



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DE TISSEMSILT
INSTITUT DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE
DEPARTEMENT DE SCIENCES AGRONOMIQUES



Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme
de Master Académique en

Filière : Sciences Agronomiques

Spécialité : Protection des végétaux

Thème

**Lutte intégrée dans les conditions contrôlées contre *Trogoderma granarium*
(Coleoptera : Dermestidae) ravageur des denrées stockées**

Présentée par : **Mebarek Hadjer**

Soutenu le : 28 / 06 /2026

Devant le Jury			
Mr Abdelhamid D	Président	Prof.	Univ-Tissemsilt
Mr Bounaceur F	Encadrant	M.C.A.	Univ-Tissemsilt
Mme Ait Ameer S	Examineur	M.C.B.	Univ-Tissemsilt

Année universitaire : 2025-2026



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DE TISSEMSILT
INSTITUT DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE
DEPARTEMENT DE SCIENCES AGRONOMIQUES



Année universitaire : 2025-2026

Dédicace

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 : pour leur encouragement et leur soutien permanent.

À mon époux : pour son encouragement et son soutien continu.

À ma fille : pour son encouragement, son soutien et sa patience à mon égard tout au long de mon parcours académique.

À mes frères et sœurs : pour leur présence et leur affection.

Remerciements

Louanges à Allah le Très-Haut, le Tout-Puissant, par la grâce de qui s'accomplissent les bonnes œuvres, et qui m'a accordé la patience et la détermination nécessaires pour mener à bien ce travail béni.

À mon encadrant Mr Bounaceur F : J'exprime mes plus sincères expressions de gratitude, de remerciement et d'estime pour ses orientations précieuses, sa patience infinie et son suivi rigoureux qui ont été ma boussole tout au long de la préparation de cette recherche.

Au président et aux membres honorables du jury : Mr Abdelhamid Mme Ait Ameur S J'adresse mes vifs remerciements pour avoir bien voulu accepter d'évaluer ce travail et d'en rectifier le tir.

Au responsable du laboratoire : Je tiens à exprimer mes sincères remerciements pour nous avoir accueillis au sein de son laboratoire et pour avoir mis à notre disposition tous les moyens disponibles.

Aux honorables enseignants : Je remercie tous les enseignants de la faculté et du département de science agronomie pour leurs efforts louables. et Je remercie Bentamra Djemaa.

Enfin, je ne saurais oublier d'exprimer ma profonde gratitude à tous ceux qui m'ont tendu une main secourable, m'ont prodigué un conseil ou ont laissé une bonne empreinte en moi, m'aidant ainsi à accomplir ce parcours académique.

SOMMAIRE

Remerciements

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

INTRODUCTION I

Chapitre I : Données bibliographiques sur *Trogoderma granarium*

1.Position systématique3

2.Origine et répartition géographique3

3.Le régime alimentaire.....4

4.Dégâts de *Trogoderma granarium*.....5

5.Etude biologique et morphologique *Trogoderma granarium*.....6

5.1.Description Morphologique des différents stades6

5.1.1.Œuf.....6

5.1.2.Larve.....6

5.1.3.Nymphe7

5.1.4.Adulte8

6.Biologie de *Trogoderma granarium*9

6.1.Influence des facteurs environnementaux sur le développement et la dynamique des populations9

6.2.Caractéristiques des adultes et potentiel reproducteur10

6.3.Mécanisme de diapause larvaire et persistance10

6.4.Potentiel de pullulation et comportement trophique10

Chapitre II : Moyens de lutte contre les insectes des denrées stockées

1.La lutte préventive.....15

1.1.Inspection15

1.2.Mesure d'hygiène15

1.3.Entreposage	16
1.4.Lutte par dépistage.....	16
1.4.1.Dépistage par surveillance de la température	16
1.4.2.Dépistage par rayons X	17
1.5.Lutte par piégeage.....	17
2.La lutte curative.....	18
2.1.La lutte physique.....	18
2.1.1.Stockage sous atmosphère contrôlée.....	18
2.1.2.Froid et chaleur	18
2.1.3.Radiation ionisante.....	19
2.2.La lutte génétique	20
2.3.La lutte chimique	20
2.4.La lutte biologique	20
2.4.1.Parasitoïdes	21
2.4.2.Prédateurs	21
2.4.3.Les entomopathogènes	21
2.5.La lutte par les produits minéraux	23
2.6.La lutte par les extraits des végétaux	23

Chapitre III : Aperçu général sur les produits utilisés

1.Généralités sur les produits utilisés	25
1.1.L'Eucalyptus.....	25
1.2.Classification systématique et description botanique	25
1.3.Description botanique	26
1.3.1.Morphologie de la plante.....	26
1.4.Composition chimique	28
2.La Bentonite.....	28
2.1.Généralités sur la bentonite	28
2.2.Propriétés physico-chimiques de la bentonite	29

2.2.1. Gonflement de bentonite :	29
2.2.2. Capacité d'échange cationique	29
2.2.3. La surface spécifique.....	29
2.3. Structure de la bentonite.....	29
2.4. Utilisation de bentonite contre les insectes des denrées stockées	30
3. Micro-ondes	30
3.1. Historique	30
3.2. Définition d'un four à micro-ondes	31
3.3. Interaction micro-onde-matière	31
3.4. Avantages spécifiques des micro-ondes	32
3.5. Utilisation des micro-ondes dans la lutte contre les insectes des denrées stockées	32

Chapitre IV : Matériel et méthodes

1. Objectif de l'étude	35
2. Matériel biologique.....	35
2.1. Elevage de masse des insectes.....	35
3. Matériel végétal	36
3.1. Les critères de choix des plantes	36
3.2. Récolte et préparation du matériel végétal.....	36
3.3. Préparation des poudres végétales	37
3.4. Utilisation dans l'expérimentation.....	37
4. Méthodes physiques.....	37
5. Les produits inertes	38
6. Mode d'opération	39
6.1. Lutte biologique par utilisation la poudre des feuilles de <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	39
6.1.1 Etude de l'effet insecticide de poudre	39
6.2. Lutte par l'utilisation des produits inertes (Bentonite)	39
6.3. Lutte physique par Micro-onde	40
7. Exploitation des données :	41

7.1.Calcul du pourcentage de mortalité	41
7.2.Correction de la mortalité :	41
8.Analyses statistiques :	42
8.1.Calcul de TL ₅₀ et DL ₅₀ :	42
8.1.1.Détermination de la DL ₅₀ :	42

Chapitre V : Résultats

1.Effet de l'eucalyptus sur <i>T. granarium</i>.....	44
1.1.Analyse de la variance	45
1.2.Test de Tukey	46
2.Facteur Dose	46
3.Effet de la dose.....	47
4.Comparaison LC50 vs TL50	50
5.Effet de la Bentonite sur <i>T.granarium</i>.....	51
5.1.Évolution temporelle de la mortalité	51
5.2.Effet de la dose	51
5.3.Variabilité entre répétitions	51
5.5.Analyse de la variance	53
5.6.Test de Tukey	54
6.Tukey pour les doses.....	54
7.Tukey pour le temps	55
7.1.Comparaison LC50 vs TL50	57
8.Effet des micro-ondes sur <i>T. granarium</i>.....	58

Chapitre VI : Discussion

1.Effet de poudre d'eucalyptus sur <i>T.granarium</i>.....	63
2.Effet des ondes de hautes fréquences (micro-ondes) sur <i>T.granarium</i>.....	64
3.Effets de de la bentonite sur <i>T.granarium</i>.....	64
Conclusion et Perspectives	67

Liste des Références.....	69
Résumé.....	Error! Bookmark not defined.

