique appliqué au poivron (facteur à 3 niveaux : aucun traitement, co-culture avec une tagète, co-culture avec une tagète mycorhizée), et leur interaction. L'étude de la masse fraîche racinaire intra-pot totale des poivrons a été étudiée par le même type de modèle auquel la covariable “prélèvement pour transcriptomique” a été ajoutée. La masse fraîche aérienne totale et de la masse fraîche racinaire intra-pot totale des tagètes ont été modélisées par le même type de modèle linéaire simple (lm) prenant comme variables explicatives : la co-culture avec un poivron (facteur à 3 niveaux : tagète seule, en co-culture avec DTLL et en co-culture avec Criptonio), la présence de mycorhizes (facteur à 2 niveaux : oui ou non) et leur interaction.

Pour la ManipC4, l'étude de la biomasse fraîche totale des poivrons a été modélisée par un modèle linéaire simple (lm) prenant comme variable explicative l'interaction de la variété de poivron avec la présence de mycorhizes.

Les figures ont été réalisées avec le package “ggplot2”, représentant pour chaque modalité les masses fraîches moyennes calculées et sur lesquels ont été rapportés sous forme de lettre les résultats des tests post hoc.



Après 6 heures d'exsudation, l'eau des bécards est récupérée et stockée dans des Eppendorf

Figure 21 : Schéma du prélèvement des exsudats racinaires (Barry F., 2026)

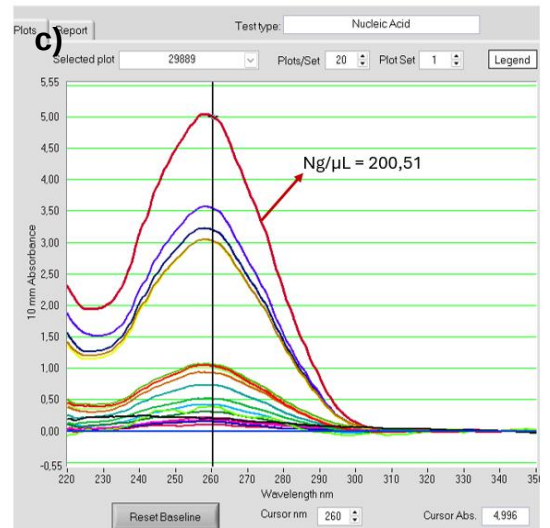


Figure 22 : Photos illustrant les étapes pour extraire l'ARN depuis les feuilles et racines de poivrons ; **a)** Broyage du matériel génétique (feuilles et racines), **b)** extraction de l'ARN, **c)** Dosage Nano-drop des échantillons d'ARN (Barry F., 2026)

II.4 Mesures complémentaires

II.4.1 Prélèvements d'exsudats racinaires

Avant de commencer le prélèvement, les béciers de récupération ont été nettoyés selon un protocole spécifique (**Annexe 3**). Puis, ils ont été remplis avec 120 mL d'eau ultra-pure (Milli-Q®) sans contamination, et pesés. Les plantes prélevées (n=6 par modalité) ont ensuite été déposées sur les béciers de sorte que les racines soient plongées dans l'eau.

Après 6 heures d'exsudation des racines, les béciers ont de nouveau été pesés et l'eau contenant les exsudats a été récoltée dans des Eppendorfs (ADN-free) stériles de 50 mL (*Figure 22*). Les Eppendorfs ont été stockés au congélateur à -80°C. Ces prélèvements permettront de réaliser des analyses ultérieures du profil d'exsudation des racines, dont les pré-tests ont été réalisés lors de ce stage, ainsi que des tests comportementaux sur NàG.

II.4.2 Échantillonnage du matériel génétique et extraction d'ARN pour analyse transcriptomique

Des analyses de séquençage haut débit de transcriptome (RNA-seq) des gènes de défenses des poivrons ont été réalisées par l'entreprise allemande BMKGENE.

Pour ce faire, lors de la destruction de l'expérimentation 1, des feuilles et racines de poivrons ont été prélevées (8 modalités et 6 répétitions). Dès sa coupe, le matériel génétique a été stocké dans un sachet en plastique annoté, plongé dans de l'azote liquide, puis conservé à -80°C. Avant broyage, les masses congelées ont été pesées et ajoutées à la biomasse totale fraîche de la plante correspondante. Le broyage s'est déroulé dans l'azote liquide grâce à un broyeur à billes cryogénique (*Figure 22a*). La poudre obtenue a été stockée à -80°C avant de réaliser l'extraction d'ARN.

Des pré-tests ont permis de déterminer le kit d'extraction nécessaire pour les différents organes. Ainsi, l'ARN des racines a été extrait avec le kit Macherey NucleoSpin RNA Plant and Fungi et l'ARN des feuilles a été extrait avec le Kit NucleoSpin RNA Plant 50 (Ref. 3613655) (*Figure 22b*). Des tests Nano-Drop ont permis de vérifier le taux et la qualité des ARN présents dans les échantillons extraits (*Figure 22c*). Les profils NanoDrop des échantillons de feuilles ont montré un plus mauvais état général que celui des racines, ce qui a été confirmé par l'entreprise BMKGENE après réception des échantillons. Pour chaque modalité (**Annexe 4**), 4 répétitions de nos meilleurs échantillons avaient été envoyées. Finalement, il a été décidé de ne séquençer que le transcriptome des racines. Les données de séquençage ont été reçues après la fin de ce stage, et n'ont donc pas pu être intégrées dans ce rapport.



Figure 23 : Photo du dépôt de larves de pucerons âgées de 24h sur un plan sain de poivron (DTLL) (Barry F., 2026)

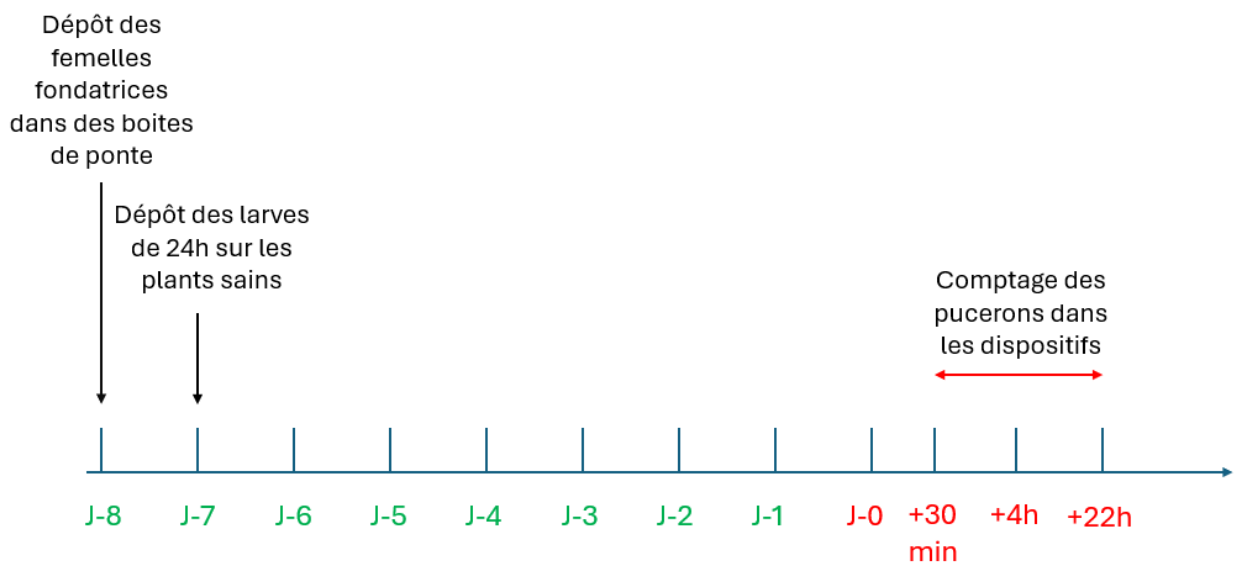


Figure 24 : Schéma du déroulement des actions pour obtenir des pucerons adultes de 8 jours au moment des tests de choix (Barry F., 2026)

III. Tests comportementaux sur *Myzus persicae*

III.1 Matériel biologique

III.2.1 Production des cohortes de *Myzus persicae*

La réalisation de cohortes de pucerons permet d'obtenir des pucerons de même âge, ce qui réduit la variabilité de comportement qui serait liée à l'âge (Kénia Quinzoni, communication personnelle).

Les cohortes ont été réalisées grâce au prélèvement de femelles fondatrices de l'élevage réparties ensuite par 20 dans 10 boîtes de pétri de dimensions 11x11x1cm. Des feuilles fraîches de poivron, face abaxiale vers le haut, ont été déposées préalablement dans chaque boîte sur un papier filtre humidifié. Après une durée de ponte de 24 heures, les larves ont été récupérées et déposées sur un plant de poivron (DTLL) sain (Figure 23). Entre 200 et 500 larves ont été produites par cohorte, le but étant d'atteindre 300 pucerons pour pouvoir réaliser les tests. Dans ces conditions expérimentales, le stade adulte du puceron (L5) est atteint au bout de 8 jours, âge auquel les tests ont été réalisés (Figure 24).

III.2.2 Les plantes utilisées

Les plantes utilisées pour les tests de choix ont été cultivées dans les mêmes conditions que les plantes de l'expérimentation 1, avant la mise en place du protocole plante à traire. Lorsqu'elles étaient mycorhizées, la même souche de *R. irregularis* a été utilisée avec une plus forte concentration (800 spores/pot) que celle utilisée dans l'expérimentation 1, afin de favoriser la vitesse de colonisation.

Les plantes servant d'hôte aux élevages de *M. persicae* étaient des poivrons (de variété Yolo Wonder). Ces poivrons ont été cultivés dans une serre dédiée aux plantes d'élevage. Les graines ont été semées dans des plateaux de semences avec du terreau Klasman Ô de type Potgrond H, pH=6. Les plantules ont ensuite été transférées dans des pots standardisés de 1 L qui sont irrigués par des goutteurs (débit : 33 mL/min, cycles : 7/jrs pendant 5 min).

III.2 Le protocole des tests comportementaux

Les tests de choix ont été inspirés de la méthode de N'deye et al. (2026), mais le protocole a été adapté grâce à l'utilisation de pucerons issus de cohortes (Figure 25).

Chaque test durant 22h et le nombre de répétitions par modalité ayant été fixé à 30, il a été décidé de ne tester que quatre comparaisons, ce qui correspondait déjà à 120 tests et qui ont été réalisés grâce à la production de 10 cohortes d'environ 300 pucerons de 8 jours.

- R- contre R-. Il s'agit d'un test témoin permettant de comprendre comment le puceron se comporte dans le dispositif et de vérifier l'absence de biais, notamment directionnels ;
- R- contre R+, pour vérifier si la différence de variété, et notamment la présence d'un gène de résistance aux NàG dans la variété R+, a un effet sur le choix du puceron ;
- R- contre R-/T, afin de tester l'effet de la co-culture avec une tagète. Durant ce test, la tagète est placée du côté du bord de la cloche afin de s'affranchir de l'impact visuel que pourrait avoir la plante sur le puceron ;
- R- contre R-/T/M, afin de tester la combinaison des deux leviers, la tagète et les CMA, sur le choix du puceron.

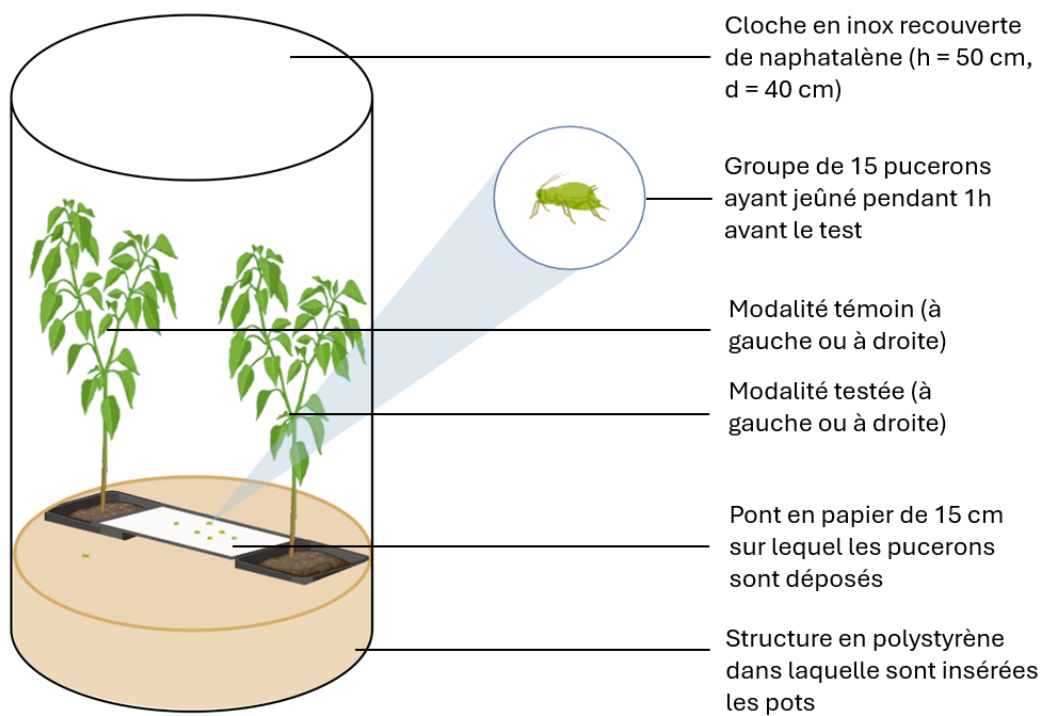


Figure 25 : Schéma d'une cage lors d'un test de choix (Barry F., 2026)



Figure 26 : Photo de l'enceinte climatique dans laquelle les 12 tests sont réalisées en parallèle (Barry F., 2026)

Les tests de choix ont été réalisés dans une enceinte climatique de l'insectarium. Les paramètres de photopériode ont été fixés à 8h de nuit et 16h de jour. L'éclairage dans la salle est homogène afin de ne pas influencer le déplacement des pucerons qui s'orientent par rapport à la lumière. 12 dispositifs ont été répartis de part et d'autre de la salle ce qui permettait de réaliser 12 tests en parallèle (Figure 26). Initialement, l'objectif était de réaliser 3 répétitions de chacune des 4 comparaisons dans les 12 dispositifs afin que les tests aient tous été réalisés dans les mêmes conditions. Mais un problème de nombre de semis nous a contraint à réaliser les comparaisons R-/R+ en amont des 3 autres comparaisons. Ces 3 autres comparaisons ont pu être réalisées en même temps.

Chaque dispositif était composé d'une plante à tester et du témoin (poivron sensible seul), séparées de 15 cm par un pont en papier sur lequel étaient déposés 15 pucerons. Le tout était cloisonné dans une cloche qui permettait de contenir les COV émis dans une enceinte fermée et d'éviter que les pucerons ne s'enfuient (Figure 25).

Avant chaque journée de test, des plantes de taille et de morphologie similaires ont été sélectionnées et placées dans les dispositifs une heure avant le début du test. Les pucerons ont également été mis à jeûner dans des boîtes de pétri vides une heure avant le début des tests. Au début d'un test, 15 pucerons sont déposés au centre du pont en papier puis sont comptés (i) sur chaque plante, (ii) sur chaque pot, et (iii) dans le reste de la cage, à 30 min, 4h et 22h. Les temps de comptage ont été déterminés par des pré-tests : l'observation à 30 min correspond au temps d'acclimatation au dispositif, l'observation à 4h correspond à un temps intermédiaire où certains pucerons n'ont pas encore fait de choix, l'observation à 22h correspond au temps où la majorité des pucerons ont fait leur choix. Le nombre de feuilles et de fleurs de chaque plante a été comptabilisé afin de prendre en compte cette information dans les analyses statistiques.

III.3 Analyse statistique

Les analyses ont été réalisées à l'aide des packages glmmTMB (Brooks et al., 2017) pour l'ajustement des modèles, emmeans pour les comparaisons post-hoc, DHARMA pour la validation des modèles, et ggplot2 pour les représentations graphiques.

Afin de répondre à la question « *Une des modalités est-elle associée à une proportion plus faible de pucerons sur la plante testée ?* », la variable réponse a été construite comme la proportion de pucerons ayant effectué un choix pour la modalité testée, définie par :

$$\text{Proportion de pucerons} = \frac{\text{Nb de pucerons sur la modalité testée}}{(\text{Nb de pucerons sur la modalité testée} + \text{Nb de pucerons sur la modalité témoin})}$$

Cette variable étant une proportion issue d'un nombre fini d'essais (choix binaire par puceron), des modèles linéaires généralisés mixtes (GLMM) ont été utilisés. Avant d'étudier, l'effet des différentes modalités, l'absence de biais sur la position des plantes dans le dispositif de test de choix a d'abord été vérifié grâce aux tests témoin R-/R-. Ensuite, un modèle GLMM prenant en compte les modalités testées R+, R-/T et R-/T/M a été construit avec une fonction de lien logit et une distribution bêta-binomiale plutôt que binomiale simple. La distribution bêta-binomiale introduit un paramètre de dispersion supplémentaire (ϕ) permettant d'absorber l'hétérogénéité extra-binomiale, fréquemment rencontrée en écologie comportementale du fait d'effets de grégarité entre individus.

La structure aléatoire du modèle prenait initialement en compte deux facteurs de regroupement : un identifiant puceron (ID_Puceron), croisant le numéro de répétition et le numéro de dispositif, destiné à tenir compte de la non-indépendance des comptages répétés sur les mêmes individus aux trois temps de mesure (30 min, 4h, 22h) ; et le numéro de cohorte d'origine des pucerons. Cependant, l'inclusion de ID_Puceron en effet aléatoire a conduit à un problème de convergence du modèle. Ce résultat suggère une confusion structurelle entre la variance associée à ID_Puceron et le paramètre de dispersion ϕ de la distribution bêta-binomiale, les deux capturant une source de variabilité au même niveau hiérarchique (l'unité d'observation répétée). Ce diagnostic a été confirmé empiriquement : le modèle sans ID_Puceron converge correctement, et les résidus simulés de DHARMA ne présentent aucune structure résiduelle détectable, y compris lorsqu'ils sont regroupés par ID_Puceron. La variable ID_Puceron a donc été retirée de la structure aléatoire.

Finalement, le modèle s'écrit tel que :

glmmTMB (proportion de pucerons sur la modalité testée ~ modalité testée + temps + disponibilité en feuille de la modalité testée + (1| Numéro de cohorte))

L'absence de colinéarité entre les variables explicatives a été vérifiée par le calcul des facteurs d'inflation de variance (VIF). L'adéquation du modèle a été évaluée par l'analyse des résidus simulés de DHARMA, en contrôlant l'uniformité des résidus (test de Kolmogorov-Smirnov) ainsi que l'absence de sur-dispersion résiduelle et l'inflation des zéros (**Annexe 5**).

Les moyennes marginales estimées (*estimated marginal means*, EMM) de la proportion de pucerons ont été calculées pour chaque modalité et chaque temps de comptage à l'aide du package emmeans, sur l'échelle de réponse (proportions, type = "response"). Des tests contre la valeur de référence 0,5 ont été réalisés, correspondant à l'absence de préférence des pucerons entre la modalité testée et la modalité témoin. Les p-values ont été corrigées pour comparaisons multiples selon la méthode de Šidák.

Les figures ont été réalisées avec le package ggplot2, représentant pour chaque modalité et chaque temps de comptage la proportion estimée de pucerons, accompagnée de son intervalle de confiance à 95 %. La valeur de référence 0,5 (ligne pointillée) a aussi été représentée, un point avec une p-value significative au-dessus de cette ligne signifie que la modalité est attractive pour les pucerons et un point avec une p-value significative signifie que la modalité est répulsive contre les pucerons.

Partie III

Résultats :

I. Effet de différents leviers agro-écologiques sur la biomasse des plantes

I.1 Effet de la variété sur la biomasse des poivrons

Dans le compartiment C4, la variété n'induit pas de différence sur la masse fraîche totale des poivrons ($p\text{-value} = 0,9444$) (Figure 27). Dans le compartiment C3, lorsque les fruits sont pris en compte, il n'y a pas non plus de différence significative entre la masse fraîche totale des deux variétés de poivron ($p\text{-value} = 0.0531$) (Annexe 6d). Néanmoins lorsque l'on enlève les fruits du calcul, la masse fraîche totale des R+ est significativement supérieure à celle des R- ($p\text{-value} = 0.01153$) (Annexe 6 e). De même, la masse fraîche racinaire des R+ est significativement supérieure à celle des R- ($p\text{-value} = 0,0029$) (Figure 28). Ceci indique une croissance végétative plus importante des R+ comparée aux R-.

I.2 Effet du levier agro-écologique mycorhization sur la biomasse des plantes

L'effet de la mycorhization sur les tagètes est étudié dans le compartiment C3 en comparant les modalités T et T/M, tandis que l'effet de la mycorhization sur les poivrons est étudié dans le compartiment C4 qui y est dédié en comparant les modalités R (+ ou -) et R (+ ou -) /M.

La mycorhization augmente significativement la biomasse fraîche totale des T/M comparé aux T dans les compartiments aériens ($p\text{-value} < 0.0001$) et racinaires des tagètes ($p\text{-value} < 0.0001$) (Figure 28).

La mycorhization augmente significativement la biomasse fraîche totale des deux variétés de poivron, mais avec une magnitude différente due à une interaction entre la mycorhization et la variété. Ainsi, l'effet est significativement plus élevé chez les R+ (+23.8 g, $p\text{-value} < 0.0001$) que chez les R- (+10.8 g, $p\text{-value} = 0.0061$) (Figure 27).

I.3 Effet de la mise en co-culture avec une PdS sur la biomasse des plantes de la co-culture

Dans le C3, les poivrons en co-culture semblent avoir plus souffert de l'effet de la compétition que les tagètes. En effet, pour les masses fraîches aériennes, les R- et R+ en co-culture avec des tagètes (R- vs R-/T : $p\text{-value} = 0.0051$ et R+ vs R+/T : $p\text{-value} < 0,0001$) et les tagètes en co-culture avec des R- (T vs R-/T : $p\text{-value} = 0.0124$) avaient des masses significativement plus faibles en co-culture que seules. Et, pour les masses fraîches racinaires, les R+ en co-culture avec des tagètes (R+ vs R+/T : $p\text{-value} < 0.0001$) avaient des masses significativement plus faibles en co-culture que seules (Figure 28). Ainsi l'intensité de la compétition semble varier selon la variété de poivron, et la variété R+ semble moins bien supporter la co-culture avec la tagète.

I.4 Effet de la combinaison de 3 leviers agro-écologiques sur la biomasse des plantes

L'analyse de la combinaison de leviers est réalisée dans le compartiment C3.

Chez les poivrons, pour la modalité R-/TM, la masse fraîche aérienne était similaire à celle de la modalité R-/T et significativement inférieure à celle des poivrons R- cultivés seuls ($p\text{-value} < 0.0001$). Concernant la masse fraîche racinaire, bien que celle des poivrons R-/T/M soit similaire à celle des R-/T, elle était significativement inférieure à celle des R- cultivés seuls (R-/T/M vs R- : $p\text{-value} = 0.0118$) (Figure 28).

Pour les poivrons de la modalité R+/T/M, la biomasse fraîche aérienne présentait une valeur intermédiaire entre celles observées pour les modalités R+/T et R+ seuls. Concernant la biomasse racinaire, celle-ci était similaire à celle de la modalité R+/T et significativement inférieure à celle des poivrons cultivés seuls (R+ vs R+/T/M : $p\text{-value} = 0.0198$) (Figure 28).

