



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique



Université Constantine 1 Frères Mentouri
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

جامعة قسنطينة 1 الإخوة منتوري
كلية علوم الطبيعة والحياة

Département : Biologie Animale

قسم : بيولوجيا الحيوان

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences Biologiques

Spécialité : Biologie et contrôle des populations d'insectes

N° d'ordre :

N° de série :

Intitulé :

Evaluation de l'activité bio-insecticide d'un extrait de plante sur *Drosophila melanogaster*

Présenté par : BOUCHAREB Ikram
LAHRACHE Imane

Le : 24/06/2025

Jury d'évaluation :

Président : CHAABANE Meriem (MCB - U Constantine 1 Frères Mentouri).

Encadrant : BOULAHBEL Bilel (MCA - U Constantine 1 Frères Mentouri).

Examineur : FRAHTIA Khalida (MCA- U Constantine 1 Frères Mentouri).

Année universitaire
2024 - 2025

Remerciements

Nous rendons grâce à Dieu Tout-Puissant qui nous a donné la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Qu'Il agrée nos efforts et les rende bénéfiques.

Nous exprimons notre sincère gratitude à Mr. Bilel BOULAHBEL, Maître de Conférences A à l'Université de Constantine 1 pour son encadrement rigoureux, sa disponibilité et la qualité de son accompagnement tout au long de ce travail. Sa présence constante et ses conseils pertinents ont grandement facilité la réalisation de ce mémoire.

Nous remercions tout particulièrement madame CHAABAN Meriem, Maître de Conférences classe B à l'Université de Constantine 1, qui nous a fait l'honneur de présider le jury de notre soutenance. Nous exprimons également toute notre gratitude à Madame Frahatia Khalida, Maître de Conférences classe A à l'Université de Constantine 1, pour avoir accepté d'examiner notre travail.

Nous tenons aussi à exprimer nos sincères remerciements à Madame N. Benkenana, directrice du laboratoire de biosystématique et écologie des arthropodes, pour nous avoir accueillies au sein de son laboratoire et pour les moyens mis à notre disposition.

Enfin, nos remerciements vont tout particulièrement à nos chers parents, pour leur amour, leur patience et leur soutien indéfectible, ainsi qu'à toutes les personnes qui nous ont soutenues de près ou de loin.

(وَقُلْ أَعْمَلُوا فَسَيَرَى اللَّهُ عَمَلَكُمْ وَرَسُولُهُ وَالْمُؤْمِنُونَ) [التوبة: 105]



Cette page est pour tout ce qui s'est construit dans le silence.

*À mes parents, mes racines et mes repères,
pour tout ce qu'ils ont donné, sans jamais rien attendre.*

*À mon père, exemple de persévérance,
et à ma mère, tendresse et force à la fois.
Leur foi en moi fut le souffle derrière chaque pas.*

*À mes frères,
qui avancent à leur manière, parfois à contrecœur.
Ce travail est une porte entrouverte —
vers ce que la volonté peut accomplir, au-delà des habitudes.*

*À mes amies,
pour leur présence simple, mais précieuse.
Des mots, parfois légers, mais porteurs de lumière.*

*À mon encadrant,
présent dans les moments qui comptaient.
Par son accompagnement attentif,
ce travail a pu prendre forme comme il le fallait.*

*Et à cette expérience,
qui n'a pas été qu'un projet académique,
mais une traversée silencieuse vers un soi plus lucide.
Là où la patience ne s'apprend pas, mais se vit.
Où l'attente devient enseignement,
et l'effort, langage discret du cœur.*

IKRAM

Je dédie ce travail :



À moi-même,

En reconnaissance de l'effort constant, de la résilience face aux défis, et de la foi inébranlable en mes rêves. Que ce travail soit le témoignage de ma détermination et de mon cheminement personnel.

À mes parents bien-aimés, Modèles de sagesse, de patience et d'amour inconditionnel, Recevez toute ma gratitude pour votre soutien indéfectible, vos prières silencieuses et votre foi en mon potentiel.

Ce modeste fruit de mon labeur vous est dédié, avec amour et respect.

Imene

Table des matières

- Liste des tableaux
- Liste des figures
- Liste des abréviations

INTRODUCTION.....1

CHAPITRE 1: LES BIOPESTICIDES

1. Définition des biopesticides.....4

2. Différentes catégories de biopesticides.....4

2.1. Biopesticides d'origine animale.....4

2.2. Biopesticides végétaux4

2.3. Biopesticides microbiens.....5

3. Avantages et inconvénients des biopesticides.....6

3.1. Avantages des biopesticides6

3.2. Inconvénients des biopesticides.....7

4. Caractéristiques des biopesticides.....7

CHAPITRE 2 : LES MONOTERPENES

1. Généralités sur les monoterpènes.....9

2. Classification des monoterpènes.....9

2.1. Monoterpènes acycliques (sans cycle).....9

2.2. Monoterpènes monocycliques (avec un seul cycle).....10

2.3. Monoterpènes bicycliques (deux cycles fusionnés).....10

3. Sources de monoterpènes.....11

4. Monoterpènes dans la lutte contre les insectes ravageurs.....14

4.1. Toxicité directe pour les insectes.....14

4.2. Inhibition de la croissance et perturbation du développement.....15

4.3. Propriétés répulsives.....15

MATERIEL & METHODES

| | |
|---|----|
| 1. Matériel biologique..... | 16 |
| 1.1. <i>D. melanogaster</i> organisme modèle | 16 |
| 1.2. Présentation du matériel biologique..... | 16 |
| 1.3. Taxonomie | 18 |
| 1.4. Cycle biologique..... | 18 |
| Fécondation et ponte..... | 18 |
| Stade œuf..... | 19 |
| Stade larvaire..... | 19 |
| Stade pupal..... | 20 |
| Stade adulte..... | 20 |
| 1.3. Elevage au laboratoire | 21 |
| 2. Présentation de l'insecticide et traitement des insectes | 23 |
| 2.1. Présentation de l'insecticide | 23 |
| 2.2. Traitement des insectes..... | 23 |
| 2.3. Essais toxicologiques..... | 24 |
| 3. Effet du linalool sur le développement..... | 25 |
| 3.1. Analyse morphologique..... | 25 |
| 3.2. Suivie de la croissance..... | 25 |
| 4. Analyse statistique..... | 26 |

RESULTATS

| | |
|--|----|
| 1. Toxicité du linalool chez les stades immatures..... | 27 |
| 2. Effet du linalool sur le développement..... | 30 |
| 2.1 Effets de linalool sur la morphologie..... | 30 |
| 2.2 Effets du linalool sur le poids des pupes..... | 32 |
| DISCUSSION..... | 35 |
| CONCLUSION & PERSPECTIVES | 39 |

RESUMES

Résumé.....40

Abstract.....41

الملخص.....42

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....43

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 1 : Effet du monoterpène administré <i>in vivo</i> par application topique à différentes doses (μg) chez les larves L3 de <i>D. melanogaster</i> (6h avant la formation du puparium) : Inhibition observée (%) de l'émergence adulte ($M \pm \text{SEM}$; $n = 3$ répétitions de 20 individus chacune)..... | 27 |
| Tableau 2 : Effet du monoterpène administré <i>in vivo</i> par application topique à différentes doses (μg) chez les larves L3 de <i>D. melanogaster</i> (6h avant la formation du puparium) : Inhibition corrigée (%) de l'émergence adulte. ($M \pm \text{SEM}$; $n = 3$ répétitions de 20 individus chacune)..... | 28 |
| Tableau 3 : Effets du monoterpène, administré par application topique à différentes doses (μg) chez les larves L3 de <i>D. melanogaster</i> (6h avant la formation du puparium), sur le pourcentage d'inhibition corrigé de la mue adulte. ($M \pm \text{SEM}$; $n = 3$ répétitions de 20 individus chacune): Analyse de la variance à un critère de classification..... | 28 |
| Tableau 4 : Toxicité du monoterpène ($\mu\text{g}/\text{larve}$), administré par application topique aux larves L3 de <i>D. melanogaster</i> 6h avant la formation du puparium: Détermination des doses d'inhibition de l'émergence adulte et leurs intervalles de confiance (95%). | 30 |
| Tableau 5 : Effets du monoterpène (DI_{25} et DI_{50}), administré par application topique chez les larves L3 de <i>D. melanogaster</i> (6h avant la formation du puparium), sur le poids (mg) des pupes. ($M \pm \text{SEM}$, $n=7$): Comparaison des moyennes à différents âges pour une même série. Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes ($P > 0,05$)..... | 33 |
| Tableau 6 : Effets du monoterpène (DI_{25} et DI_{50}), administré par application topique chez les larves L3 de <i>D. melanogaster</i> (6h avant la formation du puparium), sur le poids des pupes (mg). ($M \pm \text{SEM}$, $n=7$) : Analyse de la variance à deux critères de classification..... | 34 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1. Représentation schématique des six principaux types de biopesticides microbiens avec leurs exemples..... | 5 |
| Figure 2. Classification des monoterpènes..... | 10 |
| Figure 3. Citrus limon (Citron)..... | 11 |
| Figure 4. Menthe poivrée (Menth)..... | 11 |
| Figure 5. Feuilles et fruits d'Eucalyptus globulus (Eucalyptus)..... | 12 |
| Figure 6. Romarin (<i>Rosmarinus officinalis</i>)..... | 12 |
| Figure 7. Arbre à thé (<i>Melaleuca alternifolia</i>)..... | 13 |
| Figure 8. Graines de carvi (<i>Carum carvi</i>)..... | 13 |
| Figure 9. Lavande (<i>Lavandula angustifolia</i>)..... | 13 |
| Figure 10. Femelle et Mâle de <i>D. melanogaster</i> | 17 |
| Figure 11. Peignes sexuels..... | 17 |
| Figure 12. Œuf de <i>D. Melanogaster</i> | 19 |
| Figure 13. A. larve de premier stade. B. larve de deuxième stade. C. larve de troisième stade..... | 20 |
| Figure 14. Pupes de <i>D. melanogaster</i> . (A : Prépupe ; B : Pupa)..... | 20 |
| Figure 15. Cycle de vie de <i>D. melanogaster</i> en 25°C..... | 21 |
| Figure 16. Elevage au laboratoire de <i>D. melanogaster</i> . A : Préparation de la nourriture ; B : L'élevage dans l'étuve ; C : Repiquage..... | 22 |
| Figure 17. Structure chimique du linalool..... | 23 |
| Figure 18. Procédure expérimentale pour les essais toxicologiques..... | 24 |
| Figure 19. Procédure expérimentale pour le suivi de la croissance..... | 25 |

Figure 20 . Toxicité du monoterpène ($\mu\text{g}/\text{insecte}$), administré par application topique aux larves L3 de *D. melanogaster* 6h avant la formation du puparium : Inhibition corrigée (%) de l'émergence adulte ($M \pm \text{SEM}$, $n= 3$ répétitions de 20 individus chacune). Les lettres représentent le classement des doses selon le test HSD de Tukey29

Figure 21. Courbe dose-réponse exprimant le pourcentage d'inhibition corrigée de l'émergence adulte en fonction du logarithme de la dose du monoterpène, administré par application topique aux larves L 3 de *D. melanogaster* 6h avant la formation du puparium. $R^2= 0,99$. $Y=100/1+10(\log \text{EC}_{50} - X)*\text{Hill Slope}$ 29

Figure 22. Photos de différentes malformation enregistrées chez *D. melanogaster* après traitement. (A : Larve normale, B : Larve hyperpigmentée , C : Pupa normale , D : Pupa déformée , E : adulte morte , F : Pupa bloqué , G : adulte malformé (ailes déformé).....31

Figure 23 . Pourcentage d'aberrations morphologiques chez *D. melanogaster* après traitement des larves au dernier stade L3 6h avant la formation du puparium avec du linalool (ID_{25} , ID_{50}), ($M \pm \text{SEM}$, $n= 3$ répétitions de 15 individus). Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes ($p > 0,05$).....32

Figure 24. Effets du monoterpène (DI_{25} et DI_{50}), administré par application topique chez les larves L3 de *D. melanogaster* (6h avant la formation du puparium), sur le poids (mg) des pupes. ($m \pm \text{SEM}$, $n=7$): Comparaison des moyennes pour un même âge entre les différentes séries. Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes ($P > 0,05$).....33

Liste des abréviations

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture

PGPR : Plant Growth Promoting Rhizobacteria

UV : Ultraviolet

IPM : Lutte Intégrée contre les Ravageurs

D : Drosophila

DI : Doses d'inhibition de l'émergence adulte

R1 : Répétition 1

L3 : Stade larvaire 3

SHD : Honest Significant Difference

HJ : Hormone Juvénile (HJ)

M : Moyenne

SEM : Erreur Standard de la Moyenne

R² : Coefficient de Détermination

Ddl : Degré de liberté

SCE : Somme des carrés des écarts

CM : Carré moyen

ROS : Reactive oxygen species

F Obs : f observé

P: Niveau de sinificativité

AchE : Acétylcholinestérase

SNC : Système nerveux central

CI : Concentrations d'inhibition

h : Heure

µg/µl : Microgramme par microlitre

C : Degré Celsius

Introduction

Introduction

Les insectes jouent un rôle double dans l'environnement agricole. D'un côté, ils contribuent à la pollinisation des plantes et à l'augmentation de leur productivité, tandis que de l'autre côté, ils représentent l'un des principales menaces pour la production agricole (Ouaarous *et al.*, 2025). En se nourrissant des feuilles, des tiges et des fruits, ces insectes causent des dommages considérables aux cultures, constituant ainsi une menace sérieuse pour la production agricole (Schmitz *et al.*, 2022 ; Barathi *et al.*, 2024 ; Ouaarous *et al.*, 2025). L'ampleur de ces effets varie en fonction du type d'insecte, du stade de développement de la plante et de l'espèce cultivée. Selon l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO), les infestations de ravageurs sont responsables chaque année la perte d'environ 45 % de la production agricole mondiale (FAO, 2022 ; Schmitz *et al.*, 2022).

Pour faire face à ce problème, l'humanité a depuis des décennies, eu recours à l'utilisation de insecticides chimiques dans les cultures agricoles, en raison de leur efficacité élevée, leur action rapide contre les insectes, leur facilité d'utilisation et leur coût modéré (Al-Zahrani, 2019). Cependant, l'utilisation excessive et inappropriée de ces produits est associée à de nombreux effets néfastes sur l'environnement, notamment une toxicité pour les sols et les cultures accrue (OMS, 2021 ; Gravrilesco, 2015 ; Damalas & Koutroubas, 2016). Par ailleurs, ils affectent également des organismes non ciblés tels que les pollinisateurs, les ennemis naturels et les prédateurs lors de la lutte contre les ravageurs, ce qui entraîne une diminution significative de la biodiversité (Ndakidemi *et al.*, 2016). De plus l'usage très répandu de ces pesticides a entraîné l'apparition de formes de résistances chez les insectes cibles (Khamies *et al.*, 2024).

Par conséquent, compte tenu des inconvénients et des effets délétères des insecticides chimiques sur l'environnement ainsi que sur les organismes non ciblés, il est impératif de développer de nouvelles alternatives, plus sûres et durables, afin de remplacer ces produits entièrement, ou de minimiser leur utilisation (Ouabou *et al.*, 2024).

Dans le contexte actuel de transition vers des pratiques agricoles plus respectueuses de l'environnement, les biopesticides des substances issues de sources naturelles telles que les plantes, les bactéries, les champignons, les animaux ou certains minéraux représentent une alternative prometteuse aux insecticides chimiques et suscitent un intérêt croissant (Khursheed *et al.*, 2022). Plus sûrs et respectueux de l'environnement, ils sont de plus en plus utilisés dans

la lutte antiparasitaire (Khursheed *et al.*, 2022). Parmi eux, les biopesticides d'origine végétale forment un groupe significatif. Les huiles essentielles extraites de plantes aromatiques, sont largement employés pour lutter contre les insectes, grâce à divers mécanismes d'action insecticide (Regnault-Roger *et al.*, 2012 ; Khursheed *et al.*, 2022).

Ces huiles essentielles sont extraites de différentes parties des plantes, telles que les feuilles, les fleurs, les écorces, les racines ou les graines (Bakkali *et al.*, 2008). Elles se caractérisent par une composition chimique très complexe, riche en composés volatils bioactifs, principalement issus du métabolisme secondaire des plantes aromatiques (Bakkali *et al.*, 2008).