Liste des tableaux

Tableau 1 :La classification systématique de <i>Trogoderma granarium</i> (EPPO,2026)	3
Tableau 2: Classification systématique de <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	26
Tableau 3 : Mortalité (%) $\pm$ écart-type de <i>T. granarium</i> selon les doses et les jours	44
Tableau 4 : Analyse de variance (ANOVA à un facteur) de l'effet des doses de <i>Eucalyptus</i> sur la mortalité de <i>T.granarium</i>	45
Tableau 5 :Comparaisons entre doses (globalement).....	46
Tableau 6 : Comparaisons dans le temps.....	47
Tableau 7 : Temps léthal médian (TL50) de <i>T. granarium</i> en fonction des doses et du temps d'exposition.....	49
Tableau 8 : Comparaison des LC50 et TL50 de <i>T. granarium</i> traité au Bentonite	50
Tableau 9 : Mortalité (%) $\pm$ écart-type de <i>T.granarium</i> traité par le du Bentonite selon les doses et les jours	52
Tableau 10 : Analyse de variance (ANOVA à un facteur) de l'effet des doses du Bentonite sur la mortalité de <i>T. granarium</i>	53
Tableau 11 : Les moyennes globales (tous jours confondus) sont approximativement	55
Tableau 12 : Les moyennes de mortalité augmentent progressivement au cours du temps	55
Tableau 13 : Temps léthal médian (TL50) de <i>T. granarium</i> en fonction des doses et du temps d'exposition au Bentonite	57
Tableau 14 : comparaison des LC50 et TL50 de <i>T.granarium</i> traité au Bentonite	58
Tableau 15 : Effet de l'exposition à différentes sur aux micro-ondes sur <i>T. granarium</i>	58
Tableau 16 : Analyse de variance (ANOVA à un facteur) de l'effet des micro-ondes sur la mortalité de <i>T.granarium</i>	59
Tableau 17 : Différences de proportion de mortalité entre les différents temps d'exposition.....	59
Tableau 18 : Temps léthal médian (TL50) de <i>T.granarium</i> exposé aux micro-ondes, estimé par analyse Probit.	60
Tableau 19 : Comparaisons des trois méthodes de lutte	51

Liste des figures

Figure 1: Distribution géographique de <i>Trogoderma granarium</i> (EPPO,2026).....	4
Figure 2: Les dégâts cause par <i>Trogoderma granarium</i> (Original,2026).....	6
Figure 3: La larve de <i>Trogoderma granarium</i> (Original,2026).	7
Figure 4: La morphologie dorsal de <i>Trogoderma granarium</i> (Original,2026).....	7
Figure 5: La nymphe de <i>Trogoderma granarium</i> (Original,2026).	8
Figure 6: Adult de <i>Trogoderma granarium</i> (Original,2026).	9
Figure 7: Comparaison de la taille de femelle par rapport au mal (IPPC,2016). Error! Bookmark not defined.	
Figure 8 : les feuilles d'arbre de <i>Eucalyptus camaldulensis</i> (Original ,2026)	25
Figure 9: La structure de bentonite (Hebbar et al, 2014).....	30
Figure 10 : L'élevage de masse de <i>Trogoderma granarium</i> (Original, 2026).	36
Figure 11 : Les étapes de préparation de poudre végétales (Original,2026).	37
Figure 12 : Micro-onde utilise pour le traitement de <i>Trogoderma granarium</i> (Originale,2026).	38
Figure 13 : La bentonite utilisée pour le traitement les larves de <i>Trogoderma granarium</i> (Original,2026).....	38
Figure 14 : les étapes de préparation de dispositif expérimentales de test d'effet insecticide de poudre (Originale,2026).	39
Figure 15 : Les étapes de préparation du dispositif expérimentale de l'effet de bentonite (Original,2026).....	40
Figure 16 : Traitement les larves de <i>Trogoderma granarium</i> par micro-onde (Originale,2026).	41
Figure 17 : l'effet des doses de l'eucalyptus sur la mortalité de <i>T. granarium</i>	45
Figure 18 : Concentration létale médiane (LC50) de <i>T. granarium</i> en fonction des doses de traitement	48
Figure 19 : Temps léthal médian (TL50) de <i>T.granarium</i> en fonction des doses et du temps d'exposition.....	50
Figure 20 : l'effet des doses du Bentonite sur la mortalité de <i>T.granarium</i>	53
Figure 21: Concentration létale médiane (LC50) de <i>T.granarium</i> en fonction des doses de traitement par le Bentonite	56

Figure 22 : Temps létal médian (TL50) de <i>T.granarium</i> en fonction des doses et du temps d'exposition au Bentonite.	57
Figure 23 : l'effet des doses Des micro-ondes sur la mortalité de <i>T.granarium</i>	59
Figure 24 : Temps létal médian (TL50) de <i>T.granarium</i> en fonction des doses et du temps d'exposition aux micro-ondes.	60

Liste des abréviations

Abréviation	Signification complète
<i>T. granarium</i>	<i>Trogoderma granarium</i>
<i>E. camaldulensis</i>	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>
IPM	Integrated Pest Management (Lutte Intégrée contre les Nuisibles)
CCLS	Coopérative des Céréales et des Légumes Secs
EPPO	European and Mediterranean Plant Protection Organization
OEPP	Organisation Européenne et Méditerranéenne pour la Protection des Plantes
IPPC	International Plant Protection Convention
FAO	Food and Agriculture Organization – Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
USDA-APHIS	United States Department of Agriculture – Animal and Plant Health Inspection Service
HR	Humidité Relative
L3, L4	Stades larvaires 3 et 4
Bt	Bacillus thuringiensis
CEC	Capacité d'Échange Cationique
LC50	Concentration Létale 50 %
TL50	Temps Létal 50 %
ANOVA	Analyse de la Variance
GLM	Generalized Linear Model (Modèle Linéaire Généralisé)
MHz	Mégahertz
GHz	Gigahertz
Gy / kGy	Gray / KiloGray (unité de dose de rayonnement)
SS	Somme des Carrés
MS	Carré Moyen
ddl / Df	Degrés de Liberté
D1 – D5	Doses 1 à 5
J1 – J14	Jours d'observation 1 à 14
R1, R2, R3	Répétitions 1, 2 et 3
EGPIC	Piège Électrique Compteur d'Insectes de Grain

Introduction Générale

INTRODUCTION

Les ravageurs des produits stockés constituent une menace majeure et persistante pour la sécurité alimentaire mondiale, les chaînes de valeur post-récolte et le commerce international (**Adler et al., 2022**). Les céréales, notamment le riz, le blé, le maïs, l'orge et l'avoine, constituent la pierre angulaire des systèmes alimentaires mondiaux, fournissant des nutriments essentiels et de l'énergie à des milliards de personnes dans le monde (**Winarti et al., 2023**).

Le défi mondial des pertes alimentaires après récolte figure parmi les problèmes les plus urgents en matière de sécurité alimentaire contemporaine, les infestations d'insectes étant responsables d'environ 10 à 20 % des pertes de céréales dans le monde (**FAO, 2021**). Un grand nombre d'insectes des denrées stockées a été recensé sur les grains de céréales conservés dans différentes régions d'Algérie. Parmi les espèces les plus fréquemment observées, *Tribolium castaneum* occupe la première place avec une fréquence de 30 %, suivi de *Sitophilus granarius* (20 %) et de *Trogoderma granarium* (10 %) (**Mebarkia et al., 2001 ; Tazerouti et al., 2001**) : Parmi ces insectes, le dermeste du grain, *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera : Dermestidae), est largement reconnu comme l'une des espèces les plus destructrices et présentant un risque phytosanitaire important (**Yadav et al., 2022 ; Hashem et al., 2025**). Sa tolérance à la sécheresse, sa capacité à une diapause prolongée et son aptitude à survivre avec des résidus alimentaires minimes rendent les infestations difficiles à éradiquer et à contrôler, et les incursions entraînent de lourdes conséquences économiques et phytosanitaires pour les producteurs et les négociants en céréales du monde entier (**Athanassiou et al., 2019 ; Ramadan et al., 2024**). Cette espèce a fait l'objet d'importants efforts de quarantaine et de modélisation du risque d'invasion en raison de sa capacité à contaminer une vaste gamme de produits et à persister dans les vecteurs de transport tels que les conteneurs maritimes et les emballages (**Ramadan et al., 2023 ; Awadalla et al., 2024**).