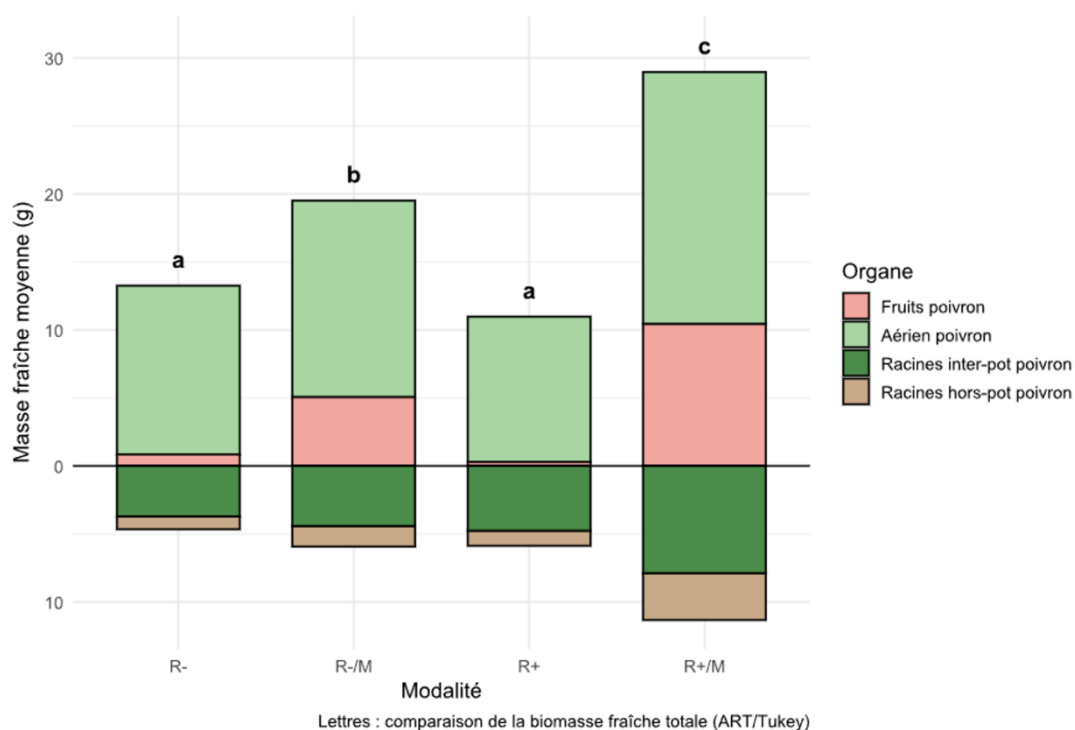


Figure 27 : Bar-plot empilé de la masse fraîche moyenne des plantes du compartiment C4, les tests post-hoc ont été réalisés sur la masse fraîche totale des poivrons (Heroguez C., 2026)

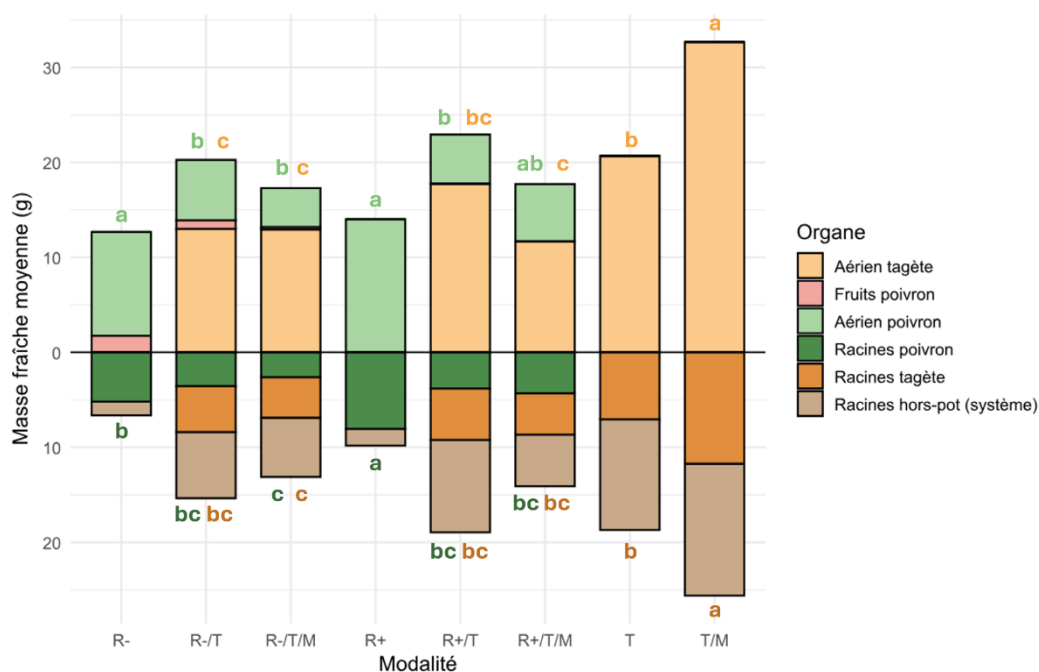


Figure 28 : Bar-plot empilé de la masse fraîche moyenne des plantes du compartiment C3, les tests post-hoc ont été réalisés respectivement sur les masses fraîches aériennes et racinaires intra-pot de chaque plante (la couleur des lettres correspond à l'organe de la plante étudié et comparé) (Heroguez C., 2026)

De plus, l'analyse sur la biomasse fraîche totale des poivrons (**Annexe 6 i**) montre que l'ajout d'une tagète, qu'elle soit mycorhisée ou non, entraîne une diminution de la biomasse fraîche totale du poivron chez les deux variétés.

Chez les tagètes, pour la modalité R-/T/M, les biomasses fraîches aériennes et racinaires étaient similaires à celles observées pour la modalité R-/T et significativement inférieures à celles des tagètes cultivées seules (masses fraîches aériennes de T vs R-/T/M : $p\text{-value} = 0.0113$, masses fraîches racinaires de T vs R-/T/M : $p\text{-value} = 0.0425$). Ainsi, de même que pour les poivrons, l'ajout de CMA ne semble pas suffire à compenser l'effet de la compétition avec le poivron. En revanche, chez les tagètes en co-culture avec un R+ et en association avec des CMA, la modalité R+/T/M présentait une biomasse fraîche aérienne similaire à celle de la modalité R+/T, mais significativement inférieure à celle des tagètes cultivées seules (T vs R+/T/M : $p\text{-value} = 0.0149$). La biomasse racinaire était, quant à elle, similaire à celles des tagètes de la modalité R+/T ainsi qu'à celles des tagètes cultivées seules (*Figure 28*).

Ainsi, bien que les CMA ne compensent pas l'effet dépressif de la compétition entre le poivron et la tagète (I.3), ces résultats confirment la meilleure réponse à la mycorhization des poivrons R+ par rapport aux R- (I.2.2). En effet, les biomasses aériennes montrent que le R+ résiste mieux à la compétition avec la tagète en présence de CMA, puisque sa biomasse dans la modalité R+/T/M est similaire à celle d'un poivron cultivé seul, alors qu'en co-culture et en l'absence de CMA, elle est significativement inférieure à celle d'un poivron seul. À l'inverse, chez les poivrons R-, l'effet de la compétition reste similaire, avec ou sans mycorhizes.

II. Effet de différents leviers agro-écologique sur le volatilome des plantes

Le choix a été fait de ne présenter que les résultats de volatilomes obtenus à T2 car la mycorhization était bien établie chez les plantes de suivies et que les tagètes étaient en fleurs. Les plantes respectaient donc pleinement les conditions correspondant à leur modalité. De plus à T0 et T1, un problème instrumental, qui a été résolu à T2, était présent sur l'appareil de TD-GC. Celui-ci provoquait un aplatissement systématique des chromatogrammes des cartouches analysées dans le deuxième lot.

Concernant l'analyse multivariée, les indicateurs de performance (Q^2 et R^2), ainsi que les tests de permutation, n'ont pas permis de valider les modèles de PLS-DA.

II.1 Effet de la variété sur le volatilome des poivrons

Dans le compartiment C3, aucune molécule ne passe le seuil de significativité après correction FDR lors des tests de limma. Ainsi la variété de poivron ne semble pas induire de différence significative dans l'émission des COV. Néanmoins, en ne considérant que les $p\text{-values}$ (**Annexe 7 a**), l'octanal, le nonanal et le décanal présentent des aires de pics supérieures chez les poivrons R- par rapport aux R+. De plus, dans le compartiment C4, aucune molécule ne passe le seuil FDR ou ne présente une $p\text{-value}$ significative, ce qui renforce le résultat selon lequel la variété de poivron n'induit pas de différence significative dans l'émission des COV.

II.2 Effet du levier agro-écologique mycorhization sur le volatilome des plantes

L'effet de la mycorhization sur les tagètes a été étudié dans le compartiment C3, tandis que l'effet de la mycorhization sur les poivrons a été étudié dans le compartiment C4 dédié à cette analyse.

II.2.1 Effet du levier agro-écologique mycorhization sur le volatilome des poivrons

L'analyse des poivrons mycorhisés a été réalisée dans le compartiment C4. Pour les deux génotypes, les tests de limma ne mettent en évidence aucun COV franchissant le seuil FDR.

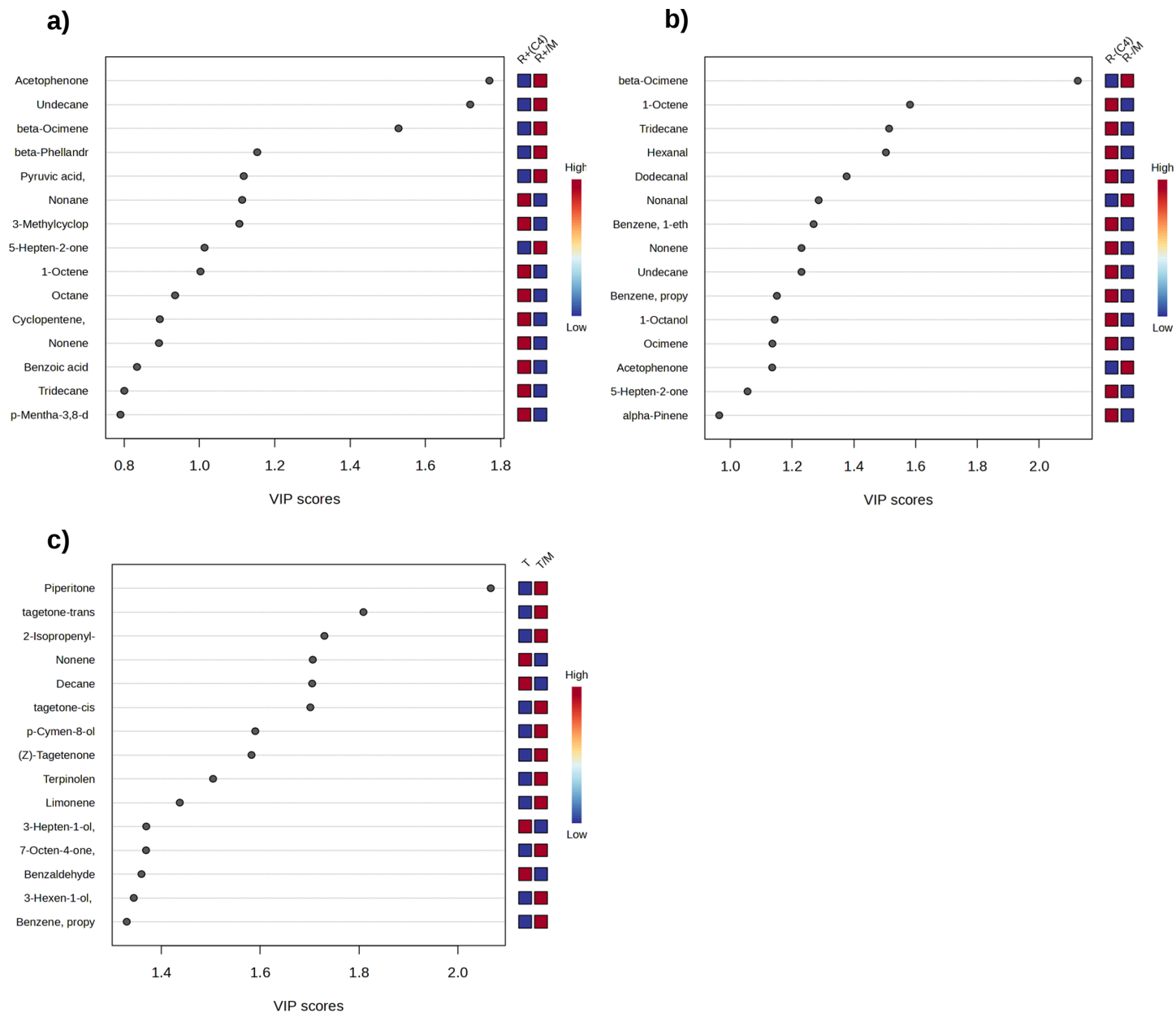


Figure 29 : Diagramme des VIP-scores des modalités

a) R+ et R+/M,

b) R- et R-/M,

c) T et T/M

(Barry F., 2026)

Néanmoins, pour les deux génotypes, en considérant uniquement les *p-values* (**Annexe 6 c**), les tests de limma montrent que l'aire de pic du β -Ocimène est supérieure chez les poivrons mycorhizés par rapport aux poivrons non mycorhizés. De plus, pour le génotype résistant, l'acétophénone et l'undécane présentent également des aires de pics supérieures chez les poivrons R+/M par rapport aux R+. Pour le génotype sensible, l'hexanal présentent également une aire de pic supérieure chez les poivrons R-/M par rapport aux R-.

Enfin, même si le modèle de PLS-DA n'a pas été validé, l'analyse multivariée montre que ces COV ont un VIP-score supérieur à 1 (*Figure 29 a, b*). Ainsi, le β -ocimène apparaît comme un bon candidat pour caractériser les modalités mycorhizées.

II.2.2 Effet du levier agro-écologique mycorhization sur le volatilome des tagètes

Le test de limma ne met en évidence aucune molécule franchissant le seuil FDR. Néanmoins, en considérant les *p-values* (**Annexe 6 b**), la tagétone-cis, la pipéritone, le p-Cymen-8-ol et le terpinolène présentent des aires de pics supérieures chez tagètes mycorhizées (T/M) par rapport aux tagètes non mycorhizées (T). De plus, même si le modèle de PLS-DA n'a pas été validé, l'analyse multivariée montre que ces COV présentent un VIP-score supérieur à 1, ce qui en fait de bons candidats pour caractériser les tagètes mycorhizées (*Figure 29 c*).

II.3 Effet de la mise en co-culture avec une PdS sur le volatilome des plantes de la co-culture

L'analyse de la co-culture est réalisée dans le C3.

Pour le génotype sensible (R-/T), le test de limma montre que seul l'octanal franchit le seuil FDR, avec une aire de pic supérieure dans les poivrons cultivés seuls par rapport à ceux en co-culture (**Annexe 7 d**). Aucune autre différence de COV n'a été mise en évidence en considérant uniquement les *p-values*.

Pour le génotype résistant (R+/T), le test de limma a permis de mettre en évidence 4 COV qui passent le seuil FDR. Le terpinolène, la pipéritone et le sabinène présentent des aires de pic supérieures en co-culture par rapport au poivron cultivé seul, tandis que le nonanal présente une aire de pic supérieure chez le poivron cultivé seul par rapport à la co-culture. (*Figure 30 b*).

II.4 Effet de la combinaison de 3 leviers agro-écologiques sur le volatilome des plantes

L'analyse de la combinaison de leviers a été réalisée dans le compartiment C3.

Pour le génotype sensible, la comparaison entre les modalités R- et R-/T/M à l'aide du test de limma met en évidence 6 COV franchissant le seuil FDR. La pipéritone, le limonène, le sabinène, l'allo-ocimène et le terpinolène présentent des aires de pics significativement supérieures dans la co-culture mycorhizée par rapport au poivron seul, tandis que l'heptanal a une aire de pic significativement plus élevée chez les poivrons seuls (*Figure 30 a*). En ne prenant en compte que les *p-values*, le Silphiperfol-5-ene, la (Z)-Tagetenone, la tagetone-cis, 3-Hexen-1-ol (E), le β -Phellandrene et le Caryophyllene présentent également des aires de pics supérieures chez les poivrons R-/TM par rapport aux R- (**Annexe 7 e**). Ensuite, entre la co-culture simple et la co-culture mycorhizée, aucun COV ne franchit le seuil FDR. Néanmoins, en considérant uniquement les *p-values*, l'undecanal, le 3-Hexen-1-ol, l'alpha-pinène, le limonène, la pipéritone, le γ -terpinène, le tridecane et le 5-heptène-2-one-6-méthyl présentent des aires de pics brutes plus élevées chez les poivrons R-/T/M par rapport aux R-/T (**Annexe 7 e**).

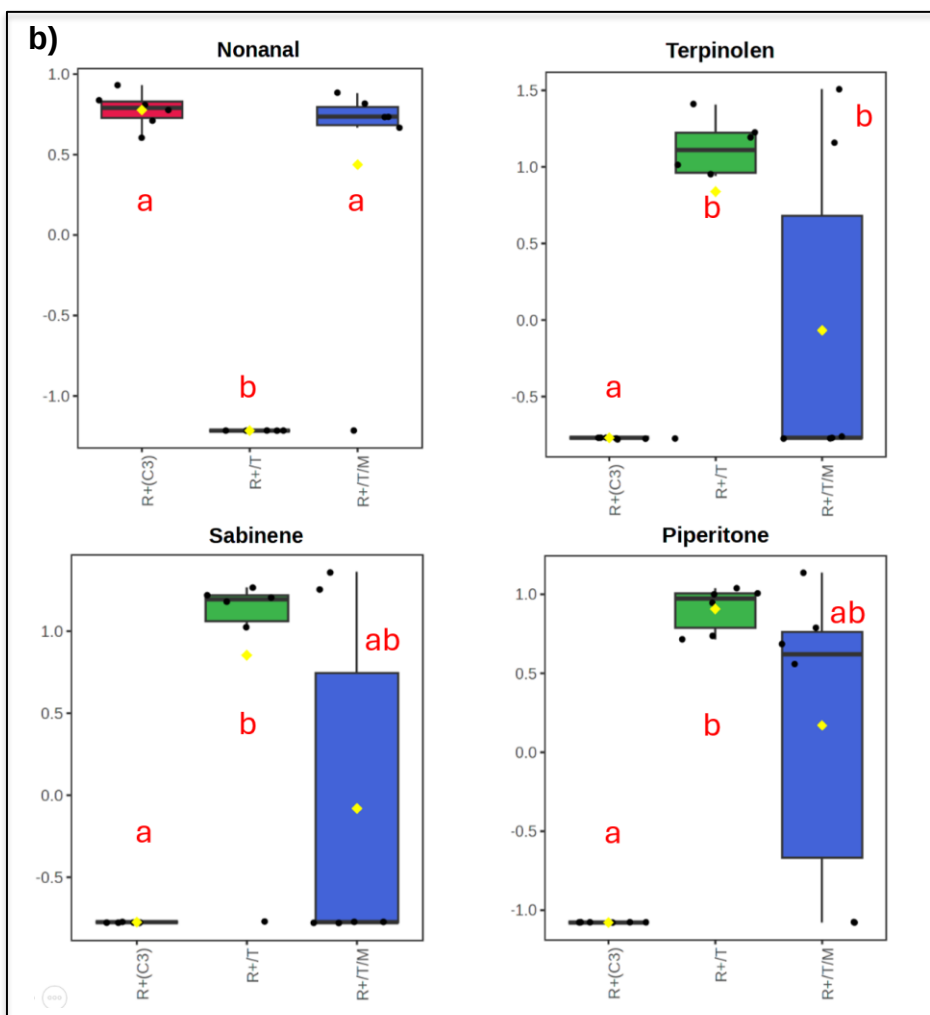
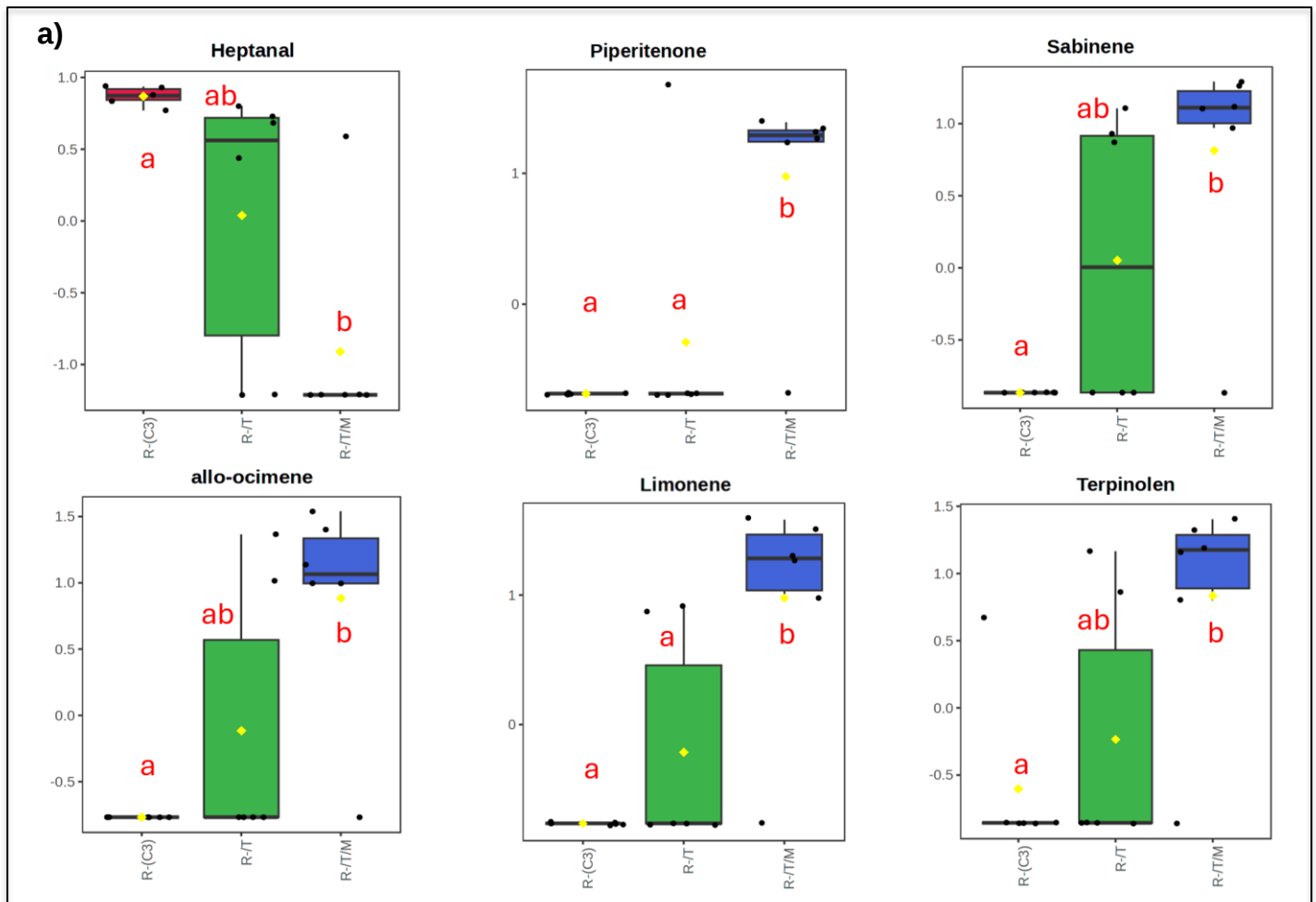


Figure 30 : Box-plot des COV dont l'abondance est modifiée avec l'ajout de leviers agroécologiques

a) Box-plot des COV dont l'abondance est modifiée dans les combinaisons de leviers comprenant la modalité R-. Les molécules présentées sont celles qui franchissent le seuil FDR entre R- et R-/T/M. Les lettres reportées sur les box-plot proviennent des p-values obtenues lors des tests post-hoc

b) Box-plot des COV dont l'abondance est modifiée dans les combinaisons de leviers comprenant la modalité R+. Les molécules présentées sont celles qui franchissent le seuil FDR entre R+ et R+/T. Les lettres reportées sur les box-plot proviennent des p-values obtenues lors des tests post-hoc

(Barry F., 2026).