Parmi ces composés bioactifs, les monoterpènes représentent une catégorie de terpènes dénotant une formule moléculaire de $C_{10}H_{16}$ (Qasim *et al.*, 2024). Ces composés organiques sont des constituants majeurs des huiles essentielles de nombreuses plantes, suscitent un vif intérêt en raison de leurs arômes et saveurs distinctifs, ainsi que de leur efficacité potentielle dans la lutte contre les ravageurs (Qasim *et al.*, 2024). En plus d'attirer les pollinisateurs et les disperseurs de graines, ils protègent les plantes aromatiques et médicinales des facteurs de stress biotiques et abiotiques (Raguso, 2008, Dudareva *et al.*, 2013). Bien que les monoterpènes soient reconnus comme l'un des insecticides botaniques les plus puissants en raison de leur toxicité directe, de leurs effets répulsifs, de leur capacité à inhiber l'alimentation et à perturber la croissance des insectes ils sont toutefois considérés comme des substances sûres et biodégradables, présentant un faible risque pour les mammifères et l'écosystème (Isman, 2006 ; Qasim *et al.*, 2024).

Le linalool est un alcool monoterpénique acyclique insaturé que l'on retrouve couramment dans les huiles essentielles extraites de nombreuses plantes aromatiques, telles que *Aniba rosaeodora* Ducke, *Cinnamomum camphora*, la lavande ou encore *Coriandrum sativum* (Mączka *et al.*, 2022). Il est reconnu comme une substance sûre et a démontré plusieurs activités biologiques, notamment des activités antibactérienne (Abd El-Baky & Hashem, 2016), ainsi que des effets anti-inflammatoires (Kim *et al.*, 2019), anticancéreux (Zhao *et al.*, 2020 ; Elbe *et al.*, 2022), apoptotiques et antiprolifératifs (Kisacam *et al.*, 2022). Il possède une activité insecticide à large spectre et ses propriétés répulsives et anti-oviposition envers de nombreuses espèces d'insectes sont largement reconnues et bien documentées en particulier contre *Musca domestica* et *Ceratitis capitata* (Maganga *et al.*, 1996 ; Papanastasiou *et al.*, 2020). Cependant peu d'informations sont disponibles dans la littérature scientifique concernant l'effet de ce monoterpène sur le développement des insectes.

Introduction

Par conséquent, cette étude a pour objectif d'évaluer l'activité insecticide du linalol, un monoterpène majeur présent dans de nombreuses huiles essentielles, notamment celles d'*Ocimum basilicum* et de *Lavandula angustifolia*, deux plantes largement cultivées en Algérie. L'évaluation de l'activité insecticide sur le développement a été réalisée en utilisant *Drosophila melanogaster*, un modèle biologique de référence couramment utilisé pour tester l'efficacité des et la toxicité des insecticides (Scott & Buchon, 2019).

*Chapitre 1 : Les
biopesticides*

1. Définition des biopesticides

Les biopesticides, également appelés pesticides bio-rationnels, sont des organismes vivants ou des substances dérivées d'organismes vivants, qui se caractérisent par leur capacité à contrôler ou à éliminer les organismes nuisibles aux cultures, tels que les bactéries, les champignons, les mauvaises herbes, les virus et les insectes (Deravel *et al.*, 2014, Samada & Tambunan, 2020). Il peut être utilisé en agriculture conventionnelle et biologique et, bien qu'il soit moins toxique, il est devenu un sujet d'intérêt pour de nombreux agriculteurs de nombreux pays du monde dans le cadre de stratégies de contrôle (Deravel *et al.*, 2014). Les biopesticides peuvent être classés en trois grandes catégories, selon leur nature : les biopesticides microbiens, les biopesticides végétaux et les biopesticides animaux (Chandler *et al.*, 2011; Leng *et al.*, 2011).

2. Différentes catégories de biopesticides

2.1. Biopesticides d'origine animale

Les biopesticides d'origine animale sont une alternative écologique et efficace pour la lutte contre les ravageurs. Ils incluent les prédateurs naturels, tels que les coccinelles et les araignées, qui se nourrissent d'insectes nuisibles (Symondson *et al.*, 2002), ainsi que les parasites animaux, comme les nématodes entomopathogènes, qui infestent et éliminent les larves d'insectes (Gaugler, 2002). De plus, certaines toxines animales, extraites du venin d'araignées et de scorpions, montrent une efficacité insecticide sans nuire aux organismes non ciblés (Windley *et al.*, 2012 ; Bermúdez-Guzmán *et al.*, 2023).

2.2. Biopesticides végétaux

Les plantes représentent la source la plus importante de biopesticides, elles produisent des substances actives ayant des propriétés insecticides, aseptiques ou encore régulatrices de la croissance des plantes et des insectes. Le plus souvent, ces substances actives sont des métabolites secondaires qui, à l'origine, protègent les végétaux des herbivores (Deravel *et al.*, 2014).

Les biopesticides d'origine végétale exercent leur action en perturbant les processus physiologiques des ravageurs ou en interférant avec leur développement (Dupont et Martin, 2020). Par exemple certains, comme les pyréthrinés extraites du chrysanthème (*Chrysanthemum cinerariifolium*), perturbent le système nerveux des insectes en bloquant les

canaux sodiques, provoquant ainsi leur paralysie et leur mort rapide (National Pesticide Information Center). D'autres, comme l'azadirachtine issue l'arbre du Neem, *Azadirachta indica* A. Juss. (Meliaceae) interfèrent avec les hormones de croissance des insectes, induisant ainsi un effet perturbateur de leur développement, principalement représenté par une réduction de la nymphose, des malformations et un échec de l'émergence des adultes (Chaudhary *et al.*, 2017, Kilani-Morakchi *et al.*, 2021). De plus, certaines huiles essentielles, comme celles de menthe et d'eucalyptus, possèdent des propriétés répulsives qui éloignent les insectes sans les tuer directement (Regnault-Roger *et al.*, 2012). Enfin, certains composés végétaux, tels que les flavonoïdes et les terpénoïdes, modifient le comportement alimentaire des insectes, réduisant ainsi les dommages causés aux cultures (Simmonds, 2001).

2.3. Biopesticides microbiens

Cette catégorie comprend les bactéries, champignons, oomycètes, virus et protozoaires (Arthurs & Dara, 2019). L'efficacité de certains d'entre eux repose sur des substances actives dérivées des micro-organismes (Figure 1). Ce principe repose sur l'utilisation de ces substances actives, qui agissent contre le bio-agresseur plutôt que le micro-organisme lui-même.

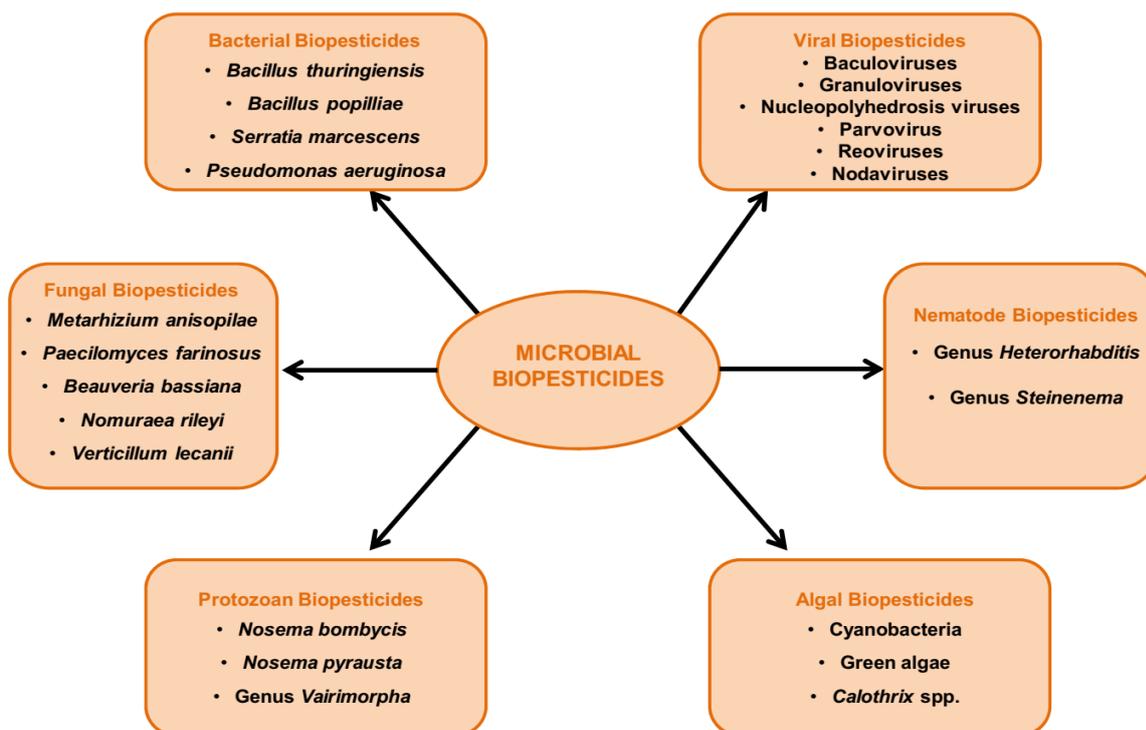


Figure 1. Représentation schématisée des six principaux types de biopesticides microbiens avec leurs exemples (Kumari *et al.*, 2022).

3. Avantages et inconvénients des biopesticides

3.1. Avantages des biopesticides

- ✓ **Respectueux de l'environnement** : Ils se décomposent rapidement dans la nature et ne causent pas de pollution environnementale comme les pesticides chimiques (Gupta & Dikshit, 2010). Les biopesticides sont généralement moins toxiques que les pesticides conventionnels.
- ✓ **Effet sélectif** : L'un des grands avantages des biopesticides est qu'ils ciblent uniquement les ravageurs nuisibles sans affecter les organismes bénéfiques comme les abeilles et autres insectes utiles (Marrone, 2019).
- ✓ **Réduction de la résistance des ravageurs** : Ils minimisent le risque de développement de résistances chez les ravageurs, assurant ainsi une efficacité durable (Gupta & Dikshit, 2010).
- ✓ **Sans danger pour la santé humaine et animale** : Ils ne laissent pas de résidus toxiques sur les cultures ou dans l'environnement, garantissant une consommation plus sûre (Marrone, 2019).
- ✓ **Amélioration de la qualité des cultures** : Ils favorisent la production de cultures plus saines et exemptes de produits chimiques nocifs, augmentant ainsi leur valeur nutritionnelle (Gupta & Dikshit, 2010). Certains micro-organismes endophytes et/ou certaines rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (Plant Growth Promoting Rhizobacteria ou PGPR) peuvent conférer à certaines cultures une tolérance aux stress abiotiques comme la sécheresse (Compant *et al.*, 2010 ; Zhang *et al.*, 2019).
- ✓ **Stimulation de la résistance naturelle des plantes** : Ils renforcent l'immunité des plantes contre les maladies et les ravageurs, réduisant ainsi le besoin de traitements répétés (Marrone, 2019).
- ✓ **Compatibilité avec la gestion intégrée des ravageurs (IPM)** : Ils peuvent être facilement intégrés aux stratégies de lutte intégrée pour améliorer l'efficacité et réduire les dommages environnementaux. (Gupta & Dikshit, 2010).

3.2. Inconvénients des biopesticides

- ✓ **Action plus lente** : Les biopesticides prennent plus de temps pour éliminer les ravageurs que les pesticides chimiques, car ils reposent sur des processus biologiques plutôt que sur une toxicité immédiate (Gupta & Dikshit, 2010).
- ✓ **Sensibilité aux conditions environnementales** : Leur efficacité est influencée par des facteurs comme la température, l'humidité et l'exposition aux rayons UV, ce qui peut réduire leur performance dans certaines conditions climatiques (Marrone, 2019).
- ✓ **Durée de conservation courte** : Comparés aux pesticides chimiques, les biopesticides ont souvent une durée de vie plus courte, ce qui limite leur stockage et leur utilisation sur le long terme (Gupta & Dikshit, 2010).
- ✓ **Coût de production élevé** : En raison des processus complexes de recherche, de développement et de production, les biopesticides sont souvent plus coûteux que leurs homologues chimiques (Marrone, 2019).
- ✓ **Spectre d'action limité** : Certains biopesticides ne sont efficaces que contre des ravageurs spécifiques, ce qui nécessite l'utilisation de plusieurs produits différents, contrairement aux pesticides chimiques à large spectre (Gupta & Dikshit, 2010).
- ✓ **Application fréquente requise** : Comme ils se dégradent rapidement dans l'environnement, ils doivent être appliqués plus souvent pour maintenir leur efficacité (Marrone, 2019).
- ✓ **Disponibilité commerciale limitée** : Tous les biopesticides ne sont pas facilement accessibles sur le marché, contrairement aux pesticides chimiques largement distribués (Gupta & Dikshit, 2010).

3. Caractéristiques des biopesticides

- ✓ **Sélectivité** : Les plantes et les insectes ont coévolué ensemble, développant des interactions étroites. Les insectes pollinisateurs favorisent la reproduction des plantes, tandis que les insectes phytophages dépendent des végétaux pour se nourrir (Marrone, 2019).

- ✓ **Spécificité** : L'efficacité des huiles essentielles varie selon les espèces. Une même molécule peut avoir des effets différents selon le stade de développement de l'insecte (Isman, 2000).
- ✓ **Biodégradabilité** : Les molécules végétales sont facilement dégradées par des processus enzymatiques, avec une durée de demi-vie courte, allant de quelques heures à quelques jours (Gupta & Dikshit, 2010).
- ✓ **Résistance** : Une utilisation excessive et répétée des insecticides phytochimiques peut entraîner des résistances. Il est donc recommandé d'alterner les formulations et de limiter les applications (Marrone, 2019).
- ✓ **Biodisponibilité** : La disponibilité des molécules végétales dépend de plusieurs facteurs (environnementaux, physiologiques, génétiques). Leur large présence dans le règne végétal permet toutefois de compenser certaines limites (Wink, 2015).
- ✓ **Courte durée de vie résiduelle** : Les biopesticides sont facilement biodégradables et présentent une faible toxicité pour les organismes non ciblés, ce qui réduit leur impact environnemental (Gupta & Dikshit, 2010).

*Chapitre 2: Les
monoterpènes*

1. Généralités sur les monoterpènes

Les monoterpènes sont des hydrocarbures naturels appartenant à la famille des terpènes. Ils sont constitués de deux unités d'isoprène (C_5H_8), ce qui leur confère une structure chimique de $C_{10}H_{16}$ (Moghddam & Mehdizadeh, 2016).

Ces composés organiques constituent une part importante des huiles essentielles présentes dans de nombreuses plantes, les enrichissant d'arômes et de saveurs distinctifs. Leurs divers rôles en écologie végétale englobent les mécanismes de défense contre les herbivores et les pathogènes, l'attraction des pollinisateurs et les interactions allélopathiques (Qasim *et al.*, 2024).

Les monoterpènes sont volatils, entraînés à la vapeur d'eau, d'odeur souvent agréable et représentent la majorité des constituants des huiles essentielles, ils constituent parfois plus de 90% de l'huile essentielle (Citrus, Térébenthines) (Başer & Buchbauer, 2010).

Certains monoterpènes sont des hydrocarbures acycliques (comme le myrcène et l'ocimène) ou leurs dérivés (comme le linalol et le géraniol), mais les monoterpènes cycliques et leurs dérivés (comme le limonène, les pinènes, le camphre, l'alpha-terpinéol, l'alcool périllylique, le carveol, la carvone et les menthols) sont plus abondants dans la nature et ont davantage d'applications industrielles (Kang & Lee, 2016).

2. Classification des monoterpènes

Les monoterpènes peuvent être classés en trois grandes catégories en fonction de leur structure (Zielińska-Błajet & Feder-Kubis, 2020 ; Mabou & Yossa, 2021) :

2.1. Monoterpènes acycliques (sans cycle)

Ces composés ont une structure linéaire et sont souvent des précurseurs d'autres monoterpènes.

Exemples :

Géraniol, un alcool monoterpénique présent dans diverses huiles essentielles, connu pour ses propriétés antimicrobiennes (Zielińska-Błajet & Feder-Kubis, 2020).

Myrcène, retrouvé dans le houblon et le cannabis, reconnu pour ses effets anti-inflammatoires (Mabou & Yossa, 2021).

2.2. Monoterpènes monocycliques (avec un seul cycle)

Ces composés possèdent un cycle à six chaînons et sont souvent retrouvés dans les huiles essentielles.

Exemples :

Linalol, présent dans la lavande et la coriandre, utilisé en parfumerie et en aromathérapie (Mabou & Yossa, 2021).

Thymol, extrait du thym, aux propriétés antiseptiques (Zielińska-Błajet & Feder-Kubis, 2020).

Limonène, abondant dans les écorces d'agrumes, employé en parfumerie et comme solvant naturel (Mabou & Yossa, 2021).

2.3. Monoterpènes bicycliques (deux cycles fusionnés)

Ces composés contiennent deux cycles fusionnés et sont couramment présents dans les résines de conifères.

Exemples :

α -Pinène et β -Pinène, principaux constituants des résines de pin, avec des propriétés anti-inflammatoires (Zielińska-Błajet & Feder-Kubis, 2020).

Camphre, extrait du camphrier, utilisé pour ses propriétés analgésiques et antimicrobiennes (Mabou & Yossa, 2021).