Le moyen le plus courant pour limiter leurs activités est La lutte chimique demeure la pierre angulaire de la gestion des insectes des produits stockés, grâce à sa rapidité d'action, sa facilité d'application et son rapport coût-efficacité (**Arthur, 1993 ; Andreadis et Athanassiou, 2017 ; Hashem et al., 2025**)

Cependant, l'utilisation intensive et prolongée d'insecticides conventionnels soulève d'importantes préoccupations, notamment l'apparition de résistances, la réduction de l'efficacité résiduelle, les comportements d'évitement et le renforcement des restrictions réglementaires relatives à la santé humaine et à la sécurité environnementale (**Opit et al., 2012 ; Sparks et**

Nauen, 2015). Ces limitations ont stimulé un regain d'intérêt pour des alternatives durables et à faibles résidus qui combinent (**Kady et al., 2021**).

La gestion des nuisibles a connu une transformation significative au cours du siècle dernier, passant de la dépendance aux contrôles chimiques synthétiques à une approche plus holistique et écologiquement fondée. La lutte intégrée contre les nuisibles IPM se trouve au cœur de cette évolution, offrant une stratégie équilibrée qui intègre des outils biologiques, culturels, mécaniques, comportementaux et chimiques pour gérer les populations de nuisibles de manière économiquement et écologiquement responsable.

Dans le cadre de la recherche de méthodes alternatives et écologiques pour la protection des denrées stockées contre *Trogoderma granarium*, la lutte intégrée représente une stratégie prometteuse permettant de réduire l'utilisation excessive des insecticides chimiques. Cette approche repose sur l'association de plusieurs méthodes de lutte compatibles et efficaces, notamment l'utilisation de la bentonite, des poudres végétales d'Eucalyptus et de Micro-ondes, Ces méthodes présentent différents modes d'action tels que l'effet desséchant, répulsif, toxique ou biologique, contribuant ainsi à la diminution des populations larvaires de ce ravageur redoutable des produits stockés.

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'efficacité de ces substances naturelles, et le traitement par Micro-onde utilisées seules ou en combinaison, dans le cadre d'une stratégie de lutte intégrée contre *Trogoderma granarium*, afin de déterminer leur potentiel insecticide sur la mortalité des larves et leur capacité à constituer une alternative durable, économique et respectueuse de l'environnement pour la protection des céréales stockées.

Ce mémoire, comporte cinq chapitres, ce mémoire est subdivisé en partie bibliographique et partie expérimentale. Le premier chapitre relate les données bibliographiques sur le model biologique utilisé *Trogoderma granarium*. Le deuxième et troisième chapitre exposent les produits utilisés dans ce mémoire et donne un aperçu de littérature. Quant au quatrième chapitre il expose le matériels ainsi que la méthodologie adoptée. Le cinquième chapitre traite les résultats aux quels nous avons aboutis, il est suivi par une discussion générale et enfin une conclusion clôture ce travail.

Chapitre I

Données bibliographiques sur
Trogoderma granarium

Les ravageurs des denrées stockées représentent un groupe diversifié d'insectes capables d'infester les céréales, les légumineuses, les épices, les oléagineux. Ces ravageurs réduisent à la fois la quantité et la qualité des matériaux stockés, affectent la teneur nutritionnelle et contribuent à des pertes post-récolte importantes à l'échelle mondiale. Comprendre leur classification, leur biologie et leur potentiel de dommages est essentiel pour concevoir des stratégies de gestion ciblées (Dash et al, 2025). Parmi ces ravageurs, *Trogoderma granarium* est un insecte nuisible très important qui s'attaque aux denrées stockées. Son importance pour l'économie tient à la fois aux graves dégâts qu'il peut infliger aux marchandises sèches stockées et aux restrictions à l'exportation auxquelles se trouvent confrontés les pays lorsqu'ils ont des populations établies de cet organisme nuisible. Des populations peuvent vivre pendant de longues périodes dans des conteneurs qui n'ont pas été nettoyés, des matériaux d'emballage et des soutes (Sinha, & Sinha ,1990).

1.Position systématique

Tableau 1 :La classification systématique de *Trogoderma granarium* (EPPO,2026)

Règne	Animalia
Embranchement	Arthropoda
Sous-embranchement	Hexapoda
Classe	Insecta
Ordre	Coleoptera
Sous-ordre	Polyphaga
Super-famille	Bostrichoidea
Famille	Dermestidae
Genre	<i>Trogoderma</i>
Espèce	<i>Trogoderma granarium</i> ((Everts, 1898)

2.Origine et répartition géographique

Trogoderma granarium est originaire du sous-continent indien, où il elle a été signalée pour la première fois comme ravageur en 1894 (Barnes & Grove, 1916 ; Pains & Yemshanov, 2012 ; Rahman et al., 1945).

. Cette espèce préfère les climats chauds et secs et se rencontre dans de tels habitats entre 35° de latitude nord et 35° de latitude sud (Day & White, 2016 ; Food and Agriculture Organizations, 2016). Ces conditions prévalent dans certaines régions du Moyen-Orient, d'Afrique et d'Asie du Sud où l'espèce se trouve, tandis qu'elle a également été trouvée dans certains habitats chauds spécialisés de pays plus tempérés (Aitken, 1975). Il est très important de faire la différence entre les signalements qui se réfèrent à des introductions et ceux qui correspondent à un établissement.

On rencontre *T. granarium* essentiellement dans une zone délimitée au nord par la latitude 35, au sud par l'Équateur, à l'ouest par l'Afrique de l'Ouest et à l'est par le Myanmar ; autrement dit, dans les régions tempérées et humides qui s'étendent de l'Europe à l'Inde en traversant le canal de Suez. On a introduit *T. granarium* dans des régions aux conditions climatiques comparables, principalement le long du trajet alternatif entre l'Inde et l'Europe qui évite l'Afrique. Initialement, ces introductions causaient des dommages importants, mais les infestations étaient localisées et ont été supprimées dans la majorité des cas. Habituellement, *T. granarium* parvient à établir sa présence parmi d'autres nuisibles d'entrepôt uniquement dans des conditions d'humidité basse (OEPP/EPPO, 2013).

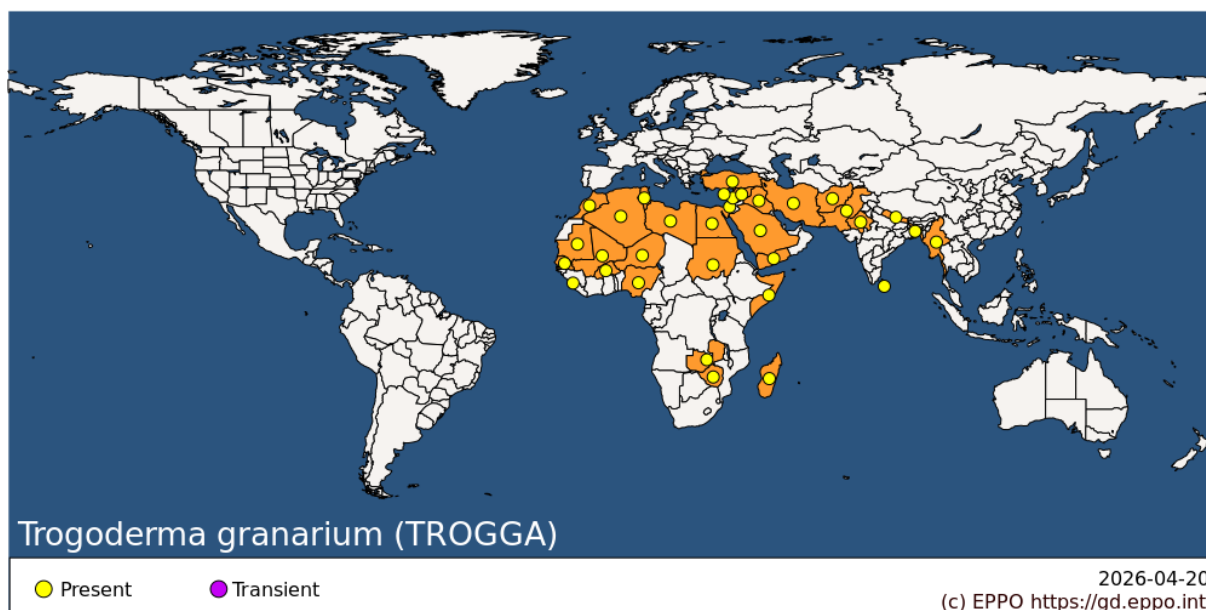


Figure 1: Distribution géographique de *Trogoderma granarium* (EPPO, 2026).

