République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi -Tébessa-
Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la vie
Département : Biologie des êtres vivants

MEMOIRE DE MASTER

Spécialité : BIOLOGIE ANIMALE

Option : Ecophysiologie animale

Thème

Étude comparative de l'efficacité insecticide et répulsive des huiles de feuilles et de graines d'*Eucalytpus globulus* et de leur composé majeur contre *Trogoderma granarium*

Présentée par : Boudiar Azzeddine

Cherfi Mouhamed Nadji

Membres de Jury :

Pr. TINE-DJEBBAR Fouzia	**U. Echahid Cheikh Larbi Tebessi**	**Présidente**
Dr. HLAIMIA Samira	**U. Echahid Cheikh Larbi Tebessi**	**Examinatrice**
Pr. TINE Samir	**U. Echahid Cheikh Larbi Tebessi**	**Encadrant**
SOLTANI Meriem	**U. Echahid Cheikh Larbi Tebessi**	**Co- encadrante**

Année universitaire : 2024/2025

REMERCIEMENT

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

La première personne que nous tenons à remercier est notre encadrant ***Pr. TINE Samir*** *pour avoir mis à notre disposition un environnement de travail favorable notamment en ce qui concerne l'approche méthodologique et les aspects matériels de cette étude.*

Toutes nos considérations à l'égard de ***Pr. TINE DJEBBAR FOUZIA*** *qui nous avons fait l'honneur de juger le présent travail.*

Nos plus vifs remerciements vont à ***Dr .HLAIMIA SAMIRA*** *qui a bien voulu accepter d'être membre du jury et de nous faire l'honneur pour avoir accepté d'évaluer ce travail.*

Nos remerciements vont également à ***Madame SOLTANI MERIEM****, notre co-encadrante, pour son suivi attentif, ses conseils méthodologiques et son investissement tout au long de la réalisation de ce travail.*

A nos parents et tous nos frères et sœurs.

Nos remerciements s'adressent également à ceux qui ont contribué de loin ou de près.

TABLE DES MATIERES

I. INTRODUCTION	**1**
II. MATERIEL ET METHODES	**4**
2.1. Présentation de l'insecte, *Trogoderma granarium* (Everts, 1898)	**4**
2.2. Collecte et élevage	**6**
2.3. Présentation de la plante, *Eucalyptus globulus*	**6**
2.4. HEs des feuilles et des graines d'*E. globulus* et leurs Composition chimique	**7**
2.5. Traitement et bioessais	**7**
2.5.1. Toxicité par fumigation	**8**
2.5.2. Toxicité par contact	**8**
2.6. Test de répulsion	**9**
2.7. Analyses statistiques	**10**
III. RESULTATS	**11**
3.1. Essais toxicologiques	**11**
3.1.1. Toxicité par fumigation	**11**
3.1.2. Toxicité par contact	**13**
3.3. Effet répulsif	**16**
IV. DISCUSSION	**18**
4.1. Toxicité des traitements	**18**
4.2. Effet répulsif des traitements	**21**
V. CONCLUSION ET PERSPECTIVES	**23**
RESUMES	**25**
Français	**25**
Anglais	**26**
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	**27**

LISTE DES TABLEAUX

Tableaux	Titres	Pages
Tableau 1	Principaux constituants des huiles essentielles extraites des feuilles et des graines d'*Eucalyptus globulus*.	**7**
Tableau 2	Efficacité insecticide des huiles de feuilles et de graines d'*E.globulus* et de leur composé majeur, eucalyptol, appliqués par fumigation sur les larves de *T. granarium* : détermination des concentrations létales et de leurs intervalles de confiance.	**12**
Tableau 3	Efficacité insecticide des huiles de feuilles et de graines d'*E.globulus* et de leur composé majeur, eucalyptol, appliqués par contact sur les larves de *T. granarium* : détermination des concentrations létales et de leurs intervalles de confiance.	**15**
Tableau 4	Pourcentage (PR) et classe de répulsion des huiles de feuilles, de graines d'*E.globulus* et de leur composé majeur, eucalyptol, sur les larves de *T. granarium*.	**16**

LISTE DES FIGURES

Figures	Titres	Pages
Figure 1	*Trogoderma granarium*	**5**
Figure 2	*Eucalyptus globulus*	**7**
Figure 3	Test de toxicité par fumigation	**8**
Figure 4	Test de toxicité par contact	**9**
Figure 5	Test de répulsion par la méthode de la zone préférentielle sur papier filtre	**10**
Figure 6	Toxicité des huiles de feuilles, de graines d'*E.globulus* et de leur composé majeur, eucalyptol, appliquée par fumigation (µL/L d'air) sur les larves de *T. granarium* à différentes périodes : Mortalité corrigée (%) (m ± SEM, n=3 répétitions de 10 individus chacune) : test HSD de Tukey	**12**
Figure 7	Toxicité des huiles de feuilles, de graines d'*E.globulus* et de leur composé majeur, eucalyptol, appliquée par contact (µL/mL) sur les larves de *T. granarium* à différentes périodes : Mortalité corrigée (%) (m ± SEM, n=3 répétitions de 10 individus chacune): test HSD de Tukey	**14**

INTRODUCTION

I. INTRODUCTION

La population mondiale devrait augmenter de plus d'un tiers, soit 2,3 milliards de personnes entre 2009 et 2050 (FAO, 2009). Cette croissance démographique engendre une demande alimentaire accrue. Pour garantir la sécurité alimentaire et éviter une grave crise, l'agriculture doit relever le défi d'augmenter la production de matières premières, notamment les céréales et les légumineuses, d'environ 50 % par rapport à 2012. En effet, d'ici 2050, il faudra nourrir 9,7 milliards d'habitants dans le monde (FAO, 2017).

Le blé tendre en particulier, constitue l'une des principales cultures vivrières à l'échelle mondiale, représentant une source majeure de glucides et de protéines végétales pour des milliards d'individus. Sa conservation post-récolte constitue un enjeu stratégique pour la sécurité alimentaire, particulièrement dans les régions arides et semi-arides, où les capacités de stockage sont limitées. Toutefois, la préservation qualitative et quantitative de cette céréale est compromise par divers bioagresseurs, telles que les rongeurs, les champignons, les acariens et les insectes, dont la plupart sont des coléoptères et des lépidoptères (Fleurat-Lessard, 1994), à l'instar de *Trogoderma granarium* Everts, considéré comme l'un des ravageurs les plus dévastateurs des denrées entreposées (Athanassiou, 2022).

Classé organisme de quarantaine de catégorie A2 par l'Organisation européenne et méditerranéenne pour la protection des plantes (OEPP), *T. granarium* se distingue par sa résistance thermique, sa faible exigence en humidité, ainsi que par la longévité de ses larves en état de diapause. Ces caractéristiques biologiques confèrent à l'espèce une redoutable capacité d'infestation, rendant les stratégies de lutte conventionnelles peu efficaces (Ghimire *et al*., 2017). Historiquement, la gestion de ce ravageur repose sur l'utilisation massive de fumigants (phosphine, bromure de méthyle) et d'insecticides de contact (pyréthrinoïdes, organophosphorés). Cependant, l'émergence de souches résistantes à divers traitements tels que l'alpha-cyperméthrine, le chlorfénapyr, la deltaméthrine, le pyriproxyfène, le thiaméthoxam et le spinosad (Athanassiou et *al.*, 2015 ; Kavallieratos *et al*., 2017; Ghimire *et al*., 2017), conjuguée aux risques écotoxicologiques et aux résidus chimiques dans les produits alimentaires, souligne la nécessité de recourir à des alternatives bio-compatibles (Isman, 2020).

Dans cette optique, les substances d'origine végétale, notamment les huiles essentielles (HEs), suscitent un intérêt croissant en tant qu'insecticides d'origine naturelle. Issues du métabolisme

secondaire des plantes, ces extraits volatils contiennent des monoterpènes, des sesquiterpènes et des composés phénoliques aux propriétés insecticides (Aryani & Auamcharoen, 2016 ; Jayakumar *et al*., 2017), répulsives (Ebrahimifar *et al*., 2021), et antifeedantes (Ali *et al*., 2017; Sayada *et al*., 2021) bien documentées . Le mode d'action de ces composés peut impliquer des interactions avec les récepteurs synaptiques (notamment GABAergiques et octopaminergiques), la perturbation du métabolisme énergétique mitochondrial, ou encore l'inhibition d'enzymes clés telles que l'acétylcholinestérase (Enan, 2001).

Les activités biologiques des HEs reposent principalement sur quelques molécules présentes en concentrations élevées, généralement entre 20 et 85%. Cependant, d'autres molécules présentes à des niveaux de traces peuvent jouer un rôle crucial dans l'amélioration de leur efficacité globale, en démontrant une activité synergique mutuelle ou des effets antagonistes (Pavela & Benelli, 2016). De plus, les modalités d'application — fumigation, application topique ou exposition par contact indirect — conditionnent l'efficacité biocide, en fonction de la perméabilité cuticulaire, du comportement de l'insecte cible, ainsi que de la stabilité physicochimique des composés actifs dans l'environnement de stockage.