Pour le génotype résistant, le test de limma ne montre aucune différence de COV entre les R+ et les R+/T/M franchissant le seuil FDR. En considérant uniquement les *p-values*, le limonène, le terpinolène et le cyclopentène,1-ethenyl-3-méthylène ont des aires de pic supérieures chez les R+/T/M par rapport aux R+ (**Annexe 7 e**). Tandis que, comme pour le génotype sensible, l'heptanal a une aire de pic brute supérieure dans le poivron seul que dans la co-culture mycorhizée.

Enfin, la comparaison entre la co-culture simple et la co-culture mycorhizée montre que le Nonanal franchit le seuil FDR et présente une aire de pic supérieure chez les poivrons R+/T/M par rapport aux R+/T. En ne considérant que les *p-values*, l'undecanal, l'octanal, l'octane, le cyclopentène,1-ethenyl-3-méthylène et l'acétophénone présentent également des aires de pic supérieures dans la co-culture mycorhizée par rapport à la co-culture simple (**Annexe 7 e**). A l'inverse, le β -ocimène, le décane et le caryophyllène sont davantage émis dans la co-culture simple que dans la co-culture mycorhizée (**Annexe 7 e**).

III. Effet de différents leviers agro-écologiques sur le comportement des pucerons

Les tests de choix témoins consistaient à comparer des plantes identiques (R-) et ont permis de vérifier que le choix des pucerons n'était pas influencé par le dispositif expérimental ou la méthode utilisée. Les trois modalités testées, R+, R-/T, R-/T/M, ont ensuite été incluses dans un modèle permettant de répondre à la question « au temps X, *une des modalités est-elle associée à une proportion plus faible de pucerons sur la plante testée ?* ».

III.1 Effet de la variété de poivrons sur le comportement des pucerons

Les tests de choix ont montré que la proportion estimée de pucerons sur les poivrons R+ n'était pas significativement différente de 50%. Ainsi, ces tests n'ont pas révélé de préférence des pucerons pour l'une ou l'autre des variétés de poivron (R- ou R+), à 30 min : *p-value* = 0.0701 (différence marginale), à 4h : *p-value* = 0.0775 (différence marginale), à 22h : *p-value* = 0.1429) (*Figure 32*).

III.2 Effet de la mise en co-culture avec une PdS sur le comportement des pucerons

Les tests de choix ont montré que la proportion estimée de pucerons sur la modalité R-/T était significativement inférieure à 50% à 30 min (*p-value* = <0.0001), à 4h (*p-value* = 0.0001) et à 22h (*p-value* = 0,0003) (*Figure 32*). Ainsi, les tests de choix ont révélé un effet répulsif de la modalité R-/T lorsqu'elle était présentée face à la modalité R-.

III.3 Effet de la combinaison de 3 leviers agro-écologiques sur le comportement des pucerons

Les tests de choix ont montré que la proportion estimée de pucerons sur la modalité R-/T/M était significativement inférieure à 50% à 30 min (*p-value* = 0.0002), 4h (*p-value* = 0.0001) et à 22h (*p-value* = 0.0003) (*Figure 31*). Ainsi, les tests de choix ont révélé un effet répulsif de la modalité R-/T/M lorsqu'elle était présentée face à la modalité R-.

Néanmoins, l'ajout de CMA n'a pas montré d'effet additif en situation de co-culture : la combinaison des deux leviers agroécologiques n'a pas permis d'obtenir une répulsion des pucerons supérieure à celle observée avec un seul levier.

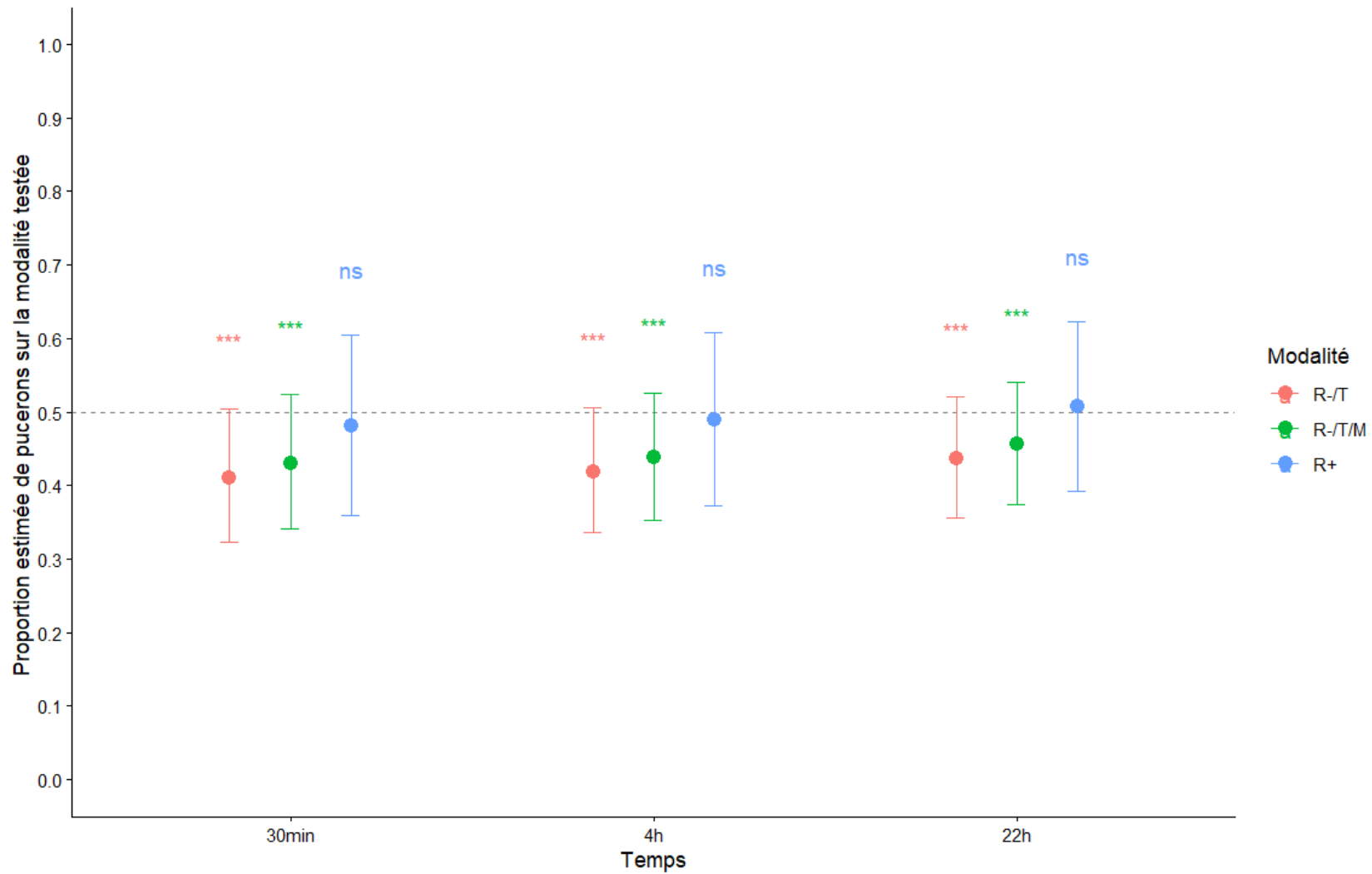


Figure 31 : Graphique de la proportion estimée de pucerons à 30 min, 4h et 22h accompagné de son intervalle de confiance à 95 %, la valeur de référence 0,5 (ligne pointillée), ainsi que la zone de tolérance biologique ± 5 % (bande grisée) (Barry F., 2026)

Partie IV

Discussion et conclusion :

I. Retour sur les résultats

L'expérimentation 1 a confirmé l'effet biostimulant des CMA (Tarigan et al., 2022) sur les poivrons et tagètes cultivées seuls, dont la biomasse a augmenté en présence de mycorhizes. Une interaction entre la variété de poivron et la mycorhization a également été observée, la variété Criptonio semble mieux mycorhizer que la variété DTLL dans les deux compartiments de la serre. Néanmoins, cet effet ne compense pas les pertes de biomasses dues à la compétition entre les plantes en co-culture. Ainsi, en co-culture, les poivrons comme les tagètes ont été impactés négativement par la compétition.

Concernant les captation actives, bien que les résultats doivent être nuancés en raison de la faible significativité des analyses, liée notamment au faible nombre de répétitions, nous avons montré qu'aucun nouveau COV n'apparaissait en réponse à la combinaison des différents leviers. Nous discuterons donc principalement des variations d'abondance de ces COV entre les différentes modalités.

Enfin, les tests de choix ont montré un effet répulsif de la combinaison de leviers sur le comportement des pucerons.

I.1. Objectif 1 : La modification des COV de la tagète lors de la combinaison des leviers

Aujourd'hui, les études sur le volatilome des plantes mycorhizées sont encore peu nombreuses, et les émissions de COV semblent fortement dépendre de la souche de CMA, de la génétique de l'espèce colonisée, de son stade phénologique et du contexte écosystémique (Davidson-Lowe et al., 2024; Ngumbi, 2025). Néanmoins, plusieurs études montrent que certains monoterpènes dont le limonène pourraient être émis spécifiquement suite à la colonisation par *R. irregularis* et participer au dialogue moléculaire établi lors de la symbiose (Carreón-Abud et al., 2015; Dreher et al., 2019).

Les résultats de ce stage semblent aller dans la même direction en montrant que la colonisation par *R. irregularis* des tagètes seules ou en co-culture avec les poivrons R- tend à augmenter l'émission de plusieurs monoterpènes : la tagétenone-cis, la pipéritone, le sabinène, l'allo-ocimène, le limonène, le terpinolène et le p-Cymen-8-ol. Dans ce cas, il semblerait qu'il s'agisse d'une réelle induction liée à la présence des CMA, et non simplement d'un effet de la croissance des plantes entraînant une augmentation de l'émission de chaque COV. En effet, les modalités R-/T et R-/T/M présentent une biomasse similaire. Pourtant, une augmentation significative de l'émission du limonène a été observé lors du passage de la modalité R-/T à la modalité R-/T/M. Le fait de ne pas observer la même tendance dans les modalités avec les poivrons R+ pourrait s'expliquer par la meilleure capacité de mycorhization de la variété Criptonio comparée à la variété DTLL. En effet, les COV identifiés semblent provenir majoritairement des tagètes. Or, l'ajout de CMA a permis aux poivrons R+ de mieux supporter la compétition envers les tagètes que les poivrons R-, ce qui a donc davantage limité la biomasse aérienne des tagètes. Ainsi, dans les modalités R+/T/M, la compétition avec le poivron a pu masquer l'effet des CMA, ce qui pourrait expliquer l'absence de tendance nette à l'augmentation de l'émission des monoterpènes.

Les monoterpènes participent également aux mécanismes de défenses des plantes contre les pucerons, de manière directe (répulsif, baisse de la fécondité, baisse de la prise alimentaire) et indirecte (attraction d'insectes prédateurs) (Regnault-Roger, 2013). En particulier, parmi ces COV identifiés, l'allo-ocimène, le limonène et le terpinolène sont reconnus pour leur activité répulsive contre *M. persicae* (Dardouri, 2018; Zhou et al., 2021). Le limonène, notamment, influence le comportement de *M. persicae* qui passe moins de temps à se nourrir sur des plantes en présence de ce monoterpène (B. Gabrys', 2005).

De plus, la pipéritone réduit la longévité et la fécondité de *M. persicae* (Petrakis et al., 2014). Le sabinène est également un COV pouvant attirer les nématodes entomopathogènes (Davidson-Lowe et al., 2024), mais nous n'avons pas trouvé d'information similaire concernant une éventuelle attraction des NàG.

Il est d'ailleurs intéressant d'avoir réussi à capter ces COV dans l'environnement aérien, car cela témoigne d'un dialogue systémique entre la plante et le champignon et non uniquement d'un dialogue localisé au niveau des racines. Malheureusement, il semble peu probable de pouvoir comparer directement les COV identifiés lors des captations aériennes avec les molécules qui seront retrouvées dans les exsudats racinaires. En effet, il s'agit majoritairement de monoterpènes, molécules très volatiles et donc potentiellement peu compatibles avec la LC-MS, technique de chimie analytique qui sera utilisée pour l'analyse des exsudats racinaires.

I.2 Objectif 2 : Les conséquences des émissions de tagètes sur le poivron

Par manque de temps, il n'a pas été possible de réaliser l'analyse statistique du contenu des extraits liquides des organes des poivrons et des tagètes en co-culture. Néanmoins, ces échantillons ont été récoltés, pesés et analysés. Il sera donc possible d'identifier les COV spécifiques des différentes modalités, après normalisation par la masse des échantillons.

De plus, les captations ont montré qu'aucun nouveau COV n'était émis lors de la co-culture. Ainsi, il ne semble pas que les émissions de tagètes aient eu un effet sur les COV de poivrons. Les variations d'abondance du nonanal et de l'heptanal semblent davantage liées aux variations de biomasse des poivrons, induites par la compétition avec les tagètes, qu'à un effet direct des COV de la PdS sur le volatilome des poivrons. En effet, l'abondance de ces deux COV semble suivre les variations de biomasse des poivrons. Ainsi, lorsque la biomasse du poivron R- diminue dans les modalités R-/T et R-/T/M, l'abondance de l'heptanal tend également à diminuer entre les modalités R-, R-/T, et R-/T/M. De même lorsque la biomasse du poivron R+ tend à augmenter entre les modalités R+/T et R+/T/M, l'abondance du nonanal diminue dans la modalité R+/T par rapport à la modalité R+, puis augmente à nouveau dans la modalité R+/T/M.

I.3 Objectif 3 : L'effet des CMA sur le poivron

Comme nous l'avons vu précédemment pour les tagètes cultivées seules ou en co-culture avec les poivrons, *R. irregularis* semble favoriser l'émission de certains monoterpènes. Le même phénomène est observé pour les deux génotypes de poivrons mycorhizés. En effet, dans les deux cas, la mycorhization est associée à une augmentation de l'émission du β -Ocimène, un monoterpène qui présente des propriétés insecticides (Dardouri, 2018).

I.4 Objectif 4 : Les conséquences de la combinaison de leviers sur les pucerons

L'année précédente Célia Heroguez et son équipe avait réalisé un essai au champ afin de tester la même combinaison de leviers sur une culture de poivron. Des suivis de bioagresseurs aériens avaient alors mis en évidence une réduction du taux d'infestation par les pucerons chez des poivrons résistants par rapport aux poivrons sensibles. Les tests de choix n'ont pas permis de corroborer les résultats obtenus en plein champ car ils n'ont pas mis en évidence de préférence des pucerons pour l'une des deux variétés de poivrons (seulement une différence marginale à 1 et 4h). Toutefois l'effet marginal observé couplé avec une multiplication par parthénogénèse des pucerons lors de l'essai terrain, pourrait aboutir à des différences significatives entre les deux variétés. Une autre hypothèse serait que, sur le terrain, certains ennemis naturels auraient pu être recrutés par les poivrons Criptonio, ce qui aurait pu contribuer à une diminution de l'infestation ou à une apparente préférence de *M. persicae* pour les poivrons sensibles.

Par ailleurs, des différences de variété de poivrons entre les deux expérimentations pourraient aussi expliquer la différence de résultats. En effet, si la variété résistante était bien Criptonio, comme dans la présente étude, la variété sensible n'était pas Doux Très Long des Landes.

En revanche, les leviers agroécologiques, à savoir la PdS seule ou mycorhizée, ont montré un effet répulsif intéressant contre *M. persicae*. Néanmoins, même si plusieurs COV potentiellement impliqués dans cet effet (limonène, allo-ocimène, terpinolène) ont été identifiés dans ces modalités, il est impossible de conclure quant à l'implication d'un seul ou de plusieurs de ces COV dans l'effet répulsif observé sur les pucerons. En effet, il est bien établi que des COV répulsifs lorsqu'ils sont testés isolément peuvent perdre leur efficacité lorsqu'ils sont intégrés dans un mélange olfactif complexe, et inversement, que certaines propriétés peuvent émerger de la combinaison de plusieurs composés (Webster et al., 2010).

Enfin, certains COV, stockés dans les structures spécialisées (trichomes en particulier), ne sont émis qu'en réponse à un stress biotique. Il est donc possible que de nouveaux COV aient été émis lors des tests de choix et qu'ils aient participé à l'effet répulsif observé dans les modalités combinant la PdS et les mycorhizes (Fontana et al., 2009). Néanmoins, si l'effet du stress biotique provoqué par *M. persicae* avait été ajouté à l'étude des émissions de COV lors de l'expérimentation 1, il aurait fallu doubler le nombre de modalités. Cela aurait entraîné une diminution du nombre de répétitions par modalité et ajouté des contraintes logistiques et temporelles, qui étaient déjà des facteurs limitants lors de ce stage

II. Perspectives

Il serait donc intéressant de réaliser une nouvelle expérimentation incluant simultanément les bioagresseurs aériens et telluriques. On pourrait, par exemple, ne conserver que les modalités R-/T/M et R+/T/M et faire varier le facteur bioagresseur selon 4 niveaux : absence de bioagresseur, présence de NàG, présence de pucerons, présence de NàG et de pucerons.

De plus, même si les captations ont montré qu'aucun nouveau COV n'était émis lors de la mise en co-culture, il sera intéressant de tester les modalités « tagète seule » ou « tagète seule mycorhizée » face à la modalité R- dans de nouvelles répétitions des tests de choix. Ceci permettrait notamment de tester l'hypothèse proposée par Dardouri (2018) selon laquelle c'est le cocktail de COV émis en situation de co-culture qui serait répulsif, plutôt que le volatilome des tagètes cultivées seules ou mycorhizées.

En parallèle, il serait également intéressant de tester cette hypothèse à partir des différents COV aux propriétés insecticides et identifiés lors de ce stage, émis par les tagètes et les poivrons, notamment le limonène, l'allo-ocimène, le terpinolène et le β -Ocimène. Pour cela, les différentes combinaisons pourraient être testées à l'aide d'un dispositif d'olfactomètre (Dardouri et al. 2019), une des techniques déjà utilisées à PSH.

Les résultats des analyses transcriptomiques n'ont malheureusement pas pu être obtenus dans les délais impartis pour être intégrés à ce rapport. Ils seront néanmoins analysés à la suite de ce stage. Dans tous les cas, le prélèvement du matériel génétique a probablement été réalisé trop tardivement au regard de la cinétique de développement de la mycorhization.

Il est ainsi peu probable que l'induction de gènes de défense consécutive à la pénétration du champignon dans la racine ait pu être détectée. En effet, chez les plantes mycorhizées, on observe fréquemment un phénomène de *priming* défensif : la colonisation par les CMA induit un état dans lequel les gènes impliqués dans les mécanismes de défense et les voies de biosynthèse sont plus rapidement et plus fortement inductibles (via des modifications épigénétiques, accumulation de facteurs de transcription inactifs prêts à être activés, etc.) (Pozo & Azcón-Aguilar, 2007). Cet état de transcription élevée n'est généralement pas maintenu et donc détectable après 24h à 48h.

Ainsi, avec un prélèvement réalisé 6 à 8 semaines après la pénétration des CMA dans les racines, il aurait été difficile de conclure quant à l'activation de gènes impliqués dans les voies de biosynthèse des monoterpénoïdes. On pourrait donc imaginer de réaliser une expérience dédiée à l'étude des COV induit par la mycorhization en suivant de manière précise le développement de la colonisation racinaire. Des prélèvements pourraient alors être réalisés au moment de la pénétration des CMA dans les racines, (par captation active des COV et prélèvement d'exsudats racinaires).

Enfin, il reste aussi à analyser les échantillons congelés d'exsudats racinaires récoltés au cours de l'expérimentation. Ces analyses permettront de déterminer si la combinaison des leviers agro-écologiques exerce des effets similaires sur les émissions aériennes et racinaires, c'est-à-dire si elle induit principalement des modifications d'abondance des molécules déjà présentes, sans nécessairement entraîner l'apparition de nouvelles molécules. Après identification des molécules, ces échantillons pourront également être utilisés pour réaliser des tests comportementaux sur les NàG. Les résultats seront particulièrement intéressants car, contrairement aux captations de COV, les échantillons utilisés pour les analyses chimiques et tests comportementaux sur le bioagresseur cible seront identiques. Il sera ainsi plus facile de conclure quant à l'implication de molécules candidate dans la lutte contre les NàG.

Partie V

Enrichissement personnel :

A travers ce stage, j'ai pu approfondir de nombreuses connaissances scientifiques et compétences techniques sur les COV, les pucerons ou les NàG. Je retiens notamment l'importance d'acquérir des compétences dans la clarification d'un sujet. En effet, je me suis rendu compte de la nécessité de tenir un planning précis dans l'organisation d'une expérimentation en condition semi-contrôlée, de l'importance d'entretenir une bonne communication entre les membres d'une équipe (technicien.nes, ingénieur.e.s, chercheur.euse.s,) ainsi que de la capacité des expérimentateur.ices à créer ou à s'adapter selon chaque situation.

J'ai également continué à renforcer des compétences plus classiques comme la communication orale ou écrite grâce à des présentations réalisées durant le stage et le traitement statistiques des données.

De plus, ce stage m'a confirmé l'envie d'entrer dans le monde de la recherche qui se concrétisera prochainement.