3. Le régime alimentaire

Trogoderma granarium a été enregistré infestant plus de 100 produits (Cotton, 1956). Ce ravageur préfère les grains et les produits céréaliers, en particulier le blé, l'orge, l'avoine, le seigle, le maïs, le riz, la farine, le malt et les nouilles. Lorsqu'on lui propose le choix entre le

seigle, le blé et l'avoine, il préfère le blé. Ce ravageur se nourrit de presque toutes les matières végétales ou animales sèches, y compris la nourriture pour chiens, la pulpe d'orange séchée, le pain et les noix de coco séchées (**Hinton, 1945 ; Szito, 2005**). Ce ravageur peut se nourrir de produits avec seulement 2 % d'humidité et peut se développer sur des matières animales telles que des souris mortes, du sang séché et des insectes séchés (**Pasek, 1998**). Les produits alimentaires de l'épicerie qui peuvent servir d'hôtes comprennent le pain, les noix de coco séchées, la farine de maïs, les crackers, la farine blanche et de blé entier, le gruau de maïs, les céréales pour bébé, l'orge perlé et le germe de blé (**Szito, 2005**).

4. Dégâts de *Trogoderma granarium*

L'infestation par *Trogoderma granarium* provoque des pertes économiques mondiales quantitatif et qualitatif. À l'échelle mondiale, les insectes nuisibles des céréales stockées représentent environ 10 à 20 % de pertes sur le total des céréales récoltées chaque année. L'alimentation par les insectes entraîne une perte de poids directe, tandis que la contamination par les excréments, les toiles et les insectes morts réduit la qualité et la commercialisation des grains. Implications financières estimées selon les estimations de la FAO et de la Banque mondiale, les pertes après récolte dues à de mauvaises pratiques de stockage dépassent 4 milliards USD par an dans les économies en développement. Ces pertes comprennent le gaspillage direct de grains, la baisse des prix, l'augmentation des coûts de retraitement et la perte d'opportunités d'exportation (**Dash et al, 2025**).

Les larves de *T. granarium* dans les grains affecte négativement la qualité minérale, les glucides disponibles ainsi que la digestibilité et la biodisponibilité des protéines et de l'amidon. (**Jood et al ,1992 ;1993**) Les larves nouvellement écloses se nourrissent de poussière de grain ou de grains cassés, tandis que les grains entiers sont attaqués par des larves de quatrième stade ou plus âgées (**Dillon ,1968**). La perte de poids du grain infesté et le coût du traitement nécessaire réduiront le profit à la vente et rendront rapidement le produit invendable. *Trogoderma granarium* endommage beaucoup plus de grains qu'il n'en consomme, et il provoque une forte contamination des denrées par des morceaux de corps et des mues (**Myers, Hagstrum ,2012**). La consommation de certains de ces contaminants dans les aliments peut provoquer de graves risques pour la santé. Les infestations par *T. granarium* entraînent une grande quantité de déjections, beaucoup plus que celles produites par d'autres principales espèces de coléoptères de produits stockés. Les grains en bon état peuvent être moins adaptés au développement rapide des populations de *T. granarium* que ceux contenant de grandes quantités de déjections. L'infestation larvaire sur le germe des grains entraîne des pertes de

germination importantes, tandis que la présence du germe semble favoriser la croissance de la population. (Athanassiou, 2019).



Figure 2: Les dégâts cause par *Trogoderma granarium* (Original,2026).

5. Etude biologique et morphologique *Trogoderma granarium*

5.1. Description Morphologique des différents stades

5.1.1. Œuf

Blanc laiteux au départ, jaunâtre pâle plus tard ; typiquement cylindriques, 0,7 mm de longueur et 0,25 mm d'épaisseur ; une extrémité arrondie, l'autre plus pointue et portant des projections épineuses, plus larges à la base et effilées du côté distal (Hinton ,1945 ; Beal ,1956, 1960 ; Faber ,1971).

5.1.2. Larve

Au premier stade larvaire, la larve mesure entre 1,6 et 1,8 mm de longueur totale, dont un peu plus de la moitié est constituée par une longue queue formée de poils portés par le dernier segment abdominal. Le corps, large de 0,25 à 0,3 mm, présente une coloration uniformément blanc jaunâtre, à l'exception de la tête et des poils corporels qui sont noirs. La tête porte une courte antenne composée de trois segments.

La caractéristique principale de ces larves réside dans la présence de deux types de poils : les poils simples, dont la tige porte de nombreuses petites excroissances rigides orientées vers le haut, et les poils barbelés, caractérisés par une tige rétrécie à intervalles réguliers et se terminant par une tête barbelée. Cette tête est aussi longue que l'ensemble des quatre segments qui la précèdent. Les poils simples sont répartis sur la face dorsale de la tête ainsi que sur les segments

du corps. La queue est constituée de deux groupes de longs poils simples portés par le neuvième segment abdominal. Les poils barbelés sont regroupés en mèches appariées situées sur certains tergites abdominaux.

Au cours du développement, la coloration des larves évolue progressivement du blanc jaunâtre pâle des premiers stades vers une teinte dorée ou brun rougeâtre. La densité des poils augmente également, mais ceux-ci ainsi que la queue deviennent proportionnellement plus courts par rapport à la longueur et à la largeur du corps. Dès le quatrième stade larvaire, les poils prennent l'aspect de quatre bandes transversales sombres visibles sur le corps. À maturité, la larve atteint environ 6 mm de longueur et 1,5 mm de largeur. La présence de grandes quantités de larves velues et de leurs exuvies constitue un signe caractéristique d'une infestation par le *trogoderme* (Hinton, 1945 ; Beal, 1956 ; 1960 ; Faber, 1971 ; EPPO, 1981).



Figure 3: La larve de *Trogoderma granarium* (Original,2026).



Figure 4: La morphologie dorsal de *Trogoderma granarium* (Original,2026).

5.1.3.Nymphe

Lors de la dernière mue larvaire, l'enveloppe de la larve s'ouvre, mais la nymphe demeure à l'intérieur de cette exuvie. Il s'agit d'une nymphe libre. Le mâle est généralement plus petit que la femelle, avec une longueur moyenne d'environ 3,5 mm contre 5 mm chez la femelle (Hinton, 1945 ; Beal, 1956 ; 1960 ; Faber, 1971).



Figure 5: La nymphe de *Trogoderma granarium* (Original,2026).

5.1.4.Adulte

Les adultes de *Trogoderma granarium* sont de petits coléoptères de forme oblongue à ovale, mesurant entre 1,4 et 3,4 mm de longueur et entre 0,75 et 1,9 mm de largeur. La tête est inclinée vers le bas et, avec le pronotum, présente une coloration plus foncée que celle des élytres. Les pattes et l'abdomen sont brunâtres, tandis que les élytres sont de couleur brune. Les femelles sont généralement légèrement plus grandes et plus claires que les mâles.

L'identification fiable des adultes de *T. granarium* repose sur plusieurs caractères morphologiques propres à la famille des Dermestidés, au genre *Trogoderma* et à l'espèce *granarium*. Les élytres possèdent une cuticule uniforme, généralement brun clair à brun rougeâtre, parfois faiblement marbrée, sans dessin nettement défini. Les soies recouvrant les élytres sont principalement brunes, bien que quelques soies jaunâtres ou blanchâtres puissent être présentes sans former de bandes distinctes. Avec le temps et les déplacements de l'insecte, ces soies ont tendance à se détacher, donnant aux adultes un aspect plus brillant.