Outre leur pouvoir insecticide, les HEs se distinguent également par leur effet répulsif significatif vis-à-vis de nombreux insectes ravageurs, notamment ceux des denrées stockées. La répulsion constitue un mécanisme de défense préventive et indirect, visant à dissuader les insectes de s'approcher ou d'entrer en contact avec les substrats traités, réduisant ainsi les risques d'oviposition, de colonisation et de détérioration des denrées. Ce mode d'action est généralement attribué à l'interaction des composés volatils avec les récepteurs olfactifs des insectes, entraînant une perturbation des signaux chimiosensoriels responsables de la reconnaissance alimentaire et de l'orientation comportementale (Nerio *et al*., 2009). Plusieurs monoterpènes, notamment le 1,8-cinéole, le limonène et le linalol, ont démontré une aversion olfactive marquée chez les Coléoptères et les Lépidoptères infestant les grains, modulant leur activité locomotrice et réduisant le temps de séjour dans les zones traitées (Papachristos & Stamopoulos, 2002).

Dans ce contexte, le présent travail vise à entreprendre une évaluation comparative de l'activité insecticide par fumigation et par contact, et l'effet répulsif des HEs extraites des feuilles et des graines d'*Eucalyptus globulus*, ainsi que de leur constituant principal, le 1,8-cinéole, à l'encontre de *Trogoderma granarium*. En s'appuyant sur des bioessais comportementaux et des tests de

toxicité, cette étude ambitionne de caractériser l'efficacité biologique de ces extraits, tout en contribuant à la valorisation de biopesticides d'origine végétale dans une perspective de lutte intégrée contre les ravageurs des denrées stockées.

MATERIEL ET METHODES

II. MATERIEL ET METHODES

2.1. Présentation de l'insecte, *Trogoderma granarium* (Everts, 1898)

Trogoderma granarium, un ravageur originaire du sous-continent indien, il appartient à l'ordre des Coléoptères et à un niveau plus spécifique, il est classé dans la super-famille des Bostrichoidea, la famille des Dermestidea, et la sous-famille des Anthreninae. Il est classé en catégorie A2 par l'Organisation européenne et méditerranéenne pour la protection des plantes, ce qui en fait une menace potentielle prioritaire (EPPO 2016). Ce ravageur revêt une importance majeure pour les mesures de quarantaine, étant classé parmi les 100 espèces envahissantes les plus nuisibles au monde (Lowe *et al*., 2000). Dans des conditions favorables, 20°C et 35°C de température et une humidité relative <50%, il peut causer des pertes pouvant atteindre 70 % en une courte période (Lindgren & Vincent 1959 ; Kavallieratos *et al*., 2019).

La diapause larvaire de cette espèce est reconnue comme une caractéristique essentielle qui contribue grandement à l'expansion de sa zone géographique (Hadaway, 1956 ; Athanassiou *et al*., 2019). Ce stade de dormance peut persister pendant plusieurs années et résister à des températures extrêmes ainsi qu'à diverses méthodes de contrôle, qu'elles soient chimiques ou non-chimiques. (Athanassiou, 2022).

D'après la liste établi par Hagstrum et Subramanyam (2009), et par la suite complétée par Athanassiou *et al*. (2016) et Kavallieratos *et al*. (2019), *T. granarium* peut infester plus de 100 produits différents d'origine végétale et animale, allant des céréales à la poudre de lait. En ce qui concerne les céréales et les légumineuses, *T. granarium* se développe beaucoup plus facilement dans le blé que dans d'autres produits tels que le maïs, le riz ou les légumineuses (Athanassiou *et al*., 2016; Kavallieratos *et al*., 2019). Par conséquent, cette espèce est considérée comme une menace majeure pour les céréales et les produits amylacés associés (Athanassiou *et al*., 2019).

Les larves de cette espèce sont généralement très velues. Des spicisetae de différentes longueurs sont disposées sur la surface dorsale, et une "brosse" de longues spicisetae sur le neuvième segment abdominal s'étend vers l'arrière tel une queue et diminue en taille par rapport au corps au fur et à mesure de la croissance des larves. Des hastisetae sont présentes et insérées sur les tergites, souvent en touffes distinctes. La larve de premier stade est jaunâtre, d'environ 1,6 mm de longueur, et présente deux touffes de 4 à 10 hastisetae sur chacun des septième et huitième tergites abdominaux.

En atteignant le quatrième stade, les larves deviennent brun doré, mesurent environ 3 mm de longueur et présentent des touffes denses de hastisetae insérées sur les parties postérolatérales des tergites abdominaux et thoraciques ; ces touffes s'agrandissent et se densifient vers l'arrière. À pleine maturité, la larve mesure environ 5 mm, mais sa taille peut varier, notamment chez les larves en diapause (Athanassiou, 2022).

Les adultes de *T. granarium* sont brun rougeâtre, avec ou sans marques sombres vagues ; le pronotum est d'un brun plus foncé. Ils sont de forme ovale et varient en taille de 2 à 3 mm, les femelles étant légèrement plus grandes que les mâles. La surface dorsale est modérément recouverte de fins poils. Un ocelle médian est présent entre les yeux composés. Le nombre de segments antennaires est généralement de 11, mais une certaine fusion des segments peut avoir lieu, de sorte qu'il peut y en avoir aussi peu que neuf. Le club antennaire assez distinct se compose de 3 à 5 segments, selon le degré de fusion des segments distaux. Chez le mâle, le segment apical du club est allongé par rapport à celui de la femelle. Les antennes s'insèrent dans des rainures ventrales dans le prothorax (Athanassiou, 2022).

Des données récentes ont montré que l'éclosion des œufs se produit quelques jours après la ponte, généralement entre 2 et 4 jours (Gourgouta *et al*., 2021; Lampiri et Athanassiou, 2021). Le temps de développement de l'œuf à l'adulte peut varier de 39 à 45 jours à 30ºC, mais peut prendre jusqu'à 220 jours à 21ºC (Athanassiou *et al*., 2019). De plus, à des températures inférieures à 30ºC, le développement larvaire peut être interrompu en raison de l'induction de la diapause (Wilches *et al*., 2017). Les stades larvaires varient considérablement en fonction de la température et du sexe, mais à des températures de 30ºC ou plus, le développement peut être très rapide, de 15 jours, voire moins (Hadaway, 1956 ; Burges, 1962a, b; Gourgouta *et al*., 2021; Lampiri et Athanassiou, 2021). Les adultes ont une durée de vie courte et ne se nourrissent pas, seuls quelques-uns peuvent vivre plus de 7 jours, tandis que tous les adultes meurent avant 14 jours (Gourgouta *et al*., 2021).



Figure 1. *Trogoderma granarium*.

2.2. Collecte et élevage

La collecte de ce ravageur a été réalisée à l'Office Algérien Interprofessionnel des Céréales de Tébessa (OAIC). Son élevage en masse a été mené au Laboratoire d'Eau et d'Environnement de l'Université de Tébessa. Les individus ont été gardés dans des bocaux en plastique, contenant du blé sain, non infesté et non traité, provenant de la coopérative de céréales et légumineuses, comme substrat alimentaire. L'élevage a été maintenu à une température de 26 ±1°C et à une humidité relative de 65 ±5 % pendant plusieurs générations afin d'obtenir des individus sains et purs.

2.3. Présentation de la plante, *Eucalyptus globulus*

Eucalyptus globulus, communément appelée « gommier bleu » ou « gommier bleu de Tasmanie». est une espèce ligneuse appartenant à la famille des Myrtaceae. Originaire d'Australie et de Tasmanie, cette espèce a été largement introduite dans les régions méditerranéennes, subtropicales et tempérées en raison de sa croissance rapide, de sa résistance aux stress abiotiques, et de son intérêt économique en sylviculture, médecine traditionnelle et agro-industrie (Broker & Kleinig, 2006).

Cette espèce se caractérise par un port élancé, des feuilles persistantes, aromatiques et riches en glandes sécrétrices d'huiles essentielles. Ces dernières sont présentes à la fois dans les feuilles, les graines et les jeunes rameaux. L'huile essentielle d'*E. globulus* est particulièrement connue pour sa richesse en 1,8-cinéole (également appelé eucalyptol), un monoterpène oxydé aux propriétés antibactériennes, antifongiques et insecticides bien établies (Silva *et al*., 2003 ; Dorman & Deans, 2000). La composition chimique de l'huile essentielle peut varier en fonction de l'organe végétal, du stade phénologique, des conditions pédoclimatiques et de la méthode d'extraction utilisée. Outre le 1,8-cinéole, on retrouve fréquemment des composés tels que l'α-pinène, le limonène, le globulol et le spathulénol, qui peuvent contribuer de manière synergique ou antagoniste à l'activité biologique globale (Batish *et al*., 2008).

Règne : Plantae

Division : Magnoliophyta (Angiospermes)

Classe : Magnoliopsida (Dicotylédones)

Ordre : Myrtales

Famille : Myrtaceae

Genre : *Eucalyptus*

Espèce : *Eucalyptus globulus* Labill.



Figure 2. *Eucalyptus globulus*.

2.4. HEs des feuilles et des graines d'*E. globulus* et leurs Composition chimique

Les huiles essentielles extraites des feuilles et des graines d'*E.globulus* qui ont été obtenues par hydrodistillation à l'aide d'un appareil de type Clevenger, puis caractérisées chimiquement par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (GC-MS). Leurs constituants majeurs ont été rapportés précédemment (Tableau 1).

Tableau 1. Principaux constituants des huiles essentielles extraites des feuilles et des graines d'*Eucalyptus globulus*.