Partie VI

Bibliographie :

- Adamczyk, S. (2016). The role of terpenes in carbon and nitrogen cycling in boreal forest soils. *Dissertationes Forestales*, 2016, 1. <https://doi.org/10.14214/df.228>
- Ahn, J. J., Kim, B.-H., Kim, J.-E., & Kim, C. H. (2025). Impact of Constant and Fluctuating Temperatures on Development and Fertility of *Myzus persicae* Sulzer (Hemiptera : Aphididae). *Entomological Research*, 55(3), e70033. <https://doi.org/10.1111/1748-5967.70033>
- André, A. (2024). (PDF) *Companion plants to enhance AMF diversity and protect peppers against root-knot nematodes*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/390594766_Companion_plants_to_enhance_AMF_diversity_and_protect_peppers_against_root-knot_nematodes
- Anwardeen, N. R., Diboun, I., Mokrab, Y., Althani, A. A., & Elrayess, M. A. (2023). Statistical methods and resources for biomarker discovery using metabolomics. *BMC Bioinformatics*, 24(1), 250. <https://doi.org/10.1186/s12859-023-05383-0>
- Baghi, R. (2013). *Émissions biogéniques de composés organiques volatils en région méditerranéenne : Développement instrumental, mesures et modélisation* [Thesis, Toulouse 3]. <https://theses.fr/2013TOU30132>
- Barbary, A., Palloix, A., Fazari, A., Marteu, N., Castagnone-Sereno, P., & Djian-Caporalino, C. (2014). The plant genetic background affects the efficiency of the pepper major nematode resistance genes Me1 and Me3. *TAG. Theoretical and Applied Genetics. Theoretische Und Angewandte Genetik*, 127(2), 499-507. <https://doi.org/10.1007/s00122-013-2235-1>
- Barrès, B., & Mottet, C. (2017). *La résistance aux néonicotinoïdes chez le puceron vert du pêcher*.
- Bass, C., Puinean, A. M., Zimmer, C. T., Denholm, I., Field, L. M., Foster, S. P., Gutbrod, O., Nauen, R., Slater, R., & Williamson, M. S. (2014). The evolution of insecticide resistance in the peach potato aphid, *Myzus persicae*. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 51, 41-51. <https://doi.org/10.1016/j.ibmb.2014.05.003>

- Ben Issa, R., Gautier, H., Costagliola, G., & Gomez, L. (2016). Which companion plants affect the performance of green peach aphid on host plants? Testing of 12 candidate plants under laboratory conditions. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 160(2), 164-178. <https://doi.org/10.1111/eea.12473>
- Bernard, G. C., Egnin, M., & Bonsi, C. (2017). The Impact of Plant-Parasitic Nematodes on Agriculture and Methods of Control. In *Nematology—Concepts, Diagnosis and Control*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.68958>
- Blancard, Berton, & Ryckewaert. (2026). *Pucerons*.
<https://ephytia.inrae.fr/fr/C/23155/Tropileg-Pucerons>
- Blancard, D. (2023). *Meloidogyne spp. Nématodes à galles*.
<https://ephytia.inrae.fr/fr/C/23095/Tropileg-Nematodes-a-galles>
- Boulestreau, Y. (2021). *Une démarche de co-conception d'innovations du système de culture au système agri-alimentaire pour une gestion agroécologique des bioagresseurs telluriques en maraîchage provençal* [Theses, Université d'Avignon].
<https://doi.org/10.70675/5b545c32z7512z4b09z90fczce712dd9ab1c>
- Bragard, C., Gonthier, P., Jaques, J., Justesen, A., Macleod, A., Magnusson, C., Milonas, P., Navas Cortés, J., Parnell, S., Potting, R., Thulke, H.-H., Van der Werf, W., Vicent, A., Yuen, J., Zappalà, L., Dehnen-Schmutz, K., Migheli, Q., Stefani, E., Vloutoglou, I., & Reignault, P. (2021). Pest categorisation of carrot thin leaf virus. *EFSA Journal*, 19. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2021.6931>
- Brooks, M. E., Kristensen, K., Johannes van Benthem, K., & Magnusson, A. (2017). glmmTMB Balances Speed and Flexibility Among Packages for Zero-inflated Generalized Linear Mixed Modeling. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.32614/RJ-2017-066>
- Cao, H.-H., Liu, H.-R., Zhang, Z.-F., & Liu, T.-X. (2016). The green peach aphid *Myzus persicae* perform better on pre-infested Chinese cabbage *Brassica pekinensis* by enhancing host plant nutritional quality. *Scientific Reports*, 6(1), 21954. <https://doi.org/10.1038/srep21954>

- Carreón-Abud, Y., Torres-Martínez, R., Farfán-Soto, B., Hernández-García, A., Ríos-Chávez, P., Bello-González, M. Á., Martínez-Trujillo, M., & Salgado-Garciglia, R. (2015). *Arbuscular mycorrhizal symbiosis increases the content of volatile terpenes and plant performance in Satureja macrostema (Benth.) Briq.*
- Castagnone-Sereno, P., Mulet, K., & Iachia, C. (2015). Tracking changes in life-history traits related to unnecessary virulence in a plant-parasitic nematode. *Ecology and Evolution*, 5. <https://doi.org/10.1002/ece3.1643>
- Celik, I., Sogut, M., Özkaynak, E., Doganlar, S., & Frary, A. (2016). Physical mapping of NBS-coding resistance genes to the Me-gene cluster on chromosome P9 reveals markers tightly linked to the N gene for root-knot nematode resistance in pepper. *Molecular Breeding*, 36, 137. <https://doi.org/10.1007/s11032-016-0560-1>
- Chandra, P., Sao, R., Gautam, S. K., & Poddar, A. N. (2010). *Initial Population Density and its Effect on the Pathogenic Potential and Population Growth of the Root Knot Nematode Meloidogyne incognita in Four Species of Cucurbits.* <https://doi.org/10.3923/ajppaj.2010.1.15>
- Collange, B., Navarrete, M., Peyre, G., Mateille, T., & Et., A. (2011). Root-knot nematode (Meloidogyne) management in vegetable crop production : The challenge of an agronomic system analysis. *Crop Protection*. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2011.04.016>
- Dardouri, T. (2018). *Implication des composés organiques volatils dans la capacité des plantes de service à perturber le comportement et les performances de Myzus persicae (sulzer) le puceron vert du verger* [Phdthesis, Université d'Avignon]. <https://doi.org/10.70675/b196ae8dz6415z468cz86cbzf35495afeca1>
- Dardouri, T., Gautier, H., Ben Issa, R., Costagliola, G. and 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. <https://doi.org/10.1002/ps.5271>

- Davidson-Lowe, E., Zainuddin, N., Trase, O., McCarthy, N., & Ali, J. G. (2024). Arbuscular mycorrhizal fungi influence belowground interactions between a specialist root-feeder and its natural enemy. *Journal of Invertebrate Pathology*, 207, 108200.
<https://doi.org/10.1016/j.jip.2024.108200>
- De Guiran, G. (1983). *Nematodes, les ennemis invisibles. Les nematodes parasites des cultures en pays temperes* (p. 42 p.). La Littorale. <https://hal.inrae.fr/hal-02853991>
- Dedryver, C. A., Le Ralec, A., & Fabre, F. (2010). The conflicting relationships between aphids and men : A review of aphid damage and control strategies. *Comptes Rendus - Biologies*, 333(6-7), 539-553. <https://doi.org/10.1016/j.crv.2010.03.009>
- Dicke, M., & Baldwin, I. T. (2010). The evolutionary context for herbivore-induced plant volatiles : Beyond the 'cry for help'. *Trends in Plant Science, Special Issue: Induced biogenic volatile organic compounds from plants*, 15(3), 167-175.
<https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.12.002>
- Djian-Caporalino, C. (2009). *Gestion des nematodes a galles : Lutte conventionnelle et lutttes alternatives. L'atout des plantes pieges*. https://www.supagro.fr/ress-tice/EcoHort/Uved/PratiqueAgroecologiqueCultureMaraichere/res/Caporalino_2009_TK_altern.pdf
- Djian-Caporalino, C., Caravel, C., Rhino, B., Lavoit, A.-V., Villeneuve, F., Fournet, S., Gautier, H., Chave, M., Cortesero, A.-M., Nicot, P. C., Romeo, M., Delporte, M., & Berthelot, C. (2020). *Agrosystèmes légumiers : Les plantes de service contre les bioagresseurs*.
- Djian-Caporalino, C., Fazari, A., Arguel, M. J., Vernie, T., VandeCastele, C., Faure, I., Brunoud, G., Pijarowski, L., Palloix, A., Lefebvre, V., & Abad, P. (2007). Root-knot nematode (*Meloidogyne* spp.) Me resistance genes in pepper (*Capsicum annuum* L.) are clustered on the P9 chromosome. *TAG. Theoretical and Applied Genetics. Theoretische Und Angewandte Genetik*, 114(3), 473-486.
<https://doi.org/10.1007/s00122-006-0447-3>

- Djian-Caporalino, C., & Lavoit, A.-V. (2024). Les plantes de services. Vers de nouveaux agroécosystèmes. *éditions Quae*, 388.
- Djian-Caporalino, C., Navarrete, M., Fazari, A., & Baily-Bechet, M. (2019). Conception et évaluation de systèmes de culture maraîchers méditerranéens innovants pour gérer les nématodes à galles = Design and assessment of innovative Mediterranean vegetable cropping systems to manage root-knot nematodes. *ResearchGate*.
https://www.researchgate.net/publication/332188116_Conception_et_evaluation_de_systemes_de_culture_maraichers_mediterraneens_innovants_pour_gerer_les_nematodes_a_galles_Design_and_assessment_of_innovative_Mediterranean_vegetable_cropping_systems_to_ma
- Djian-Caporalino, C., Palloix, A., Fazari, A., Marteu, N., Barbary, A., Abad, P., Sage-Palloix, A.-M., Mateille, T., Risso, S., Lanza, R., Taussig, C., & Castagnone-Sereno, P. (2014). Pyramiding, alternating or mixing : Comparative performances of deployment strategies of nematode resistance genes to promote plant resistance efficiency and durability. *BMC Plant Biology*, 14(1), 53. <https://doi.org/10.1186/1471-2229-14-53>
- Dreher, D., Baldermann, S., Schreiner, M., & Hause, B. (2019). An arbuscular mycorrhizal fungus and a root pathogen induce different volatiles emitted by *Medicago truncatula* roots. *Journal of Advanced Research, Special Issue on Plant Microbiome*, 19, 85-90.
<https://doi.org/10.1016/j.jare.2019.03.002>
- Emden, H. F. van, & Harrington, R. (2017). *Aphids as Crop Pests, 2nd Edition*. CABI.
- Francis, F., Lognay, G., & Haubruge, E. (2004). Olfactory Responses to Aphid and Host Plant Volatile Releases : (E)- β -Farnesene an Effective Kairomone for the Predator *Adalia bipunctata*. *Journal of Chemical Ecology*, 30(4), 741-755.
<https://doi.org/10.1023/B:JOEC.0000028429.13413.a2>
- Giordanengo, P., Febvay, Yvan, G., & Rahbé, Y. (2023). *Manipulation de la plante*.
<https://encyclopedie-pucerons.hub.inrae.fr/pucerons-et-recherche/interactions-plantes-pucerons/manipulation-de-la-plante>

- Guenther, A., Hewitt, C. N., Erickson, D., Fall, R., Geron, C., Graedel, T., Harley, P., Klinger, L., Lerdau, M., Mckay, W. A., Pierce, T., Scholes, B., Steinbrecher, R., Tallamraju, R., Taylor, J., & Zimmerman, P. (1995). A global model of natural volatile organic compound emissions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 100(D5), 8873-8892. <https://doi.org/10.1029/94JD02950>
- Guichard, L., Dedieu, F., Jeuffroy, M.-H., Meynard, J.-M., Reau, R., & Savini, I. (2017). Le plan Ecophyto de réduction d'usage des pesticides en France : Décryptage d'un échec et raisons d'espérer. *Cahiers Agricultures*, 26(1), 14002. <https://doi.org/10.1051/cagri/2017004>
- Gurr, G. M., Wratten, S. D., & Luna, J. M. (2003). Multi-function agricultural biodiversity : Pest management and other benefits. *Basic and Applied Ecology*, 4(2), 107-116. <https://doi.org/10.1078/1439-1791-00122>
- Hajihassani, A., Rutter, W. B., & Luo, X. (2019). Resistant Pepper Carrying N, Me1, and Me3 have Different Effects on Penetration and Reproduction of Four Major Meloidogyne species. *Journal of Nematology*, 51, e2019-20. <https://doi.org/10.21307/jofnem-2019-020>
- Han, K., Hua, J., Zhang, Q., Gao, Y., Liu, X., Cao, J., & Huo, N. (2021). Multi-Residue Analysis of Fipronil and Its Metabolites in Eggs by SinChERS-Based UHPLC-MS/MS. *Food Science of Animal Resources*, 41(1), Article 1. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2020.e76>
- Herrbach, E. (1985). Rôle des sémiochimiques dans les relations pucerons-plantes. I. - Généralités et phéromones d'alarme. *Agronomie*, 5(3), 283-286. <https://doi.org/10.1051/agro:19850311>
- Hervé, M. R., Nicolè, F., & Lê Cao, K.-A. (2018). Multivariate Analysis of Multiple Datasets : A Practical Guide for Chemical Ecology. *Journal of Chemical Ecology*, 44(3), 215-234. <https://doi.org/10.1007/s10886-018-0932-6>

- Holopainen, J. K., & Gershenzon, J. (2010). Multiple stress factors and the emission of plant VOCs. *Trends in Plant Science, Special Issue: Induced biogenic volatile organic compounds from plants*, 15(3), 176-184. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2010.01.006>
- Jacquet, F., Jeuffroy, M.-H., Jouan, J., Le Cadre, E., Malausa, T., Reboud, X., & Huyghe, C. (2022). *Zéro pesticide*. éditions Quae. <https://doi.org/10.35690/978-2-7592-3311-3>
- Jamin, A. (2022). *The chemical ecology of a model aphid pest, Myzus persicae, and its natural enemies*. Keele University.
- Jouhet, E., Vincent, F., Lahens, M., Blomme, L., & Giuliano, S. (2022). Plantes de service. In INRAE (Éd.), *Dictionnaire d'Agroécologie*. <https://doi.org/10.17180/xxv9-mx71>
- Kang, Z.-W., Liu, F.-H., Zhang, Z.-F., Tian, H.-G., & Liu, T.-X. (2018). Volatile β -Ocimene Can Regulate Developmental Performance of Peach Aphid *Myzus persicae* Through Activation of Defense Responses in Chinese Cabbage *Brassica pekinensis*. *Frontiers in Plant Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00708>
- Liu, J., Maldonado-Mendoza, I., Lopez-Meyer, M., Cheung, F., Town, C. D., & Harrison, M. J. (2007). Arbuscular mycorrhizal symbiosis is accompanied by local and systemic alterations in gene expression and an increase in disease resistance in the shoots. *The Plant Journal*, 50(3), 529-544. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2007.03069.x>
- Loreto, F., & Schnitzler, J.-P. (2010). Abiotic stresses and induced BVOCs. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.12.006>
- Maffei, M. E. (2010). Sites of synthesis, biochemistry and functional role of plant volatiles. *South African Journal of Botany, Chemical diversity and biological functions of plant volatiles*, 76(4), 612-631. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2010.03.003>
- Matson, P. A., Parton, W. J., Power, A. G., & Swift, M. J. (1997). Agricultural Intensification and Ecosystem Properties. *Science*, 277(5325), 504-509. <https://doi.org/10.1126/science.277.5325.504>
- N'deye, M. F., Fabarez, A., Hedan, M., Macou, L., Gendron, P., Jacquot, E., Anton, S., & Cortesero, A.-M. (2026). Potential of Chinese Cabbage and Oat as Companion Plants to Protect Sugar Beets Against the Green Peach Aphid, *Myzus persicae*.

- Entomologia Experimentalis et Applicata*, 174(3), 225-235.
<https://doi.org/10.1111/eea.70055>
- Ngumbi, E. N. (2025). Beneficial soil microbes as drivers of plant–insect interactions : A perspective. *Current Opinion in Insect Science*, 72, 101432.
<https://doi.org/10.1016/j.cois.2025.101432>
- Niinemets, Ü., Loreto, F., & Reichstein, M. (2004). Physiological and physicochemical controls on foliar volatile organic compound emissions. *Trends in Plant Science*, 9(4), 180-186. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2004.02.006>
- Njekete, C., Caravel, C., Massol, F., Lavoit, A.-V., & Djian-Caporalino, C. (2025). Screening and host suitability assessment of nematicidal plants for root-knot nematode control. *Nematology*, 27(5), 533-548. <https://doi.org/10.1163/15685411-bja10406>
- Ollivier, M. (2026). *Grands principes de la protection des cultures : De la protection intégrée à la protection agroécologique des cultures*. https://moodle.inp-toulouse.fr/pluginfile.php/97514/mod_resource/content/0/PAEC_M.OLLIVIER_2025.pdf
- Petrakis, E. A., Kimbaris, A. C., Perdakis, D. Ch., Lykouressis, D. P., Tarantilis, P. A., & Polissiou, M. G. (2014). Responses of *Myzus persicae* (Sulzer) to three Lamiaceae essential oils obtained by microwave-assisted and conventional hydrodistillation. *Industrial Crops and Products*, 62, 272-279.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.08.041>
- Pickett, J., Wadhams, L., Woodcock, C., & Hardie, J. (2003). The Chemical Ecology of Aphids. *Annual Review of Entomology*, 37, 67-90.
<https://doi.org/10.1146/annurev.en.37.010192.000435>
- Piedra Buena, A., Díez-Rojo, M. Á., López-Pérez, J. A., Robertson, L., Escuer, M., & Bello, A. (2008). Screening of *Tagetes patula* L. on different populations of *Meloidogyne*. *Crop Protection*, 27(1), 96-100. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2007.04.011>

- Possell, M., & Loreto, F. (2013). The Role of Volatile Organic Compounds in Plant Resistance to Abiotic Stresses : Responses and Mechanisms. In *ResearchGate*.
https://doi.org/10.1007/978-94-007-6606-8_8
- Pozo, M. J., & Azcón-Aguilar, C. (2007). Unraveling mycorrhiza-induced resistance. *Current Opinion in Plant Biology, Special Issue on Biotic Interactions*, 10(4), 393-398.
<https://doi.org/10.1016/j.pbi.2007.05.004>
- PSH. (2025). CAP ZERO PHYTO. <https://psh.paca.hub.inrae.fr/contrats-et-projets/projets-nationaux/pilotes/cap-zero-phyto>
- Regnault-Roger, C. (2013). Essential Oils in Insect Control. In *Natural Products* (p. 4087-4107). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-22144-6_181
- Regnault-Roger, C., & Vincent, C. (2011). *Essential Oils in Insect Control : Low-Risk Products in a High-Stakes World | Annual Reviews*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1146/annurev-ento-120710-100554>
- Rodriguez-Heredia, M., Djian-Caporalino, C., Ponchet, M., & Chave, M. (2020). Protective effects of mycorrhizal association in tomato and pepper against *Meloidogyne incognita* infection, and mycorrhizal networks for early mycorrhization of low mycotrophic plants. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.14601/Phyto-11637>
- Rossi, M., Goggin, F. L., Milligan, S. B., Kaloshian, I., Ullman, D. E., & Williamson, V. M. (1998). The nematode resistance gene Mi of tomato confers resistance against the potato aphid. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 95(17), 9750-9754.
<https://doi.org/10.1073/pnas.95.17.9750>
- Salehi, B., Valussi, M., Morais-Braga, M. F. B., Carneiro, J. N. P., Leal, A. L. A. B., Coutinho, H. D. M., Vitalini, S., Kręgiel, D., Antolak, H., Sharifi-Rad, M., Silva, N. C. C., Yousaf, Z., Martorell, M., Iriti, M., Carradori, S., & Sharifi-Rad, J. (2018). Tagetes spp. Essential Oils and Other Extracts : Chemical Characterization and Biological Activity. *Molecules*, 23(11), 2847. <https://doi.org/10.3390/molecules23112847>

- Selosse, M.-A. (2017). *Jamais seul : Ces microbes qui construisent les plantes, les animaux et les civilisations*. Actes Sud Nature.
- Sharma, S., Sood, A. K., & Ghongade, D. S. (2022). Assessment of losses inflicted by the aphid, *Myzus persicae* (Sulzer) to sweet pepper under protected environment in north western Indian Himalayan region. *Phytoparasitica*, 50(1), 51-62.
<https://doi.org/10.1007/s12600-021-00951-7>
- Shivalingaswamy, T. M., Udayakumar, A., & Mani, M. (2022). Pests and Their Management in Chillies and Bell Pepper. In M. Mani (Éd.), *Trends in Horticultural Entomology* (p. 971-982). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0343-4_39
- Sikandar, A., Zhang, M. Y., Wang, Y. Y., Zhu, X. F., Liu, X. Y., Fan, H. Y., Xuan, Y. H., Chen, L. J., & Duan, Y. X. (2020). REVIEW ARTICLE : MELOIDOGYNE INCOGNITA (ROOT-KNOT NEMATODE) A RISK TO AGRICULTURE. *Applied Ecology and Environmental Research*, 18(1), 1679-1690.
https://doi.org/10.15666/aeer/1801_16791690
- Storer, J. R., Young, S., & Hardie, J. M. (1999). Three-dimensional analysis of aphid landing behaviour in the laboratory and field. *Physiological Entomology*, 24(3), 271-277.
<https://doi.org/10.1046/j.1365-3032.1999.00142.x>
- Stupar, S., Dragičević, M., Tešević, V., Stanković-Jeremić, J., Maksimović, V., Ćosić, T., Devrnja, N., Tubić, L., Cingel, A., Vinterhalter, B., Ninković, S., & Savić, J. (2021). Transcriptome Profiling of the Potato Exposed to French Marigold Essential Oil with a Special Emphasis on Leaf Starch Metabolism and Defense against Colorado Potato Beetle. *Plants*, 10(1), 172. <https://doi.org/10.3390/plants10010172>
- Tarigan, S. I., Toth, S., Szalai, M., Kiss, J., Turoczi, G., & Toepfer, S. (2022). Biological control properties of microbial plant biostimulants. A review. *Biocontrol Science and Technology*, 32(12), 1351-1371. <https://doi.org/10.1080/09583157.2022.2129589>
- Thies, J. A. (2011). Virulence of *Meloidogyne incognita* to expression of N gene in pepper. *Journal of Nematology*, 43(2), 90-94.

- Trouvelot, S., Wipf, D., Lauvergeat, V., Bonneau, L., Dal, F., Tuinen, D. van, & Courty, P.-E. (2021). Services écosystémiques rendus par la symbiose mycorhizienne à arbuscule au vignoble. *La revue des œnologues et des techniques vitivinicoles et œnologiques*, 178, 27.
- Turpeau, E., Chaubet, B., & Hullé, M. (2009). *Cycles biologiques des pucerons*. <https://encyclopedie-pucerons.hub.inrae.fr/qu-est-ce-qu-un-puceron/cycles-biologiques>
- Turpeau, E., Chaubet, B., & Hullé, M. (2024). *Transmission de virus*. Encyclop'Aphid. <https://encyclopedie-pucerons.hub.inrae.fr/pucerons-et-agriculture/transmission-de-virus>
- van den Berg, R. A., Hoefsloot, H. C., Westerhuis, J. A., Smilde, A. K., & van der Werf, M. J. (2006). Centering, scaling, and transformations : Improving the biological information content of metabolomics data. *BMC Genomics*, 7(1), 142. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-7-142>
- Vasudevan, P., Kashyap, S., & Sharma, S. (1997). Tagetes : A multipurpose plant. *Bioresource Technology*. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(97\)00101-6](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(97)00101-6)
- Webster, B., Bruce, T., Pickett, J., & Hardie, J. (2010). Volatiles functioning as host cues in a blend become nonhost cues when presented alone to the black bean aphid. *Animal Behaviour*, 79(2), 451-457. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2009.11.028>
- Wold, S., Sjöström, M., & Eriksson, L. (2001). PLS-regression : A basic tool of chemometrics. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, PLS Methods*, 58(2), 109-130. [https://doi.org/10.1016/S0169-7439\(01\)00155-1](https://doi.org/10.1016/S0169-7439(01)00155-1)
- Wu, W., Dong, Y., Xie, Y., Xue, M., Zhang, J., Wei, H., Ji, G., & Wang, Y. (2020). Marigold (*Tagete erecta*) : An Effective Meloidogyne incognita Trap Plant. *International Journal of Agriculture and Biology*, 25(2). <https://doi.org/10.17957/IJAB/15.1666>
- Zhou, L., Li, C., Zhang, Z., Li, X., Dong, Y., & Cao, H. (2021). Biological activity and safety evaluation of monoterpenes against the peach aphid (*Myzus persicae* Sulzer)

(Hemiptera : Aphididae). *International Journal of Tropical Insect Science*, 41(4),
2747-2754. <https://doi.org/10.1007/s42690-021-00454-2>

Partie VII

Annexes :

Annexe 1 : Protocole coloration des mycorhizes

Nettoyage des racines :

- Recouvrir les racines de KOH 10%
- Mettre au bain marie à 80°C pendant 30 min
- Rincer abondamment

Décoloration des racines de poivron :

- Recouvrir de KOH 10% avec 1 mL de de H2O2 à 30%
- Mettre au bain marie à 80°C pendant 10min

Décoloration des racines de tagète :

- Recouvrir de KOH 10% sans H2O2 pendant 10 min
- Mettre au bain marie à 80°C pendant 10 min

Coloration des racines de poivron :

- Recouvrir les racines dans de l'encre bleue du commerce avec du HCL
- Mettre au bain marie à 80°C pendant 4-5 min
- Neutraliser avec du HCl 1% qui nettoie le KOH

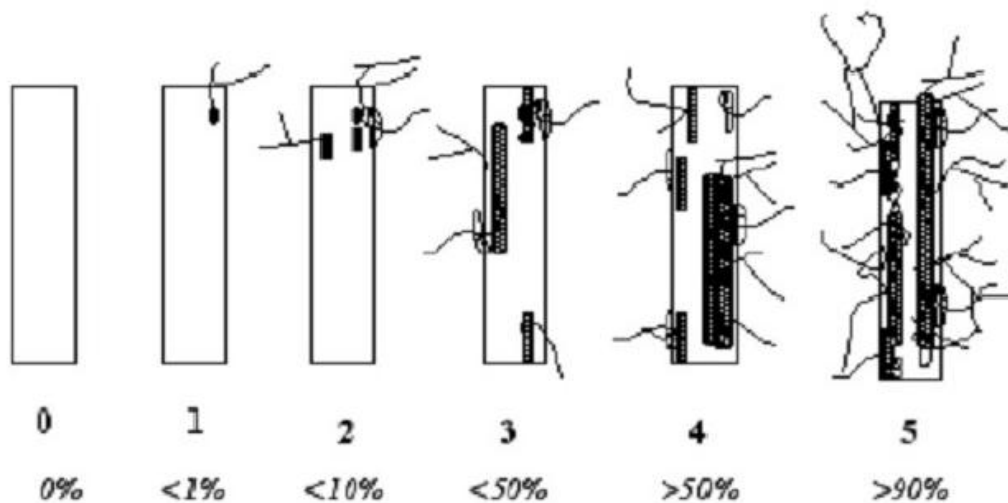
Coloration des racines de tagète :