Bornéol, retrouvé dans certaines huiles essentielles et employé en médecine traditionnelle chinoise (Zielińska-Błajet & Feder-Kubis, 2020).

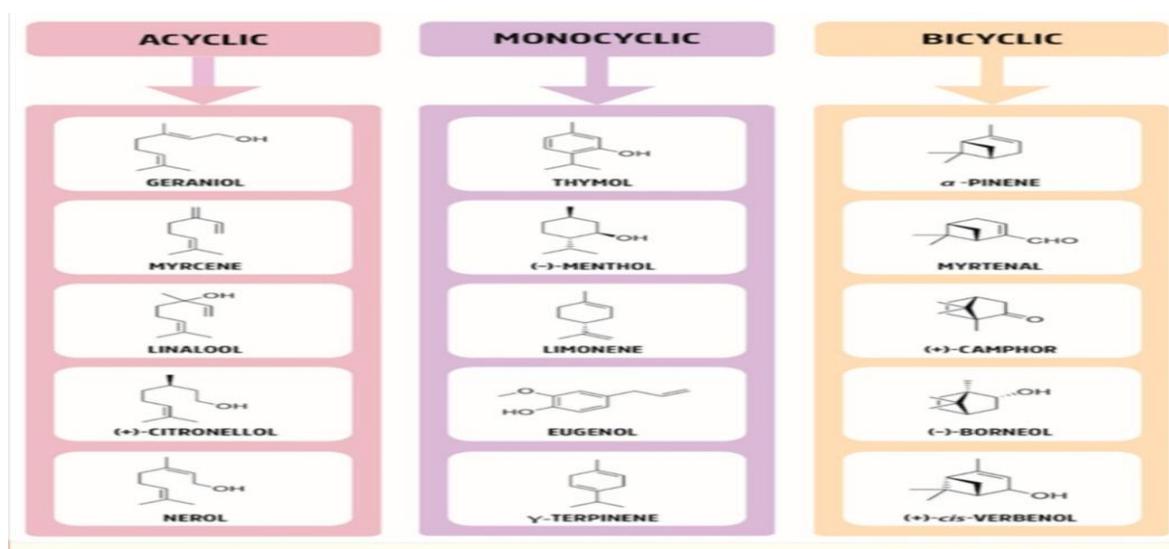


Figure 2. Classification des monoterpènes (Zielińska-Błajet & Feder-Kubis, 2020).

3. Sources de monoterpènes

Les monoterpènes sont des composés organiques naturels constitués de dix atomes de carbone et présents principalement dans les huiles essentielles des plantes aromatiques et médicinales. Ils jouent un rôle essentiel dans les arômes, la parfumerie, ainsi que dans les applications pharmaceutiques et industrielles.

- ❖ **Agrumes (*Citrus spp.*)** : Les écorces de citron, d'orange et de pamplemousse sont riches en limonène (Limonène), un monoterpène connu pour ses propriétés antioxydantes et anti-inflammatoires (Baser & Buchbauer, 2010).



Figure 3. Citrus limon (Citron). ephytia.inra.

- ❖ **Menthe poivrée (*Mentha piperita*)** : L'huile essentielle de menthe contient menthol (Menthol) et menthone (Menthone), responsables de ses effets rafraîchissants et antiseptiques, largement utilisés en pharmacie et en agroalimentaire (Lawrence, 2006).



Figure 4. Menthe poivrée (Menth).

- ❖ **Eucalyptus (*Eucalyptus globulus*)** : Cette plante est une source majeure de 1,8- cinéole (Eucalyptol), reconnu pour ses effets antibactériens et son utilisation dans les médicaments contre la toux et les affections respiratoires (Dorman & Deans, 2000).



Figure 5. Feuilles et fruits d'*Eucalyptus globulus* (Eucalyptus)- Laboratoire altho, s.d.

- ❖ **Romarin (*Rosmarinus officinalis*)** : Contient α -pinène (α -Pinène) et β -pinène (β -Pinène), deux composés aux propriétés antioxydantes et antimicrobiennes, utilisés en cosmétique et en aromathérapie.



Figure 6. Romarin (*Rosmarinus officinalis*). www.leparisien.fr

- ❖ **Huile d'arbre à thé (*Melaleuca alternifolia*)** : Riche en terpinène-4-ol (Terpinen-4-ol), cet ingrédient est réputé pour ses effets antifongiques et antibactériens, couramment utilisé dans les soins de la peau (Carson & Hammer, 2006).



Figure 7. Arbre à thé (*Melaleuca alternifolia*). nantes-naturopathe.fr.

- ❖ **Graines de carvi (*Carum carvi*)** : Elles contiennent une forte concentration de carvone (Carvone), responsable de leur arôme caractéristique et utilisé en parfumerie et en phytothérapie (Chemat & Cravotto, 2013).



Figure 8. Graines de carvi (*Carum carvi*). www.graines-semences.com

- ❖ **Lavande (*Lavandula angustifolia*)** : Contient du linalol et de l'acétate de linalyle, qui confèrent à la lavande ses propriétés aromatiques et relaxantes.



Figure 9. Lavande (*Lavandula angustifolia*). fr.wikipedia.org

4. Monoterpènes dans la lutte contre les insectes ravageurs

Depuis plusieurs décennies, les insectes ont posé des défis considérables à l'agriculture, à la santé publique et à la conservation des aliments, entraînant ainsi une recherche continue de stratégies efficaces de lutte contre ces ravageurs (Afzal *et al.*, 2020 ; Qasim *et al.*, 2020). Bien que les insecticides synthétiques conventionnels se soient révélés efficaces, ils causent souvent des dommages environnementaux favorisent l'apparition de résistances chez les insectes et posent des risques potentiels pour la santé humaine. Par conséquent, il y a une fascination croissante pour l'exploration de solutions insecticides alternatives et respectueuses de l'environnement. Un domaine d'étude particulièrement prometteur implique l'examen des monoterpènes, un groupe varié de composés organiques d'origine naturelle (Liu *et al.*, 2022, Gharib *et al.*, 2024). Les monoterpènes sont efficaces contre les insectes nuisibles, grâce à divers mécanismes, tels que la toxicité directe, activité répulsifs, antiappétante et l'inhibition de croissance.

4.1. Toxicité directe pour les insectes

Les monoterpènes exercent des effets neurotoxiques sur les insectes par le biais de divers mécanismes d'action. Ces composés perturbent le fonctionnement du système nerveux en modulant les canaux ioniques, les récepteurs et les enzymes impliqués dans la transmission de l'influx nerveux (Qasim *et al.*, 2024 ; Tong & Coats, 2012). Certains monoterpènes ciblent les récepteurs du GABA (acide gamma-aminobutyrique), entraînant une activité neuronale excessive et incontrôlée, qui peut conduire à la paralysie, voire à la mort de l'insecte (Priestley *et al.*, 2003 ; Tong & Coats, 2012). D'autres inhibent l'acétylcholinestérase, une enzyme clé dans la dégradation de l'acétylcholine ; cette inhibition provoque une accumulation de ce neurotransmetteur au niveau des synapses, entraînant une stimulation prolongée des nerfs et des muscles (Isman, 2000 ; Enan, 2001).

De plus, des monoterpènes comme le limonène, l' α -pinène, le camphre et le menthol possèdent des effets cytotoxiques, provoquant des dommages aux membranes cellulaires et aux processus métaboliques (Bakkali *et al.*, 2008 ; Isman, 2000). Ils induisent également un stress oxydatif en générant des espèces réactives de l'oxygène (ROS), ce qui entraîne des altérations des composants cellulaires (Bakkali *et al.*, 2008). Certains monoterpènes peuvent

également perturber le système respiratoire des insectes en affectant le fonctionnement des mitochondries, conduisant ainsi à une diminution de l'énergie et à la mort de l'insecte.

4.2. Inhibition de la croissance et perturbation du développement

Certains monoterpènes affectent la croissance et le développement des insectes nuisibles. Des recherches ont montré que des composés tels que l'eucalyptol, le S- (+)-carvone, le trans-anéthol et le thymol entravent le processus de mue, ralentissant ainsi la croissance des larves et réduisant leur capacité de reproduction (Pavela, 2008 ; Koul *et al.*, 2008).

Ces composés agissent par plusieurs mécanismes, notamment l'altération du système neuroendocrinien, qui régule des hormones essentielles à la croissance, comme l'hormone juvénile et l'ecdysone, indispensables à la mue et à la métamorphose (Regnault-Roger *et al.*, 2012). De plus, certains monoterpènes ont une action antialimentaire, limitant ainsi l'ingestion de nutriments et l'énergie nécessaire au développement (Isman, 2006). Par ailleurs, les monoterpènes inhibent les enzymes digestives, réduisant l'absorption et l'utilisation des nutriments (Pavela, 2009). Ces perturbations entraînent un retard dans la mue, des malformations aux stades larvaires pouvant aller jusqu'à la mortalité des larves ou des nymphes (Tripathi *et al.*, 2009). Ces effets sont attribués à une perturbation hormonale et à une toxicité directe sur les tissus en développement (Regnault-Roger *et al.*, 2012).

4.3. Propriétés répulsives

L'efficacité des monoterpènes en tant que répulsifs contre les insectes est attribuée à leur volatilité, qui leur permet de s'évaporer rapidement et de créer une barrière protectrice contre les attaques d'insectes (Isman, 2006). Ces composés perturbent les récepteurs olfactifs des insectes, les empêchant ainsi de localiser leurs hôtes ou leurs sources de nourriture (Nerio *et al.*, 2010).

Matériels
&
Méthodes

1. Matériel biologique

1.1. *D. melanogaster* organisme modèle

La vaste connaissance de la génétique de *D. melanogaster* et l'expérience expérimentale à long terme avec cet organisme, ainsi que son importante homologie génétique avec les mammifères, en font un outil unique pour la recherche sur les mutations et la toxicologie génétique. De nombreux gènes de *Drosophila* sont homologues à ceux des humains et sont étudiés afin de mieux comprendre le rôle que ces protéines jouent chez l'être humain (Parvathi *et al.*, 2009).

Les recherches génétiques sur *Drosophila* menées au cours des 50 dernières années ont permis d'accumuler une vaste littérature de référence et une connaissance approfondie de centaines de ses gènes.

Cet organisme est idéal pour plusieurs raisons : Les mouches du vinaigre sont robustes, ont des besoins alimentaires simples et occupent peu d'espace. Leur cycle de vie est achevé en environ 12 jours à température ambiante, ce qui permet une analyse rapide des croisements expérimentaux. Elles produisent un grand nombre de descendants, ce qui facilite la collecte de données suffisantes.

L'examen et la collecte de données sont simples, car les mouches peuvent être rapidement et facilement immobilisées pour l'observation. De nombreux types de variations héréditaires peuvent être identifiés avec une faible puissance de grossissement (Parvathi *et al.*, 2009).

1.2. Présentation du matériel biologique

D. melanogaster (Meigen, 1830) organisme modèle, est aussi appelée mouche du vinaigre (Figure 10). C'est un insecte hygrophile, présentant une métamorphose complète de type holométabole (Colombani *et al.*, 2006). Les mouches mesurent environ 3 ou 4 mm de long, ailes incluses et présentent une coloration brun jaunâtre, avec des anneaux transversaux noirs au travers de l'abdomen. Elles se caractérisent par leurs yeux rouge vif et leurs antennes courtes munies d'une extrémité plumeuse.

Les individus adultes de *D. melanogaster* présentent en moyenne un poids de 0,54 mg et une durée de vie de 30 jours à une température de 29°C. Un dimorphisme sexuel (Parvathi *et*

al., 2009) noté par les paramètres détaillés ci-dessous, permet de différencier les mâles et les femelles :

Taille de l'adulte : mâles plus petits que les femelles

- Femelles : 4 mm
- Mâles : 3 mm

• **Forme de l'extrémité de l'abdomen :**

- Femelles : allongée
- Mâles : arrondie

• **Marques sur l'abdomen :**

- Femelles : bandes sombres et claires alternées sur la partie arrière
- Mâles : fusion des derniers segments terminaux qui sont très foncés

• **Nombre des segments abdominaux :**

- Femelles : 8 segments
- Mâles : 5 segments

• **Organes sexuels situés à l'extrémité de l'abdomen :**

- Femelles : plaque vaginale non colorée
- Mâles : pénis très coloré

• **Peignes sexuels :**

- Femelles : Absence de peignes
- Mâles : présents au niveau de la première paire de pattes

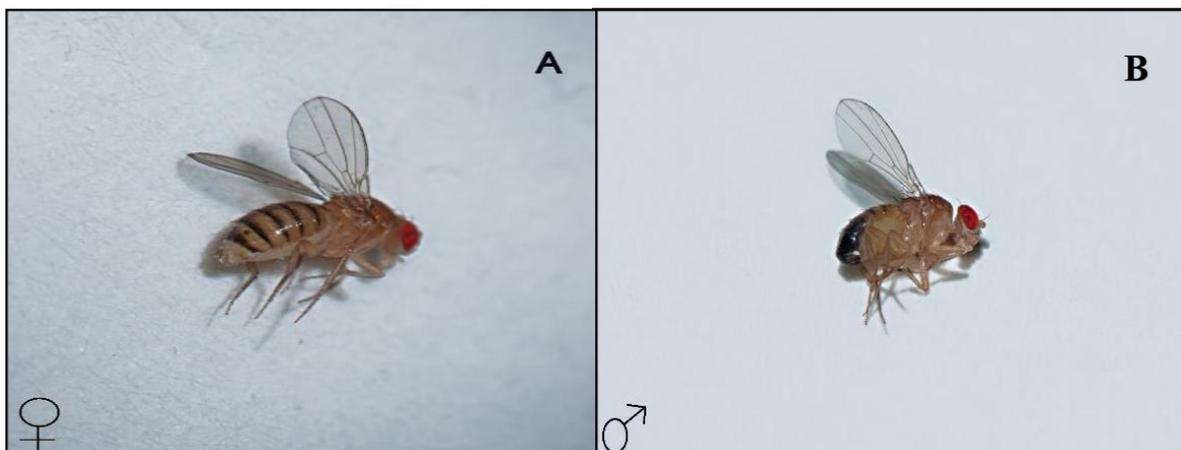


Figure 10. Femelle et Mâle de *D. melanogaster* (A : Cr x 6,87 ; B : x 5,94). (Boulahbel, 2015).



Figure 11. Peignes sexuels. www.snv.jussieu.fr/bmedia/ATP/images/drospatf.

1.3. Taxonomie

Sa position systématique est la suivante :

| | |
|---------------------------|-------------------------------|
| Règne | Animalia |
| Embranchement | Arthropoda |
| Sous embranchement | Hexapoda |
| Classe | Insecta |
| Sous-classe | Pterygota |
| Infra-classe | Neoptera |
| Ordre | Diptera |
| Sous-ordre | Brachycera |
| Infra-ordre | Muscomorpha |
| Famille | Drosophilidae |
| Sous-famille | Drosophilinae |
| Genre | Drosophila |
| Espèce | Melanogaster (Meigen , 1830). |

1.4. Cycle biologique

D. melanogaster est caractérisée par une reproduction très rapide (Griffiths *et al.*, 2002), cet insecte élevé au laboratoire, se reproduit toute l'année, sans interruption, avec une nouvelle génération tous les 10 jours à une température de 25°C donnant ainsi plus de 30 générations par an.

Le cycle de vie de la mouche drosophile se divise en quatre phases durant lesquelles les individus prennent des morphologies très différentes : l'œuf (stade embryonnaire), la larve (stade larvaire), la pupa (stade pupal) et l'imago (stade adulte). La durée de ces stades est variable d'après la température de culture (Figure 15).

Fécondation et ponte

Les femelles peuvent être fécondées dès la seizième heure après leur émergence. En général, une femelle n'est fécondée qu'une seule fois dans sa vie et utilise les spermatozoïdes stockés dans sa spermathèque. La ponte commence dès le deuxième jour de la vie adulte (Schnakenberg *et al.*, 2012).

Stade œuf

La femelle peut pondre jusqu'à 300 œufs (Goudey-Perrière & Perrière, 1974), soit de 25 à 35 œufs par jour, d'environ 0,5 mm de long, allongés et blanchâtres, présentant une forme semblable à un ballon de rugby (Figure 12). Dans la nature, la femelle pond des centaines d'œufs sur des fruits en putréfaction ou d'autres matières humides ou en fermentation (Tavernier & Lizeaux, 2002).

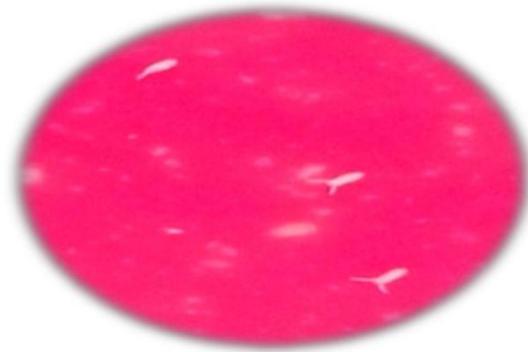


Figure 12. Œuf de *D. melanogaster* (Saadane, 2022).