Huiles testés	Constituants majeurs	Pourcentage relatif (%)	littérature
E. globulus	ρ-cymene	27.31	(Soltani *et al*., 2025)
feuilles	1,8-cineole	25.19	
	spathulenol	8.13	
	β-phellandrene	7.95	
E. globulus	1,8-cineole	47.58	(Abes *et al*., 2025)
graines	ρ-cymene	15.69	
	terpinen-4-ol	7.14	
	α-phellandrene	6.13	

2.5. Traitement et bioessais :

2.5.1. Toxicité par fumigation

L'effet toxique de l'HE des feuilles et des graines d'*E.globulus* et de leur composé majeur eucalyptol, sur les larves de *T. granarium* a été évalué dans des flacons en verre (60 mL), chacun contenant 10 larves (Fig. 3). Des disques de papier filtre No.2 Whatman, mesurant 2 cm de diamètre, ont été fixés sur la face inférieure des bouchons des flacons. Ces disques ont été imprégnés par différents concentrations varient de 104.166 µL/L air jusqu'à 833.33 µL/L air. Les insectes témoins ont été maintenus dans des conditions identiques sans traitement. Chaque dose a été répliquée trois fois. À des intervalles de 24, 48 et 72 heures après le début de l'exposition, le nombre de mortalités a été compté et ajusté à l'aide de la formule d'Abbott (1925). Les concentrations létales (CL_{25}, CL_{50} et CL_{90}) ainsi que leurs intervalles de confiance 95 % ont été déterminés par analyse de régression non linéaire.

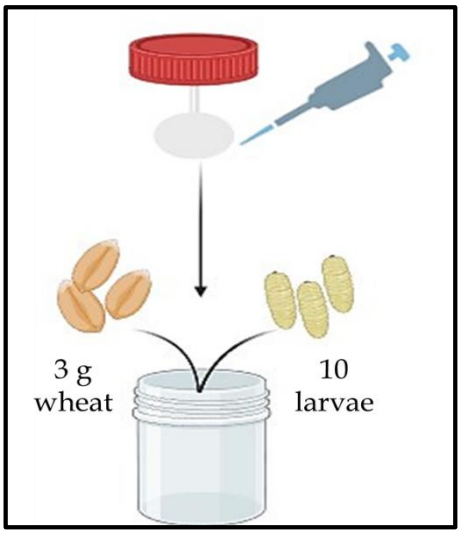


Figure 3. Test de toxicité par fumigation.

2.5.2. Toxicité par contact

Après un screening préalable, l'HE des feuilles et des graines d'*E.globulus* et de leur composé majeur eucalyptol, dissous dans l'acétone a été appliquée à différentes concentrations (8, 16 et 32 et 64 µl/ml) sur 3g de blé sain dans des flacons en plastique (Fig. 4). Après une évaporation totale du solvant pendant 15min, 10 larves de *T. granarium* sont introduits dans les flacons. Le bioessai

a été réalisé en trois répétitions pour chaque dose. Une série témoin est conduite en parallèle où les grains de blé reçoivent uniquement du solvant (acétone). Les mortalités enregistrées à 12 h, 24h et 48 h après traitement ont été corrigées selon la formule d'Abbott (1925), afin d'éliminer les mortalités naturelles. Les concentrations létales (CL_{25}, CL_{50} et CL_{90}) ainsi que leurs intervalles de confiance 95 % ont été déterminés par analyse de régression non linéaire.

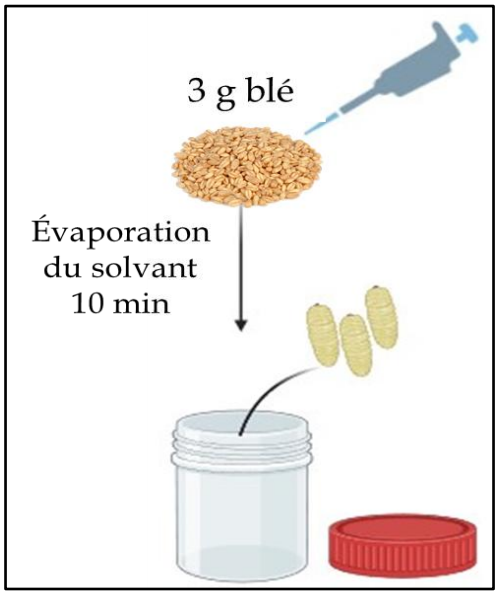


Figure 4. Test de toxicité par contact.

2.6. Test de répulsion

L'effet répulsif de l'HE des feuilles et des graines d'*E.globulus* et de leur composé majeur eucalyptol, a été évalué sur les larves de *T. granarium,* en utilisant la méthode de la zone préférée sur papier filtre décrite par Jilani & Saxena (1990). Ainsi, les disques de papier filtre de 9 cm de diamètre utilisés à cet effet ont été coupés en deux parts égales. Trois doses ont été préparées (6 µl, 12 µl et 24 µl/ml) et diluées avec l'éthanol. Ensuite, 0,5 ml de chaque solution ainsi préparée a été étalée uniformément sur une moitié du disque, tandis que l'autre moitié était traitée uniquement avec de l'éthanol. Après 15 minutes d'évaporation, les deux moitiés ont été collées ensemble à l'aide de ruban adhésif. Le disque de papier filtre a été remis en place et placé dans une boîte, et un lot de 10 larves a été placé au centre de chaque disque (Fig. 5). Chaque traitement a été répliqué trois fois et les pourcentages d'insectes présents sur les zones traitées (G) et de contrôle (P) ont été enregistrés après 30 minutes, 1 heure, 3 heures, 6 heures, 12 heures et 24 heures. Le pourcentage de répulsion (RP) a été calculé à l'aide de la formule de McDonald et al. (1970) :

$$RP = [(P-G) / (P+G)] \times 100$$

Les valeurs moyennes ont été calculées et classées selon la méthode de McDonald et al. (1970) en utilisant une échelle de répulsion allant de 0 à V :

Classe 0 (PR < 0,1 %), classe I (PR = 0,1 % - 20,0 %), classe II (PR = 20,1 % - 40,0 %), classe III (PR = 40,1 % - 60,0 %), classe IV (PR = 60,1 % - 80,0 %) et classe V (PR = 80,1 % - 100,0 %).

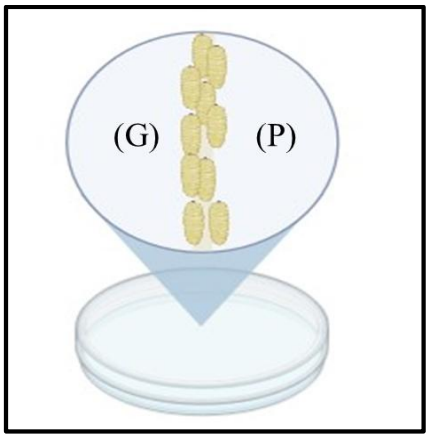


Figure 5. Test de répulsion par la méthode de la zone préférentielle sur papier filtre.

2.7. Analyses statistiques

L'analyse statistique a été réalisée grâce au logiciel GRAPH PAD PRISM 7. Les résultats obtenus ont été exprimés par la moyenne ± l'écart-moyen (SEM). L'analyse de la variance à un critère de classification et le test HSD de Tukey ont été utilisés.

RÉSULTATS

III. RESULTATS

3.1. Essais toxicologiques :

Les essais toxicologiques ont permis de déterminer l'efficacité des huiles essentielles extraites des feuilles et des graines d'*Eucalyptus globulus*, ainsi que de leur composé principal, l'eucalyptol, en se basant sur les mortalités enregistrées chez les larves de *Trogoderma granarium* à différents temps après traitement.

3.1.1. Toxicité par fumigation :

Après un test de présélection, différentes concentrations ont été utilisées : 333.33 ; 500 ; 666.66 et 833.33 µL/L d'air pour les huiles de feuilles et de graines, et 104.16 ; 208.33 ; 416.66 et 833.33 µL/L d'air pour l'eucalyptol. Les traitements ont été appliqués par fumigation. Aucune mortalité n'a été observée dans les séries témoins.

Les mortalités corrigées enregistrées lors des tests de toxicité par fumigation varient comme suit : Pour l'huile de feuilles d'*E. globulus*, elles passent de 3.33 % à 24 heures à 20 % à 72 heures pour la dose la plus faible (333.33 µL/L d'air), et de 73.33 % à 24 heures à 100 % à 72 heures pour la dose la plus élevée (833.33 µL/L d'air). Pour l'huile de graines d'*E. globulus*, les mortalités vont de 3.33 % à 24 heures à 36.66 % à 72 heures pour la dose la plus faible, et de 66.66 % à 24 heures à 100 % à 72 heures pour la dose la plus élevée. En ce qui concerne l'eucalyptol, elles varient de 3.33 % à 24 heures à 10 % à 72 heures pour la plus faible dose (104.16 µL/L d'air), et de 93.33 % à 24 heures à 100 % à 72 heures pour la dose maximale (833.33 µL/L d'air).

Ces mortalités augmentent de manière significative en fonction des doses appliquées et du temps après traitement chez les larves de *T. granarium* : Pour l'huile de feuilles d'*E. globulus* : à 24 heures ($F_{3,8} = 61.94$; $p < 0.0001$), à 48 heures ($F_{3,8} = 116.5$; $p < 0.0001$) et à 72 heures ($F_{3,8} = 88.73$; $p<0.0001$). Pour l'huile de graines d'*E. globulus* : à 24 heures ($F_{3,8} = 26.08$; $p = 0.0002$), à 48 heures ($F_{3,8} = 31.60$; $p < 0.0001$) et à 72 heures ($F_{3,8} = 50.87$; $p < 0.0001$). Pour l'eucalyptol : à 24 heures ($F_{3,8} = 29.51$; $p = 0.0001$), à 48 heures ($F_{3,8} = 73.60$; $p < 0.0001$) et à 72 heures ($F_{3,8} = 48.83$; $p < 0.0001$).