- Recouvrir les racines dans de l'encre bleue du commerce avec du HCL
- Mettre au bain marie à 80°C pendant 10 min
- Neutraliser avec du HCl 1% qui nettoie le KOH

Annexe 2 : Quantification mycorrhizienne selon la méthode Trouvelot (1986)

A

SCORING MYCORRHIZAL COLONIZATION IN CLASSES FROM 0 TO 5



SCORING ARBUSCULE ABUNDANCE

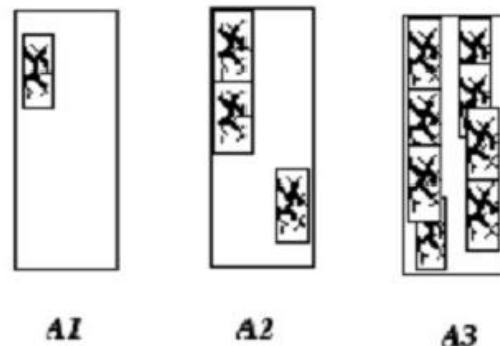
B

None : A0

Few arbuscules : A1

Frequent : A2

Abundant : A3



Annexe 3 : Protocole de nettoyage des béciers

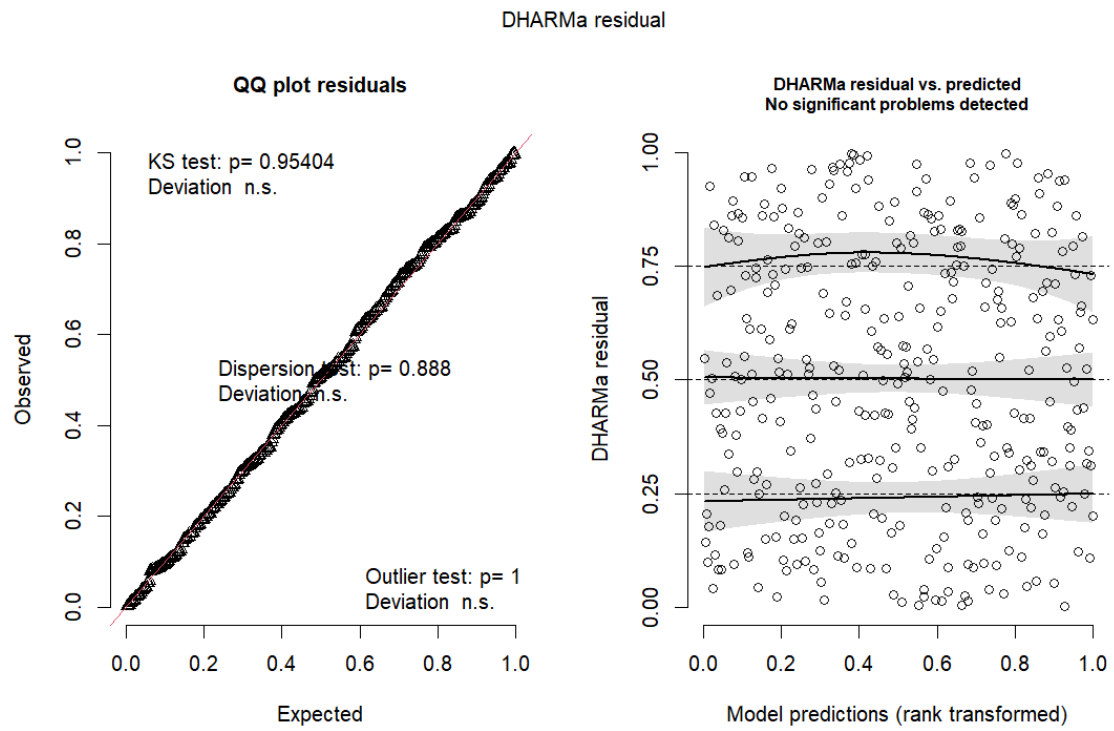
- Eau ultra pure
- Acétonitrile
- Méthanol
- Isopropanol
- Eau ultra pure

Annexe 4 : Tableau des notes attribués aux échantillons d'ARN

Une note de A/B signifie que la quantité et la qualité de l'ARN permettra de réaliser le séquençage tandis qu'une note de C ou D ne montre pas une assez bonne intégrité pour le séquençage

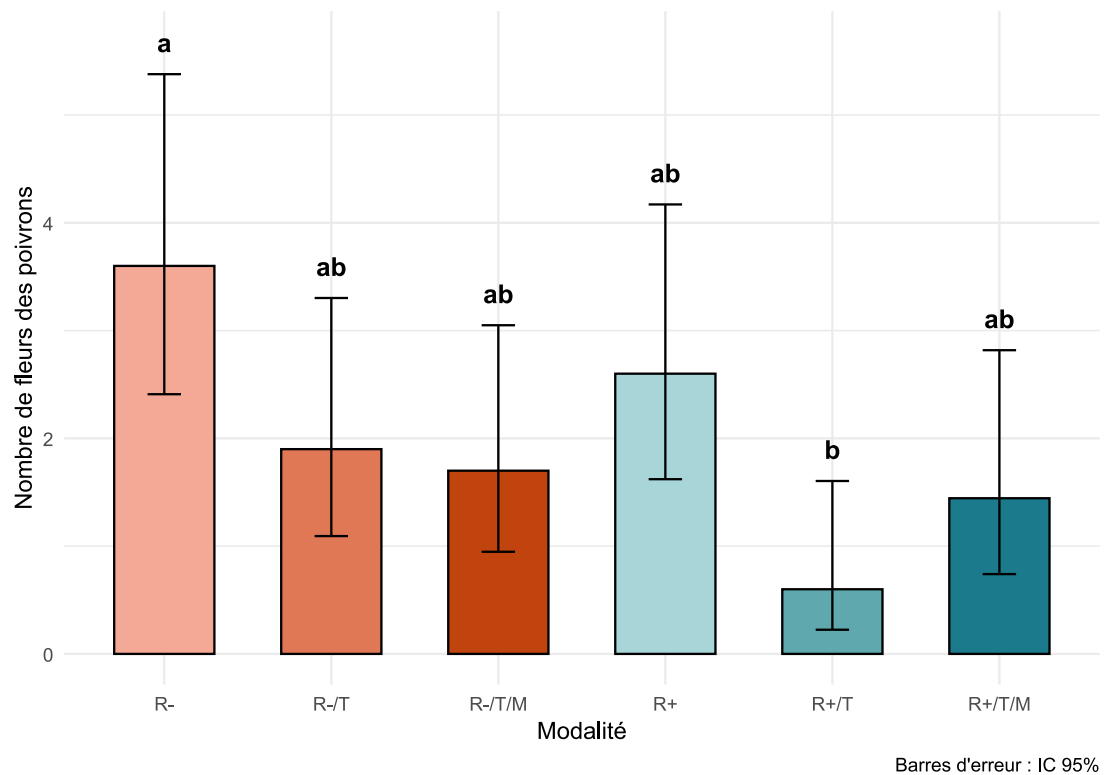
modalite	organe	numéro_la	Grade_BMKGene		modalite	organe	numéro_lab	Grade_BMKGene
R-(C3)	feuille	29172	D		R-/T	feuille	29166	C
R-(C3)	feuille	29180	D		R-/T	feuille	29196	D
R-(C3)	feuille	29206	D		R-/T	feuille	29202	C
R-(C3)	feuille	29208	C		R-/T	feuille	29910	C
R-(C3)	racine	29173	A		R-/T	racine	29167	A
R-(C3)	racine	29181	B		R-/T	racine	29197	A
R-(C3)	racine	29191	A		R-/T	racine	29213	B-
R-(C3)	racine	29209	A		R-/T	racine	29911	A
R-(C4)	feuille	29872	D		R+/T	feuille	29162	B-
R-(C4)	feuille	29884	D		R+/T	feuille	29164	B-
R-(C4)	feuille	29892	C		R+/T	feuille	29176	C
R-(C4)	feuille	29896	D		R+/T	feuille	29188	C
R-(C4)	racine	29893	B-		R+/T	racine	29163	A
R-(C4)	racine	29897	C		R+/T	racine	29165	A
R-(C4)	racine	29901	B-		R+/T	racine	29177	A
R-(C4)	racine	29907	C		R+/T	racine	29199	A
R-/M	feuille	29874	D		R+(C3)	feuille	29168	C
R-/M	feuille	29878	D		R+(C3)	feuille	29182	C
R-/M	feuille	29888	C		R+(C3)	feuille	29192	C
R-/M	feuille	29898	D		R+(C3)	feuille	29912	C
R-/M	racine	29879	B-		R+(C3)	racine	29169	A
R-/M	racine	29889	B-		R+(C3)	racine	29171	A
R-/M	racine	29899	B-		R+(C3)	racine	29183	A
R-/M	racine	29903	B-		R+(C3)	racine	29193	A
R-/T/M	feuille	29160	C		R+(C4)	feuille	29876	D
R-/T/M	feuille	29174	D		R+(C4)	feuille	29886	D
R-/T/M	feuille	29200	C		R+(C4)	feuille	29890	C
R-/T/M	feuille	29908	C		R+(C4)	feuille	29894	C
R-/T/M	racine	29161	B		R+(C4)	racine	29883	C
R-/T/M	racine	29175	A		R+(C4)	racine	29887	B-
R-/T/M	racine	29201	A		R+(C4)	racine	29895	B-
R-/T/M	racine	29205	A		R+(C4)	racine	29905	B-

Annexe 5 : Validation du modèle de test de choix des pucerons grâce aux résidus de DHARMA

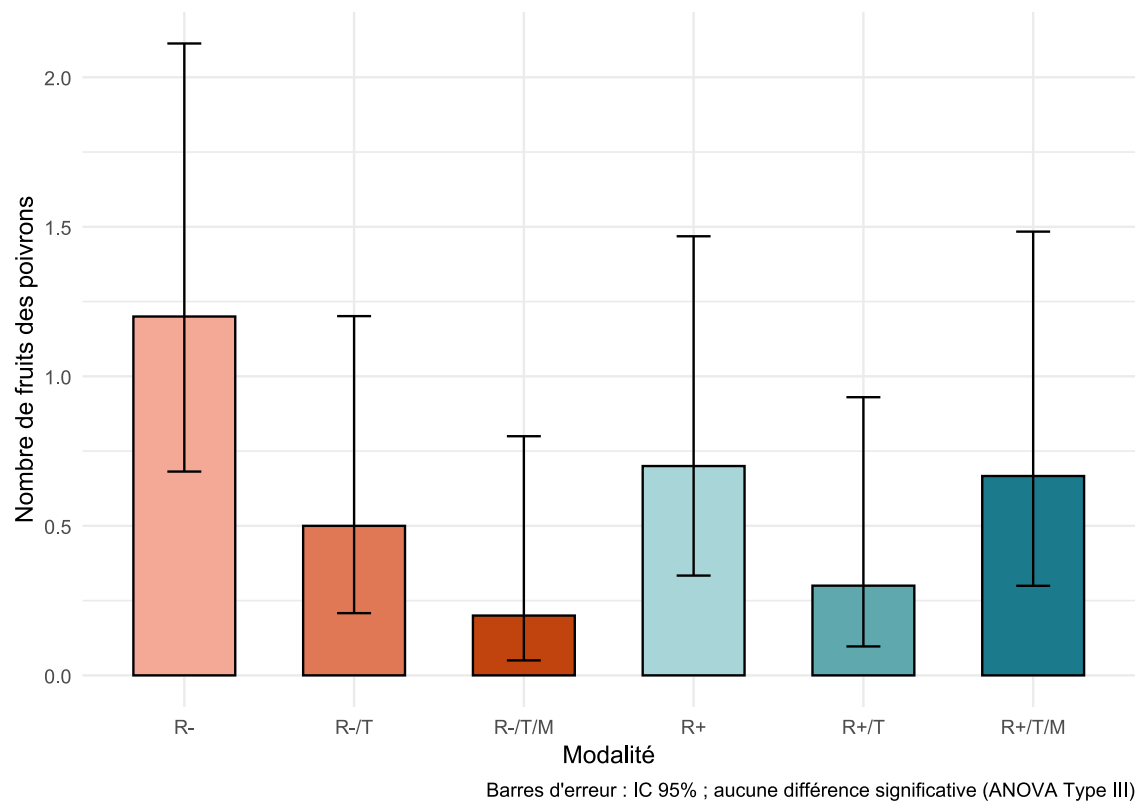


Annexe 6 : Annexes biomasses

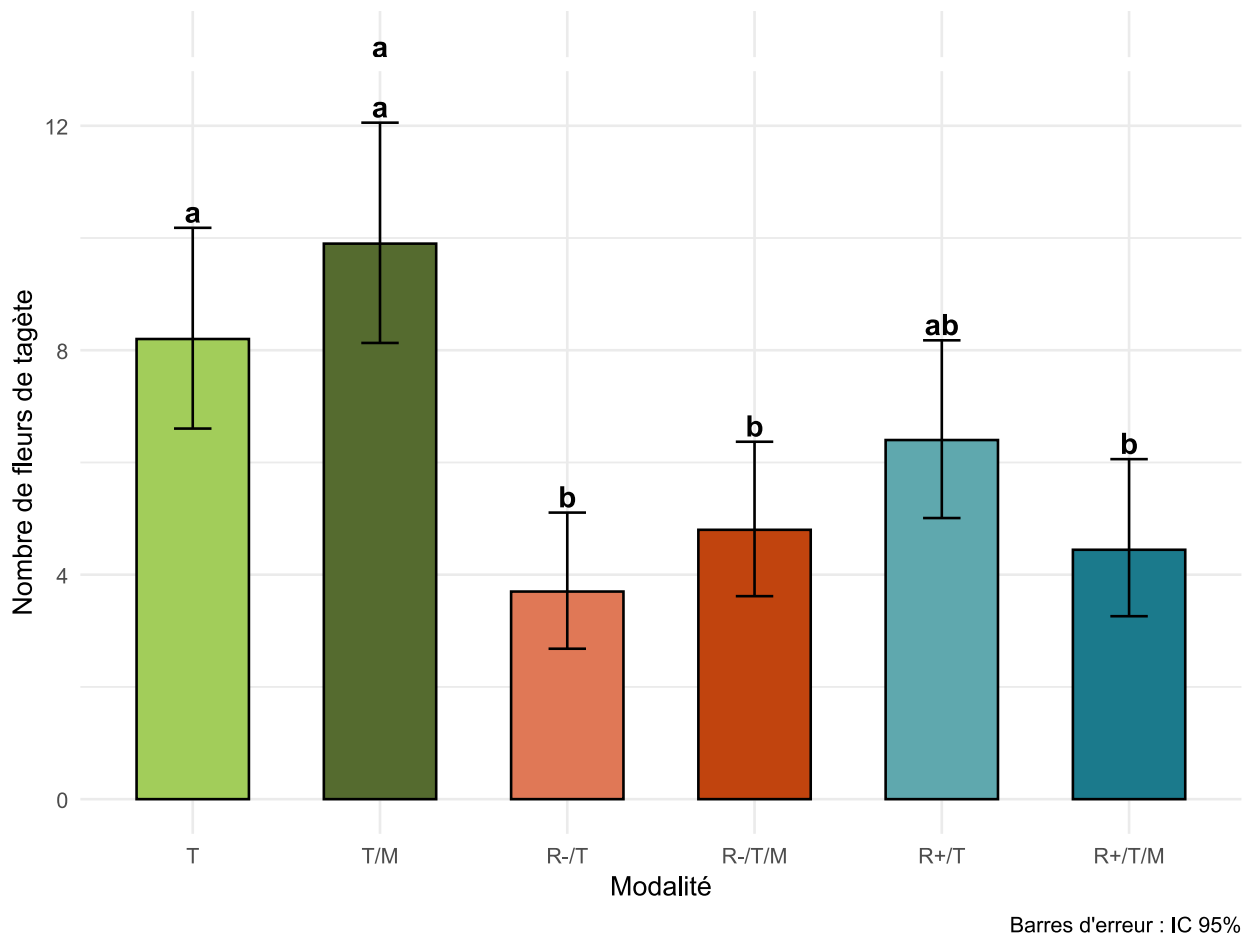
Annexe 6 a : Box-plot du nombre de fleurs des poivrons dans le C3



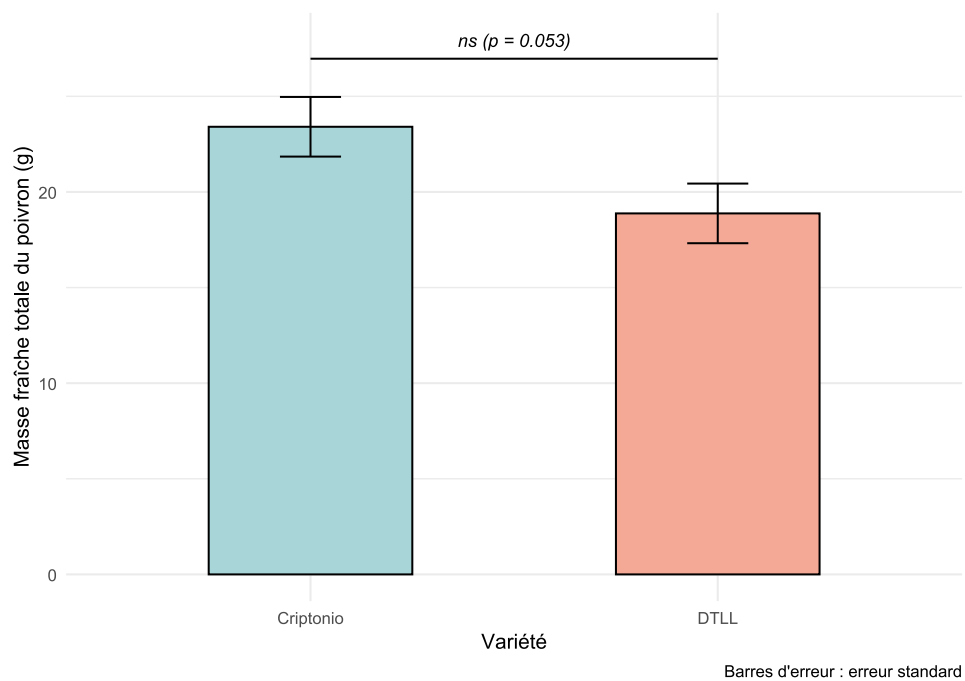
Annexe 6 b : Box-plot du nombre de fruits des poivrons dans le C3



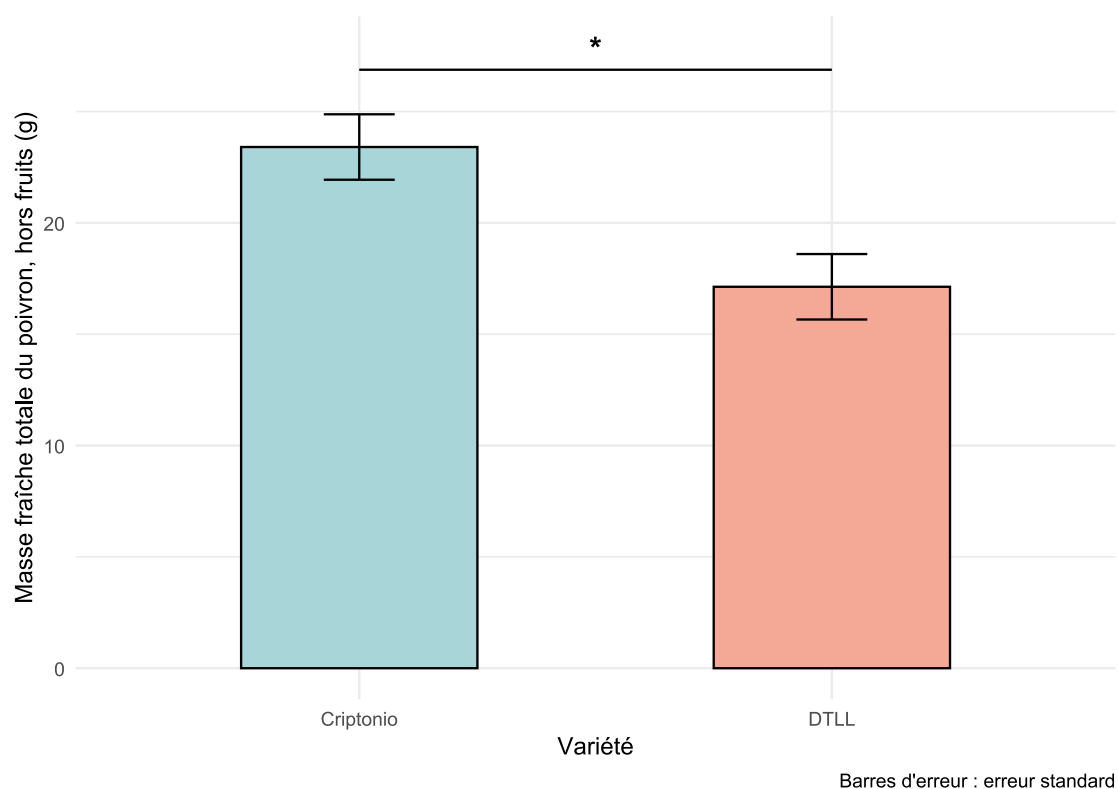
Annexe 6 c : Box-plot du nombre de fleurs des tagètes dans le C3



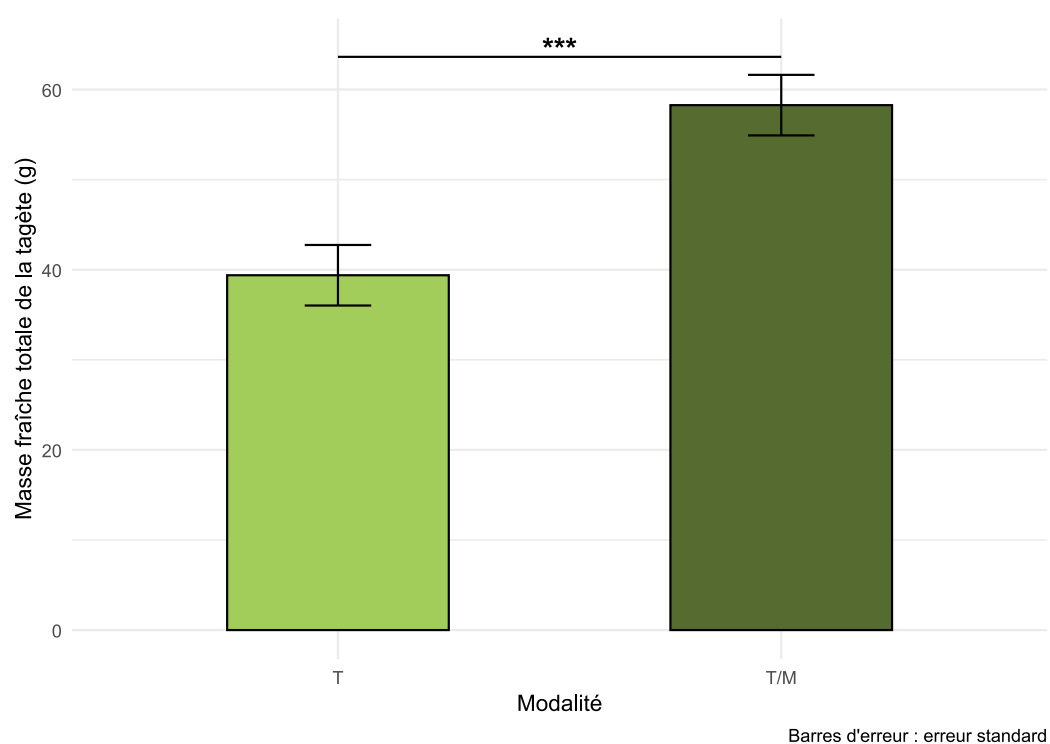
Annexe 6 d : Box-plot de la biomasse fraîche totale des poivrons (avec les racines hors du pot et en incluant les fruits) dans le C3