Stade larvaire

Une trentaine d'heures après la ponte, les œufs vont éclore pour donner naissance à une larve blanchâtre appelée aussi asticot. Celle-ci se nourrit continuellement en creusant des galeries dans le milieu nutritif. Le stade larvaire qui dure 4 jours environ se compose de trois stades (L1, L2 et L3 d'une durée respective de 24 h, 24 h et 48 h) (Figure 13). A la fin de ce dernier stade, les larves cessent de s'alimenter, sortent du milieu nutritif et entame une phase

d'errance. À son terme, les larves s'encapsulent dans un puparium où se déroule la métamorphose, sécrétant une glue et se fixant sur un support (Ferdenache, 2021).

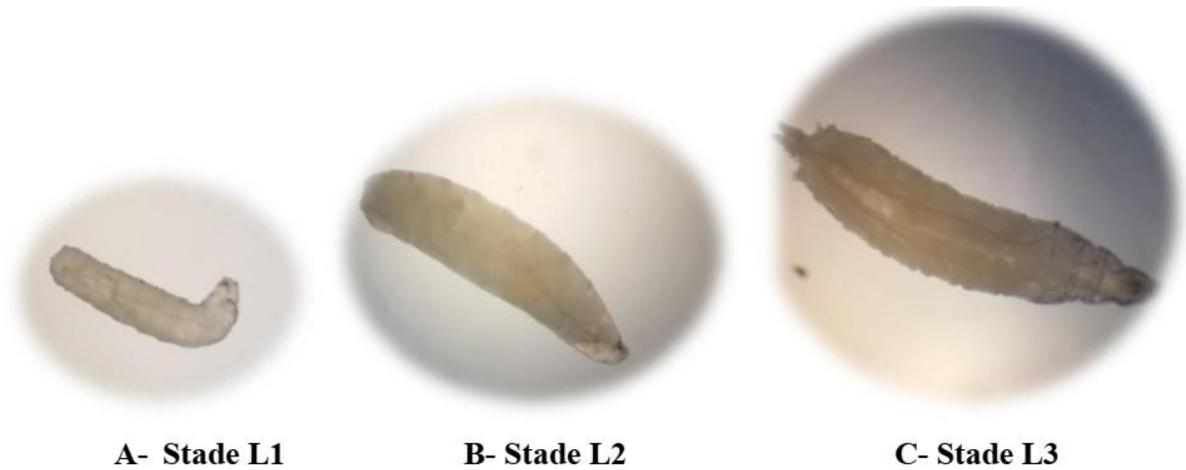


Figure 13. A. larve de premier stade. B. larve de deuxième stade. C. larve de troisième stade (Saadane, 2022).

Stade pupal

La *Drosophile* se trouve alors au stade pré-pupal, qui dure environ 12 heures et va subir d'importantes modifications morphologiques et structurales. Le stade pupe (Figure 14) qui se poursuit alors pendant 4 jours au terme desquels, toutes les structures larvaires sont détruites et les structures adultes sont mises en place (Quinn *et al.*, 2012).



Figure 14. Pupes de *D. melanogaster*. (A : Prépupe ; B : Pupe) (Saadane, 2022).

Stade adulte

4 jours après l'empupement l'adulte de *D. melanogaster* émerge par l'opercule du puparium. La jeune drosophile adulte apparaît avec un corps non encore pigmenté mais au

bout de 6 à 8 heures la pigmentation est achevée et les ailes sont gonflées. Les adultes s'alimentent des fruits mûrs ou avariés, des végétaux et des champignons en décomposition ainsi que les liquides fermentés (Tracqui & Demongeot, 2003). Les femelles sont fécondables (matures sexuellement) et s'accouplent environ 12 après être sorties de leur pupa. Elles stockent le sperme des mâles auxquels elles se sont accouplées pour pouvoir l'utiliser ultérieurement et commencent à pondre un jour plus tard (Tavernier & Lizeaux, 2002).

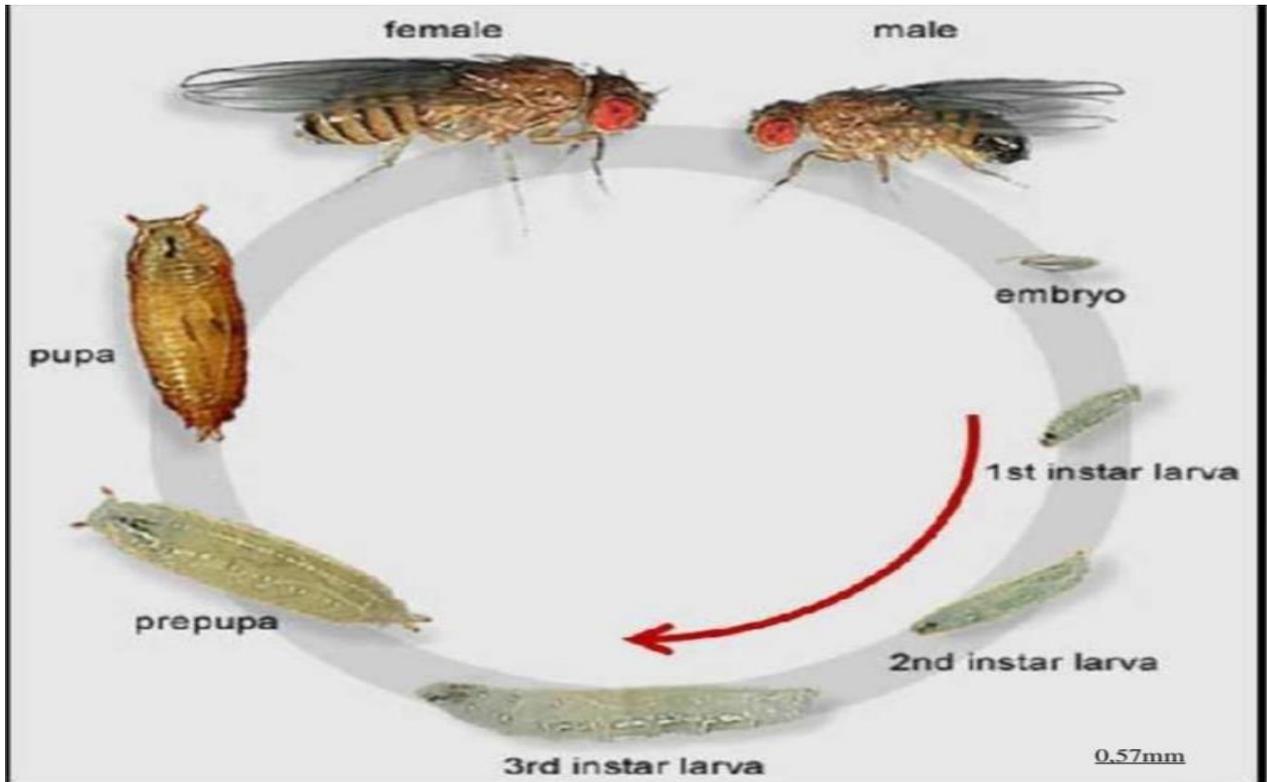


Figure 15. Cycle de vie de *D. melanogaster* en 25°C (Jouandin, 2013).

1.5. Elevage au laboratoire

L'élevage des drosophiles (souche canton S : souche de référence) se fait sur un milieu nutritif artificiel standard, en laboratoire dans une étuve, sous un cycle jour-nuit de 12 h, une température de 25°C et une hygrométrie de 70% dans des flacons en plastique bouchés par un tampon de mousse (Figure 16 A). Le milieu nutritif artificiel gélosé sur lequel est élevée la drosophile il doit être suffisamment solide pour éviter l'engluement des adultes, sans cependant être trop compact pour permettre le développement des larves. Ce milieu gélosé est composé essentiellement de 33,3 g semoule de maïs, 33,3 g levure de bière, 4,8 g d'agar-agar et de l'eau distillée selon nécessité, Le mélange est porté à ébullition pendant 2 à 3

Matériels & Méthodes

minutes en agitant sans arrêt pour ne pas accrocher au fond de la casserole. Après refroidissement on ajoute 3 ml d'antifongique (acide propionique) (Figure 16 B). Le substrat est versé dans des bouteilles en plastique qui seront fermées avec un bouchon en mousse permettant le passage de l'air (Figure 16 C).

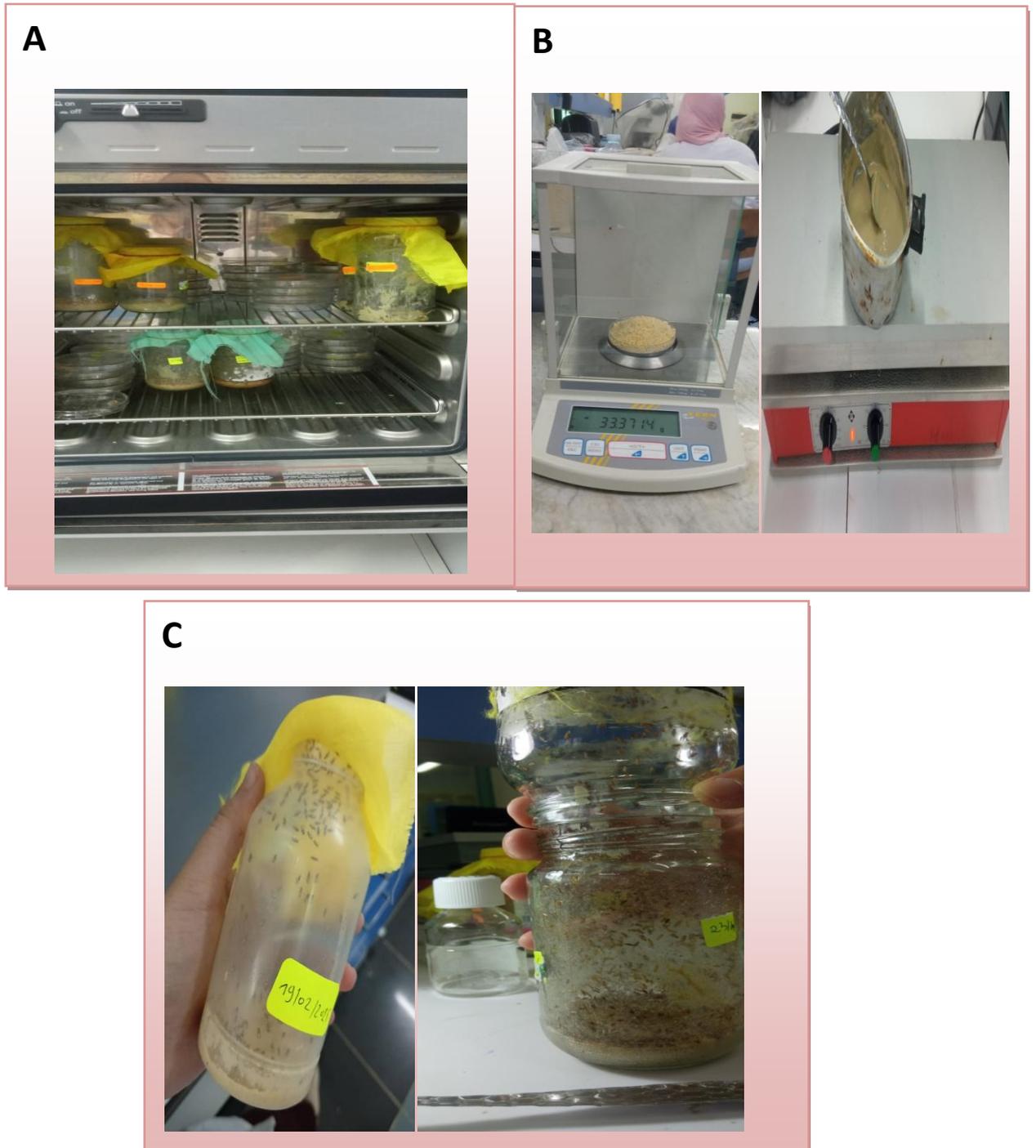


Figure 16. Elevage au laboratoire de *D. melanogaster*. **A** : Elevage dans une étuve ;
B : Préparation de la nourriture ; **C** : Repiquage.

2. Présentation de l'insecticide et traitement des insectes

2.1. Présentation de l'insecticide

Le linalool est un monoterpène alcoolique présent dans les huiles essentielles extraites de nombreuses plantes aromatiques, notamment dans celle de lavande, le basilic et la coriandre (Pereira *et al.*, 2018). Son nom chimique est le 3,7-diméthyl-1,6-octadién-3-ol et sa formule chimique brute est $C_{10}H_{18}O$ (Figure 17).

Le linalool possède un poids moléculaire de 154,25 g/mol, est légèrement soluble dans l'eau, sa solubilité est d'environ 0.00159 g/mL à 25 °C, ce qui le classe parmi les composés faiblement solubles dans l'eau (Amiri *et al.*, 2016).

Il se présente sous deux stéréo-isomères : le (R) - (+) - linalool et le (S) - (-) – linalool, qui se distinguent par les caractéristiques de leur odeur et leur rotation optique (Peano *et al.*, 2002).

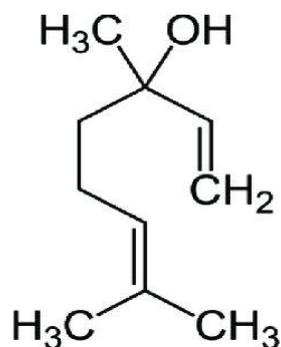


Figure 17. Structure chimique du linalool (Cakmak *et al.*, 2019).

2.2. Traitement des insectes

Le monoterpène a été dissous dans l'acétone, puis administré par application topique à l'aide d'une micro-seringue (Hamilton) sur la face dorsale des larves L3 au dernier stade larvaire 6h avant la formation du puparium (Figure 18). Dans le but de synchroniser l'élevage et d'obtenir des larves de troisième stade (L3) du même âge, des adultes mâles et femelles âgés de 4 à 5 jours sont prélevés dans l'élevage de masse. Ensuite, ils sont placés à pondre dans un tube contenant un milieu frais pendant une période de 4 heures. Les adultes sont ensuite enlevés et les tubes sont maintenus dans les conditions standard mentionnées

précédemment. Après 5 jours les larves obtenues seront alors à la fin du dernier stade larvaire (L3) (Fougeron, 2011).



Figure 18. Procédure expérimentale pour les essais toxicologiques.

2.3. Essais toxicologiques

Après un screening préalable, le biopesticide a été testé à différentes doses variant de 12,5 à 400 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$. Les essais de toxicité ont été effectués dans des boîtes de Pétri en plastique contenant chacune 20 individus; trois répétitions ont été réalisées pour chaque concentration (Figure 18). Une série témoin est conduite en parallèle et les larves reçoivent uniquement 1 μl de solvant (Acétone). Les larves des séries témoins et traitées sont maintenues dans les conditions standard citées plus haut.

La mortalité observée a été enregistrée quotidiennement jusqu' à l'émergence des adultes et a été calculée pour les différentes séries à partir de la mortalité cumulée des stades immatures (larves mortes, pupes mortes, mues bloquées et incomplètes et adultes malformés).

Les pourcentages d'inhibition observée obtenus ensuite sont corrigés selon la formule Abbott (1925) afin d'éliminer la mortalité naturelle puis font l'objet d'une transformation angulaire selon les tables de Bliss (1938), cités par Fisher et Yates (1957). Les données ainsi normalisées font l'objet d'une analyse de la variance à un critère de classification et un classement des concentrations par le test HSD de Tukey, afin d'évaluer l'effet de monoterpène. Enfin, la régression non linéaire exprimant le pourcentage de mortalité corrigée en fonction du logarithme de la dose a permis d'estimer, pour le monoterpène, les doses d'inhibition de l'émergence adulte (DI_{10} , DI_{25} et DI_{50}) ainsi que leurs intervalles de confiance (95 % IC).

3. Effet du linalool sur le développement

3.1. Analyse morphologique

Afin de repérer d'éventuelles anomalies morphologiques chez les insectes après exposition à l'insecticide, une analyse morphologique a été réalisée 24 heures après le traitement des larves au dernier stade L3 (6h avant la formation du puparium) et ce jusqu'à l'émergence des adultes. Les différentes malformations ont été observées afin de réaliser une analyse morphologique. Les pourcentages correspondant à chaque phénotype ont été calculés à partir de trois répétitions, comprenant chacune 20 insectes par série.

3.2. Suivi de la croissance

La croissance de *D. melanogaster* des séries témoins et traitées au biopesticide (DI_{25} et DI_{50}) a été évaluée par la mesure du poids (balance de précision : Sartorius AG Gottinger, Germany) des pupes durant toute la durée du stade pupal (0, 1, 2 et 3 jours) (Figure 19).