Le test HSD de Tukey appliqué révèle : Pour l'huile de feuilles d'*E. globulus*, la formation de quatre groupes de moyennes distincts à 48 heures, et de trois groupes à 24 et 72 heures. Pour l'huile

de graines, deux groupes à 24 heures, et trois groupes à 48 et 72 heures. Pour l'eucalyptol, trois groupes ont été identifiés à chacune des périodes (24, 48 et 72 heures) (Fig.6).

La courbe dose-réponse, représentant les pourcentages de mortalité en fonction du logarithme des doses appliquées, a permis l'estimation des concentrations létales (CL) ainsi que leurs intervalles de confiance et le Hill Slope (Tableau 2).

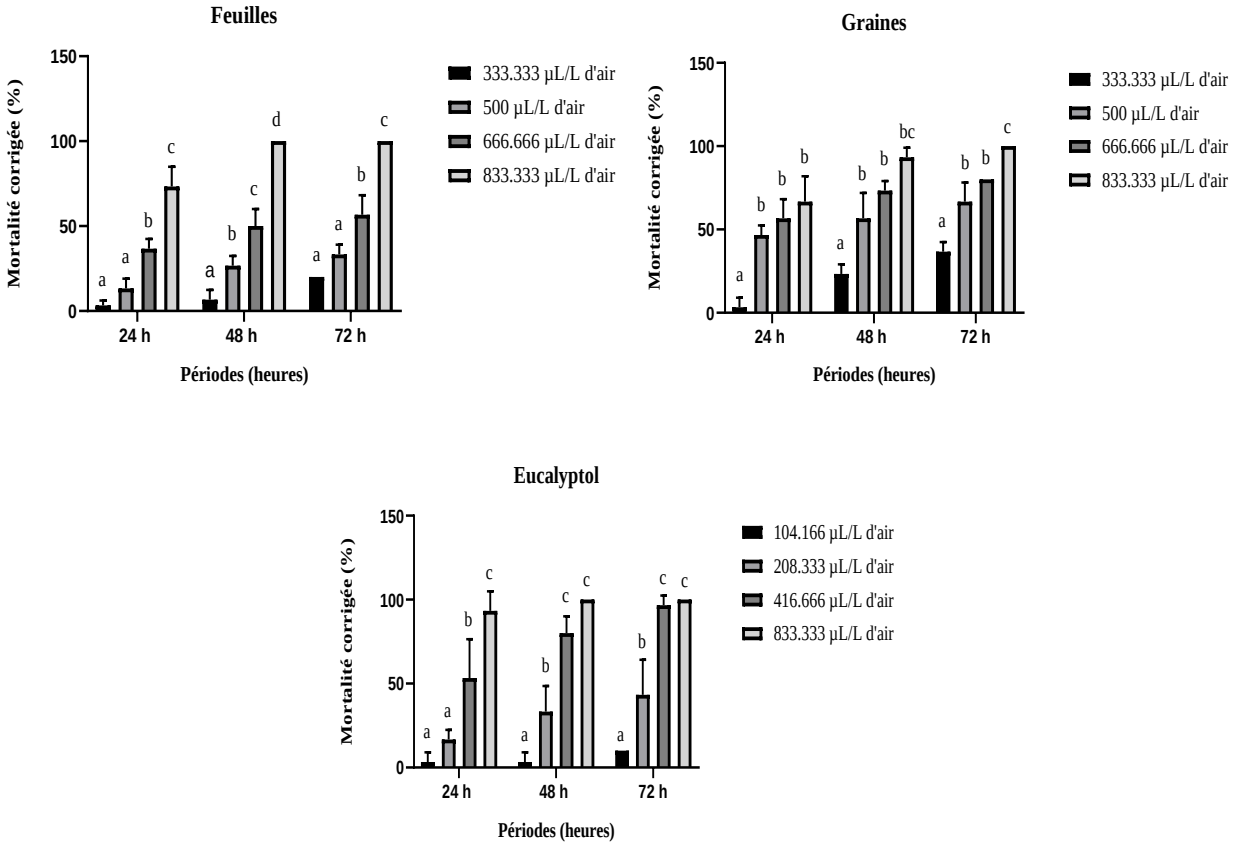


Figure 6. Toxicité des huiles de feuilles, de graines *d'E.globulus* et de leur composé majeur, eucalyptol, appliquée par fumigation (µL/L d'air) sur les larves de *T. granarium* à différentes périodes : Mortalité corrigée (%) (m ± SEM, n=3 répétitions de 10 individus chacune) : test HSD de Tukey.

Tableau 2. Efficacité insecticide des huiles de feuilles et de graines d'*E.globulus* et de leur composé majeur, eucalyptol, appliqués par fumigation sur les larves de *T. granarium* : détermination des concentrations létales et de leurs intervalles de confiance.

Traitement	Temps	R^2	Hillslope	CL_{25} IC	CL_{50} IC	CL_{90} IC
E. globulus feuilles	24 h	0.99	6.08	597.80 524.70±661.20	716.10 666±771.60	1028 878.60± 1332
	48 h	0.92	6.28	520.70 78.29±724	620.10 363.80±1148	879.70 594±1176
	72 h	0.86	4.47	445 302±550	569 407±788.50	930.30 602±1147
E. globulus graines	24 h	0.86	3.12	429.90 290 ±719.90	611 483.20±710.70	996.30 850.40±2022
	48 h	0.98	3.55	344 235.80±429.40	468.60 388.40±545.60	869.60 657.30±1391
	72 h	0.95	3.33	287.40 94.10±400.70	399.50 235±505.50	771.90 497.90±1233
Eucalyptol	24 h	0.99	2.94	266.10 201.60±342.80	386.70 322.20±461.30	816.60 579.80±1267
	48 h	0.99	3.30	189.30 143.70±239.70	264 217.80±322.90	513.10 321.70±811
	72 h	0.99	4.01	166.20 112.70±209.20	218.50 175.10±268	377.40 282.90±660.30

Selon les valeurs de CL rapportées dans ce tableau, l'eucalyptol présente la toxicité la plus élevée par fumigation, surpassant celle des huiles de graines et de feuilles d'*E.globulus*.

3.1.2. Toxicité par contact :

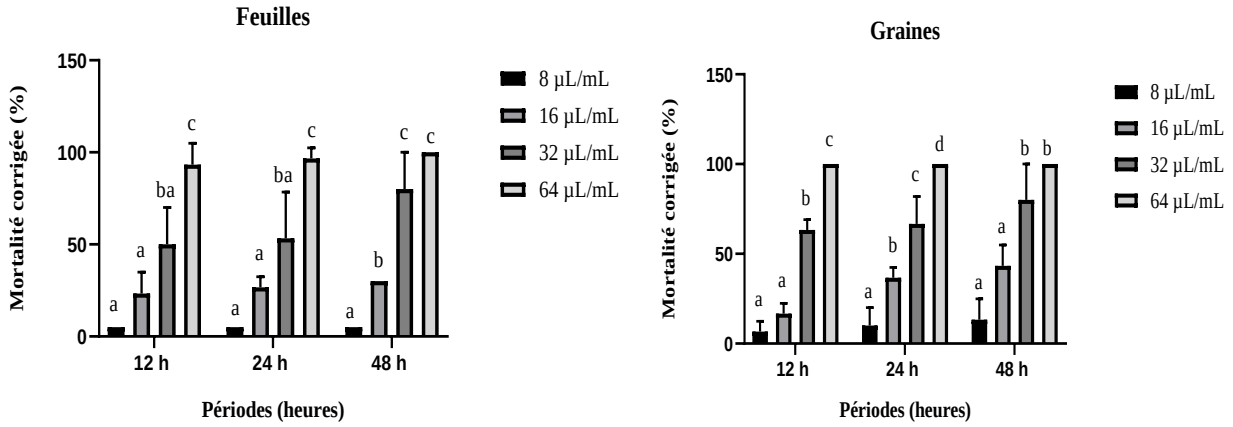
Après un test de screening, les mêmes concentrations ont été utilisées pour les huiles de feuilles, de graines, ainsi que pour l'eucalyptol : 8, 16, 32 et 64 µL/mL. Les traitements ont été appliqués par ingestion. Aucune mortalité n'a été observée dans les séries témoins.

Les mortalités corrigées enregistrées lors des tests de toxicité par ingestion varient comme suit : pour l'huile de feuilles d'*E. globulus*, elles passent de 3.33 % à 12 heures à 6.66 % à 48 heures pour la dose la plus faible (8 µL/mL), et de 93.33 % à 12 heures à 100 % à 48 heures pour la dose la plus élevée (64 µL/mL). Pour l'huile de graines d'*E. globulus*, les mortalités varient de 6.66 % à 12 heures à 13.33 % à 48 heures pour la dose la plus faible, et atteignent 100 % dès 12 heures pour la dose la plus élevée. En ce qui concerne l'eucalyptol, elles vont de 3.33 % à 12 heures à 13.33 % à 48 heures pour la plus faible dose, et de 73.33 % à 12 heures à 100 % à 48 heures pour la dose maximale.