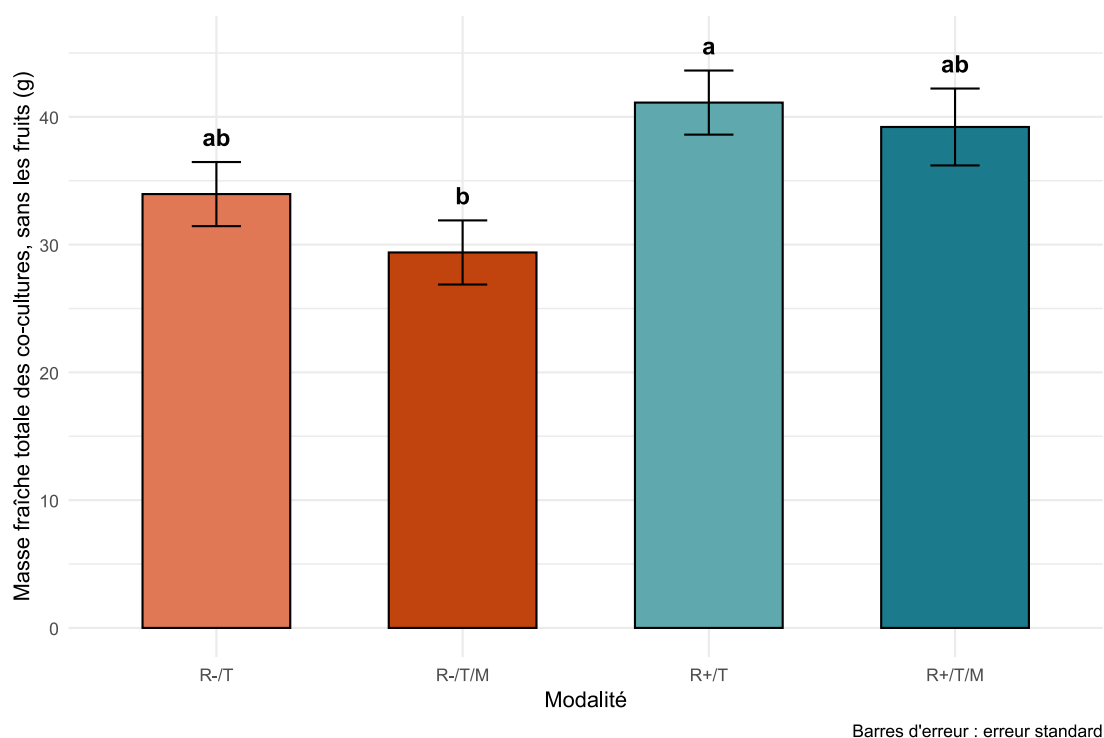
Annexe 6 e : Box-plot de la biomasse fraîche totale des poivrons (avec les racines hors du pot et en excluant les fruits) dans le C3



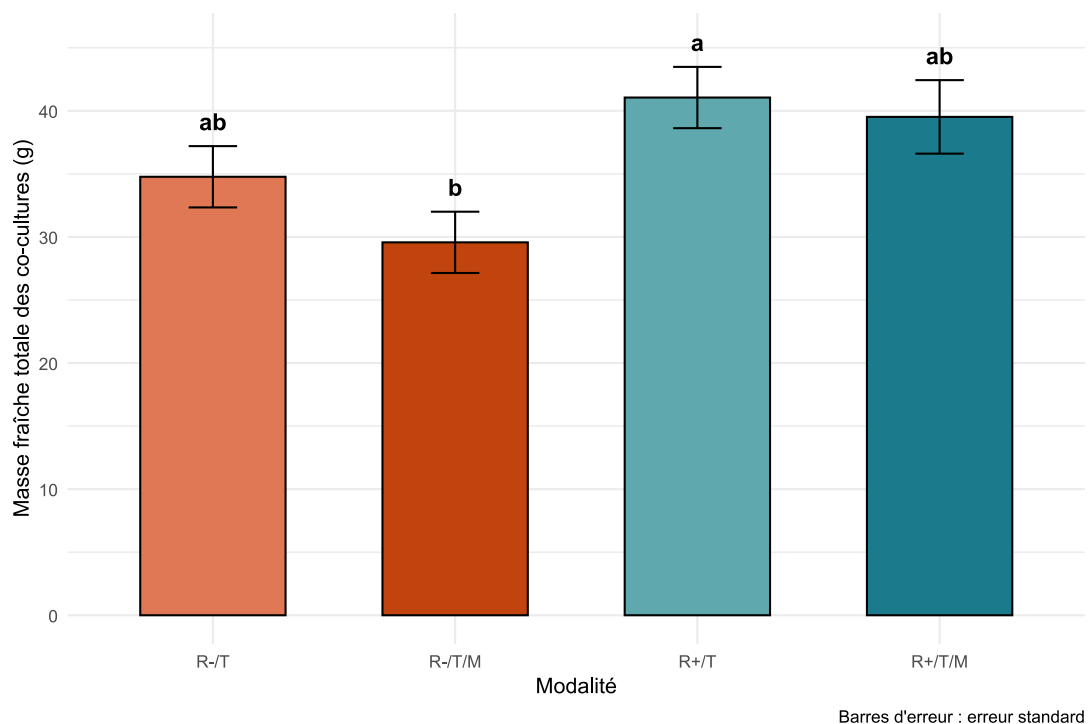
Annexe 6 f : Box-plot de la biomasse fraîche totale des tagètes (avec les racines hors du pot)



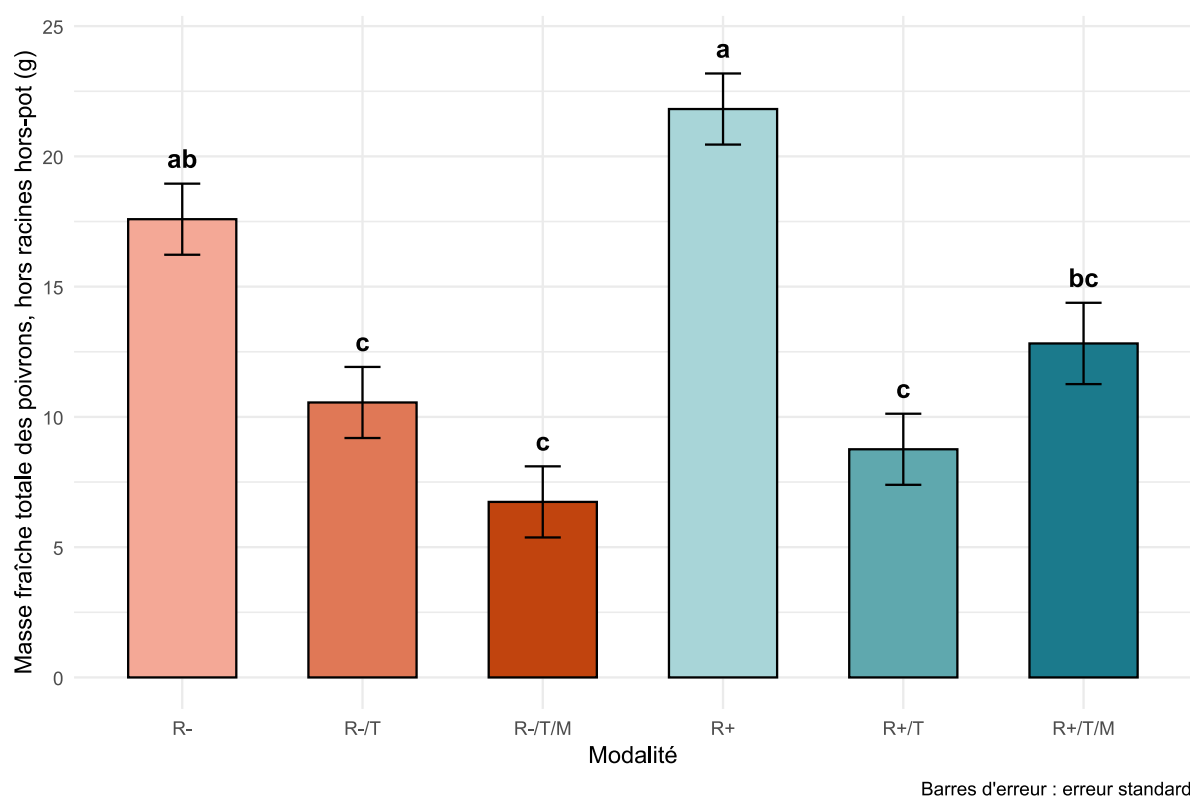
Annexe 6 g : Box-plot de la biomasse fraîche totale des poivrons en co-cultures (avec les racines hors du pot en excluant les fruits)



Annexe 6 h : Box-plot de la biomasse fraîche totale des poivrons en co-cultures (avec les racines hors du pot en incluant les fruits)



Annexe 6 i : Box-plot de la biomasse fraîche totale des poivrons de toutes les modalités (sans les racines hors du pot)



Annexe 7 : Tests univariés sur les COV

Les valeurs de ces tableaux sont celles obtenues à T2, sur données normalisées par le volume de la plante si elle est seule dans le pot et sans normalisation si la plante est en co-culture. Les données sont aussi toutes log-transformées (base de 2). En gras sont représentées les molécules pour lesquelles le seuil FDR est validé.

Annexe 7 a : Tableaux des molécules identifiées pour le levier résistance variétale des poivrons dans le C3

Modalités	Modalité dans laquelle le composé est émis en quantité supérieure	Composé	Seuil FDR (obtenu avec le test de limma)	p-value (obtenue avec le test de limma)
R- et R+	R-	Octanal	0.46405	0.010547
R- et R+	R-	Nonanal	0.47774	0.034191
R- et R+	R-	Décanal	0.47774	0.046619

Annexe 7 b : Tableaux des molécules identifiées pour le levier mycorhization sur les tagètes dans le C3

Modalités	Modalité dans laquelle le composé est émis en quantité supérieure	Composé	Seuil FDR (obtenu avec le test de limma)	p-value (obtenue avec le test de limma)
T et T/M	T/M	tagetone-cis	0.5066	0.016356
T et T/M	T/M	Piperitone	0.5066	0.01955
T et T/M	T/M	p-Cymen-8-ol	0.5066	0.01995
T et T/M	T/M	Terpinolène	0.5066	0.032221

Annexe 7 c : Tableaux des molécules identifiées pour le levier mycorhization sur les poivrons (résistants et sensibles) dans le C4

Modalités	Modalité dans laquelle le composé est émis en quantité supérieure	Composé	Seuil FDR (obtenu avec le test de limma)	p-value (obtenue avec le test de limma)
R+ et R+/M	R+/M	β -Ocimene	0.123	0.011533
R+ et R+/M	R+/M	Acetophenone	0.123	0.015316
R+ et R+/M	R+/M	Undecane	0.123	0.015376
R- et R-/M	R-/M	Hexanal	0.50116	0.018657
R- et R-/M	R-/M	β -Ocimene	0.50116	0.039419

Annexe 7 d : Tableaux des molécules identifiées pour le levier PdS dans le C3

Modalités	Modalité dans laquelle le composé est	Composé	Seuil FDR (obtenu avec le test de limma)	p-value (obtenue avec
-----------	---------------------------------------	---------	--	-----------------------

	émis en quantité supérieure			le test de limma)
R- et R-/T	R-	Octanal	0.0428	0.004952
R+ et R+/T	R+	Nonanal	3.4151E-4	1.0885E-5
R+ et R+/T	R+/T	Terpinolène	3.4151E-4	1.2419E-5
R+ et R+/T	R+/T	Sabinene	0.014697	8.6946E-4
R+ et R+/T	R+/T	Piperitone	0.014697	0.0010688
R+ et R+/T	R+	Heptanal	0.05696	0.0051782
R+ et R+/T	R+	Décanal	0.095476	0.010416
R+ et R+/T	R+	Octanal	0.12431	0.015822
R+ et R+/T	R+	Undecanal	0.18562	0.039143
R+ et R+/T	R+/T	tagétone-trans	0.18562	0.039262
R+ et R+/T	R+/T	Decane	0.18562	0.039334
R+ et R+/T	R+/T	3-Hexen-1-ol, (E)-	0.18562	0.039368
R+ et R+/T	R+/T	Limonene	0.18562	0.040499
R+ et R+/T	R+/T	Caryophyllene	0.19984	0.047235

Annexe 7 e : Tableaux des molécules identifiées pour la combinaison de leviers PdS et mycorhization dans le C3

Modalités	Modalité dans laquelle le composé est émis en quantité supérieure	Composé	Seuil FDR (obtenu avec le test de limma)	p-value (obtenue avec le test de limma)
R+ et R+/T/M	R+/T/M	Limonène	0.31944	0.0093958
R+ et R+/T/M	R+/T/M	Terpinolène	0.31944	0.0095354
R+ et R+/T/M	R+	Heptanal	0.61452	0.043915
R+ et R+/T/M	R+/T/M	Cyclopenten, 1-ethenyl-3-methylene-	0.61452	0.044919
R+/T et R+/T/M	R+/T/M	Nonanal	0.024683	3.6841E-4
R+/T et R+/T/M	R+/T/M	Undecanal	0.2624	0.0078327
R+/T et R+/T/M	R+/T	β-Ocimene	0.33037	0.015766

R+/T et R+/T/M	R+/T/M	Octanal	0.33037	0.024481
R+/T et R+/T/M	R+/T/M	Octane	0.33037	0.029067
R+/T et R+/T/M	R+/T	Decane	0.33037	0.040962
R+/T et R+/T/M	R+/T/M	Cyclopenten, 1- ethenyl-3- methylene-	0.33037	0.041319
R+/T et R+/T/M	R+/T/M	Acetophenone	0.33037	0.041746
R+/T et R+/T/M	R+/T	Caryophyllene	0.33037	0.040499
R- et R-/T/M	R-	Heptanal	0.0074954	1.4291E-4
R- et R-/T/M	R-/T/M	Piperitenone	0.0074954	3.6805E-4
R- et R-/T/M	R-/T/M	Sabinene	0.0074954	3.7486E-4
R- et R-/T/M	R-/T/M	allo-ocimène	0.0074954	4.5344E-4
R- et R-/T/M	R-/T/M	Limonène	0.0074954	4.6847E-4
R- et R-/T/M	R-/T/M	Terpinolène	0.0079578	0.00059684
R- et R-/T/M	R-/T/M	Silphiperfol-5- ene	0.0918	0.0080325
R- et R-/T/M	R-/T/M	(Z)-Tagéténone	0.29843	0.042647
R- et R-/T/M	R-/T/M	tagetone-cis	0.29843	0.042772
R- et R-/T/M	R-/T/M	3-Hexen-1-ol, (E)-	0.29843	0.043069
R- et R-/T/M	R-/T/M	β-Phellandrene	0.29843	0.043715
R- et R-/T/M	R-/T/M	Caryophyllene	0.29843	0.044764
R-/T et R-/T/M	R-/T/M	Undecanal	0.3162	0.0078055
R-/T et R-/T/M	R-/T/M	3-Hexen-1-ol	0.3162	0.0079049
R-/T et R-/T/M	R-/T/M	Piperitenone	0.41036	0.029701
R-/T et R-/T/M	R-/T/M	Limonène	0.41036	0.035365
R-/T et R-/T/M	R-/T/M	alpha-Pinène	0.41036	0.040726
R-/T et R-/T/M	R-/T/M	gamma- Terpinene	0.41036	0.040849
R-/T et R-/T/M	R-/T/M	Tridécan	0.41036	0.040913
R-/T et R-/T/M	R-/T/M	5-Hepten-2-one, 6-methyl-	0.41036	0.041036

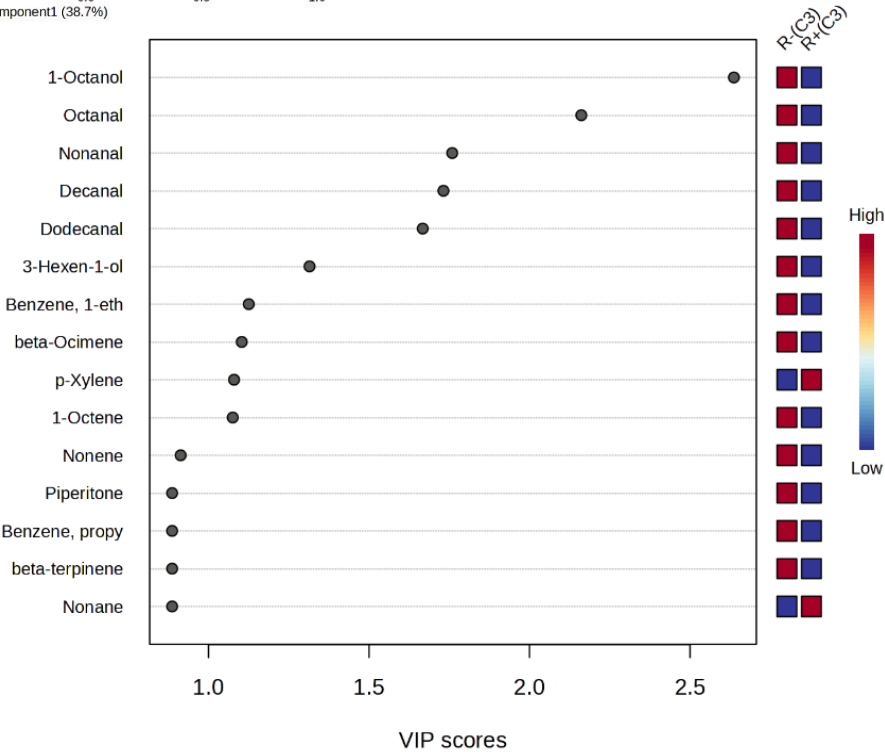
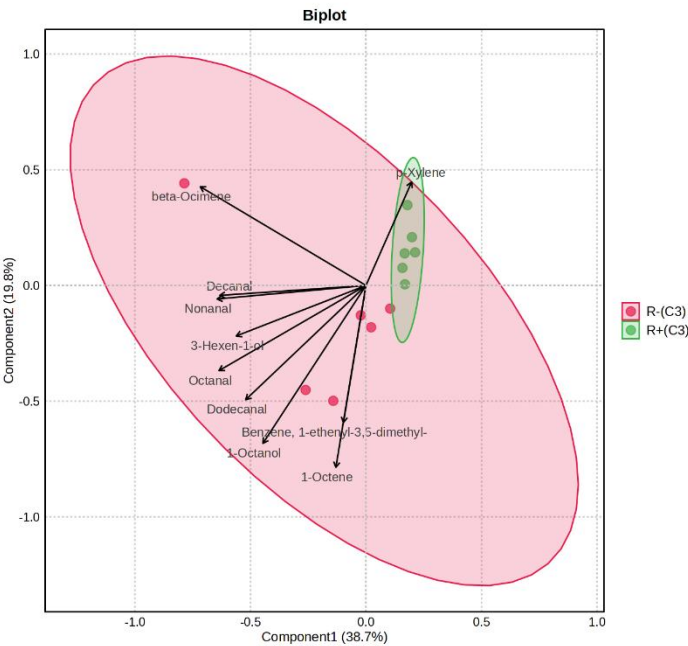
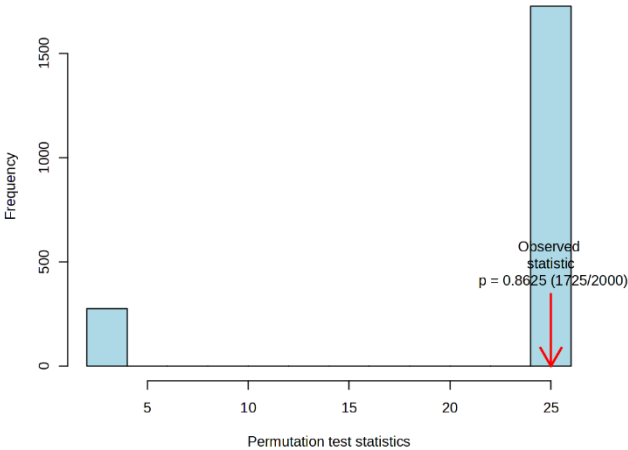
Annexe 7 f : Tableaux des molécules identifiées pour le levier résistance génétique des poivrons dans le C4

Dans le C4, il n'y a aucune différence de composés entre les deux génotypes en regardant les valeurs FDR et les p-values.