Les antennes comportent de 9 à 11 articles. La massue antennaire est constituée de 4 à 5 articles chez le mâle et de 3 à 4 articles chez la femelle. La bordure interne de l'œil est droite ou légèrement sinuée. Chez le mâle, le huitième tergum abdominal est plus ou moins uniformément sclérifié, avec des soies parfois regroupées au centre du bord. Le neuvième tergum présente une bordure proximale dont la partie la plus large est presque en forme de U, tandis que le dixième tergum porte de nombreuses longues soies (IPPC, 2016).

Chez la femelle, les sclérîtes dentelés de la bourse copulatrice sont de petite taille, ne dépassant pas la longueur de la partie ondulée de la spermathèque, et possèdent de 10 à 15 dents. Les genitalia mâles se caractérisent par un pont droit, de largeur régulière, légèrement plus large au niveau de sa jonction avec les paramères (IPPC, 2016).



Figure 6: Adulte de *Trogoderma granarium* (Original,2026).

6. Biologie de *Trogoderma granarium*

6.1. Influence des facteurs environnementaux sur le développement et la dynamique des populations

Les températures optimales pour le développement de *T. granarium* se situent entre 20°C et 35°C (Lindgren DL et al., 1955, 1959). La durée du cycle de développement, de l'œuf à l'adulte, varie de 39 à 45 jours à 30°C, et peut s'étendre jusqu'à 220 jours à 21°C (OEPP/EPPO,2013).

Le stade larvaire comprend 4 à 8 stades selon la température ; le développement larvaire peut s'accomplir en seulement 15 jours à 35°C, les femelles présentant une mue supplémentaire par rapport aux mâles avant la nymphose (Burges HD., 1959, 1962). À 35°C, la croissance de la population de *T. granarium* s'avère 10 à 250 fois supérieure à celle d'autres coléoptères des produits stockés.

Trogoderma granarium acquiert le statut de ravageur lorsque la température moyenne mensuelle se maintient à un seuil minimal de 20°C durant quatre mois consécutifs, associée à une humidité relative (HR) inférieure à 50% (Howe et Lindgren, 1957). En revanche, des

températures moyennes mensuelles supérieures à 27°C combinées à une HR inférieure à 75% pendant 1 à 2 mois induisent une croissance démographique explosive (**Sinha et Utida, 1967**). L'oviposition s'interrompt en dessous de 20°C. Si elle ne présente pas de variation significative entre 27°C et 35°C, elle est néanmoins inhibée par l'élévation de l'humidité (**Odeyemi et al, 1993**). Ainsi, la concomitance d'une faible HR et de températures élevées constitue le facteur clé du développement rapide et de l'établissement de cette espèce (**Banks, 1977**). Outre ses performances reproductives en milieu chaud et sec, *T. granarium* manifeste une tolérance exceptionnelle aux températures extrêmes (très élevées et très basses), une caractéristique biologique rare chez les insectes des denrées stockées.

6.2. Caractéristiques des adultes et potentiel reproducteur

Les adultes de *T. granarium* ne s'alimentent pas et leur longévité n'excède pas 10 jours dans les conditions optimales. Bien que les deux sexes possèdent des ailes pleinement développées, ils sont inaptes au vol (**Bank, 1977**)

La majorité des travaux indiquent que les femelles pondent entre 26 et 66 œufs au cours de leur brève existence, une fécondité standard pour les coléoptères des produits stockés à cycle de vie court. Néanmoins, les femelles issues de larves ayant subi une diapause peuvent s'accoupler de manière répétée et déposer plus de 130 œufs par individu en conditions idéales de laboratoire, un trait biologique favorisant la longévité et le succès invasif de l'espèce.

6.3. Mécanisme de diapause larvaire et persistance

Les larves du cinquième stade peuvent entrer dans une diapause facultative capable de persister jusqu'à six ans. Durant cette phase, les larves survivent de manière prolongée à l'inanition et peuvent effectuer des mues surnuméraires (**OEPP/EPPO, 2013**), bien qu'elles conservent la capacité de s'activer temporairement pour s'alimenter avant de retourner à l'état de quiescence (**Bell, 1994 ; Wilches et al., 2016**).

La diapause est généralement induite par une forte densité populationnelle, une température inférieure à 30°C et une restriction des ressources alimentaires. La levée de la diapause est déclenchée par l'élévation thermique, tandis que la disponibilité de la nourriture n'exerce qu'un rôle secondaire ou restreint aux conditions d'isolement. En raison de leur comportement cryptique et de leur immobilisation dans les anfractuosités, les larves en diapause échappent fréquemment à la détection, ce qui augmente le taux d'introduction frauduleuse ou accidentelle dans les pays dotés d'une législation de quarantaine (**Athanassiou, 2019**).

6.4. Potentiel de pullulation et comportement trophique

Selon la nature du substrat alimentaire et les conditions ambiantes, *T. granarium* peut accomplir jusqu'à 10 générations par an. Entre 30°C et 33°C, le taux de multiplication de la population est évalué à 19-44 fois par génération, ce qui équivaut à une augmentation hebdomadaire de 2 à 2,5 fois. Si cette dynamique de croissance est comparable à celle d'autres ravageurs majeurs, *T. granarium* se distingue par sa faculté de proliférer à un rythme remarquablement soutenu en conditions arides et chaudes **(Athanassiou, 2019)**.

Sur le plan trophique, les jeunes larves sont incapables d'attaquer les grains sains et se nourrissent exclusivement de l'embryon tendre de la graine. Les larves plus âgées, en revanche, possèdent les capacités mandibulaires requises pour broyer et infester le grain entier. Par conséquent, la cinétique de l'infestation s'accélère lorsque les grains intacts coexistent avec des grains préalablement altérés, fissurés ou en situation de coexistence avec d'autres espèces d'insectes **(Athanassiou et al., 2016 ; Kavallieratos et al., 2017)**.

Chapitre II

**Moyens de lutte contre les insectes des
denrées stockées**

1. La lutte préventive

1.1. Inspection

Lors des contrôles sanitaires, les larves et leurs exuvies (mues larvaires) représentent les indices les plus fréquemment observés. Une vigilance accrue doit être accordée aux marchandises issues des zones d'endémisme de ce ravageur, en particulier les graines oléagineuses et leurs sous-produits.

Dans les installations de stockage suspectes, l'examen doit cibler prioritairement les moindres anfractuosités, les fissures ainsi que les espaces situés derrière les habillages muraux. Au sein des navires, les investigations doivent s'étendre sous les plaques de corrosion, les vaigrages en bois des cales et le long des corniches. Pour les conteneurs destinés aux cargaisons sèches, l'inspection requiert un examen minutieux des interstices du plancher et des doublages intérieurs. L'activité de ces larves culminant à l'approche de la nuit, les chances de détection s'accroissent nettement durant l'heure précédant le crépuscule (**Barak, 1989**).

La mise en évidence de *T. granarium* dans les flux commerciaux ou les réseaux de transport, qu'ils soient nationaux ou internationaux, impose la mise en œuvre de protocoles stricts et standardisés par les services de quarantaine. Le dépistage précoce de ce ravageur repose ainsi en première ligne sur le contrôle systématique des cargaisons, des conteneurs, des structures de transport de produits agricoles, ainsi que des bagages et véhicules des voyageurs aux frontières. Selon les données de l'USDA-APHIS rapportées par Myers & Hagstrum, sur 559 interceptions positives de *T. granarium* enregistrées aux points d'entrée américains entre 1985 et 2010 (sur 666 spécimens suspects identifiés), près de la moitié provenaient des bagages de passagers, 30 % du fret général, et le reste se répartissait entre le courrier postal et les cales de navires vides. Ces introductions provenaient de 43 pays différents, principalement situés en Asie, au Moyen-Orient et en Afrique du Nord (**Athanassiou et al., 2019**).

1.2. Mesure d'hygiène

La prophylaxie commence par l'assainissement rigoureux des structures de stockage, visant à éliminer tout résidu de grain, poussière ou débris d'insectes des campagnes précédentes. Les anfractuosités, fissures et zones d'accumulation de déversements constituent des foyers de multiplication idéaux pour *Trogoderma granarium*. Le nettoyage systématique des cellules, des sacs et du matériel de manutention avant chaque cycle de stockage permet de rompre le cycle biologique du nuisible et de réduire drastiquement les populations résiduelles. Des actions

simples telles que le balayage régulier, l'évacuation des matières infestées et le colmatage des ouvertures s'avèrent hautement efficaces.