Ces mortalités augmentent de manière significative en fonction des doses appliquées et du temps après traitement chez les larves de *T. granarium* : Pour l'huile de feuilles d'*E. globulus* : à 12 heures ($F_{3,8} = 28.87$; $p = 0.0001$), à 24 heures ($F_{3,8} = 29.13$; $p = 0.0001$) et à 48 heures ($F_{3,8} = 62.75$; $p<0.0001$). Pour l'huile de graines d'*E. globulus* : à 12 heures ($F_{3,8} = 224.9$; $p < 0.0001$), à 24 heures ($F_{3,8} = 49.21$; $p < 0.0001$) et à 48 heures ($F_{3,8} = 26.72$; $p = 0.0002$). Pour l'eucalyptol : à 12 heures ($F_{3,8} = 22.18$; $p = 0.0003$), à 24 heures ($F_{3,8} = 21.71$; $p = 0.0003$) et à 48 heures ($F_{3,8} = 36.62$; $p < 0.0001$).

Le test HSD de Tukey appliqué révèle : trois groupes aux différentes périodes pour l'huile de feuilles ; trois groupes de moyennes à 12 h, quatre groupes à 24 h et deux groupes à 48 h pour l'huile de graines ; deux groupes à 12 h, et trois groupes à 24 h et 48 h pour l'eucalyptol (Fig.7).

La courbe dose-réponse, représentant les pourcentages de mortalité en fonction du logarithme des doses appliquées, a permis l'estimation des concentrations létales (CL) ainsi que leurs intervalles de confiance et le Hill Slope (Tableau 3).



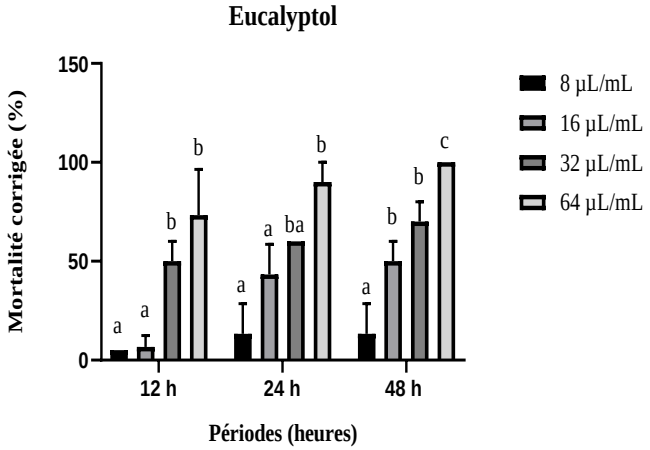


Figure 7. Toxicité des huiles de feuilles, de graines d'*E.globulus* et de leur composé majeur, eucalyptol, appliquée par contact (µL/mL) sur les larves de *T. granarium* à différentes périodes : Mortalité corrigée (%) (m ± SEM, n=3 répétitions de 10 individus chacune) : test HSD de Tukey.

Tableau 3. Efficacité insecticide des huiles de feuilles et de graines *d'E.globulus* et de leur composé majeur, eucalyptol, appliqués par contact sur les larves de *T. granarium* : détermination des concentrations létales et de leurs intervalles de confiance.

Traitement	Temps	R^2	Hillslope	CL_{25} IC	CL_{50} IC	CL_{90} IC
E. globulus feuilles	12 h	0.97	2.53	19.09 9.26 ± 31.67	29.43 19.25 ± 44.49	69.93 37.50 ± 261.70
	24 h	0.97	2.52	17.76 7.02 ± 32.21	27.42 16.42 ± 45.20	65.38 30.27 ± 355
	48 h	0.99	3.44	15.17 12.27 ± 18.35	20.87 17.89 ± 24.47	39.49 28.33 ± 55.88
E. globulus graines	12 h	0.99	3.28	18.93 12.26 ± 21.19	26.44 20.23 ± 33.79	51.60 34.61 ± 98.80
	24 h	0.98	2.27	13.09 6.21 ± 21.69	21.22 14.06 ± 31.42	55.82 27.06 ± 177.30
	48 h	0.99	2.47	11.38 8.62 ± 14.24	17.73 14.89 ± 21.05	43.02 30.35 ± 64.99

Eucalyptol	12 h	0.96	2.30	22.51 9.49 ± 38.86	36.23 22.63 ± 74.56	93.86 80.65 ± 1101
	24 h	0.97	1.66	11.10 3.58 ± 19.90	21.48 12.93 ± 35.07	80.44 33.71 ± 551.30
	48 h	0.96	2.05	10.35 2.82 ± 19.01	17.69 9.77 ± 29.80	51.65 31.08 ± 337

Ce tableau met en évidence, à travers les valeurs de CL, que l'huile de graines est le traitement le plus toxique par contact, suivie par celle de l'huile de feuilles.

3.2. Effet répulsif :

Les résultats de l'effet répulsif des huiles de feuilles, de graines d'*E.globulus* et de leur composé majeur, eucalyptol, sur les larves de *T. granarium* sont présentés dans le Tableau 4. Le pourcentage de répulsion augmente proportionnellement aux concentrations appliquées et à la durée d'exposition. Le taux de répulsion le plus élevé, soit 93.33 %, a été observé 3 h après le traitement avec la concentration maximale (24 µL/mL) d'eucalyptol. Par ailleurs, les huiles essentielles extraites des feuilles et des graines d'*E.globulus* ont également montré une activité répulsive notable. Elles sont classées dans la catégorie IV (répulsive), avec un taux de 80 % à 24 h pour les feuilles à la dose de 12 µL/mL, et un taux identique observé après 1 h d'exposition pour les graines à la dose de 24 µL/mL.

Tableau 4. Pourcentage (PR) et classe de répulsion des huiles de feuilles, de graines d'*E.globulus* et de leur composé majeur, eucalyptol, sur les larves de *T. granarium*.

		***E. globulus* feuilles**		***E. globulus* graines**		**Eucalyptol**	
Doses	**Temps**	**PR**	**Classe**	**PR**	**Classe**	**PR**	**Classe**
6 µL/mL	30 min	53.33	III	60	III	80	IV
	1 h	53.33	III	60	III	53.33	III
	3 h	46.66	III	40	II	40	II
	6h	20	I	53.33	III	26.66	II
	12 h	13.33	I	46.66	III	13.33	I

	24 h	33.33	II	60	III	26.66	II
12 µL/mL	30 min	53.33	III	60	III	60	III
	1h	60	III	40	II	60	III
	3h	66.66	IV	73.33	IV	46.66	III
	6h	60	III	60	III	49	III
	12h	66.66	IV	46.66	III	46.66	III
	24h	80	IV	60	III	53.33	III
24 µL/mL	30 min	73.33	IV	73.33	IV	53.33	III
	1h	66.66	IV	80	IV	60	III
	3h	53.33	III	60	III	93.33	V
	6 h	46.66	III	53.33	III	66.66	IV
	12 h	66.66	IV	60	III	46.66	III
	24 h	53.33	III	66.66	IV	60	III

DISCUSSION

IV. DISCUSSION

4.1. Toxicité des traitements

La nécessité de limiter les impacts environnementaux des pesticides chimiques a conduit à une intensification des recherches sur des alternatives naturelles et respectueuses de l'écosystème. Parmi celles-ci, les huiles essentielles (HEs) se démarquent comme biopesticides naturels prometteurs, en raison de leurs propriétés bioactives variées et de leur faible toxicité pour l'environnement (Popescu *et al*., 2024). Elles agissent contre un large éventail d'insectes en exerçant des effets toxiques, répulsifs, anti-alimentaires, ovicides, ainsi qu'en inhibant la croissance et la reproduction.

Leur mécanisme d'action implique notamment une perturbation du système nerveux (inhibition de l'acétylcholinestérase, altération des récepteurs neurotransmetteurs), une réduction de l'absorption alimentaire, une inhibition des enzymes digestives, ainsi qu'un stress oxydatif et un déséquilibre hormonal (Czerniewicz *et al*., 2024).

Les HE, composées majoritairement de terpènes, de phénols et d'autres composés aromatiques volatils, sont biodégradables et généralement peu toxiques pour les organismes non ciblés, ce qui les rend écologiquement intéressantes. Toutefois, leur efficacité peut être affectée par des facteurs environnementaux, notamment la stabilité et la volatilité (Assadpour *et al*., 2023 ; Rubika *et al*., 2024 ; Yeshi & Wangchuk, 2022).

Le 1,8-cinéole est largement reconnu comme le principal composé des huiles essentielles de nombreuses espèces d'Eucalyptus, et l'un des plus toxiques (Batish *et al*., 2008 ; Elaissi *et al*., 2011 ; Kumar *et al*., 2013 ; Palacios *et al*., 2009). La toxicité de plusieurs composés présents dans les HEs, notamment le 1,8-cinéole, le caryophyllène, le citral, le limonène et le linalool, constitue l'un des principaux facteurs expliquant leur activité insecticide (Ebadollahi, 2013).

La fumigation, en tant que méthode d'application des HEs, met à profit la volatilité de leurs composants pour agir efficacement sur les insectes via les voies respiratoires. Cette approche est particulièrement pertinente dans la protection des grains stockés, car elle permet une pénétration uniforme dans les silos et une action rapide sur les ravageurs (Sprenger *et al*., 2004).

Dans notre étude, l'eucalyptol s'est distingué par une toxicité remarquable contre *T.granarium*, dépassant l'efficacité des HE totales issues des graines ou des feuilles. Cette suprématie est confirmée par Sprenger *et al*. (2004), qui rapportent un LT_{50} de 9,1 h pour les adultes de *Sitophilus oryzae* exposés à 100 µL/L d'eucalyptol pur. Les travaux de Ryan & Byrne (1988) ont révélé la toxicité de plusieurs terpénoïdes, dont le pulégone, le linalool et le 1,8-cinéole contre *T. Castaneum* et leur inhibition compétitive réversible de l'acétylcholinestérase en occupant le site hydrophobe du centre actif de l'enzyme.