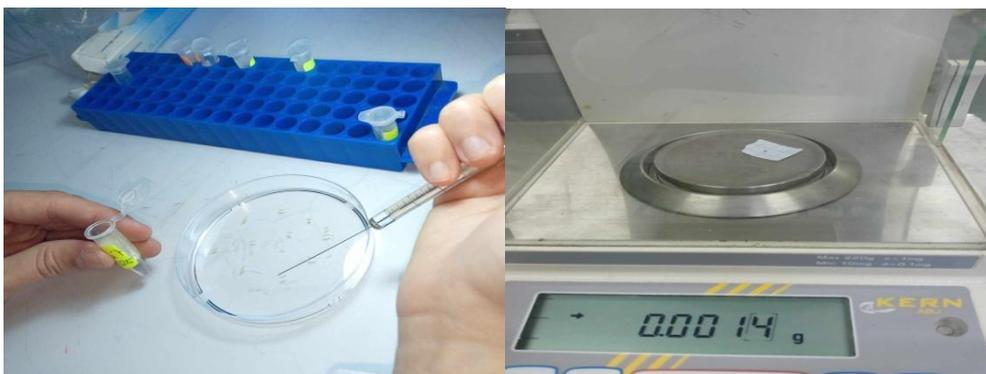


Figure 19. Procédure expérimentale pour le suivi de la croissance.

4. Analyse statistique

Les résultats ont été exprimés sous la forme de moyennes \pm SEM pour chaque série d'expériences. L'homogénéité des variances a été vérifiée à l'aide du test de Bartlett.

Une régression non linéaire utilisant une courbe dose réponse sigmoïdale exprimant le pourcentage des mortalités enregistrées en fonction des logarithmes des doses a permis d'estimer les différentes doses létales. L'analyse de la variance un et deux critères de classification suivie du test HSD (Honest Significant Difference) de Tukey est utilisée pour traiter les résultats concernant, les pourcentages de mortalité, l'étude morphologique et le poids des pupes. Toutes les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide du logiciel GraphPad Prism version 6.1 pour Windows (GraphPad software, La Jolla California, USA, www.Graphpad.com).

Résultats

1. Toxicité du linalool chez les stades immatures

Le traitement avec le linalool en application topique à des doses variant de 12,5 à 400 µg/larve sur les larves de dernier stade (L3: 6h avant la formation du puparium), a induit une inhibition de l'émergence adulte dont les pourcentages sont précisés dans le tableau 1.

Le pourcentage d'inhibition observée enregistré chez les séries témoins (inhibition naturelle) est de l'ordre de $6,66 \pm 1,66$ %. Ce pourcentage d'inhibition naturelle augmente, de manière proportionnelle aux doses administrées chez les séries traitées. Ainsi, il est noté, pour la dose la plus élevée, un pourcentage d'inhibition observée de $98,33 \pm 1,67$ %.

Tableau 1 : Effet du monoterpène administré *in vivo* par application topique à différentes doses (µg) chez les larves L3 de *D. melanogaster* (6h avant la formation du puparium) : Inhibition observée (%) de l'émergence adulte (M±SEM; n=3 répétitions de 20 individus chacune).

| | Témoins | 12,5 | 25 | 50 | 100 | 200 | 400 |
|------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| R1 | 5 | 15 | 35 | 56,66 | 70 | 85,33 | 100 |
| R2 | 10 | 10 | 35 | 50 | 71,66 | 88 | 95 |
| R3 | 5 | 10 | 38,33 | 55 | 70 | 85 | 100 |
| M ± SEM | 6,66 ± 1,66 | 11,67 ± 1,66 | 36,11 ± 1,11 | 53,89 ± 2,00 | 70,55 ± 0,55 | 86,11 ± 0,94 | 98,33 ± 1,67 |

L'élimination de la mortalité naturelle (inhibition naturelle), permet l'obtention des pourcentages d'inhibition corrigés de la mue adultes présentés dans le tableau 2. Les résultats obtenus, montrant une augmentation de l'inhibition l'émergence adulte en fonction des doses, indiquent des valeurs de l'ordre de $5,26 \pm 3,03$ à la dose la plus faible (12,5 µg) à $98,15 \pm 1,85$ à la dose la plus forte (400 µg) (Tableau 2).

Tableau 2 : Effet du monoterpène administré *in vivo* par application topique à différentes doses (μg) chez les larves L3 de *D. melanogaster* (6h avant la formation du puparium) : Inhibition corrigée (%) de l'émergence adulte. ($M \pm \text{SEM}$; $n=3$ répétitions de 20 individus chacune).

| | 12,5 | 25 | 50 | 100 | 200 | 400 |
|-------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| R1 | 10,52 | 31,57 | 54,37 | 66,66 | 84,55 | 100 |
| R2 | 0 | 27,77 | 47,36 | 68,51 | 87,36 | 94,44 |
| R3 | 5,26 | 31,47 | 52,63 | 66,66 | 84,21 | 100 |
| M \pm SEM | 5,26 \pm 3,03 | 30,28 \pm 1,25 | 51,46 \pm 2,10 | 67.28 \pm 0,61 | 85.38 \pm 0,99 | 98,15 \pm 1,85 |

L'analyse statistique des résultats, présentée dans le tableau 3, révèle une relation dose-réponse avec une différence hautement significative ($p < 0,0001$). L'analyse de la variance à un critère de classification réalisée après transformation angulaire des pourcentages de l'émergence adulte révèle des différences hautement significatives entre les différentes doses testées ($p < 0,0001$) (Tableau 3). Un classement des doses réalisé, grâce au test HSD de Tukey, permet de classer les doses testées en fonction de leur toxicité (Figure 20). Les résultats révèlent l'existence de Six groupes présentant des effets différents du biopesticide sur les pourcentages d'inhibition de la mue adulte ; ainsi dans un ordre croissant les doses sont : $12,5 \mu\text{g} < 25 \mu\text{g} < 50$ et $100 \mu\text{g} < 200 \mu\text{g} < 400 \mu\text{g}$.

Tableau 3 : Effets du monoterpène, administré par application topique à différentes doses (μg) chez les larves L3 de *D. melanogaster* (6h avant la formation du puparium), sur le pourcentage d'inhibition corrigé de la mue adulte. ($M \pm \text{SEM}$; $n=3$ répétitions de 20 individus chacune): Analyse de la variance à un critère de classification.

| Source de variation | SCE | ddl | CM | Fobs | P |
|---------------------|-------|-----|-------|-----------------------|--------------|
| Treatment | 9497 | 5 | 1899 | $F_{(5, 12)} = 94,06$ | $P < 0,0001$ |
| Erreur résiduelle | 242,3 | 12 | 20,19 | | |
| Total | 9739 | 17 | | | |

*** : hautement significatif ($p < 0,0001$) ; ddl : degré de liberté ; SCE : somme des carrés des écarts ; CM : carré moyen ; Fobs : F observé ; p: niveau de significativité.

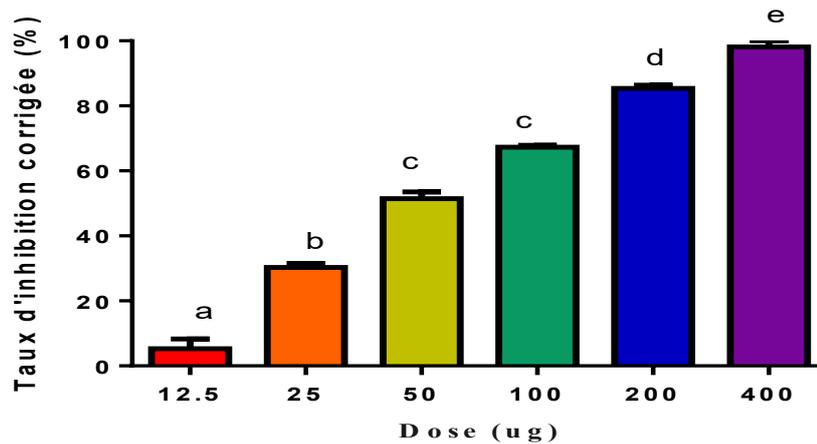


Figure 20 : Toxicité du monoterpène ($\mu\text{g}/\text{insecte}$), administré par application topique aux larves L3 de *D. melanogaster* 6h avant la formation du puparium : Inhibition corrigée (%) de l'émergence adulte ($M \pm \text{SEM}$, $n=3$ répétitions de 20 individus chacune). Les lettres représentent le classement des doses selon le test HSD de Tukey.

La courbe dose-réponse, exprimant le pourcentage d'inhibition corrigé, chez les pupes de *D. melanogaster*, en fonction du logarithme de la dose du monoterpène présente un coefficient de détermination élevé ($R^2= 0,996$) démontrant une liaison très forte entre les deux paramètres mortalité et doses (Figure 21). Par ailleurs, cette analyse a permis de déterminer les différentes doses d'inhibition de la mue adulte qui sont présentées dans le tableau 4 ; la DI_{25} et la DI_{50} et leurs intervalles de confiance sont de l'ordre de 23,83 [16,72-33,97] et 52.15 μg [40,97-66,39] respectivement (Tableau 4).

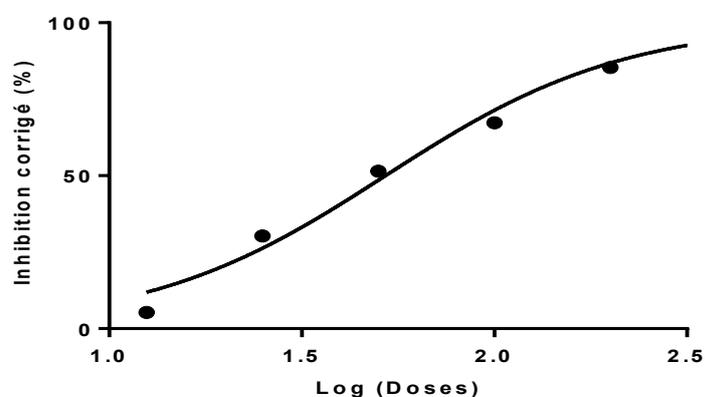


Figure 21. Courbe dose-réponse exprimant le pourcentage d'inhibition corrigée de l'émergence adulte en fonction du logarithme de la dose du monoterpène, administré par application topique aux larves L 3 de *D. melanogaster* 6h avant la formation du puparium. $R^2= 0,99$. $Y=100/1+10(\log EC50 - X)*\text{Hill Slope}$

Tableau 4 : Toxicité du monoterpène ($\mu\text{g/larve}$), administré par application topique aux larves L3 de *D. melanogaster* 6h avant la formation du puparium: Détermination des doses d'inhibition de l'émergence adulte et leurs intervalles de confiance (95%).

| | Valeur (μg) | Intervalle de confiance | Erreur Standard |
|------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------|
| DI₁₀ | 10,89 | [6.18 to 19.16] | |
| DI₂₅ | 23,83 | [16.72 – 33.97] | |
| DI₅₀ | 52,15 | [40.97 – 66.39] | |
| Hill Slope | 1,40 | [0,95- 1,85] | 0.98 |

2. Effet du linalool sur le développement

2.1. Effets de linalool sur la morphologie

Différentes malformation (Figure 22) ont été enregistrées chez *D. melanogaster* après traitement des larves au dernier stade L3 avec le linalool (ID₂₅, ID₅₀). Les aberrations morphologiques observées chez les larves sont représentées par une hyperpigmentation et une déformation du corps. En ce qui concerne les pupes et les adultes, des pupes déformées et bloquées, des mues incomplètes et des adultes malformés (ailes déformés) ainsi qu'une inhibition totale de l'émergence ont été notés (Figure 23).

La comparaison entre les séries témoins et traitées (Figure 23) indique que le linalool induit une différence hautement significative ($p < 0,001$) de la plupart des malformations observées pour les deux doses traitées (ID₂₅ et ID₅₀) avec une relation dose-réponse. Cependant, les taux d'adultes malformés diffèrent significativement en comparaison aux témoins uniquement avec la plus forte dose (ID₅₀).

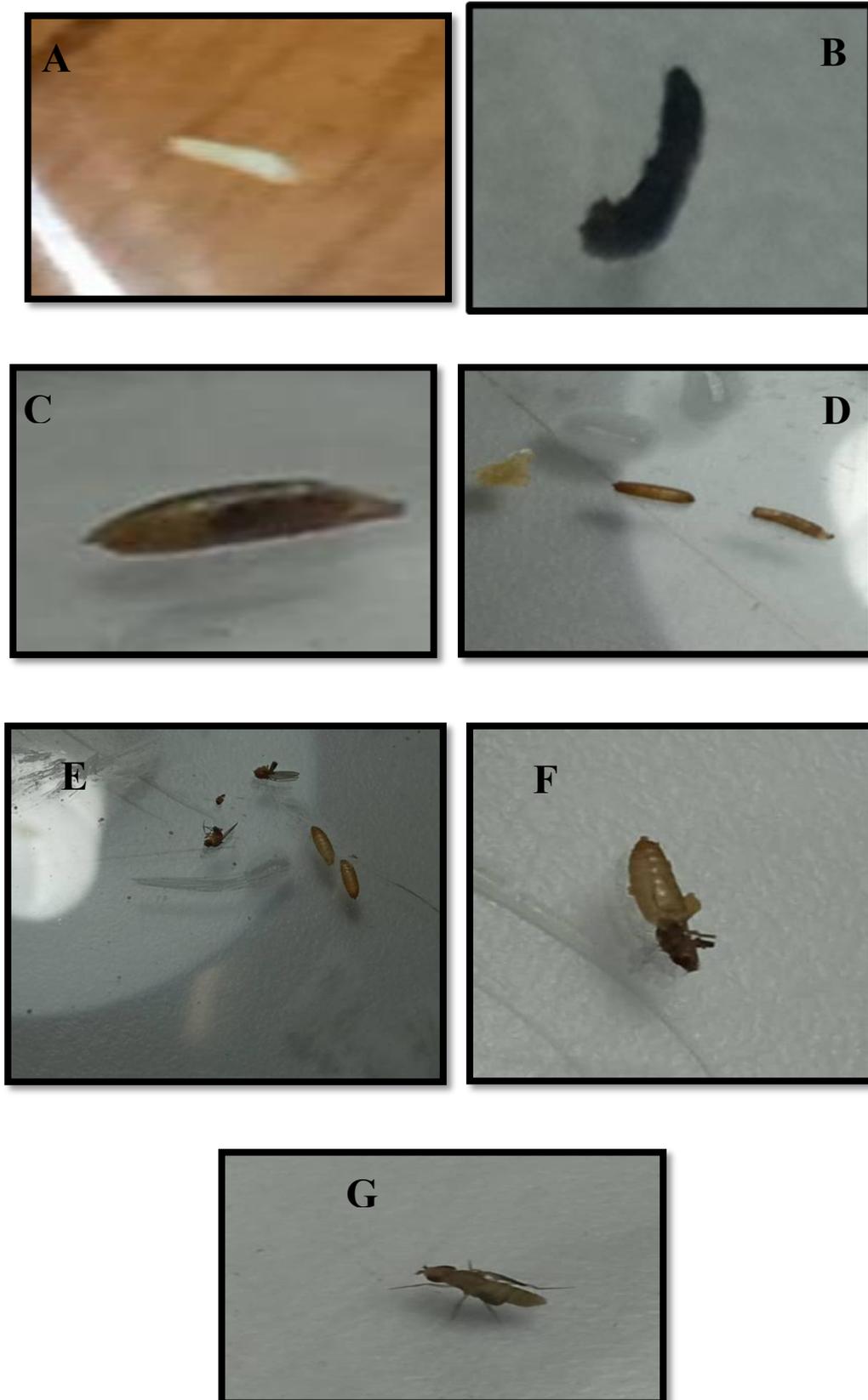


Figure 22 : Photos de différentes malformation enregistrées chez *D. melanogaster* après le traitement. (A : Larve normale, B : Larve hyperpigmentée , C : Pupa normale , D : Pupa déformée , E : adulte morte , F : Pupa bloqué , G : adulte malformé (ailes déformé)).