Impact pratique : Des travaux ont mis en évidence que l'application rigoureuse de ces seules règles d'hygiène permet de réduire de 25 à 35 % la prévalence des bioagresseurs dans les unités de stockage villageoises (**Dash et al., 2025**).

1.3. Entreposage

La phase de stockage constitue un maillon stratégique de la filière céréalière, conditionnant la préservation de la qualité sanitaire des grains, la limitation des pertes de matière et l'optimisation des marges économiques. Le choix d'une structure de stockage adaptée répond à plusieurs impératifs :

➤ **Préservation des qualités intrinsèques du grain :**

En tant que matière vivante, le grain continue de respirer après la récolte. Un confinement défaillant favorise le développement de moisissures, de populations d'insectes ou la synthèse de mycotoxines, ce qui peut rendre la production impropre aux débouchés de l'alimentation humaine ou animale.

➤ **Réduction des pertes et sécurisation des rendements :**

Un entreposage défectueux expose les stocks à des dépréciations majeures causées par les ravageurs ou un défaut d'aération. L'utilisation de silos performants permet de circonscrire ces risques et de sécuriser la valeur financière de la récolte.

➤ **Maîtrise de l'aéraulique et de la thermohygrométrie :**

La gestion combinée de la ventilation, de la teneur en eau et de la température est cruciale. Un système de ventilation bien dimensionné élimine les phénomènes de condensation et permet d'abaisser rapidement la température de la masse de grain sous le seuil critique de 12 °C, stoppant ainsi la prolifération des insectes (**FAO ,1994**)

1.4. Lutte par dépistage

1.4.1. Dépistage par surveillance de la température

La surveillance thermique est un indicateur fondamental de l'état de conservation des denrées. Toute élévation thermique anormale au sein du tas de grains signale généralement le démarrage d'un foyer de dégradation, exigeant des relevés réguliers pour prévenir des pertes massives. Compte tenu de l'hétérogénéité de la masse stockée, les points de mesure doivent être multipliés. Les capteurs utilisés n'ont pas besoin d'une précision extrême des variations d'un degré Celsius étant tolérées, mais ils doivent faire preuve d'une grande sensibilité afin de

détecter immédiatement la moindre anomalie. Ces équipements doivent être robustes, simples d'utilisation et résistants aux manipulations fréquentes. Adaptés au stockage en vrac comme en sacs, ces outils vont des modèles de base aux thermomètres numériques portables, abordables et ergonomiques (FAO, 1994).

Parallèlement, la thermographie infrarouge s'impose comme une technologie de pointe. Elle permet de visualiser l'énergie thermique émise par un corps sous forme de thermogramme (Nanje Gowda et al., 2013). Ce système, associant capteurs, optiques spécifiques et logiciels de traitement, s'avère particulièrement pertinent en gestion des stocks pour identifier précocement les échauffements liés aux grains altérés, aux impuretés ou aux infestations internes et externes (Manickavasagan et al., 2008).

1.4.2. Dépistage par rayons X

La détection par rayons X est reconnue comme une méthode officielle aux États-Unis. Développée dans les années 1950 pour la mise en évidence des infestations, elle permet d'identifier les dommages physiques affectant les grains ainsi que la présence d'insectes vivants ou morts (Milner et al., 1952). Les performances de cette technique atteignent environ 97 % de détections positives lors de l'analyse des images obtenues par radiographie, notamment pour les insectes adultes (Neethirajan et al., 2007). Néanmoins, les œufs et les premiers stades larvaires demeurent difficiles à distinguer des parties les plus denses du grain. En outre, l'utilisation de cette méthode nécessite des équipements relativement coûteux (Karunakaran et al., 2003). Malgré cette contrainte, son aptitude à mettre en évidence les altérations physiques des grains en fait un outil particulièrement intéressant pour la sélection des semences (Bettahar, 2016).

1.5. Lutte par piégeage

Le piégeage est une méthode largement utilisée, principalement pour la détection des infestations dans les entrepôts de céréales, mais également pour la réduction des populations d'insectes. Cette technique est particulièrement efficace contre les insectes volants. Il existe sur le marché une grande variété de pièges répondant aux besoins liés aux quantités de grains stockées et aux espèces ciblées (Bettahar, 2016).

Les pièges attractifs, basés sur l'utilisation de phéromones sexuelles ou d'attractifs alimentaires, sont généralement constitués de tubes contenant des substances attractives naturelles ou synthétiques destinées à capturer les insectes (Vick et al., 1990). Parmi ces dispositifs figurent les pièges-sondes développés par (Loschiavo et al., 1973), qui assurent à la fois la détection et le comptage des insectes. L'un de ces systèmes, dénommé EGPIEC (Piège Électrique Compteur

d'Insectes de Grain) (**Shuman et al., 1996**), est équipé d'une barrière infrarouge intégrée. Lorsqu'un insecte traverse le faisceau au cours de sa chute, l'interruption du signal est enregistrée comme la capture d'un nouvel individu. Ces dispositifs sont couramment utilisés pour détecter les insectes adultes présents dans les grains entreposés (**White et al., 1990**).

Les pièges-tubes sont également employés pour évaluer l'efficacité des méthodes de lutte contre les insectes. Cette évaluation repose sur l'estimation de leur densité à différentes profondeurs dans les masses céréalières (**White et al., 1988**).

2. La lutte curative

2.1. La lutte physique

2.1.1. Stockage sous atmosphère contrôlée

Le stockage en atmosphère modifiée consiste à modifier l'environnement gazeux à l'intérieur des structures de stockage scellées afin de réduire les niveaux d'oxygène (<3 %) et d'augmenter les concentrations de dioxyde de carbone (>60 %) ou d'azote (>95 %). Ces conditions inhibent la respiration des insectes et perturbent le métabolisme énergétique, entraînant la mortalité à tous les stades de vie. Les silos purgés à l'azote avec <1 % d'O₂ peuvent obtenir une efficacité similaire avec des périodes d'exposition légèrement plus longues (7 à 10 jours).

Cette méthode est particulièrement adaptée aux silos étanches, aux conteneurs hermétiques et aux cellules à atmosphère contrôlée. Elle préserve les qualités technologiques du grain, bloque le développement fongique et garantit l'absence totale de résidus chimiques, ce qui en fait une solution de choix pour les terminaux céréaliers et les stocks à long terme de produits biologiques ou destinés à l'exportation (**Dash et al., 2025**).

2.1.2. Froid et chaleur

L'utilisation des températures est une méthode respectueuse de l'environnement pour contrôler les insectes de stockage. Le refroidissement de la marchandise à des températures inférieures à 20 °C inhibe le développement et la reproduction, et le maintien de températures en dessous de ce seuil est un moyen sûr et efficace de contrôler *T. granarium* (**Burges, 2008**). Cependant, l'application de basses températures nécessite une période d'exposition plus longue et peut donc ne pas être pratiquement faisable. Étant donné que cette espèce est plus répandue dans les pays tropicaux, l'application d'un traitement thermique peut être plus facilement

réalisable. Les températures supérieures à 45 °C inhibent le mouvement et la croissance des insectes, ce qui conduit finalement à leur mort. Les adultes issus de pupes exposées à 45 °C pendant au moins 48 heures ne réussissent pas à produire une descendance (**Saxena et al ,1992**). Bien que les larves en diapause soient plus tolérantes au froid et à la chaleur, plusieurs études ont montré l'efficacité des températures extrêmement basses et élevées. Le refroidissement de la marchandise au point de surgélation inférieur à -27 °C est une méthode de contrôle efficace car elle provoque la congélation et la mort immédiate de tous les stades de vie de *T. granarium*, y compris les stades les plus tolérants au froid, c'est-à-dire les œufs et les larves en diapause (**Wilches et al. 2017**). Une exposition de 2 heures à 60 °C a été suggérée pour contrôler tous les stades de vie de cette espèce, y compris les larves en diapause (**Wilches et al. 2019**). De plus, la température joue un rôle important dans l'amélioration de l'efficacité d'autres mesures de contrôle telles que l'atmosphère contrôlée ou modifiée et la fumigation (**Navarro et al. 2002 ; OEPP/EPPO 2012**).