Annexe 8 : Tests multivariés sur les COV

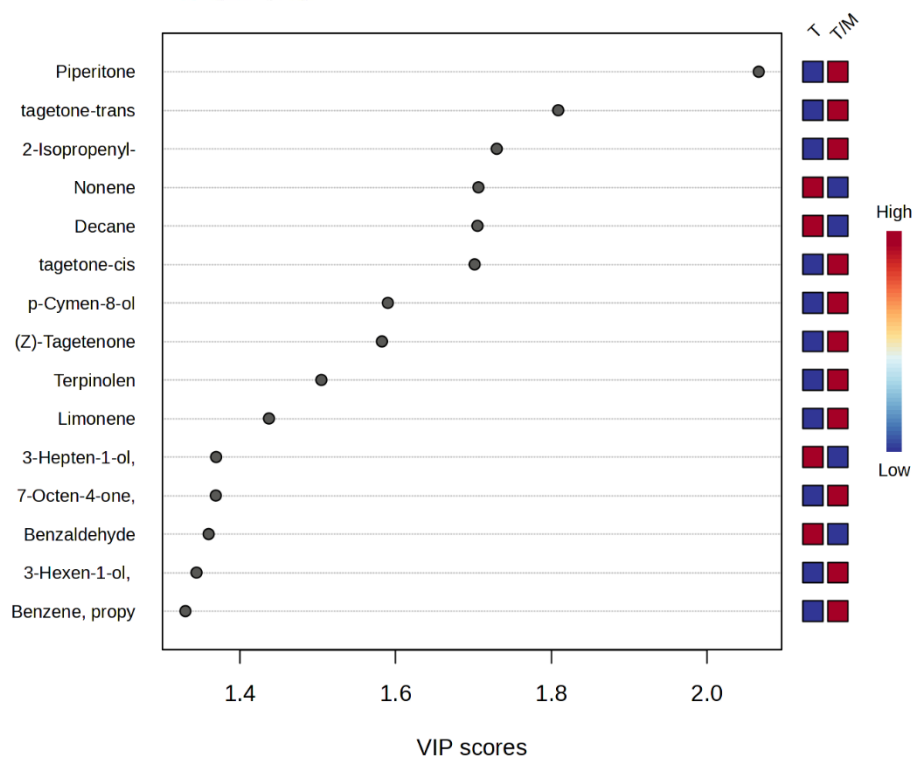
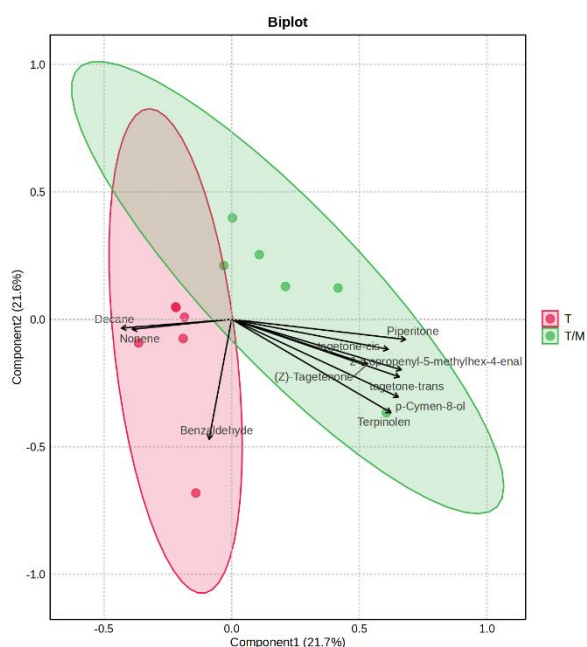
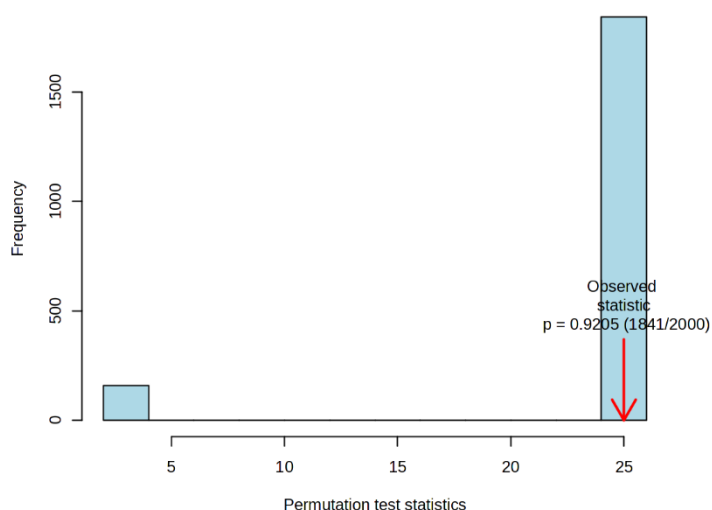
Annexe 8 a : Indicateurs de performances du modèle de PLS-DA, test de permutation, graphique Biplot et VIP-scores, pour le levier résistance variétale des poivrons dans le C3

Measure	1 comps	2 comps	3 comps
Accuracy	0.53333	0.83333	0.7
R2	0.42777	0.73454	0.89907
Q2	0.009803	0.11181	0.24112



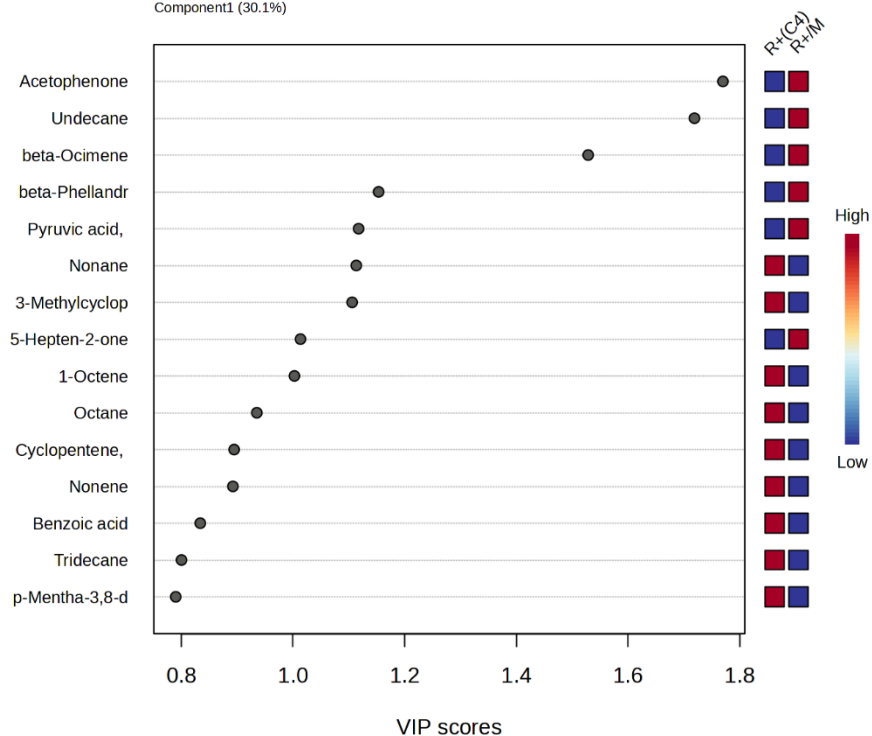
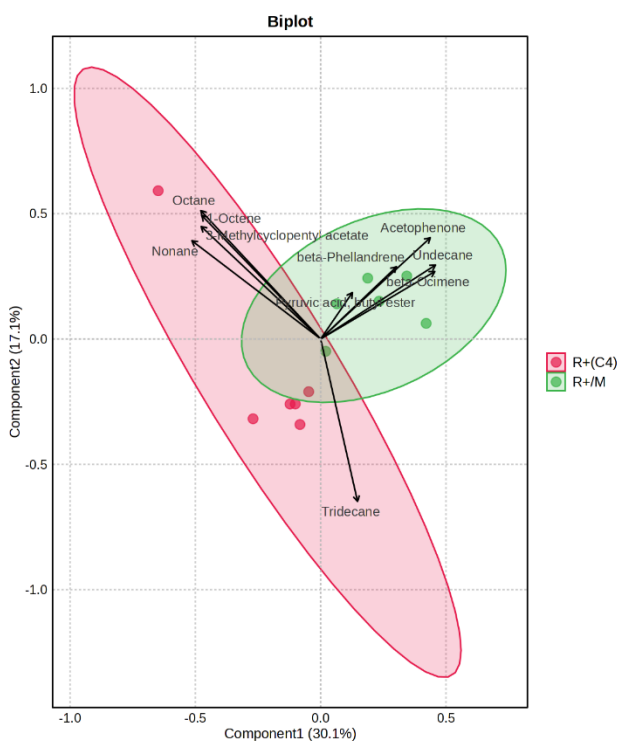
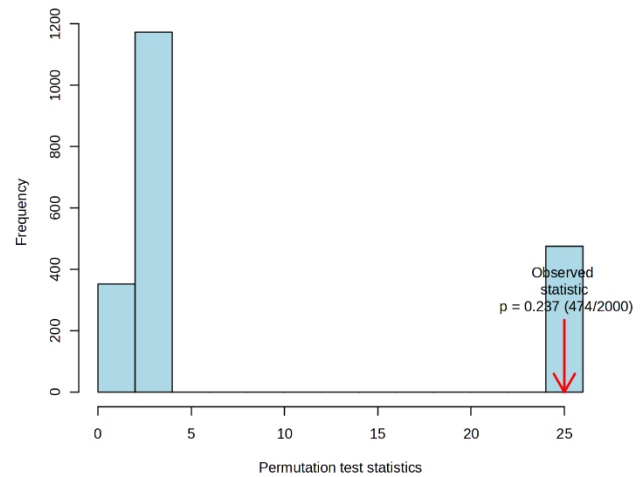
Annexe 8 b : Indicateurs de performances du modèle de PLS-DA, test de permutation, graphique Biplot et VIP-scores, pour le levier mycorhization sur les tagètes dans le C3

Measure	1 comps	2 comps	3 comps
Accuracy	0.7	0.7	0.7
R2	0.62984	0.83261	0.92748
Q2	-0.17773	-0.11668	0.055991



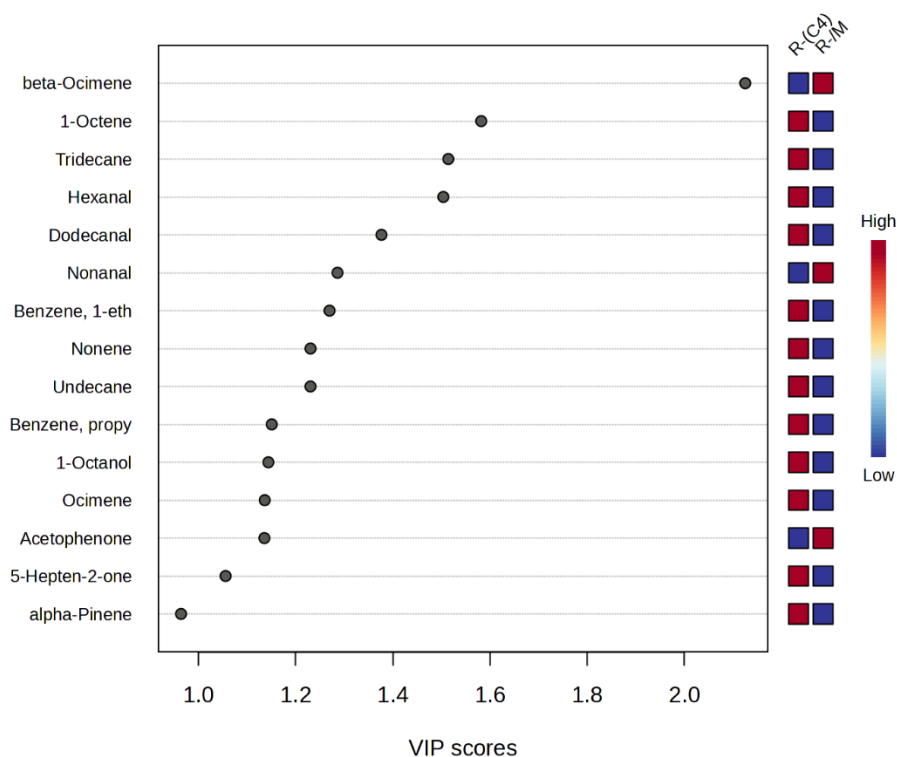
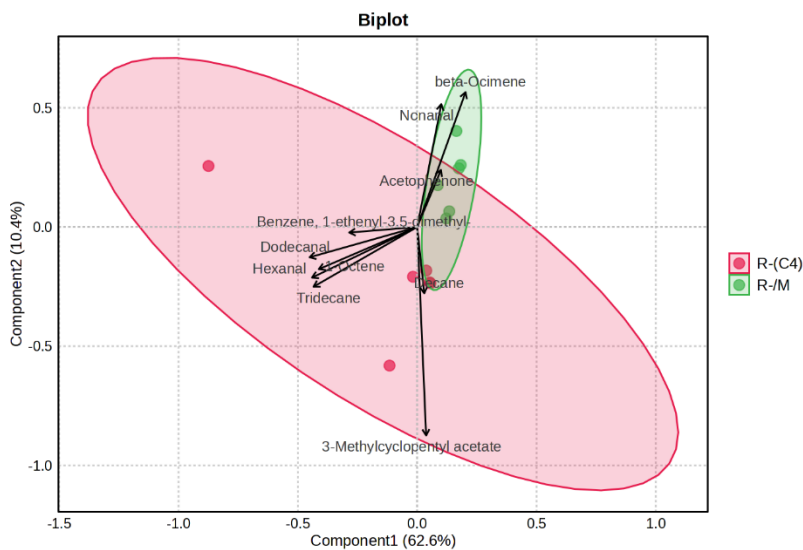
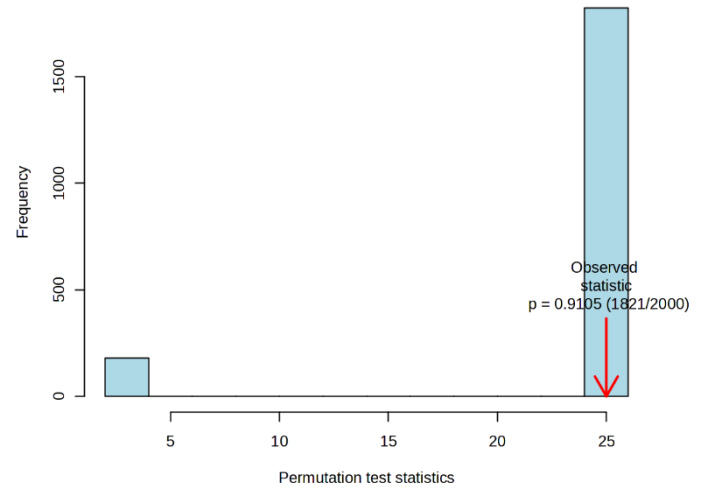
Annexe 8 c : Indicateurs de performances du modèle de PLS-DA, test de permutation, graphique Biplot et VIP-scores, pour le levier mycorhization sur les poivrons résistants dans le C4

Measure	1 comps	2 comps	3 comps
Accuracy	0.73333	0.83333	0.93333
R2	0.5876	0.81886	0.88571
Q2	0.27419	0.46662	0.57006



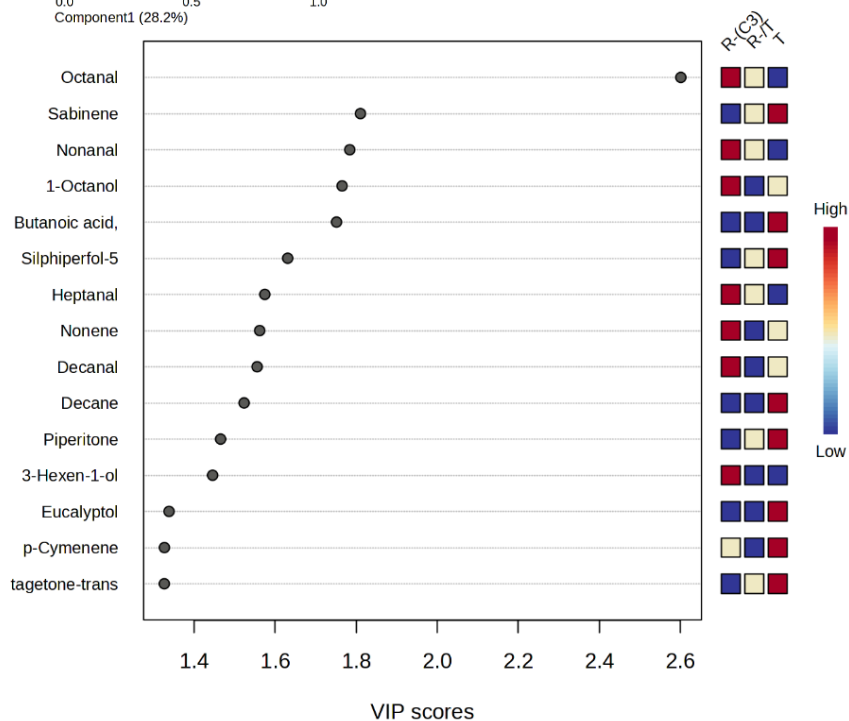
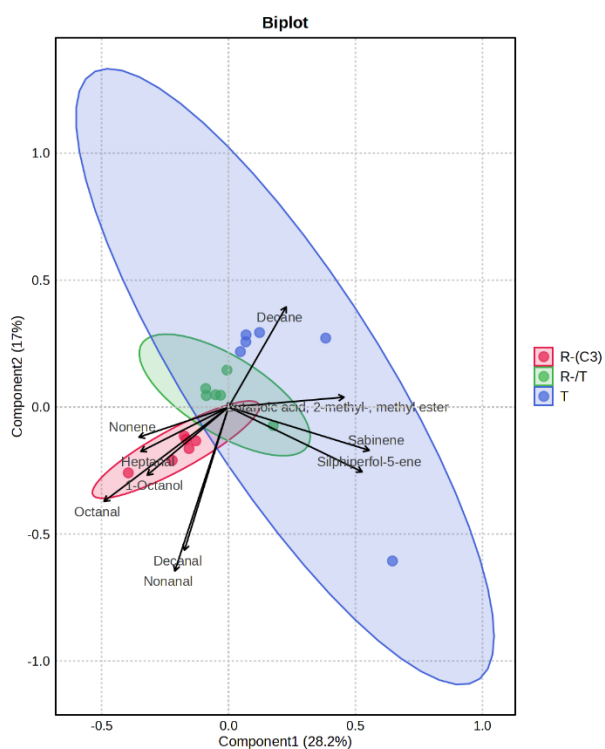
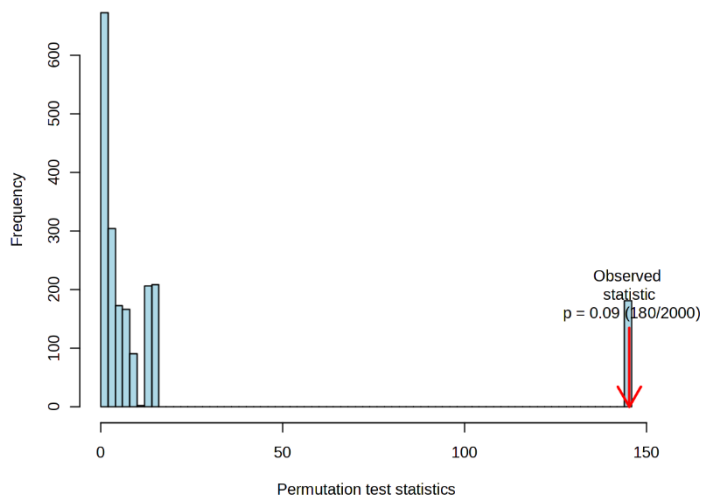
Annexe 8 d : Indicateurs de performances du modèle de PLS-DA, test de permutation, graphique Biplot et VIP-scores, pour le levier mycorhization sur les poivrons sensibles dans le C4

Measure	1 comps	2 comps	3 comps
Accuracy	0.7	0.76667	0.76667
R2	0.27085	0.78184	0.92744
Q2	-0.05883	0.31235	0.33362



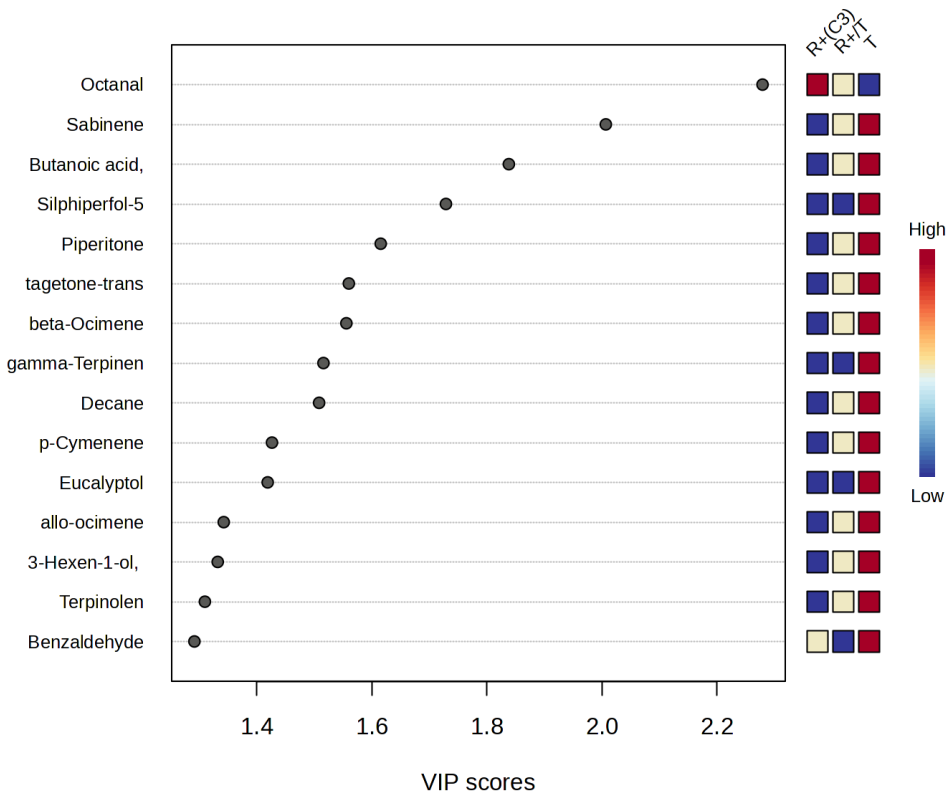
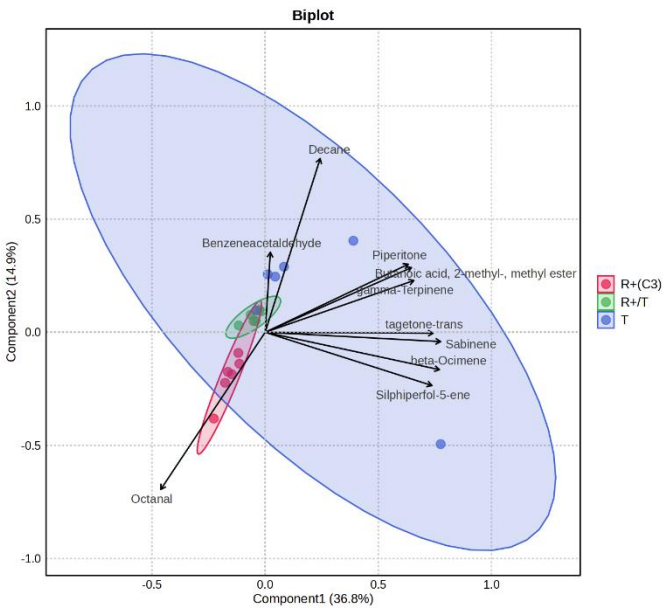
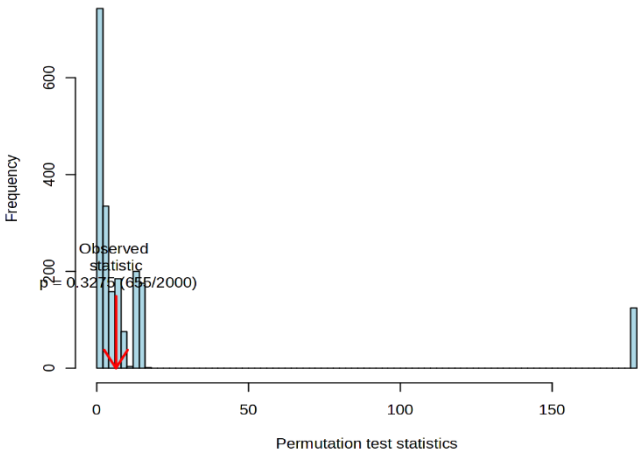
Annexe 8 e : Indicateurs de performances du modèle de PLS-DA, test de permutation, graphique Biplot et VIP-scores, pour le levier poivron sensible, PdS dans le C3

Measure	1 comps	2 comps	3 comps
Accuracy	0.47667	0.48667	0.62
R2	0.58613	0.84837	0.96706
Q2	0.33422	0.499	0.55729