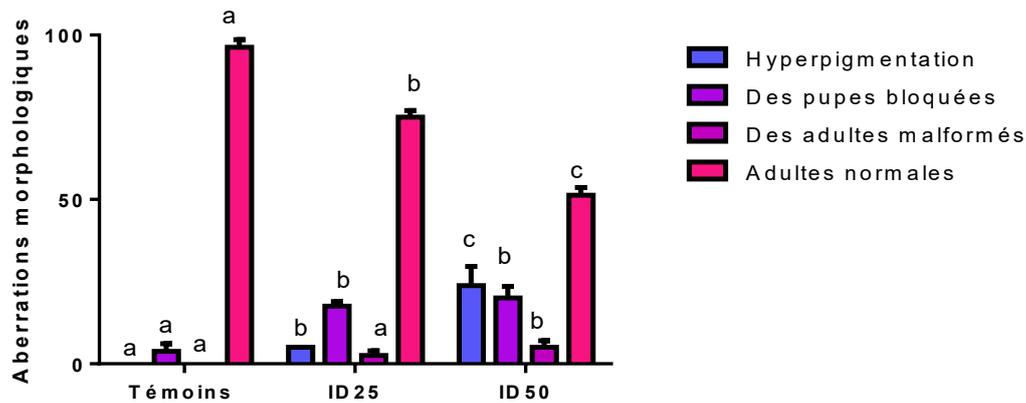


Figure 23. Pourcentage d’aberrations morphologiques chez *D. melanogaster* après traitement des larves au dernier stade L3 6h avant la formation du puparium avec du linalool (ID₂₅, ID₅₀), (M±SEM, n=3 répétitions de 15 individus). Les moyennes suivies d’une même lettre ne sont pas significativement différentes (p > 0,05).

2.2. Effets du linalool sur le poids des pupes

Chez les séries témoins le poids moyen des pupes est de 1,44±0,048 mg à 0 jour. Ce poids reste stable durant toute la durée du stade pupal soit à 1, 2 et 3 jours (P> 0,05) (Tableau 5).

Chez les séries traitées (DI₂₅ et DI₅₀) l’évolution du poids des pupes suit la même tendance que celle des témoins (Tableau 5). Le poids moyen des pupes à 0 jour est de l’ordre de 1,24 ± 0,035 et 1,26±0,014 mg pour les deux doses testées DI₂₅ et DI₅₀ respectivement. Ces valeurs restent comparables au cours du développement pupal soit à 1, 2 et 3 jours.

La comparaison entre les séries témoins et traitées (Figure 24) indique que le linalool administrée, aux larves L3 de *D. melanogaster*, aux doses DI₂₅ et DI₅₀ entraîne une réduction significative du poids des pupes, observée à 0, 1, 2 et 3 jours après traitement. Par ailleurs, aucune différence significative (P > 0,05) n’est observée entre les deux doses testées.

L’analyse de la variance, à deux critères de classification, effectuée sur le poids des pupes entre les séries témoins et traitées (Tableau 6) révèle un effet traitement hautement significatifs (P<0,0001) et un effet non significatif de l’âge (P=0,44) et de l’interaction traitement-âge (P=0,35) (Tableau 7).

Tableau 5 : Effets du monoterpène (DI₂₅ et DI₅₀), administré par application topique chez les larves L3 de *D. melanogaster* (6h avant la formation du puparium), sur le poids (mg) des pupes. (M±SEM, n=7): Comparaison des moyennes à différents âges pour une même série. Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes (P > 0,05).

| Ages (jours) | Control | ID ₂₅ | ID ₅₀ |
|--------------|-----------------|------------------|------------------|
| 0 | 1,44±0,048 A | 1,24±0,035 A | 1,26±0,014 A |
| 1 | 1,36±0,018 A | 1,25±0,020 A | 1,24±0,042 A |
| 2 | 1,39±0,031 A | 1,27±0,019 A | 1,27±0,034 A |
| 3 | 1,38±0,012 A | 1,28±0,008 A | 1,19±0,044 A |

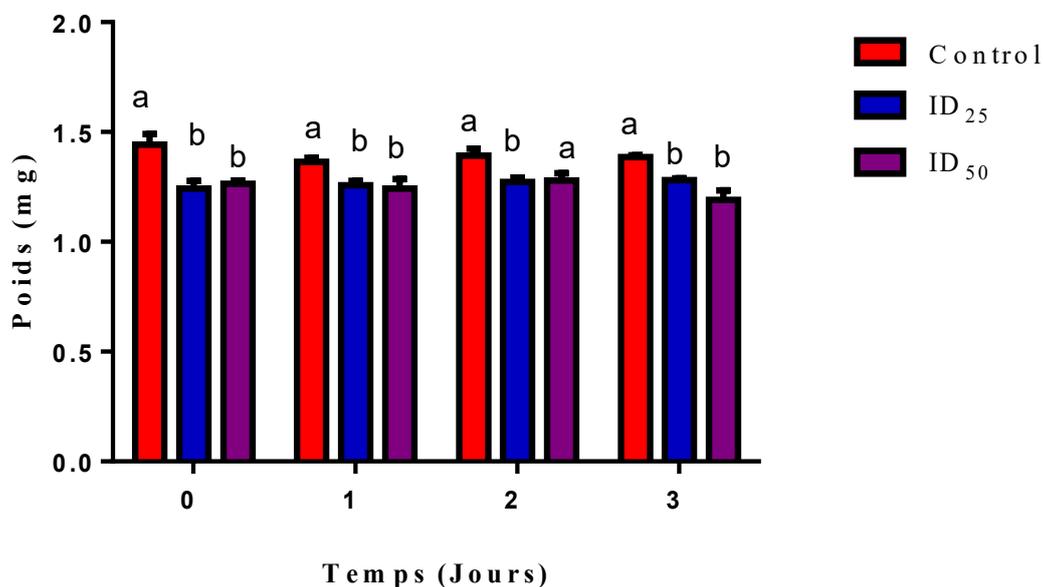


Figure 24. Effets du monoterpène (DI₂₅ et DI₅₀), administré par application topique chez les larves L3 de *D. melanogaster* (6h avant la formation du puparium), sur le poids (mg) des pupes. (M±SEM, n=7): Comparaison des moyennes pour un même âge entre les différentes séries. Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes (P > 0,05).

Tableau 6: Effets du monoterpène (DI₂₅ et DI₅₀), administré par application topique chez les larves L3 de *D. melanogaster* (6h avant la formation du puparium), sur le poids des pupes (mg). (M ± SEM, n=7) : Analyse de la variance à deux critères de classification.

| Source de variation | SCE | ddl | CM | Fobs | P |
|--------------------------|---------|-----|----------|--------------------|------------|
| Traitement | 0,3843 | 2 | 0,1921 | F (2, 72) = 30,31 | P < 0,0001 |
| Age | 0,01722 | 3 | 0,005740 | F (3, 72) = 0,9054 | P = 0,4428 |
| Interaction | 0,04272 | 6 | 0,007121 | F (6, 72) = 1,123 | P = 0,3576 |
| Erreur résiduelle | 0,4564 | 72 | 0,006339 | | |

*** : hautement significatif (p< 0,0001) ; ddl : degré de liberté ; SCE : somme des carrés des écarts ; CM : carré moyen ; Fobs : F observé ; p: niveau de significativité.

Discusión

Discussion

Les huiles essentielles dérivées des plantes représentent une alternative naturelle pour la protection des cultures en raison de leurs propriétés insecticides prometteuses, de leur large accessibilité et de leur sécurité perçue (Awad *et al.*, 2024). Les monoterpènes sont en fait l'un des principaux composants actifs dans beaucoup d'huiles essentielles (Gharib *et al.*, 2024). Ils représentent un exemple significatif de la diversité chimique présente dans la nature, fournissant une variété importante de fonctions biologiques essentielles pour la protection des plantes, la lutte contre les insectes et la préservation des écosystèmes. Leurs propriétés insecticides, répulsives, anti-appétentes et antimicrobiennes mettent en évidence leur potentiel en tant qu'outils précieux dans les stratégies de lutte intégrée contre les ravageurs et les pratiques agricoles respectueuses de l'environnement (Qasim *et al.*, 2024). À mesure que la recherche avance dans l'étude des mécanismes complexes régissant la bioactivité des monoterpènes, il devient de plus en plus évident que leur potentiel à répondre aux enjeux contemporains en matière d'agriculture, de santé publique et de préservation de l'environnement est significatif (Qasim *et al.*, 2024).

Dans la présente étude, nous avons évalué le potentiel insecticide du linalool ainsi que son impact sur les différents stades de développement de *D. melanogaster*, suite à un traitement topique appliqué sur des larves L3 6h avant la formation du puparium.

Notre résultat montre que le linalool présente une activité insecticide contre *D. melanogaster*. Le pourcentage de mortalité observée montrait une relation dose-dépendante, avec une augmentation progressive de la toxicité aux stades immatures (larves et pupes) en fonction des doses testées. Au cours du cycle biologique de *D. melanogaster*, les larves ont présenté la sensibilité la plus élevée aux effets insecticides du linalool, suivies par une mortalité plus modérée au stade pupal. Cet effet a empêché le développement des insectes jusqu'au stade adulte conduisant ainsi à l'inhibition de l'émergence adulte. Les doses d'inhibition de l'émergence adulte, les DI_{10} , DI_{25} et DI_{50} sont respectivement de l'ordre de 10,89 ; 23,83 et 52,15 $\mu\text{g}/\text{insecte}$.

Nos résultats sont en accord avec ceux de Figueiredo *et al.* 2024, qui révèlent que le linalool induisait une mortalité de 83,3 % chez les larves de *Tuta absoluta*, montrant que le linalool en tant que composé principal de *Cinnamomum camphora var. linalooliferum* (98,59 %) joue un rôle substantiel dans l'activité insecticide des huiles essentielles. La toxicité de linalool a été

également rapportée chez d'autres espèces de Diptères, comme le moustique *Culex pipiens*, où chez les larves une CL₅₀ de 14,87 µg/ml, révèle une forte sensibilité (Tabari et al., 2017).

La littérature cite également l'efficacité de cette molécule chez d'autres espèces d'insectes nuisibles telles que *Aedes albopictus*, *Aedes aegypti*, *Frankliniella occidentalis*, *Frankliniella insularis* ainsi que le charançon du riz *Sitophilus zeamais* (Torres-Estrada & Paiz-Moscoso, 2019 ; Achimon et al., 2022 ; Gharbi & Tay, 2022).

Plusieurs travaux récents démontrent également l'efficacité d'autres monoterpènes tels que le P-cymène, 1,8-cineole, cuminaldéhyde, Limonène et Menthol dans le contrôle de différentes espèces d'insectes, notamment les Lépidoptères, les Diptères, les Hémiptères ou encore les Coléoptères (Nenaah et al., 2023 ; Gharib et al., 2024 ; Hussein et al., 2025 ; Soltani et al., 2025). Ces monoterpènes se sont révélés hautement toxiques pour les larves de *Musca domestica*, *Trogoderma granarium* et *Sitophilus granarius* (Nenaah et al., 2023 ; Gharib et al., 2024 ; Soltani et al., 2025).

En plus de leur toxicité, les effets sublétaux des monoterpènes pourraient perturber les paramètres physiologiques et les stades de développement des insectes ravageurs, ce qui pourrait altérer leurs activités biologiques. Ces perturbations pourraient potentiellement jouer un rôle crucial dans la régulation des populations en maintenant leur effectif en deçà du seuil de dommage économique. Nos résultats révèlent que le linalol (DI₂₅ et DI₅₀), induit également diverses aberrations morphologiques tels que l'hyperpigmentation des larves, des pupes mortes ainsi qu'une malformation des adultes (ailes malformées ou absentes). Des effets similaires ont été rapportés chez *Tribolium confusum* (Pandey et al., 2011) après traitement des pupes avec le linalool.

L'application de linalool, aux doses d'inhibition de l'émergence adulte (DI₂₅ et DI₅₀) perturbe également la croissance de *D. melanogaster* en réduisant le poids au cours du stade nymphal. Chez *D. melanogaster* l'hormone juvénile semble jouer un rôle crucial dans la détermination de la taille finale de l'insecte (Riddiford et al., 2010). Certains monoterpènes agissent comme inhibiteurs de cette hormone, entraînant ainsi une perturbation des processus développementaux normaux de *D. melanogaster* (Kayukawa et al., 2017 ; Nesterkina et al., 2023). Aussi la diminution de poids chez les nymphes de *D. melanogaster* (qui ne nourrissent pas) pourrait s'expliquer par l'utilisation des réserves énergétiques acquises au cours des stades

larvaires (Boggs, 2009) pour détoxifier le produit toxique. Par ailleurs, l'inhibition des structures de l'adulte pourrait aussi expliquer l'inhibition de la croissance obtenue comparativement aux témoins.

Chez les insectes, les processus de croissance et de développement sont marqués par différentes mues. Les mues de croissance permettent l'augmentation de la taille de la larve tandis que les mues de métamorphose entraînent de multiples changements morphologiques conduisant à la formation de l'imago. La régulation de ces différentes étapes est assurée par deux hormones principales agissant de manière coordonnée : l'ecdysone, une hormone stéroïdienne de la mue (qui exerce son action sous sa forme active, la 20-hydroxyecdysone ou 20E), et l'hormone juvénile (HJ) (Dhadialla *et al.*, 1998). Selon le dogme classique de l'endocrinologie des insectes, l'équilibre entre ces deux hormones définit la transition de chaque phase du développement (Dubrovsky, 2005). En effet, les différentes mues sont initiées par la 20E ; tandis que la nature de la mue est déterminée par les taux d'HJ: des taux élevés d'HJ sont nécessaires au cours des mues larvaires ; la métamorphose a lieu aux taux bas d'HJ observés en fin de dernier stade larvaire (Dubrovsky, 2005). Il est donc admis que toute interférence dans l'homéostasie de ces deux hormones, avec des sources exogènes d'hormones ou avec des agonistes ou antagonistes, peut conduire à une perturbation du développement de l'insecte (Dhadialla *et al.*, 2005 ; Dhadialla *et al.*, 2010 ; Smagghe *et al.*, 2012).

Des études ont montré que les monoterpènes, tels que le linalool, peuvent perturber la signalisation hormonale chez les insectes. Par exemple, une recherche sur les larves de *Pagiophloeus tsushimanus* a révélé que l'ingestion de linalol entraînait une régulation à la hausse des gènes liés à la dégradation de l'hormone juvénile, suggérant une interférence avec le système endocrinien régulant la croissance et le développement larvaire (Li *et al.*, 2023). Par conséquent, les effets toxiques et les anomalies observées dans notre étude, notamment la réduction du poids, les larves hyperpigmentées, les pupes mortes et les adultes déformés, pourraient être dues à une perturbation hormonale similaire induite par le linalool, ce qui confirme son potentiel en tant que biopesticide affectant la régulation endocrinienne.

Selon la littérature, les monoterpènes ont été observés pour perturber le cycle de vie des insectes et affecter divers paramètres biologiques, tels que le prolongement des périodes de développement larvaire et nymphal, l'apparition d'anomalies au cours de la mue, le retard de

la pupation et de l'émergence, ainsi que, dans les cas les plus graves, la mortalité aux stades larvaire ou nymphal (Cespedes *et al.*, 2013). Certains monoterpènes provoquent également des malformations morphologiques et entravent la transition réussie du stade larvaire au stade adulte (El-Minshawy *et al.*, 2018). Ces perturbations sont attribuées à l'interférence de ces composés avec la régulation hormonale et à leurs effets toxiques directs sur les tissus en développement.

En effet, l'action neurotoxique de linalol sur le système nerveux central (SNC) des insectes (Lopez & Pascual-Villalobos, 2010) peut expliquer l'effet toxique observé au cours de nos expérimentations. Plusieurs études ont montré que ce monoterpène agit comme un modulateur des récepteurs du GABA et interfère avec la transmission synaptique cholinergique (Enan, 2001). Plus précisément, il inhibe l'enzyme acétylcholinestérase (AChE), provoquant ainsi une accumulation d'acétylcholine au niveau des synapses conduisant à une paralysie, suivie de la mort de l'insecte (Lopez & Pascual-Villalobos, 2010 ; Park *et al.*, 2016). De plus, la forte mortalité enregistrée dans nos essais pourrait également être attribuée à la synergie entre la lipophilie du composé, facilitant son absorption, et son mécanisme d'action sur le système nerveux central (Pavela & Benelli, 2016 ; Lopez & Pascual-Villalobos, 2010).

Conclusion
&
PERSPECTIVES

Conclusion & perspectives

Les produits naturels d'origine végétale font partie des alternatives possibles et disponibles pour la lutte contre les insectes. Parmi les métabolites secondaires des plantes, les monoterpènes ont été largement étudiés pour leurs applications dans la lutte contre les insectes.

Nos expérimentations ont été menées dans le but d'évaluer les effets de l'exposition du linalool un monoterpène majeur présent dans de nombreuses huiles essentielles, notamment celles d'*O. basilicum* et de *L. angustifolia*, deux plantes largement cultivées en Algérie sur la toxicité et le développement d'un insecte modèle, *D. melanogaster*.

Les essais toxicologiques révèlent que le linalool entraîne une inhibition de l'émergence adulte qui augmente significativement en fonction de la dose testée. Les doses sublétales et létales (DI₁₀, DI₂₅ et DI₅₀), déterminées à partir d'une courbe concentration-réponse sont respectivement de 10,89, 23.83, et 52.15 µg/insecte.

L'exposition préimaginale au linalool aux doses sublétales et létales (ID₂₅ et ID₅₀) affecte le développement de *D. melanogaster* en réduisant significativement le poids au cours du stade nymphale et affecte également la morphologie des mouches en induisant l'apparition de plusieurs malformations et anomalies morphologiques.