D'autres études ont également confirmé le pouvoir toxique d'eucalyptol contre divers insectes ravageurs des produits stockés. Obeng-Ofori *et al*. (1997) ont ainsi démontré son efficacité insecticide sur *Sitophilus granarius, S. zeamais, Tribolium castaneum* et *Prostephanus truncatus*. Par ailleurs, Rozman *et al*. (2006) ont mis en évidence l'activité insecticide d'eucalyptol, mais aussi du camphre et du carvacrol, contre *Cryptolestes ferrugineus.* Ces résultats soulignent le large spectre d'action de l'eucalyptol, dont la toxicité s'exerce sur différentes espèces d'insectes nuisibles, renforçant ainsi son intérêt en tant que biopesticide naturel efficace.

Plusieurs études antérieures ont mis en évidence le fort pouvoir insecticide de l'huile essentielle d'*Eucalyptus globulus* par fumigation contre divers ravageurs des denrées stockées. Taleb-Toudert (2015) a rapporté une mortalité de 100 % chez les adultes de *Callosobruchus maculatus* après 96 heures d'exposition à une concentration de 4 µL/L d'air, soulignant l'efficacité fulgurante de cette HE en milieu clos. De leur côté, Belhocine et Hammana (2017) ont démontré une toxicité marquée de l'HE par inhalation contre *Rhyzopertha dominica*, confirmant son potentiel en tant que fumigant naturel contre cette espèce particulièrement nuisible. Reguibi (2021) a également observé des résultats similaires contre *Tribolium castaneum*, avec des taux de mortalité élevés indiquant une sensibilité notable à la vapeur d'HE. Par ailleurs, Brahmi et Yousfi (2021) ont mis en évidence un effet létal de l'HE d'*E. globulus* sur *Trogoderma granarium* par exposition aux vapeurs, validant son efficacité contre cet autre coléoptère ravageur. Regnault-Roger & Hamraoui (1993) ainsi que Taib (2015) ont noté une action insecticide contre *Acanthoscelides obtectus*. Finallement, Aiboud (2012) a montré que l'application par inhalation d'HE de myrte, d'eucalyptus, d'origan et de clou de girofle provoquait une toxicité significative contre les larves de *Callosobruchus maculatus*, validant l'efficacité de la voie respiratoire pour certaines HE.

La voie d'exposition par ingestion constitue un mode d'application particulièrement pertinent dans l'évaluation de l'activité insecticide des HEs, notamment pour les ravageurs des denrées stockées. Contrairement à la fumigation, qui repose sur la volatilité des composés, l'ingestion implique un contact direct et prolongé des substances actives avec le système digestif de l'insecte. Cette méthode permet ainsi de mesurer l'impact des huiles essentielles sur les fonctions biologiques internes, notamment la digestion, l'absorption des nutriments, la régulation hormonale et l'activité enzymatique. Plusieurs travaux ont montré que cette voie d'exposition peut entraîner des altérations physiologiques sévères, conduisant à des effets létaux ou sublétaux, tels qu'un ralentissement du développement, une réduction de la fertilité ou la mort (Czerniewicz *et al*., 2024).

Dans la présente étude, il a été observé que l'HE extraite des graines d'*E. globulus* présente une toxicité par contact significativement plus élevée que celle issue des feuilles, ainsi que que celle du composé majoritaire eucalyptol. Ces résultats suggèrent que l'huile de graines constitue la forme la plus efficace par contact parmi les traitements testés.

Les tests par ingestion menés sur d'autres espèces du genre Eucalyptus corroborent ces observations : Ebadollahi *et al*. (2022) ont trouvé un LC_{50} de 25 µL/L d'air à 24 h et 19 µL/L à 72 h avec *Eucalyptus microtheca*. La revue de Filomeno *et al*. (2022) a confirmé que les HE riches en cinéole dans les Eucalyptus provoquaient systématiquement une forte toxicité par ingestion. Ces données confirment l'efficacité de l'ingestion comme mode de diffusion pour les HE et autres insecticides botaniques contre les ravageurs de denrées stockées (Mann & Kaufman, 2012).

4.2. Effet répulsif des traitements

L'activité répulsive observée chez les insectes constitue un mécanisme physiologique de défense contre les composés toxiques libérés par les plantes, permettant d'éviter des substrats hostiles (Isman, 2006). Dans ce contexte, les pesticides d'origine botanique exercent un double rôle : en plus de leur toxicité potentielle, ils possèdent des propriétés répulsives qui éloignent les insectes nuisibles, avec un impact environnemental réduit (Talukder, 2006). Cette activité répulsive repose essentiellement sur la stimulation des récepteurs sensoriels, notamment olfactifs, et a été largement documentée pour de nombreuses HEs (Mossa, 2016). Elle dépend fortement de la composition chimique de l'huile, des principes actifs présents et de leur interaction synergique ou antagoniste (Damalas & Eleftherohorinos, 2011).

Nos résultats confirment l'activité répulsive de l'HE d'*E. globulus* issue des graines et des feuilles, ainsi que de son principal composé, le 1,8-cinéole. Ce dernier a montré une efficacité particulièrement marquée, atteignant la classe V de répulsion à la plus forte concentration testée après 3 heures d'exposition vis-à-vis des larves de *T. granarium.*

Ces observations rejoignent celles de Brahmi et Yousfi (2021), qui ont noté un taux de répulsion de 85 % de l'HE d'*E. globulus* contre *T. granarium*, ainsi que celles de Taib (2015), qui a rapporté une répulsion de 90 % contre les adultes d'*Acanthoscelides obtectus*. D'autres recherches soutiennent ces résultats, comme celles de Tapondjou *et al*. (2005), qui ont enregistré une répulsion de 98 % avec *Eucalyptus saligna* contre *Tribolium confusum*. De plus, le 1,8-cinéole a démontré une activité répulsive notable contre divers ravageurs des produits stockés. Obeng-Ofori *et al*. (1997) ont signalé des taux de répulsion allant de 48 % à 70 % contre *S. granarius, T. castaneum, S. zeamais* et *P. truncatus* à une concentration de 10 µL/mL. De plus, Aggarwal *et al*. (2001) ont également mis en évidence l'effet répulsif du 1,8-cinéole vis-à-vis de *C. maculatus, R. dominica* et *S. oryzae*.

En somme, nos résultats confirment et complètent les données de la littérature en soulignant le potentiel répulsif élevé de l'HE d'*E. globulus* et de son composé majoritaire, le 1,8-cinéole, contre les larves de *T. granarium*. Ces propriétés renforcent l'intérêt de cette HE comme alternative naturelle aux répulsifs de synthèse dans la gestion intégrée des ravageurs des produits stockés.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

V. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les résultats de cette étude démontrent clairement l'efficacité insecticide des huiles essentielles d'*Eucalyptus globulus* et de son principal constituant, à travers deux modes d'action : toxicité par ingestion et par fumigation, et la répulsion. Ces approches complémentaires ont permis d'évaluer le potentiel bio-insecticide de cette plante contre les ravageurs des denrées stockées, notamment *Trogoderma granarium*.

La fumigation révélé une efficacité particulièrement élevée de l'eucalyptol pur, le composé le plus toxique par inhalation. Ce monoterpène majeur a induit une mortalité significative des larves après de courtes durées d'exposition, surpassant les HEs complètes extraites des graines ou des feuilles. Cette forte toxicité s'explique par sa grande volatilité, favorisant une pénétration rapide dans le système respiratoire des insectes.

Les tests d'ingestion, consistant à mélanger les huiles au substrat alimentaire, ont mis en évidence une toxicité croissante avec l'augmentation des doses. L'HE de graines d'*E. globulus* a présenté la plus forte efficacité dans ce mode d'exposition, surpassant celle des feuilles et même l'eucalyptol seul. Cette supériorité peut être attribuée à la synergie entre les différents constituants bioactifs de l'huile, qui provoquent des troubles digestifs, hormonaux et métaboliques chez les larves, entraînant leur mort.

En ce qui concerne l'activité répulsive, l'eucalyptol s'est également distingué par un effet très marqué, ce qui le place au-dessus HEs de graines et de feuilles. Ces composés agissent sur les récepteurs olfactifs des insectes, provoquant leur éloignement du substrat traité. De nombreux travaux antérieurs soutiennent ces observations et confirment que la répulsion dépend à la fois de la nature chimique des composés, de leur concentration et de la sensibilité de l'espèce cible.

Ces résultats confirment l'intérêt des extraits naturels comme alternatives écologiques aux insecticides chimiques, dans une approche de gestion durable des ravageurs des produits stockés. On peut dire aussi on peut dire que l'isolement et la caractérisation du composé bioactif responsable de l'activité insecticide d'une HE représentent une approche plus stratégique, notamment en matière de protection phytosanitaire, de faisabilité de synthèse et de potentiel de valorisation commerciale.

A l'avenir, il serait intéressant :

- ✓ D'encapsulé les traitements appliqués afin d'augmenter leur stabilité et leur durée d'action, de contrôler la libération progressive des composés et de réduire leur évaporation rapide en milieu ouvert.
- ✓ De Crée une base de données comparative avec une centralisation des résultats d'essais sur différents ravageurs, extraits naturels, concentrations et méthodes d'application.
- ✓ Effectuer des tests semi-réels.
- ✓ Et en dernier lieu, développer des formulations prêtes à l'emploi.