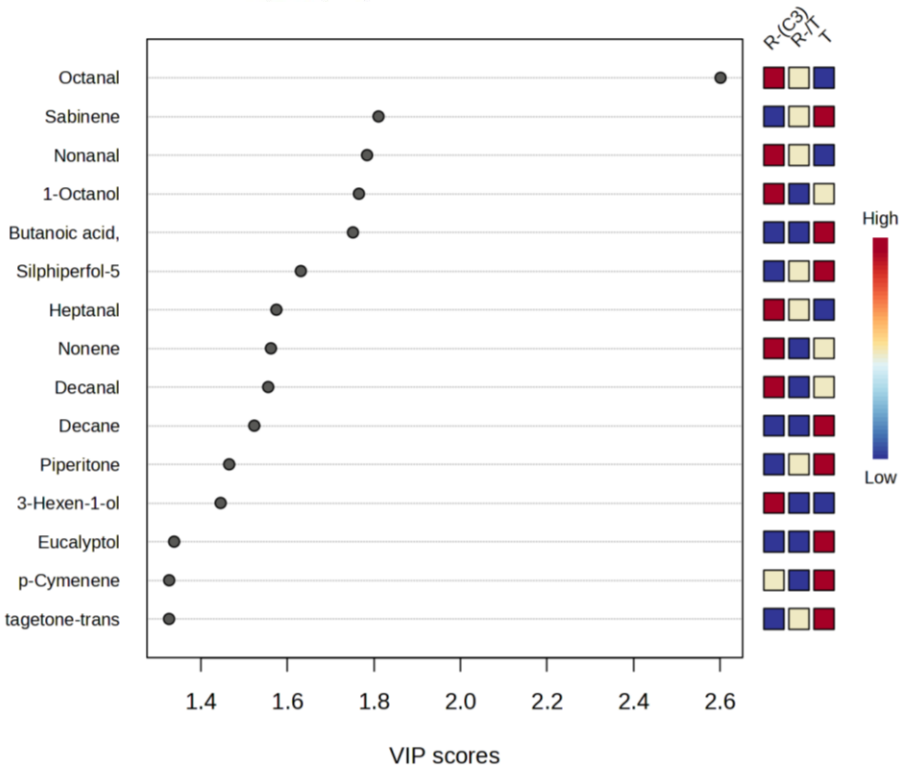
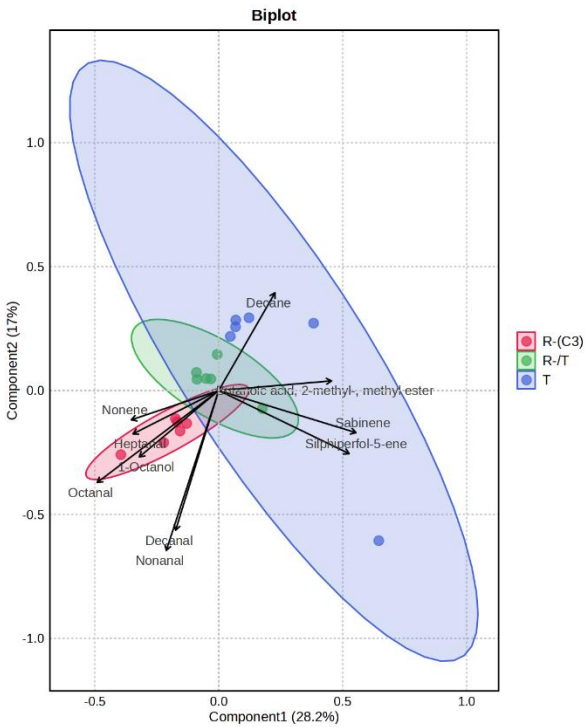
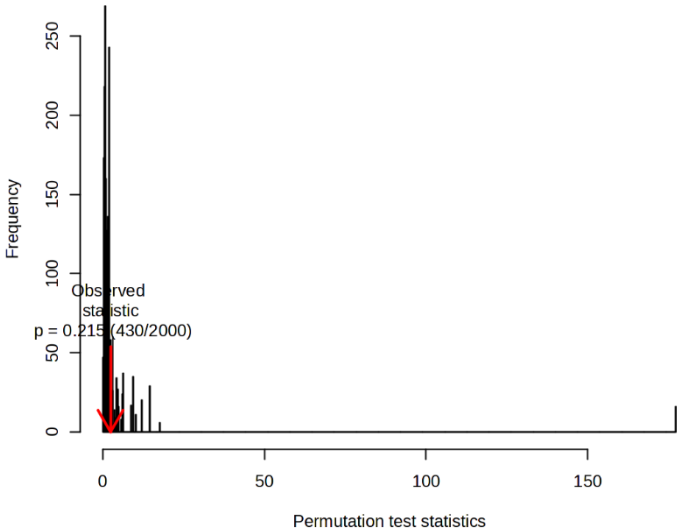
Annexe 8 f : Indicateurs de performances du modèle de PLS-DA, test de érmutation, graphique Biplot et VIP-scores, pour le levier poivron résistant, PdS dans le C3

Measure	1 comps	2 comps	3 comps
Accuracy	0.4	0.68333	0.68333
R2	0.43123	0.78178	0.90088
Q2	0.13828	0.37531	0.44209



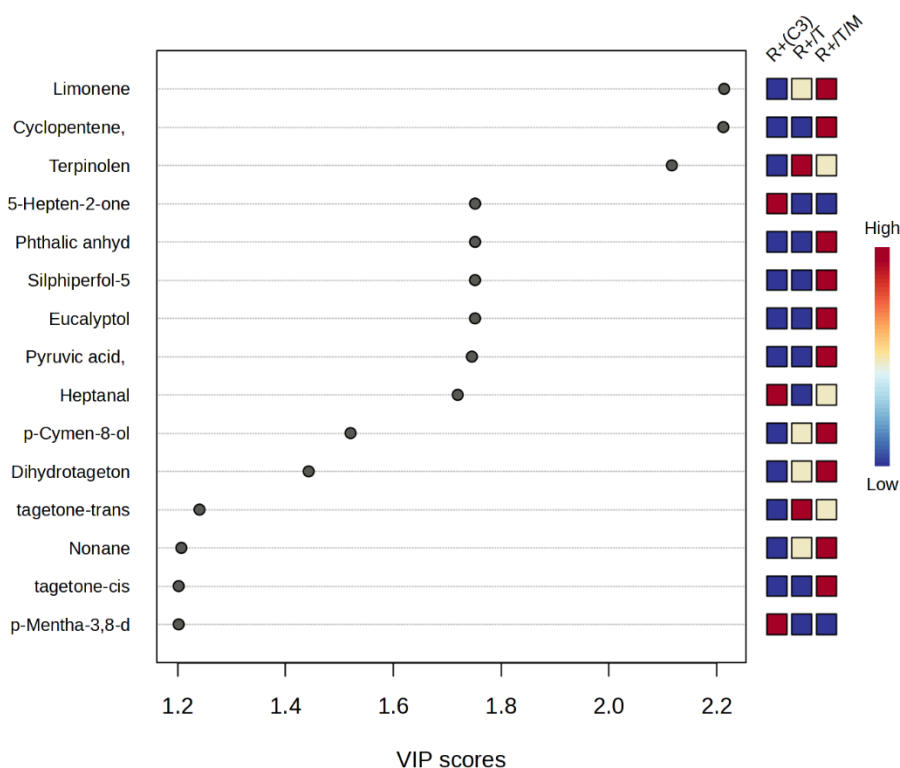
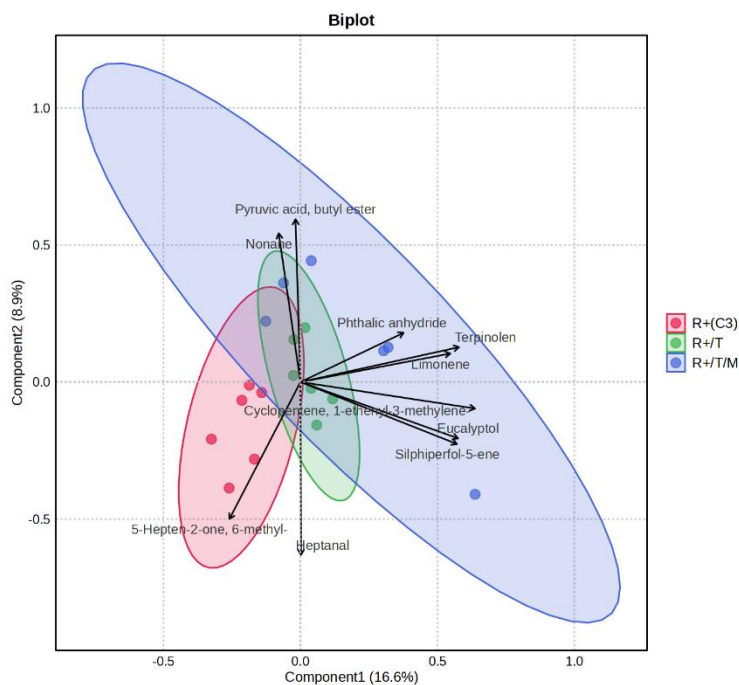
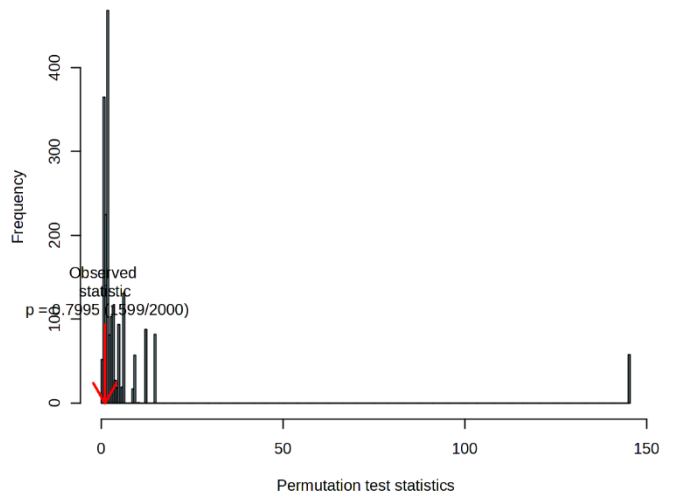
Annexe 8 g : Indicateurs de performances du modèle de PLS-DA, test de permutation, graphique Biplot et VIP-scores, pour la combinaison de leviers poivron sensible, PdS et mycorhization dans le C3

Measure	1 comps	2 comps	3 comps
Accuracy	0.44667	0.38	0.47333
R2	0.47107	0.78908	0.89329
Q2	0.22143	0.32915	0.32537



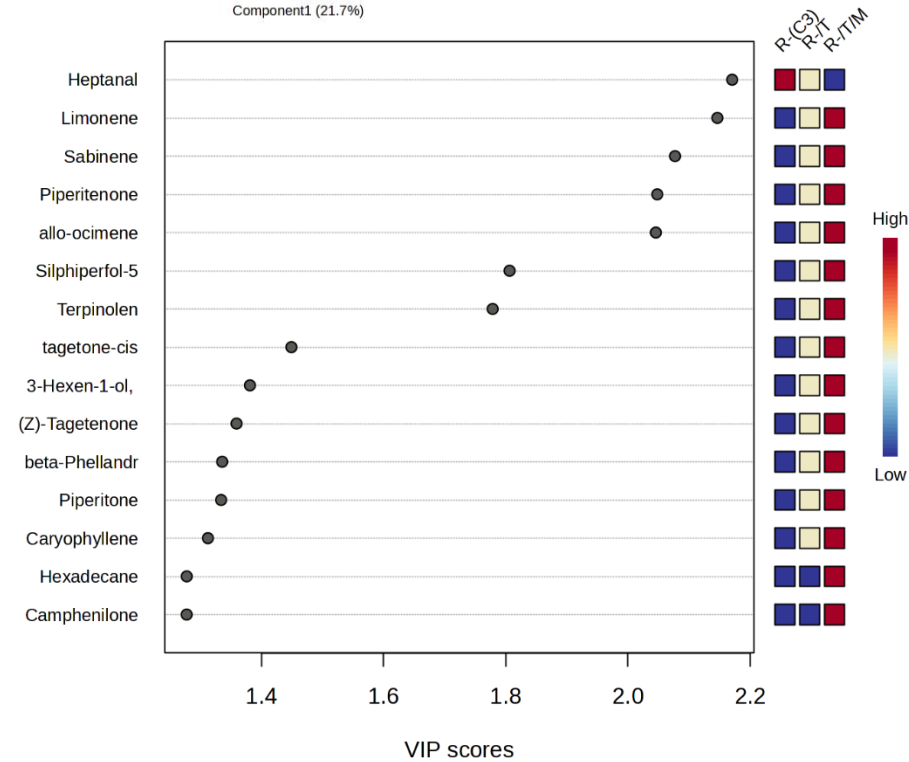
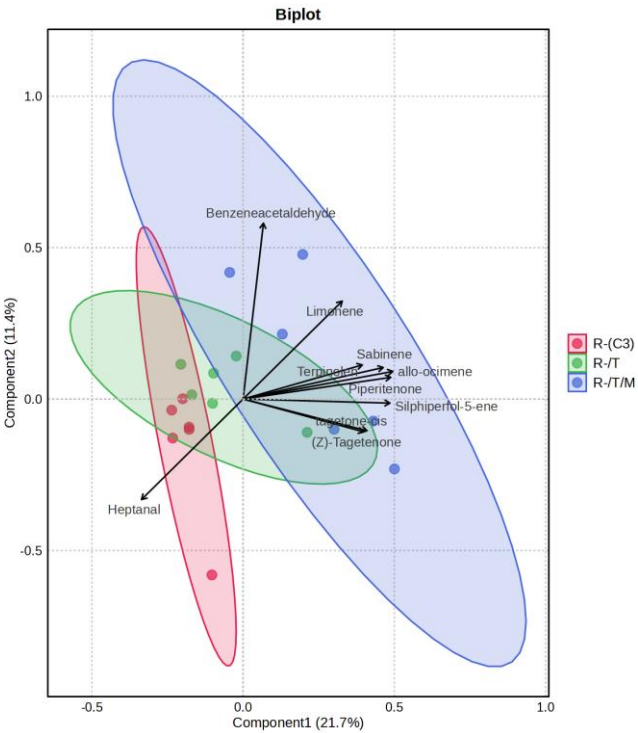
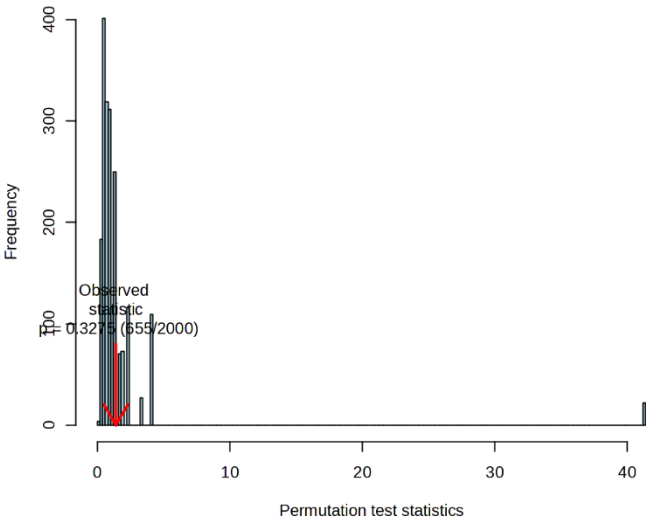
Annexe 8 h : Indicateurs de performances du modèle de PLS-DA, test de permutation, graphique Biplot et VIP-scores, pour la combinaison de leviers poivron résistant, PdS et mycorhization dans le C3

Measure	1 comps	2 comps	3 comps	4 comps	5 comps
Accuracy	0.55333	0.72667	0.55333	0.55333	0.55333
R2	0.51117	0.81339	0.86475	0.91037	0.96106
Q2	-0.045986	0.12756	0.070776	0.032318	-0.12512

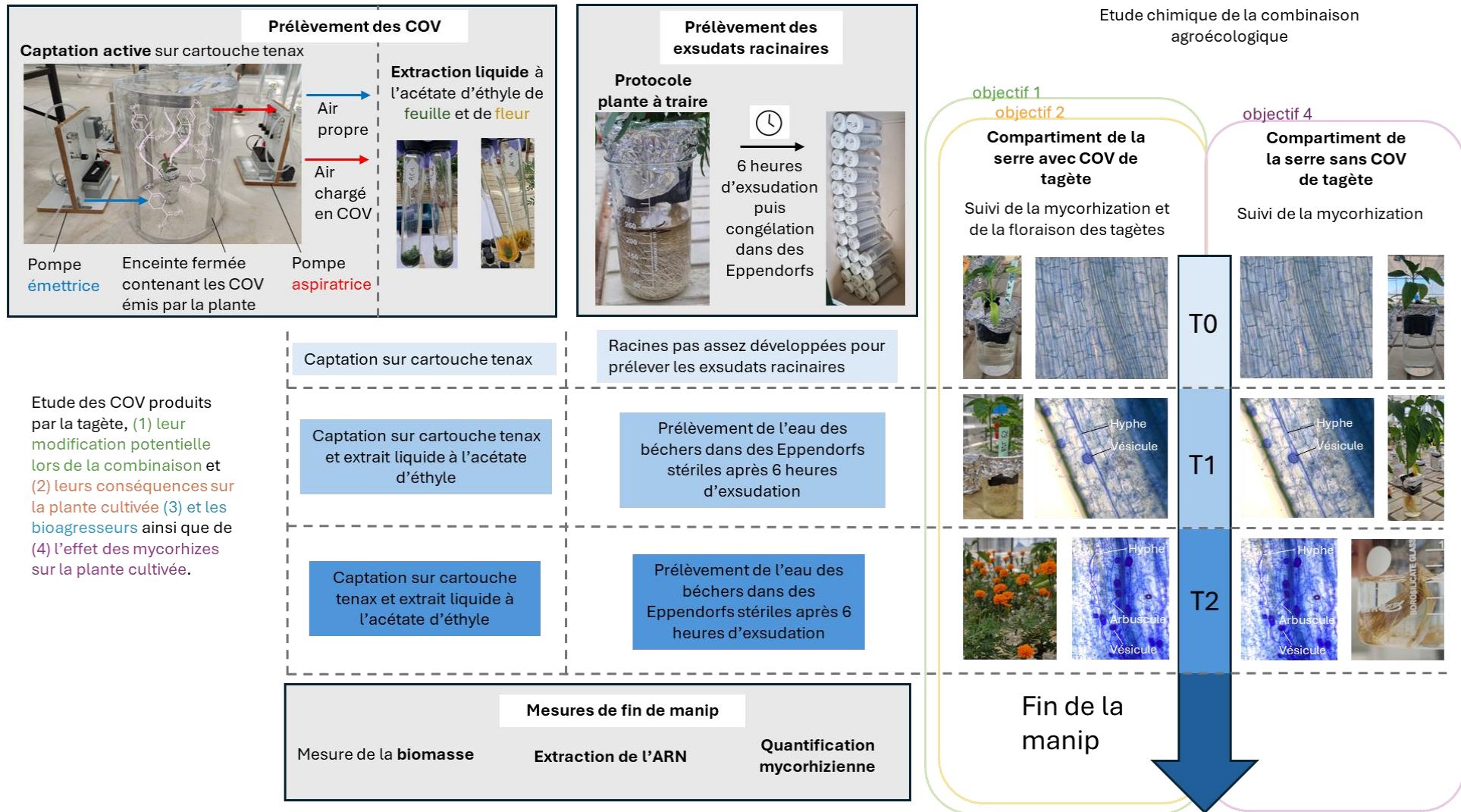


Annexe 8 i : Indicateurs de performances du modèle de PLS-DA, test de permutation, graphique Biplot et VIP-scores, pour le levier résistance génétique des poivrons dans le C4

Measure	1 comps	2 comps	3 comps	4 comps	5 comps
Accuracy	0.38333	0.38333	0.51667	0.45	0.5
R2	0.6165	0.85521	0.93248	0.98021	0.99066
Q2	0.24911	0.17738	0.12088	0.11301	0.11501



Annexe 9 : Schéma bilan des mesures réalisées durant l'expérimentation 1



Annexe 10 : Fiche évaluation par les tutrices du stage

FICHE 4 : EVALUATION DES COMPETENCES PROFESSIONNELLES A L'ISSUE DU STAGE (A remplir par le maître de stage entreprise)

NOM Prénom (Etudiant) : BARRY Flore

NOM Prénom (Maîtres de stag. HEROGUEZ Célia, GAUTIER Hélène, DJIAN-CAPORALINO Caroline)

SIGNATURE Tampon :

[Signatures]

Éléments appréciés	Degré d'acquisition				A	B	C	D	SO*
	A - Expertise	B- Maîtrise	C- En deçà de l'objectif	D-En inadéquation avec l'objectif					
Compétences techniques et scientifiques									
Aptitude à rechercher et mobiliser des connaissances et ressources d'un champ spécifique	Excellente mobilisation des connaissances	Bon niveau de connaissances	Des lacunes	Trop de lacunes	X				
Capacité à traiter des sujets complexes, à les analyser et les synthétiser	Capacité à analyser et traiter des sujets complexes avec précision et exhaustivité	Capacité à analyser et traiter des sujets complexes	Capacité à analyser et traiter des sujets de façon peu précise et partielle	Capacité à analyser et traiter des sujets de façon incohérente	X				
Maîtrise des outils et méthodes rattachés aux sciences de l'ingénieur	Maîtrise des méthodes et des outils en autonomie, à un niveau expert	Maîtrise des méthodes et des outils en autonomie	Maîtrise basique des méthodes et des outils avec accompagnement	Faible capacité à utiliser les méthodes et les outils attendus	X				
Compétences liées au contexte professionnel									
Prise en compte des problématiques propres de l'entreprise (compétitivité, productivité, qualité des produits, ...)	Identifie les problématiques spécifiques à l'entreprise et propose des solutions novatrices en lien avec sa mission et les activités de l'entreprise	Identifie les problématiques spécifiques à l'entreprise et propose des solutions adaptées en lien avec sa mission	Identifie partiellement les problématiques spécifiques à l'entreprise et propose des solutions inadaptées sans lien avec sa mission	Identifie mal les problématiques spécifiques à l'entreprise et ne propose pas de solutions adaptées en lien avec sa mission					X
Prise en compte des enjeux sociétaux	Identifie les enjeux sociétaux et son impact sur l'activité de l'entreprise et sur sa mission	Identifie les enjeux sociétaux et son impact sur sa mission	Identifie partiellement les enjeux sociétaux sans faire de lien avec sa mission	N'identifie pas les enjeux sociétaux auxquels est confrontée l'entreprise	X				

Aptitude à travailler en contexte international	S'appuie sur le contexte professionnel international pour mener à bien son travail et aller au-delà des missions	S'adapte au contexte professionnel international pour mener à bien son travail	S'adapte partiellement au contexte professionnel international	S'adapte avec difficultés au contexte professionnel international					X
--	--	--	--	---	--	--	--	--	---

NOM Prénom (Etudiant) : BARRY Flore

Compétences intra et inter-personnelles					A	B	C	D	SO*
Compétences organisationnelles									
Ponctualité	Toujours à l'heure	Souvent à l'heure	Des retards	Retards fréquents et/ou absences		X			
Capacité d'organisation personnelle	Respecte les délais en autonomie et est capable d'optimiser son temps de travail pour aller au-delà des attentes	Organise son temps de travail de manière efficace et respecte les échéances	Organise insuffisamment son temps de travail et respecte des délais avec des rappels réguliers	Rencontre des difficultés pour organiser son temps de travail, ne respecte pas les échéances		X			
Savoir-être au travail									
Attitude au travail	Manifeste toujours une attitude assertive, respectueuse et bienveillante envers son environnement de travail. Persévère, est force de propositions dans ses missions et assume pleinement ses responsabilités	Manifeste souvent une attitude assertive, respectueuse et bienveillante envers son environnement de travail. S'implique dans son travail, propose des initiatives et assume des responsabilités	Manifeste parfois des réticences dans la réalisation de ses missions. Manque parfois de respect envers son environnement de travail. Assume partiellement ses responsabilités	Manifeste de l'insatisfaction constante ou un comportement imprévisible. Manque de respect envers son environnement de travail. Rejette ses responsabilités	X				
Aptitude au travail en équipe, collaboration	Participe activement au travail et facilite le travail d'équipe de façon positive et constructive	Participe activement au travail d'équipe et facilite le travail d'équipe	Présente des difficultés à travailler en équipe	Manifeste de grosses difficultés à travailler en équipe	X				

Aptitude à communiquer	S'exprime de manière claire à l'écrit et à l'oral. Adapte parfaitement son langage aux différentes situations professionnelles	S'exprime de manière claire à l'écrit et à l'oral. Adapte son langage aux différentes situations professionnelles	S'exprime de manière confuse à l'écrit ou à l'oral. Adapte partiellement son langage aux différentes situations professionnelles	S'exprime de manière confuse à l'écrit et à l'oral. Utilise un langage inadapté aux différentes situations professionnelles		X			
-------------------------------	---	--	---	--	--	---	--	--	--

*SO : Sans objet dans le stage de l'étudiant

Commentaire général des maîtres de stage : Flore a été une stagiaire particulièrement motivée et dynamique, faisant preuve d'un grand sérieux et d'une réelle implication tout au long de son stage. Elle a rapidement acquis les compétences nécessaires à la réalisation de ses missions et a su faire preuve d'autonomie, de rigueur et d'efficacité, dans son travail. Elle a également fait preuve d'esprit d'initiative en se formant de manière autonome au traitement et à l'analyse de ses données. Curieuse, attentive et à l'écoute, Flore s'est pleinement appropriée son sujet de stage et a su mettre en oeuvre une véritable démarche scientifique, malgré le fait que ce sujet s'intégrait dans un projet de thèse plus large. Enfin, Flore a démontré un excellent esprit d'équipe. Elle a travaillé en étroite collaboration avec l'étudiante en thèse dans le cadre d'un binôme particulièrement harmonieux. Cette collaboration s'est révélée très enrichissante pour les deux étudiantes et particulièrement fructueuse, puisqu'elle a permis d'obtenir des résultats de grande qualité, susceptibles de faire l'objet d'une publication scientifique. Sa bonne-humeur et sa motivation ont été très appréciées par l'ensemble de l'équipe. Nous avons donc été très satisfaits de son travail et de son implication tout au long de son stage.

Annexe 11 : Photos du stage