Les effets observés dans nos expérimentations peuvent être liés à l'action neurotoxique de ce biopesticide et ou à son interférence avec les principales hormones contrôlant le processus de développement (Hormone Juvénile/Ecdystéroïdes).

Ces résultats suggèrent que le linalool pourrait constituer une alternative prometteuse aux insecticides chimiques de synthèse dans la lutte contre les ravageurs agricoles.

A l'avenir il serait intéressant de compléter le présent travail par :

- Evaluer l'effet de ce monoterpène sur les œufs et les jeunes larves pour déterminer les stades les plus sensibles.
- Suivre le développement de l'insecte sur un milieu contenant du linalool.
- Analyser la survie des adultes de la première génération (F1).
- Évaluer la fécondité des adultes de la première génération (F1).

RESUMES

Résumé

Les pesticides synthétiques sont souvent associés à de nombreux problèmes, tels que l'émergence de résistances chez les insectes et leur toxicité pour les organismes non ciblés. Par conséquent, la recherche et le développement de pesticides innovants, sûrs et efficaces sont devenus une priorité dans la découverte de nouveaux pesticides. Les monoterpènes, composés naturels aux multiples cibles, offrent une alternative prometteuse grâce à leurs propriétés biologiques et à leurs usages variés.

Dans le présent travail, l'effet du linalool a été évalué sur la toxicité et le développement chez un insecte modèle, *D. melanogaster*. Différentes doses variant de 12,5 à 400 µg/insecte ont été testées par application topique sur des larves du dernier stade larvaire (L3), 6 heures avant la formation de puparium.

Les résultats révèlent que le linalool exerce une activité insecticide avec un effet dose-dépendant. Les doses d'inhibition de l'émergence adultes DI_{25} et DI_{50} déterminées, à partir d'une courbe dose-réponse et correspondant à une mortalité de 25 et 50 % sont de l'ordre de 23,83 et 52,15 µg/insecte respectivement.

Le linalool testé à la DI_{25} et à la DI_{50} provoque également l'apparition de plusieurs anomalies morphologiques et perturbe le développement de *D. melanogaster* en entraînant une diminution du poids des pupes, et ce comparativement aux témoins.

Mots clés : Monoterpènes, Insecticide, Toxicité, *D. melanogaster*.

Abstract

Synthetic pesticides are often associated with numerous issues, such as the emergence of resistance in insects and their toxicity to non-target organisms. Consequently, the research and development of innovative, safe, and effective pesticides has become a priority in the discovery of new pest control strategies. Monoterpenes, natural compounds with multiple biological targets, offer a promising alternative due to their biological properties and diverse applications.

In the present study, the effect of linalool was evaluated on toxicity and development in a model insect, *D. melanogaster*. Different doses ranging from 12.5 to 400 µg/insect were tested by topical application on third-instar larvae (L3), (L3), 6 hours before puparium formation.

The results revealed that linalool exhibits insecticidal activity in a dose-dependent manner. The inhibition doses of adult emergence, DI_{25} and DI_{50} , determined from a dose-response curve and corresponding to 25 and 50% mortality, were 23.83 and 52.15 µg/insect, respectively.

Linalool tested at ID_{25} and ID_{50} also induces several morphological abnormalities and disrupts the development of *D. melanogaster* by causing a reduction in pupal weight compared to the controls.

Key words: Monoterpenes, Insecticide, Toxicity, *D. melanogaster*.

المخلص

غالبًا ما ترتبط المبيدات الاصطناعية بالعديد من المشكلات، مثل ظهور مقاومة لدى الحشرات وسميتها للكائنات غير المستهدفة. وبناءً عليه، أصبح البحث عن مبيدات جديدة تكون آمنة وفعالة ومبتكرة من الأولويات في مجال مكافحة الآفات. وتُعد المونوتريبينات، وهي مركبات طبيعية متعددة الأهداف البيولوجية، بديلاً واعدًا نظرًا لخصائصها البيولوجية وتعدد استخداماتها.

في هذه الدراسة، تم تقييم تأثير اللينالول من حيث السمية والتأثير على التطور لدى حشرة نموذجية، *D. melanogaster* تم اختبار جرعات مختلفة تتراوح بين 12.5 إلى 400 ميكروغرام/حشرة، عن طريق التطبيق الموضعي على يرقات الطور الثالث، قبل ست ساعات من تكوّن العذراء.

كشفت النتائج أن اللينالول يتمتع بنشاط حشري قاتل بطريقة تعتمد على الجرعة. حيث تم تحديد جرعتي التثبيط DI_{25} و DI_{50} ، اللتين تمثلان نسبيتي وفيات قدرها 25 و 50%، انطلاقًا من منحنى الجرعة-الاستجابة، وكانت على التوالي 83,23 و 15,52 ميكروغرام/حشرة.

كما أن اللينالول، عند تطبيقه بجرعتي DI_{25} و DI_{50} ، تسبب في ظهور العديد من التشوهات المورفولوجية، وأثر على تطور *D. melanogaster* من خلال التسبب في انخفاض وزن العذارى مقارنةً بالشواهد.

الكلمات المفتاحية: مونوتريبينات، مبيد حشري، سمية، *D. melanogaster*.

*Références
bibliographiques*

Références bibliographiques

- Abbott, W. (1925).** A method of computing the effectiveness of an insecticide *Journal of Economic Entomology*, 18 (2), 265–267.
- Abd El-Baky, R. M., & Hashem, Z. S. (2016).** Eugenol and linalool: Comparison of their antibacterial and antifungal activities. *African Journal of Microbiology Research*, 10(44), 1860-1872.
- Achimón, F., Peschiutta, M. L., Brito, V. D., Beato, M., Pizzolitto, R. P., Zygadlo, J. A., & Zunino, M. P. (2022).** Exploring contact toxicity of essential oils against *Sitophilus zeamais* through a meta-analysis approach. *Plants*, 11(22), 3070.
- Afzal, H., Ahmed, S., Khan, R. R., Sufian, M., Arshad, M., & Qasim, M. (2020).** Management of house fly, *Musca domestica* L. (Muscidae: Diptera), through botanical baits. *Revista Brasileira de Entomologia*, 64, e201968.
- Al-Zahrani, M. (2019).** Utilisation des insecticides chimiques dans les cultures agricoles. *Middle East Journal of Agriculture*, 7(4), 210–218.
- Amiri, P., Shahpiri, A., Asadollahi, M. A., Momenbeik, F., & Partow, S. (2016).** Metabolic engineering of *Saccharomyces cerevisiae* for linalool production. *Biotechnology letters*, 38, 503-508.
- Arthurs, S., & Dara, S. K. (2019).** Microbial biopesticides for invertebrate pests and their markets in the United States. *Journal of invertebrate pathology*, 165, 13-21.
- Awad, M., Alfuhaid, N. A., Amer, A., Hassan, N. N., & Moustafa, M. A. (2024).** Towards Sustainable Pest Management: Toxicity, Biochemical Effects, and Molecular Docking Analysis of *Ocimum basilicum* (Lamiaceae) Essential Oil on *Agrotis ipsilon* and *Spodoptera littoralis* (Lepidoptera: Noctuidae). *Neotropical Entomology*, 53(3), 669-681.
- Bakkali, F., Averbek, S., Averbek, D., & Idaomar, M. (2008).** Biological effects of essential oils—a review. *Food and chemical toxicology*, 46(2), 446-475.
- Barathi, S., Sabapathi, N., Kandasamy, S., & Lee, J. (2024).** Present status of insecticide impacts and eco-friendly approaches for remediation-a review. *Environmental Research*, 240, 117432.

- Başer, K. H. C., & Buchbauer, G. (Eds.). (2010).** Handbook of essential oils: Science, technology and applications. CRC Press.
- Bermúdez-Guzmán, M. de J., Buenrostro-Nava, M. T., Valdez-Velázquez, L. L., Lino-López, G. J., García-Villalvazo, P. E., Orozco-Santos, M., & Michel-López, C. Y. (2023).** Scorpion venom insectotoxins: A sustainable alternative for pest control in agriculture. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*, 67303–67316.
- Boggs, C. L. (2009).** Understanding insect life histories and senescence through a resource allocation lens. *Functional Ecology*, *23*(1), 27-37.
- Boulahbel, B. (2015).** Evaluation de l'azadirachtine (Neem-Azal et Huile de Neem) sur le développement et la reproduction chez *Drosophila melanogaster* (Diptera): mécanismes d'action et action comparée (Doctoral dissertation, Université Badji Mokhtar).
- Cakmak, K., BAYRAM, Ö., SOLAK, K., KABAN, G., ŞİMŞEK, Ö., & Mavi, A. (2019).** Plasma polymerized linalool (ppLin): an antimicrobial and biocompatible coating. *Turkish Journal of Chemistry*, *43*(1), 323-334.
- Carson, C. F., Hammer, K. A., & Riley, T. V. (2006).** Melaleuca alternifolia (tea tree) oil: a review of antimicrobial and other medicinal properties. *Clinical microbiology reviews*, *19*(1), 50-62
- Céspedes, C. L., Molina, S. C., Muñoz, E., Lamilla, C., Alarcon, J., Palacios, S. M., ... & Avila, J. G. (2013).** The insecticidal, molting disruption and insect growth inhibitory activity of extracts from *Condalia microphylla* Cav. (Rhamnaceae). *Industrial Crops and Products*, *42*, 78-86.
- Chandler, D., Bailey, A. S., Tatchell, G. M., Davidson, G., Greaves, J., & Grant, W. P. (2011).** The development, regulation and use of biopesticides for integrated pest management. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *366*(1573), 1987-1998.
- Chaudhary, S., Kanwar, R. K., Sehgal, A., Cahill, D. M., Barrow, C. J., Sehgal, R., & Kanwar, J. R. (2017).** Progress on *Azadirachta indica* based biopesticides in replacing synthetic toxic pesticides. *Frontiers in plant science*, *8*, 610.
- Chemat, F., & Cravotto, G. (Eds.). (2012).** Microwave-assisted extraction for bioactive compounds: theory and practice (Vol. 4). Springer Science & Business Media.

- Colombani J., Bianchini L., Layalle S., Léopold P., 2006.** Stéroïdes, insuline et croissance : les mouches dopent la recherche / Steroids, insulin and growth : *The flies Carson pe the research*. Revue : M/S : médecine sciences, Volume 22, numéro 3, mars 2006
- Compant, S., Clément, C., & Sessitsch, A. (2010).** Plant growth-promoting bacteria in the rhizo-and endosphere of plants: their role, colonization, mechanisms involved and prospects for utilization. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(5), 669-678.
- Damalas, C. A., & Koutroubas, S. D. (2016).** Farmers' exposure to pesticides: toxicity types and ways of prevention. *Toxics*, 4(1), 1. <https://doi.org/10.3390/toxics4010001>
- de Figueiredo, K. G., de Paiva Silva, G. T., Passos, L. C., Alves, D. S., Biondi, A., & Carvalho, G. A. (2024).** Toxicity of Cinnamomum spp. essential oil to *Tuta absoluta* and to predatory mirid. *Journal of Pest Science*, 97(3), 1569-1585.
- Deravel, J., Krier, F., & Jacques, P. (2014).** Les biopesticides, alternatives aux produits phytosanitaires chimiques (synthèse bibliographique). *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 18(2), 220–232.
- Dhadialla, T. S., Carlson, G. R., & Le, D. P. (1998).** New insecticides with ecdysteroidal and juvenile hormone activity. *Annual review of entomology*, 43(1), 545-569.
- Dhadialla, T.S., Retnakaran, A. & Smagghe, G. (2005).** Insect growth- and development disrupting insecticides. In: Gilbert, L.I., Iatrou, K. & Gill, S.S. (Eds). *Comprehensive Insect Molecular Science*, Elsevier, Oxford, UK. 6: 55–116.
- Dhadialla, T. S., Retnakaran, A., & Smagghe, G. (2010).** Insect growth and development disrupting insecticides. In: Gilbert, L.I. & Gill, S.S. (Eds). *Insect Control*. Elsevier, New York. USA. 121-166.
- Dorman, H. D., & Deans, S. G. (2000).** Antimicrobial agents from plants: antibacterial activity of plant volatile oils. *Journal of applied microbiology*, 88(2), 308-316.
- Dubrovsky, E. B. (2005).** Hormonal cross talk in insect development. *Trends in Endocrinology & Metabolism*, 16(1), 6-11.
- Dudareva, N., Klempien, A., Muhlemann, J. K., & Kaplan, I. (2013).** Biosynthesis, function and metabolic engineering of plant volatile organic compounds. *New Phytologist*, 198(1), 16-32.

- Dupont, M., Martin., (2020).** Modes d'action des biopesticides végétaux : une revue de la littérature. *Agricultural and Forest Entomology*. 30(3), DOI : 10.1111/afe.12345
- Elbe, H., Ozturk, F., Yigitturk, G., Baygar, T., & Cavusoglu, T. (2022).** Anticancer activity of linalool: Comparative investigation of ultrastructural changes and apoptosis in breast cancer cells. *Ultrastructural Pathology*, 46(4), 348-358.
- El-Minshawy, A. M., Abdelgaleil, S. A., Gadelhak, G. G., Al-Eryan, M. A., & Rabab, R. A. (2018).** Effects of monoterpenes on mortality, growth, fecundity, and ovarian development of *Bactrocera zonata* (Saunders) (Diptera: Tephritidae). *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 15671-15679.
- Enan, E. (2001).** Insecticidal activity of essential oils: octopaminergic sites of action. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 130(3), 325-337.
- FAO. (2022).** The state of food and agriculture 2022: Leveraging automation in agriculture for transforming agrifood systems. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Ferdenache, M. (2021).** Impacts d'un biopesticide, l'azadirachtine, sur la physiologie et le comportement de *Drosophila melanogaster*: Reproduction, nutrition et propriétés aversives (Doctoral dissertation, Université Paris-Saclay; Université Badji Mokhtar-Annaba).
- Fisher, R.A. & Yates, F. (1957).** Statical tables for biological agricultural and medical research. 5 eme edition, Olivier et Boyd. London. 64-66
- Fougeron, A. S., Farine, J. P., Flaven-Pouchon, J., Everaerts, C., & Ferveur, J. F. (2011).** Fatty-acid preference changes during development in *Drosophila melanogaster*. *PloS one*. 6(10), e26899
- Gaugler, R. (2002).** Entomopathogenic nematology. CABI Publishing. **Gavrilescu, M. (2015).** Pesticides in the environment and harmonized risk indicators. *Environmental Engineering and Management Journal*, 14(1), 1–10.
- Gharbi, K., & Tay, J. W. (2022).** Fumigant toxicity of essential oils against *Frankliniella occidentalis* and *F. insularis* (Thysanoptera: Thripidae) as affected by polymer release and adjuvants. *Insects*, 13(6), 493.

Références bibliographiques

- Gharib, A. M., El-Shewy, A. M., Hamouda, S. S., Gad, H. A., & Abdelgaleil, S. A. (2024).** Insecticidal, biochemical and histological effects of monoterpenes against *Musca domestica* (Diptera: muscidae). *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 27(2), 102256.
- Goudey-Perrière, F. & Perrière, C. (1974).** Guide de travaux pratiques de Zoologie et de Biologie Animale. Parais, *Centre de documentation universitaire*. Vol 2.
- Griffiths, A. J., Miller, J. H., Suzuki, D. T., Lewontin, R. C., Gelbart, W. M., & Sanlaville, C. (2002).** Introduction à l'analyse génétique. 3eme édition *De Boeck Université*. 860p.
- Gupta, S., & Dikshit, A. K. (2010).** Biopesticides: An ecofriendly approach for pest control. *Journal of Biopesticides*, 3(Special Issue), 186–188.
- Hussein, H. S., Eldesouky, S. E., & Abdelgaleil, S. A. (2025).** Potential of monoterpenes, phenylpropenes, and sesquiterpenes for the management *Bemisia tabaci* (Gennadius) biotype B (Hemiptera: Aleyrodidae). *Crop Protection*, 190, 107110.
- Isman, M. B. (2000).** Plant essential oils for pest and disease management. *Crop Protection*, 19(8–10), 603–608.
- Isman, M. B. (2006).** Botanical insecticides, deterrents, and repellents in modern agriculture and an increasingly regulated world. *Annual review of entomology*, 51(1), 45-66.
- Jouandin, P. (2013).** Rôle de la voie de signalisation Insuline dans le couplage des informations nutritionnelles et développementales au cours de l'ovogenèse chez la drosophile (Doctoral dissertation, Université Nice Sophia Antipolis).
- Kang, A., & Lee, T. S. (2016).** Secondary metabolism for isoprenoid-based biofuels. In *Biotechnology for Biofuel Production and Optimization* (pp. 35-71). Elsevier.
- Kayukawa, T., Jouraku, A., Ito, Y., & Shinoda, T. (2017).** Molecular mechanism underlying juvenile hormone-mediated repression of precocious larval–adult metamorphosis. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(5), 1057-1062. <https://doi.org/10.1073/pnas.1615423114>
- Khamies, E., Bakhite, E. A., El-Emary, T. I., Gad, M. A., Abdel-Hafez, S. H., Abdou, A., & Said, A. I. (2024).** Pyridine derivatives as insecticides: Part 6. Design, synthesis, molecular docking, and insecticidal activity of 3-(Substituted) methylthio-5, 6, 7, 8-tetrahydroisoquinoline-4-carbonitriles toward *Aphis gossypii* (glover, 1887). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 72(38), 20842-20849.