RÉSUMÉ

Résumé

Dans un contexte de résistance croissante aux insecticides chimiques et de nécessité de promouvoir des solutions durables en protection des denrées stockées, cette étude a évalué l'efficacité insecticide et répulsive des huiles essentielles (HEs) extraites des feuilles et des graines d'*Eucalyptus globulus*, ainsi que de leur composé principal, le 1,8-cinéole, à l'encontre de *Trogoderma granarium*, un coléoptère ravageur classé organisme de quarantaine. Les bioessais réalisés par fumigation, application par contact et tests de répulsion ont révélé une activité biocide et comportementale significative, dépendante de la nature du traitement, de la dose appliquée et du mode d'exposition.

Les résultats montrent que le 1,8-cinéole est le composé le plus toxique par fumigation, avec des effets létaux rapides et puissants. Par contact, l'huile essentielle extraite des graines s'est avérée plus efficace que celle des feuilles ou que le composé isolé, suggérant une synergie entre ses constituants bioactifs. Concernant l'effet répulsif, les trois traitements ont provoqué un éloignement marqué des larves vis-à-vis des substrats traités, avec une répulsion maximale observée à forte concentration d'eucalyptol.

Ces résultats mettent en évidence le fort potentiel insecticide et répulsif des extraits d'*E. globulus*, en particulier dans la perspective d'une valorisation en tant que biopesticides d'origine végétale. Ils soutiennent l'idée que l'isolement et la caractérisation des composés actifs, combinés à des formulations optimisées (encapsulation, diffusion contrôlée), pourraient offrir des alternatives viables et écologiques aux pesticides de synthèse. À terme, l'intégration de ces extraits dans des programmes de lutte intégrée pourrait contribuer efficacement à la gestion durable des infestations dans les systèmes de stockage alimentaire.

Abstract

In the face of increasing resistance to chemical insecticides and the urgent need for sustainable pest control strategies, this study evaluated the insecticidal and repellent activities of essential oils (EOs) extracted from the leaves and seeds of *Eucalyptus globulus*, as well as their major constituent, 1,8-cineole, against *Trogoderma granarium*, a highly destructive and quarantine-listed storage pest. Bioassays were conducted using fumigation, contact exposure, and behavioral repulsion tests to assess the efficacy of each treatment.

The results revealed that 1,8-cineole exhibited the highest toxicity via fumigation, inducing rapid and significant larval mortality. In contrast, the seed-derived EO showed superior efficacy through contact exposure, suggesting a synergistic interaction among its bioactive components. All treatments demonstrated notable repellent effects, with 1,8-cineole achieving the strongest response at high concentrations.

These findings highlight the potent biocidal and repellent properties of *E. globulus* extracts, particularly 1,8-cineole, and support their potential use as plant-based alternatives to synthetic pesticides. The isolation and characterization of active compounds, combined with advanced formulation strategies—such as encapsulation for controlled release—could enhance stability and efficacy in real storage conditions. Ultimately, incorporating these natural products into integrated pest management programs could contribute to more environmentally responsible and effective control of stored-product pests.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Abbott, W. B. (1925). A method of computing the effectiveness of an insecticide. Journal of Economic Entomology. 18(2): 265-267.
2. Aggarwal, K. K., Tripathi, A. K., Prajapati, V., & Kumar, S. (2001). Toxicity of 1, 8-cineole towards three species of stored product coleopterans. International Journal of Tropical Insect Science, 21(2), 155-160.
3. Aiboud, K. (2012). Etude de l'efficacité de quelques huiles essentielles à l'égard de bruche de niébé *Callosobruchus maculatus* (Coleoptera: Bruchidae) et impacts des traitements sur la germination des graines de *Vigna unguiculata* (L.) Walp. Magister. Biologie et écologie des populations et des communautés. Interaction « plantes-environnement ». Université Mouloud Mammeri. 83p.
4. Ali, A. M., Mohamed, D. S., Shaurub, E. H., Elsayed, A. M. (2017). Antifeedant activity and some biochemical effects of garlic and lemon essential oils on *Spodoptera littoralis* (Boisduval)(Lepidoptera: Noctuidae). Journal of Entomology and Zoology Studies. 5(3): 1476- 1482. -223.
5. Aryani, D. S., & Auamcharoen, W. (2016). Repellency and contact toxicity of crude extracts from three Thai plants (Zingiberaceae) against maize grain weevil, *Sitophilus zeamais* (Motschlusky)(Coleoptera: Curculionidae). Journal of Biopesticides, 9(1), 52.
6. Assadpour, E., Can Karaça, A., Fasamanesh, M., Mahdavi, S. A., Shariat-Alavi, M., Feng, J., ... & Jafari, S. M. (2024). Application of essential oils as natural biopesticides; recent advances. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 64(19), 6477-6497.
7. Athanassiou, C. (2022). *Trogoderma granarium* www.cabi.org/cpc/DATASHEET/55010. Accessed July 2023.
8. Athanassiou, C. G., Kavallieratos, N. G., Boukouvala, M. C., Mavroforos, M. E., & Kontodimas, D. C. (2015). Efficacy of alpha-cypermethrin and thiamethoxam against *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae) and *Tenebrio molitor* L. (Coleoptera: Tenebrionidae) on concrete. Journal of Stored Products Research, 62, 101 107.
9. Athanassiou, C. G., Phillips, T. W., Wakil, W. (2019). Biology and control of the khapra beetle, *Trogoderma granarium*, a major quarantine threat to global food security. Annual Review of Entomology, 64, 131-148.

10. Athanassiou, C.G., Kavallieratos, N.G., Boukouvala, M.C. (2016). Population growth of the khapra beetle, *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae) on different commodities. J. Stored Prod. Res. 69, 72–77.
11. Batish, D. R., Singh, H. P., Kohli, R. K., & Kaur, S. (2008). Eucalyptus essential oil as a natural pesticide. Forest ecology and management, *256*(12), 2166-2174.
12. Belhocine, A., & Hammana, F. (2017). Evaluation de l'effet des huiles essentielles d'*Eucalyptus globulus* sur les paramètres biochimiques de *Rhyzopertha dominica* (Doctoral dissertation, Universite laarbi tebessi tebessa).
13. Brahmi, A. & Yousfi, R. (2021). Impact d'une huile essentielle d'*Eucalyptus globulus* sur les larves de *Trogoderma granarium* : Toxicité, Répulsion, Biochimie et Indices nutritionnels. Master en Ecophysiologie Animale, Université Larbi Tébessi, Tébessa. 83p
14. Broker, M. I. H., & Kleinig, D. A. (2006). Field Guide to Eucalyptus vol. 1 South-eastern Australia.
15. Burges, H.D. (1962 a). Diapause, pest status and control of the khapra beetle, *Trogoderma granarium* Everts. Ann. Appl. Biol. 50:614–17.
16. Burges, H.D. (1962 b). Studies on the dermestidea beetle *Trogoderma granarium* Everts. V. Reactions of diapause larvae to temperature. Bull. Entomol. Res. 53:193–213.
17. Czerniewicz, P., Sytykiewicz, H., & Chrzanowski, G. (2024). The effect of essential oils from Asteraceae plants on behavior and selected physiological parameters of the bird cherry-oat aphid. Molecules, 29(7), 1673.
18. Damalas, C. A., & Eleftherohorinos, I. G. (2011). Pesticide exposure, safety issues, and risk assessment indicators. International journal of environmental research and public health, 8(5), 1402-1419.
19. Dorman, H.J.D., Deans, S.G. (2000). Antimicrobial agents from plants: antibacterial activity of plant volatile oils. J Appl Microbiol, 88:308–316
20. Ebadollahi, A (2013). Essential oils isolated from Myrtaceae family as natural insecticides. Ann. Rev. Res. Biol, 3, 148–175.
21. Ebadollahi, A., Naseri, B., Abedi, Z., Setzer, W. N., & Changbunjong, T. (2022). Promising insecticidal efficiency of essential oils isolated from four cultivated Eucalyptus species in Iran against the lesser grain borer, *Rhyzopertha dominica* (F.). Insects, 13(6), 517.

22. Ebrahimifar, J., Jamshidnia, A., Sadeghi, R., Ebadollahi, A. (2021). Repellency of *Ferulago angulata* (Schlecht.) Boiss essential oil on two major stored-product insect pests without effect on wheat germination. International Journal of Tropical Insect Science. 41(1): 217.
23. Elaissi, A., Salah, K. H., Mabrouk, S., Larbi, K. M., Chemli, R., & Harzallah-Skhiri, F. (2011). Antibacterial activity and chemical composition of 20 Eucalyptus species' essential oils. Food Chemistry, 129(4), 1427-1434.
24. Enan, E. (2001). Insecticidal activity of essential oils: octopaminergic sites of action. Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology, 130(3), 325-337.
25. Eur. Mediterr. Plant Prot. Org. (2016). A2 list of pests recommended for regulation as quarantine pests. *Trogoderma granarium*. https://gd.eppo.int/taxon/TROGGA.
26. FAO. (2009). Global agriculture towards 2050, High-Level Expert Forum - How to Feed the World in 2050; Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, 2009.
27. FAO. (2017). The Future of Food and Agriculture-Trends and Challenges; Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy, 2017.
28. Fleurat-Lessard. (1994). New trends in stored-grain infestation detection inside storage bins for permanent infestation risk monitoring. Conference: 6th International Working Conference on Stored Product Protection. At: Canberra, Australia. 1/2.
29. Ghimire, M. N., Myers, S. W., Arthur, F. H., & Phillips, T. W. (2017). Susceptibility of *Trogoderma granarium* Everts and *Trogoderma inclusum* LeConte (Coleoptera: Dermestidae) to residual contact insecticides. Journal of Stored Products Research, 72, 75–82. https://doi.org/10.1016/j.jspr.2017.02.006.
30. Gourgouta, M., Agrafioti, P., Athanassiou, C.G. (2021). Insecticidal effect of phosphine for the control of different life stages of the khapra beetle, *Trogoderma granarium* (Coleoptera: Dermestidae). Crop Protection, 140. DOI: 10.1016/j.cropro.2020.105409
31. Hadaway, A.B. (1956). The biology of the dermestid beetles, *Trogoderma granarium* Everts and *Trogoderma versicolor* (Creutz). Bulletin of Entomological Research, 46(4):781-796. DOI: 10.1017/S0007485300037044.