2.1.3.Radiation ionisante

Les rayonnements ionisants les plus couramment employés pour l'irradiation et la stérilisation des céréales sont les rayons gamma et les rayons X. Leur action repose sur la production d'effets ionisants au sein des organismes exposés, entraînant la rupture des liaisons chimiques et l'altération des structures cellulaires (**Molins, 2001**). Lorsque les doses d'irradiation sont élevées, ces altérations conduisent à la destruction de l'organisme.

Concernant le rayonnement gamma (**Rechcigl et al., 2016**), plusieurs études ont montré que l'élimination des insectes présents dans les céréales stockées nécessite des doses relativement importantes (> 200 Gy) ainsi que des périodes d'exposition prolongées pouvant atteindre plusieurs semaines (**Follett, 2013**). Une destruction immédiate des ravageurs peut toutefois être obtenue grâce à des doses comprises entre 1 et 3 kGy. À l'inverse, des doses plus faibles ne provoquent généralement pas la mort instantanée des insectes adultes, mais elles permettent de limiter l'accroissement des populations en exerçant des effets létaux sur les stades immatures et en provoquant la stérilisation des adultes (**Hosseinzadeh et al., 2010 ; Rechcigl et al., 2016**). Étant donné que les insectes adultes consomment moins de nourriture que les stades immatures en développement, leur stérilisation par irradiation apparaît comme une méthode intéressante pour freiner leur prolifération. Cette technique empêche les adultes de produire une descendance, réduisant ainsi les dommages causés dans les structures de stockage à long terme (**Molins, 2001**).

2.2.La lutte génétique

La croissance de la population d'insectes varie selon les différents hôtes et les différentes variétés d'un hôte. Divers facteurs tels que les facteurs morphologiques, physiologiques et biochimiques possédés par les plantes hôtes influencent de manière significative la fécondité de l'insecte, le temps de développement, la longévité et le taux de survie. Plusieurs cultivars de blé (Kouhdasht en Iran), d'orge et le maïs ne sont pas des hôtes adaptés pour l'alimentation de *T. granarium*, et ces cultivars peuvent être cultivés ou stockés pendant longtemps (Seifi et al. 2015 ; Golizadeh et Abedi 2016 ; Majd-Marani et al. 2017, 2018).

2.3.La lutte chimique

Le contrôle des populations d'insectes dans les stocks de grains peut être réalisé par voie chimique à l'aide d'insecticides appliqués en traitement préventif ou curatif. Ces spécialités se divisent principalement en fumigants et en insecticides de contact. Les fumigants ciblent l'éradication des infestations en cours, tandis que les insecticides de contact (ou protecteurs) sont incorporés à la masse de grain pour prévenir l'apparition de nouveaux foyers durant le stockage. Avant tout remplissage, les locaux doivent faire l'objet d'une désinsectisation à l'aide de spécialités rémanentes homologuées.

Il convient de rappeler que l'usage d'insecticides de synthèse est restreint pour les denrées destinées à l'alimentation humaine ; seules les molécules officiellement enregistrées pour une application directe sur le grain doivent être employées, dans le strict respect des doses homologuées (Mohapatra et al., 2015). Les fumigants, tels que la phosphine, les cyanogènes, le formiate d'éthyle, le fluorure de sulfuryle et le sulfure de carbonyle, pénètrent rapidement la marchandise et éliminent tous les stades de vie des insectes, s'affirmant comme l'une des méthodes les plus performantes pour limiter les pertes (Donahaye, 2000 ; Mohapatra et al., 2015). Le bromure de méthyle et la phosphine restent historiquement les composés les plus répandus (Shaaya, 1997). La fumigation à la phosphine demeure la pratique de référence lors de la mise en stockage, offrant une efficacité supérieure comparée à l'utilisation de sacs pré-traités (Demissie, 2006).

2.4.La lutte biologique

Le milieu de stockage des denrées offre des conditions favorables au développement d'ennemis naturels macroscopiques (Schöller et Flinn, 2000 ; Schöller et al., 2006). Ainsi, plusieurs prédateurs et parasitoïdes s'avèrent tout à fait adaptés pour jouer ce rôle de régulateurs naturels. Néanmoins, ce travail de thèse se concentre spécifiquement sur le lâcher de parasitoïdes selon une stratégie de lutte biologique par augmentation.

2.4.1.Parasitoïdes

Dans le cadre de la lutte biologique par augmentation, des parasitoïdes et des prédateurs adultes sont libérés au sein même des installations de stockage. Les femelles autonomes partent ensuite à la recherche d'hôtes pour leur progéniture, se dispersant et localisant les ravageurs même lorsqu'ils sont dissimulés à l'intérieur d'un grain ou enfouis profondément dans la masse céréalière (**Schöller et al., 2006**). Cette méthode de contrôle repose sur le développement des stades immatures aux dépens d'un hôte unique, qui finit par mourir sous l'action combinée de leur alimentation et des blessures mortelles infligées par les femelles. Tant que des hôtes sont disponibles et que les conditions environnementales restent propices, les parasitoïdes continuent de se reproduire sans qu'il soit nécessaire de procéder à de nouveaux lâchers. L'un des avantages majeurs de l'utilisation des parasitoïdes en lutte biologique réside dans leur très petite taille, qui permet de les éliminer facilement du grain en vrac grâce aux procédures de nettoyage habituelles avant la mouture (**Arbogast, 1998 ; Schöller et Flinn, 2000 ; Schöller et al., 1997**). De plus, ils ne laissent aucun résidu toxique et, comme les méthodes d'application de la lutte biologique sont totalement sûres pour l'utilisateur et l'environnement, le risque pour les espèces non-cibles est généralement très faible (**Delfosse, 2005**), en particulier dans les structures de stockage. Enfin, cette méthode étant inoffensive pour l'homme, aucun délai d'attente n'est requis après le lâcher des agents (**Riudavets 2017, Van Lenteren 2017**).

2.4.2.Prédateurs

Les insectes prédateurs se distinguent des parasitoïdes de plusieurs manières. Un prédateur a besoin de consommer de nombreuses proies pour accomplir son développement, alors qu'un parasitoïde effectue tout son cycle sur un seul et unique hôte. Les prédateurs ont également tendance à être moins spécifiques que les parasitoïdes dans le choix de leurs hôtes. Il existe probablement de nombreuses espèces de prédateurs qui s'attaquent aux insectes des denrées stockées, mais la plupart d'entre elles n'ont pas encore été étudiées, à l'exception de la punaise prédatrice des entrepôts, *Xylocoris flavipes* (**Hagstrum, 2012**).

2.4.3.Les entomopathogènes

De nombreux agents pathogènes, tels que les virus, les bactéries, les protozoaires et des champignons, infectent les insectes des denrées stockées (**Brower et al. 1996, Moore et al. 2000**). Certains de ces organismes se montrent très virulents et tuent l'insecte par une infection rapide. D'autres, comme les protozoaires, nuisent plutôt au développement ou à la fertilité de l'insecte (**Schöller et al., 2006**).

2.4.3.1. Bactéries

Le Dipel est une formulation commerciale de la bactérie sporulante *Bacillus thuringiensis* (Bt). Il contient une protéine insecticide qui tue l'insecte soit directement, soit par une septicémie (un empoisonnement du sang) au niveau de son tube digestif. Il peut être appliqué sur le grain sous forme liquide ou de poudre au moment du chargement dans le silo. Il est également possible de le répandre à la surface du grain puis de l'incorporer à l'aide d'un râteau sur une profondeur de 4 pouces (environ 10 cm). Les souches actuelles de Bt ne sont efficaces que contre les papillons et n'agissent pas sur les coléoptères. Si de bons résultats ont été observés en laboratoire, le contrôle des papillons s'est révélé moins régulier dans des silos de stockage de grande taille (McGaughey 1976). Des cas de résistance ont d'ailleurs déjà été signalés (McGaughey et Beeman 1985).