- Khursheed, A., Rather, M. A., Jain, V., Wani, A. R., Rasool, S., Nazir, R., ... & Majid, S. A. (2022).** Plant based natural products as potential ecofriendly and safer biopesticides: A comprehensive overview of their advantages over conventional pesticides, limitations and regulatory aspects. *Microbial pathogenesis*, *173*, 105854.
- Kilani-Morakchi, S., Morakchi-Goudjil, H., & Sifi, K. (2021).** Azadirachtin-based insecticide: Overview, risk assessments, and future directions. *Frontiers in Agronomy*, *3*, 676208.
- Kim, M. G., Kim, S. M., Min, J. H., Kwon, O. K., Park, M. H., Park, J. W., ... & Ahn, K. S. (2019).** Anti-inflammatory effects of linalool on ovalbumin-induced pulmonary inflammation. *International Immunopharmacology*, *74*, 105706.
- Kisacam, M. A., Sakin, F., Irtegun-Kandemir, S., Pektanc-Sengul, G., & Kurekci, C. (2022).** Linalool and eugenol exhibit apoptotic potential on hela and caco-2 cells through the modulation of src kinases and ADAMTS proteases while only eugenol displays anti-angiogenic features on HeLa cells. *Biologia*, *77*(3), 865-877.
- Koul, O., Walia, S., & Dhaliwal, G. S. (2008).** Essential oils as green pesticides: *Potential and constraints*. *Biopesticides International*, *4*(1), 63–84.
- Kumari, I., Hussain, R., Sharma, S., & Ahmed, M. (2022).** Microbial biopesticides for sustainable agricultural practices. In *Biopesticides* (pp. 301-317). Woodhead Publishing.
- Lawrence, B. M. (2006).** Mint: the genus *Mentha*. CRC press.
- Leng, P., Zhang, Z., Pan, G., & Zhao, M. (2011).** Applications and development trends in biopesticides. *African Journal of Biotechnology*, *10*(86), 19864-19873.
- Li, S., Li, H., Chen, C., & Hao, D. (2023).** Tolerance to dietary linalool primarily involves co-expression of cytochrome P450s and cuticular proteins in *Pagiophloeus tsushmanus* (Coleoptera: Curculionidae) larvae using SMRT sequencing and RNA-seq. *BMC genomics*, *24*(1), 34.
- Liu, Z., Li, Q. X., & Song, B. (2022).** Pesticidal activity and mode of action of monoterpenes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *70*(15), 4556-4571.
- López, M. D., & Pascual-Villalobos, M. J. (2010).** Mode of inhibition of acetylcholinesterase by monoterpenoids and implications for pest control. *Industrial Crops and Products*, *31*(2), 284-288.

- Mabou, D., & Yossa, N. (2021).** Terpenes: Structural classification and biological activities. *IOSR Journal of Pharmacy and Biological Sciences*, 16(3), 25-40.
- Mączka, W., Duda-Madej, A., Grabarczyk, M., & Wińska, K. (2022).** Natural compounds in the battle against microorganisms—Linalool. *Molecules*, 27(20), 6928.
- Maganga, M. E., Gries, G., & Cries, R. (1996).** Repellency of various oils and pine oil constituents to house flies (Diptera: Muscidae). *Environmental Entomology*, 25(5), 1182-1187.
- Marrone, P. G. (2019).** Pesticidal natural products – status and future potential. *Pest Management Science*, 75(9), 2325–2340.
- Meigen, J.W. 1830.** Systematische Beschreibung der bekannten europäischen zweiflügeligen Insekten. *Hamm*. 6: 401
- Moghaddam, M., & Mehdizadeh, L. (2016).** Chemistry of essential oils and factors influencing their constituents. Ferdowsi University of Mashhad.
- National Pesticide Information Center. (n.d.).** Pyrethrins general fact sheet. Oregon State University. <https://npic.orst.edu/factsheets/pyrethrins.html>
- Ndakidemi, B., Mtei, K., & Ndakidemi, P. (2016).** Impacts of synthetic and botanical pesticides on beneficial insects. *Agricultural Sciences*. 7,364–372. <https://doi.org/10.4236/as.2016.76038>
- Nenaah, G. E., Alasmari, S., Almadiy, A. A., Albogami, B. Z., Shower, D. M., & Fadl, A. E. (2023).** Bio-efficacy of *Salvia officinalis* essential oil, nanoemulsion and monoterpene components as eco-friendly green insecticides for controlling the granary weevil. *Industrial Crops and Products*, 204, 117298.
- Nerio, L. S., Olivero-Verbel, J., & Stashenko, E. (2010).** Repellent activity of essential oils: A review. *Bioresource Technology*, 101(1), 372–378.
- Nesterkina, M., Bilokon, S., Aliksieieva, T., Kravchenko, I., & Hirsch, A. K. (2023).** Genotoxic and mutational potential of monocyclic terpenoids (carvacrol, carvone and thymol) in *Drosophila melanogaster*. *Toxicology Reports*, 10, 327-333.
- OMS. (2021).** Résidus de pesticides dans les aliments. Organisation Mondiale de la Santé.

- Ouaarous, M., El Fakhouri, K., Taarji, N., Baouchi, A., Amri, M., Ramdani, C., ... & El Bouhssini, M. (2025).** Impact of Field Insect Pests on Seed and Nutritional Quality of Some Important Crops: A Comprehensive Review. *ACS omega*, *10*(9), 8779-8792.
- Ouabou, M., Annaz, H., Maggi, F., Ferrati, M., Spinozzi, E., & El Amrani, A. (2024).** Insecticidal, antifeedant, and repellent effect of *Lavandula mairei* var. *antiatlantica* essential oil and its major component carvacrol against *Sitophilus oryzae*. *Journal of Stored Products Research*, *107*, 102338.
- Papanastasiou, S. A., Ioannou, C. S., & Papadopoulos, N. T. (2020).** Oviposition-deterrent effect of linalool—a compound of citrus essential oils—on female Mediterranean fruit flies, *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae). *Pest Management Science*, *76*(9), 3066-3077.
- Park, C. G., Jang, M., Yoon, K. A., & Kim, J. (2016).** Insecticidal and acetylcholinesterase inhibitory activities of Lamiaceae plant essential oils and their major components against *Drosophila suzukii* (Diptera: Drosophilidae). *Industrial crops and products*, *89*, 507-513.
- Parvathi, D.V., Amritha, A. S. & Paul, S.F.D. (2009).** Wonder animal model for genetic studies - *Drosophila melanogaster* – its life cycle and breeding methods – a review. *Sri Ramachandra Journal of Medicine*, *2*(2), 33-38.
- Pavela, R. (2008).** Insecticidal activity of some essential oils against larvae of *Spodoptera littoralis*. *Fitoterapia*, *79*(7–8), 511–518.
- Pavela, R. (2009).** Larvicidal properties of essential oils against *Culex quinquefasciatus* Say (Diptera: Culicidae). *Journal of Pest Science*, *82*(2), 195–202.
- Pavela, R., & Benelli, G. (2016).** Essential oils as ecofriendly biopesticides? Challenges and constraints. *Trends in plant science*, *21*(12), 1000-1007.
- Peana, A. T., D'Aquila, P. S., Panin, F., Serra, G., Pippia, P., & Moretti, M. D. L. (2002).** Anti-inflammatory activity of linalool and linalyl acetate constituents of essential oils. *Phytomedicine*, *9*(8), 721-726.
- Pereira, I., Severino, P., Santos, A. C., Silva, A. M., & Souto, E. B. (2018).** Linalool bioactive properties and potential applicability in drug delivery systems. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, *171*, 566-578.
- Priestley, C. M., Williamson, E. M., Wafford, K. A., & Sattelle, D. B. (2003).** Thymol, a constituent of thyme essential oil, is a positive allosteric modulator of human GABAA

Références bibliographiques

- receptors and a homo-oligomeric GABA receptor from *Drosophila melanogaster*. *British Journal of Pharmacology*, 140(8), 1363–1372.
- Qasim, M., Islam, W., Rizwan, M., Hussain, D., Noman, A., Khan, K. A., ... & Han, X. (2024).** Impact of plant monoterpenes on insect pest management and insect-associated microbes. *Heliyon*, 10(20).
- Qasim, M., Xiao, H., He, K., Noman, A., Liu, F., Chen, M. Y., ... & Li, F. (2020).** Impact of landfill garbage on insect ecology and human health. *Acta tropica*, 211, 105630.
- Quinn, L., Lin, J., Cranna, N., Lee, J. E. A., Mitchell, N., & Hannan, R. (2012).** Steroid hormones in *Drosophila*: How ecdysone coordinates developmental signalling with cell growth and division. *Steroids–Basic Science. InTech, Rijeka*, 141-168
- Raguso, R. A. (2008).** Wake up and smell the roses: the ecology and evolution of floral scent. *Annual review of ecology, evolution, and systematics*, 39(1), 549-569.
- Regnault-Roger, C., Vincent, C., & Arnason, J. T. (2012).** Essential oils in insect control: Low-risk products in a high-stakes world. *Annual Review of Entomology*, 57, 405–424.
- Riddiford, L.M., Truman, J.W., Mirth, C.K., Shen, Y.C. (2010).** A role for juvenile hormone in the prepupal development of *Drosophila melanogaster*. *Development* 137(7): 1117-1126.
- Saadane, F. Z. (2022).** Effets toxiques des extraits de végétaux inférieures et supérieures sur le comportement alimentaire et sexuel de *Drosophila melanogaster* (Diptera: Drosophilidae) [Mémoire de master, Université Badji Mokhtar – Annaba]
- Samada, L. H., & Tambunan, U. S. F. (2020).** Biopesticides as promising alternatives to chemical pesticides: A review of their current and future status. *Online journal of biological sciences*, 20(2), 66-76.
- Schmitz, A., Badgajar, C., Mansur, H., Flippo, D., McCornack, B., & Sharda, A. (2022).** Design of a reconfigurable crop scouting vehicle for row crop navigation: a proof-of-concept study. *Sensors*, 22(16), 6203.
- Schnakenberg, S. L., Siegal, M. L., & Bloch Qazi, M. C. (2012).** Oh, the places they'll go: female sperm storage and sperm precedence in *Drosophila melanogaster*. *Spermatogenesis*, 2(3), 224-235.

- Scott, J. G., & Buchon, N. (2019).** *Drosophila melanogaster* as a powerful tool for studying insect toxicology. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, *161*, 95-103.
- Simmonds, M. S. J. (2001).** Importance of flavonoids in insect–plant interactions: *feeding and oviposition*. *Phytochemistry*, *56*(3), 245–252.
<https://npic.orst.edu/factsheets/pyrethrins.html>
- Smagghe, G., Gomez, L.E. & Dhadialla, T.S. 2012.** Bisacylhydrazine insecticides for selective pest control. In: Dhadialla, T.S. (Ed). *Advances in Insect Physiology*. Academic Press, Burlington, MA, USA. 43, 163–249.
- Soltani, M., Abes, I. F. Z., Djabri, M., Mahieddine, R., Saadi, C., Tine-Djebbar, F., ... Soltani, N. (2025).** Effects of monoterpenes on digestive enzymatic activities and some constituents involved in intermediary metabolism of *Trogoderma granarium* (Everts) (Coleoptera: Dermestidae). *Natural Product Research*, 1–13.
<https://doi.org/10.1080/14786419.2025.2507818>
- Symondson, W. O. C., Sunderland, K. D., & Greenstone, M. H. (2002).** Can generalist predators be effective biocontrol agents?. *Annual review of entomology*, *47*(1), 561-594.
- Tabari, M. A., Youssefi, M. R., Esfandiari, A., & Benelli, G. (2017).** Toxicity of β -citronellol, geraniol and linalool from *Pelargonium roseum* essential oil against the West Nile and filariasis vector *Culex pipiens* (Diptera: Culicidae). *Research in veterinary science*, *114*, 36-40. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2017.03.001>
- Tavernier, R. & Lizeaux, C. (2002).** Sciences vie de la Terre Terminale S- Spec. *Maisonneuve & Larose*. paris, France. 255 p.
- Thripathi, A. K., Upadhyay, S., Bhuiyan, M., & Bhattacharya, P. R. (2009).** A review on prospects of essential oils as biopesticide in insect-pest managemen. *J. Pharmacog. Phytother*, *15*, 052-053.
- Tong, F., & Coats, J. R. (2012).** Effects of monoterpenoid insecticides on [3H] TBOB binding in house fly GABA receptor and $^{36}\text{Cl}^-$ uptake in American cockroach ventral nerve cord. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, *100*(3), 324–332.
- Torres-Estrada, J. L., & Paiz-Moscoso, K. E. (2019).** Efecto de atracción de transflutrina y linalol sobre el mosquito vector *Aedes aegypti*. *Salud Pública de México*, *61*(1), 1-1.

Références bibliographiques

- Tracqui, P., & Demongeot, J. (2003).** *Éléments de biologie à l'usage d'autres disciplines: De la structure aux fonctions.* EDP Sciences.
- Windley, M. J., Herzig, V., Dziemborowicz, S. A., Hardy, M. C., King, G. F., & Nicholson, G. M. (2012).** Spider-venom peptides as bioinsecticides. *Toxins*, 4(3), 191-227.
- Wink, M. (2015).** Modes of action of herbal medicines and plant secondary metabolites. *Medicines*, 2(3), 251–286.
- Zhang, L. N., Wang, D. C., Hu, Q., Dai, X. Q., Xie, Y. S., Li, Q., ... & Guo, J. H. (2019).** Consortium of plant growth-promoting rhizobacteria strains suppresses sweet pepper disease by altering the rhizosphere microbiota. *Frontiers in Microbiology*, 10, 1668.
- Zhao, Y., Cheng, X., Wang, G., Liao, Y., & Qing, C. (2020).** Linalool inhibits 22Rv1 prostate cancer cell proliferation and induces apoptosis. *Oncology Letters*, 20(6), 289.
- Zielińska-Błajet, M., & Feder-Kubis, J. (2020).** Monoterpenes and their derivatives—Recent development in biological and medical applications. *Molecules*, 25(21), 4866.

Année universitaire : 2024-2025

Présenté par : BOUCHAREB Ikram
LAHRACHE Imane

Evaluation de l'activité bio-insecticide d'un extrait de plante sur *Drosophila melanogaster*

Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master en Biologie et Contrôle des Populations d'Insectes

Les pesticides synthétiques sont souvent associés à de nombreux problèmes, tels que l'émergence de résistances chez les insectes et leur toxicité pour les organismes non ciblés. Par conséquent, la recherche et le développement de pesticides innovants, sûrs et efficaces sont devenus une priorité dans la découverte de nouveaux pesticides. Les monoterpènes, composés naturels aux multiples cibles, offrent une alternative prometteuse grâce à leurs propriétés biologiques et à leurs usages variés.

Dans le présent travail, l'effet du linalool a été évalué sur la toxicité et le développement chez un insecte modèle, *D. melanogaster*. Différentes doses variant de 12,5 à 400 µg/insecte ont été testées par application topique sur des larves du dernier stade larvaire (L3), 6 heures avant la formation de puparium.

Les résultats révèlent que le linalool exerce une activité insecticide avec un effet dose-dépendant. Les doses d'inhibition de l'émergence adultes DI_{25} et DI_{50} déterminées, à partir d'une courbe dose-réponse et correspondant à une mortalité de 25 et 50 % sont de l'ordre de 23,83 et 52,15 µg/insecte respectivement.

Le linalool testé à la DI_{25} et à la DI_{50} provoque également l'apparition de plusieurs anomalies morphologiques et perturbe le développement de *D. melanogaster* en entraînant une diminution du poids des pupes, et ce comparativement aux témoins.

Mots-clefs : Monoterpènes, Insecticide, Toxicité, *D. melanogaster*.

Laboratoires de recherche : Laboratoire de biosystématique et écologie des arthropodes (U Constantine 1 Frères Mentouri).

Président du jury : Dr CHAABANE Meriem (MCB - U Constantine 1 Frères Mentouri).

Encadrant : Dr BOULAHBEL Bilel (MCA - U Constantine 1 Frères Mentouri).

Examineur : Dr FRAHTIA Khalida (MCA - U Constantine 1 Frères Mentouri).