32. Hagstrum, D.W., Subramanyam, B. (2009). Stored-product insect resource, [ed. by Hagstrum, D.W., Subramanyam, B.]. St. Paul, USA: American Association of Cereal Chemists, Inc (AACC). vii + 509 pp.
33. Isman, M. B. (2006). Botanical Insecticides, Deterrents, and Repellents in Modern Agriculture and an Increasingly Regulated World. Annual Review of Entomology, 51, 45-66
34. Isman, M. B. (2020). Bioinsecticides based on plant essential oils : A short overview. Zeitschrift Für Naturforschung C, 75(7-8), 179-182. https://doi.org/10.1515/znc-2020-0038.
35. Jayakumar, M., Arivoli, S., Raveen, R., & Tennyson, S. (2017). Repellent activity and fumigant toxicity of a few plant oils against the adult rice weevil *Sitophilus oryzae* Linnaeus 1763 (Coleoptera: Curculionidae). Journal of Entomology and Zoology Studies, 5(2), 324-335.
36. Jilani, G., and Saxena, R. C. (1990). Repellent and feeding deterrent effects of turmeric oil, sweetflag oil, neem oil, and a neem-based insecticide against lesser grain borer (Coleoptera: Bostrychidae). Journal of Economic Entomology, 83(2), 629-634.
37. Kavallieratos, N. G., Athanassiou, C. G., Diamantis, G. C., Gioukari, H. G., & Boukouvala, M. C. (2017). Evaluation of six insecticides against adults and larvae of *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae) on wheat, barley, maize and rough rice. Journal of Stored Products Research, 71, 81-92.
38. Kavallieratos, N.G., Athanassiou, C.G., Boukouvala, M.C., Tsekos, G.T. (2019). Influence of different non-grain commodities on the population growth of *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae). J. Stored Prod. Res. 81, 31–39.
39. Kavallieratos, N.G., Karagianni, E.S., Papanikolaou, N.E. (2019). Life history of *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae) on peeled barley, peeled oats and triticale. J. Stored Prod. Res. 84, 101515.
40. Kumar, P., Mishra, S., Malik, A., & Satya, S. (2013). Housefly (*Musca domestica* L.) control potential of *Cymbopogon citratus* Stapf.(Poales: Poaceae) essential oil and monoterpenes (citral and 1, 8-cineole). Parasitology research, 112, 69-76.

41. Lampiri, E., Athanassiou, C.G. (2021). Insecticidal effect of phosphine on eggs of the khapra beetle (Coleoptera: Dermestidae). Journal of Economic Entomology, 114(3):1389 1400. DOI: 10.1093/jee/toab074
42. Lindgren, D.L., Vincent, L.E. (1959). Biology and control of *Tragoderma granarium* Everts. J. Econ. Entomol. 52:312–19.
43. Lowe, S., Browne, M., Boudjelas, S., De Poorter, M. (2000). 100 of the World's Worst Invasive Alien Species: A Selection from the Global Invasive Species Database. Auckland, NZ: Invasive Species Spec. Group, World Conserv. Union, Int. Union Conserv. Nat. http://www.issg.org/pdf/publications/worst_100/ english_100_worst.pdf
44. Mann, R.S. and P.E. Kaufman (2012). Natural product pesticides: Their development, delivery and use against insect vectors. Mini-Reviews in Organic Chemistry, 9:185-202.
45. Mc Donald, L. L., Guy, R. H., Speirs, R. D. (1970). Preliminary evaluation of new candidate materials as toxicants, repellents, and attractants against stored-product insects. USDA Marketing Research Report. 882.
46. Mossa, A. T. H. (2016). Green pesticides: Essential oils as biopesticides in insect-pest management. Journal of environmental science and technology, 9(5), 354.
47. Obeng-Ofori, D., Reichmuth, C. H., Bekele, J., & Hassanali, A. (1997). Biological activity of 1, 8 cineole, a major component of essential oil of *Ocimum kenyense* (Ayobangira) against stored product beetles. Journal of Applied Entomology, 121(1-5), 237-243.
48. Palacios, S. M., Bertoni, A., Rossi, Y., Santander, R., & Urzúa, A. (2009). Efficacy of essential oils from edible plants as insecticides against the house fly, *Musca domestica* L. Molecules, 14(5), 1938-1947.
49. Papachristos, D. P., and Stamopoulos, D. C. (2002). Repellent, toxic and reproduction inhibitory effects of essential oil vapours on *Acanthoscelides obtectus* (Say) (Coleoptera: bruchidae). Journal of Stored Products Research, vol. 38.
50. Pavela, R., and Benelli, G. (2016). Essential Oils as Ecofriendly Biopesticides? Challenges and Constraints. Trends in Plant. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.10.005.
51. Popescu, I. E., Gostin, I. N., & Blidar, C. F. (2024). An overview of the mechanisms of action and administration technologies of the essential oils used as green insecticides. AgriEngineering, 6(2), 1195-1217.

52. Regnault-Roger, C., & Hamraoui, A. (1993). Influence d'huiles essentielles aromatiques sur *Acanthoscelides obtectus* Say, bruche du haricot (*Phasoelus vulgaris* L.). Acta Botanica Gallica. 140(2) : 217-222.
53. Reguibi, Z., M. (2021). Effet insecticide des huiles essentielles d'*Eucalyptus globulus* sur *Tribolium castaneum* (Coleoptera, Bruchidae) ravageur des céréales. Master en Ecologie. Université Aboubekr Belkaid-TLEMCEN. 59p.
54. Rozman, V., Kalinović, I., & Liška, A. (2006). Bioactivity of 1,8-cineole, camphor and carvacrol against rusty grain beetle (*Cryptolestes ferrugineus* Steph.) on stored wheat. In Proceedings of the 9th International Working Conference on Stored Product Protection (pp. 687–694). São Paulo, Brazil.
55. Rubika, R., Prabhu, T., Shenbagavalli, S., Rajangam, J., Anitha, T., Ramar, A., & Vasanthkumar, S. (2024). Plant essential oils to the rescue-an epic battle with biopesticides for pest control in agriculture. Applied Ecology & Environmental Research, 22(6).
56. Ryan, M. F., & Byrne, O. (1988). Plant-insect coevolution and inhibition of acetylcholinesterase. Journal of chemical ecology, 14, 1965-1975.
57. Sayada, N., Tine, S., Soltani, N. (2021). Evaluation of a botanical insecticide, lavender (*Lavandula angustifolia* (M.)) essential oil as toxicant, repellent and antifeedant against lesser grain borer *Rhyzopertha dominica* (F.)). Appl Ecol Envir Res 20(2):1301–1324.
58. Silva, J., Abebe, W., Sousa, S. M., Duarte, V. G., Machado, M. I. L., & Matos, F. J. A. (2003). Analgesic and anti-inflammatory effects of essential oils of Eucalyptus. Journal of ethnopharmacology, *89*(2-3), 277-283.
59. Soltani, M., Abes, I. F. Z., Perinelli, D. R., Ferrati, M., Merzougui, A., Djabri, M., ... & Soltani, N. (2025). Comparative efficacy of five essential oils from local plants and their major constituents in controlling the stored wheat pest *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae). Journal of Stored Products Research, 112, 102628.
60. Taib, H. (2015). Etude de l'activité insecticide des huiles essentielles d'*Eucalyptus globulus* L. et de *Rosmarinus officinalis* L. à l'égard de bruche du haricot *Acanthoscelides obtectus* Say (Coleoptera, Bruchidae). Master en Protection des Plantes Cultivées. Université Mouloud Mammeri. Tizi- Ouzou. 63p.
61. Taleb-Toudert K, (2015). Extraction et caractérisation des huiles essentielles de dix plantes aromatiques provenant de la région de Kabylie (Nord Algérien). Évaluation de leurs effets

sur le bruche du niébé *Callosobruchus maculatus* (Coleoptera : Bruchidae). Université MOULOUD MAMMERI de Tizi-Ouzou, Kabylie, Algérie, 206 p.

62. Tapondjou, A. L., Adler, C. F. D. A., Fontem, D. A., Bouda, H., & Reichmuth, C. H. (2005). Bioactivities of cymol and essential oils of *Cupressus sempervirens* and *Eucalyptus saligna* against *Sitophilus zeamais* Motschulsky and *Tribolium confusum* du Val. Journal of Stored Products Research, 41(1), 91-102.
63. Wilches, D.M., Laird, R.A., Floate, K.D., Fields, P.G. 2017. Effects of acclimation and diapause on the cold tolerance of *Trogoderma granarium*. Entomol. Exp. Appl. 165:169–78.
64. Yeshi, K., & Wangchuk, P. (2022). Essential oils and their bioactive molecules in healthcare. In Herbal biomolecules in healthcare applications (pp. 215-237). Academic Press.