Dans la plupart des cas, la toxine de Bt n'a que peu ou pas d'effets secondaires sur les parasitoïdes. En étudiant l'impact de larves d'*E. kuehniella* infectées par Bt sur la biologie de *V. canescens*, Kurstak (1966) a constaté que le parasitisme n'était pas affecté. De plus, il a été démontré que *V. canescens* servait de vecteur à la bactérie, ce qui accélère la propagation de la maladie au sein de la population de papillons. Kurstak (1966) et Burkholder (1981) ont ainsi suggéré que les parasitoïdes pouvaient améliorer la lutte contre les ravageurs en disséminant les agents pathogènes (Hagstrum, 2012).

2.4.3.2. Virus

De nombreux virus ont été répertoriés chez les insectes nuisibles aux produits stockés. La majorité d'entre eux attaquent les papillons, et seuls quelques-uns ont été signalés chez les coléoptères. Ces virus sont généralement spécifiques à une espèce et ne peuvent être produits que sur des hôtes vivants ou sur des cultures de cellules d'insectes. Un virus de la granulose s'est montré efficace contre la pyrale indienne de la farine. Une formulation a été brevetée (Vail et al. 1991) et homologuée aux États-Unis en 2001 pour lutter contre les larves de cette pyrale sur les fruits secs et les noix, ainsi que pour le traitement des fissures et des crevasses. Toutefois, cette formulation n'est plus commercialisée actuellement (Hagstrum, 2012).

2.4.3.3. Les champignons

Plusieurs champignons attaquant les insectes des produits stockés ont été signalés, le plus notable étant probablement *Beauveria bassiana* (Moino et al 1998). Les résultats démontrent que les champignons entomopathogènes testés pourraient être précieux pour le contrôle biologique du *Trogoderma granarium*, en particulier *Metarhizium anisopliae* et *Trichoderma citrinoviride*, en raison de leur capacité à pénétrer la cuticule des insectes et à

utiliser le corps des insectes comme source de nutriments pour la croissance et la propagation (Iqbal et al. 2022).

2.5. La lutte par les produits minéraux

L'utilisation de poudres inertes naturelles constitue une méthode importante pour la protection des denrées stockées. Leur principal avantage réside dans leur caractère peu toxique et leur innocuité (Golob, 1997). Selon Banks et Fields (1995), quatre grandes catégories de poudres inertes desséchantes et abrasives peuvent être distinguées : les terres naturelles (argile pulvérisée, sable, terre), les terres à diatomées (Protect-It, Dryacide, Silicosec), les gels de silice ainsi que les poudres inertes non siliceuses [roches phosphatées, terre soufrée, chaux (hydroxyde de calcium), calcaire (carbonate de calcium) et sel (chlorure de sodium)].

D'après Ebeling (1971), la mort de l'insecte survient lorsqu'il perd environ 60 % de sa teneur en eau ou 30 % de sa masse corporelle. La cendre et le sable fin sont fréquemment utilisés pour le traitement des stocks, selon des modalités et des proportions qui varient d'une région à l'autre. Ces matériaux pulvérulents occupent les espaces libres entre les graines et forment un obstacle à la progression des femelles à la recherche de sites de ponte. Ils exercent également une action abrasive sur les insectes et favorisent leur déshydratation en adsorbant ou en détériorant la couche lipidique protectrice de leur cuticule (Cruz et Troude, 1988).

2.6. La lutte par les extraits des végétaux

L'utilisation d'insecticides synthétiques pour le contrôle des insectes de stockage entraîne le développement de résistances, des résidus nocifs dans les céréales et des dangers pour l'environnement. En revanche, de nombreuses espèces végétales sont une riche source de composés bioactifs, c'est-à-dire de composés secondaires tels que les alcaloïdes, les terpènes, le phénol, les stéroïdes et les glycosides cardiotoniques, qui peuvent être développés en insecticides botaniques (Popławski et al. 2000 ; Cis et al. 2006 ; Abdel-Sattar et al. 2010 ; Nenaah 2011 ; Almadiy et al. 2017 ; Janaki et al. 2018 ; Pavela et al. 2020). L'utilisation de produits naturels à base de plantes est une méthode sûre, efficace, écologique, économique, localement disponible et réalisable de lutte contre les ravageurs. De nombreuses espèces végétales ont été testées contre cette espèce pour leurs activités répulsives, anti-alimentaires, régulatrices de croissance et toxiques sous forme de poudre, d'extrait aqueux, d'extrait de solvant organique, d'huile essentielle. Plusieurs études ont démontré que les huiles essentielles de diverses plantes pouvaient être biologiquement efficaces contre les nuisibles des denrées stockées par contact direct ou par inhalation. Les huiles essentielles ont un large

éventail d'usage ,elles agissent comme régulateur de croissance et possèdent des propriétés antimicrobiennes et antioxydantes (**Goudoum, 2010**) et d'élément actif par contact, ingestion et traitements par fumigation.

Chapitre III

Aperçu général sur les produits utilisés

1. Généralités sur les produits utilisés

1.1. L'Eucalyptus

Eucalyptus est une espèce d'arbre du genre *Eucalyptus* que l'on trouve dans de nombreuses parties du monde mais qui est originaire d'Australie ou il est largement répandu au bord des rivières de l'intérieur du pays. Il est aussi surnommé le gommier rouge en référence à son bois d'un rouge brillant, qui peut aller d'un rose pâle à un rouge très foncé. Le nom d'*Eucalyptus camaldulensis* est : Eucalyptus à bec, Eucalyptus des Camaldules ou gommier rouge (Kebir, 2018).



Figure 7 : les feuilles d'arbre de *Eucalyptus camaldulensis* (Original ,2026)

1.2. Classification systématique et description botanique

L'Eucalyptus camaldulensis, l'une des espèces les plus répandues à travers le monde et spécifiquement dans le bassin méditerranéen, a été introduite en Algérie en 1857 dans le but de rendre les terrains marécageux sains. Elle a été projetée sur une superficie de 30 000 hectares (Oyen et Lemmens, 2002). C'est aujourd'hui l'espèce la plus présente en Méditerranée, où elle s'est parfaitement acclimatée, illustrant sa grande capacité de résistance à la sécheresse une fois installée.

La classification systématique de l'espèce *Eucalyptus camaldulensis* est la suivante (Arar et Houari, 2008).

Tableau 2: Classification systématique de *Eucalyptus camaldulensis*

Règne	Plantae
Embranchement	Spermatophytes
Sous-embranchement	Angiospermes
Classe	Dicotylédones
Ordre	Myrtales
Famille	Myrtacées
Genre	<i>Eucalyptus</i> Plantae
Espèce	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>

1.3.Description botanique

Eucalyptus camaldulensis est considéré comme l'une des espèces d'*Eucalyptus* les plus variables sur le plan morphologique dans son aire naturelle de répartition. Son port peut aller de celui d'un arbre à tige unique atteignant 30 à 40 m de hauteur. Le diamètre du tronc varie généralement entre 1 et 2 m. Son écorce, lisse, présente différentes teintes allant du blanc au gris, en passant par le jaune-vert, le gris-vert ou le gris rosé. Les feuilles adultes mesurent de 8 à 30 cm de long et de 0,7 à 4,2 cm de large ; elles sont de couleur verte ou gris-vert. Les fleurs sont blanches et portées par des pédoncules fins de 6 à 15 mm de longueur (**Arnold et Luo, 2018**).

1.3.1.Morphologie de la plante

➤ Arbre

Eucalyptus camaldulensis est un arbre forestier caractérisé par un houppier très développé. Celui-ci adopte une forme conique durant les 15 à 20 premières années de croissance avant de devenir plus dressé avec l'âge. L'espèce peut atteindre une hauteur comprise entre 30 et 40 m, avec un diamètre variant de 0,9 à 2,50 m (**Meziane, 1996**).

➤ Tronc

Le tronc est généralement droit, élancé et mesure entre 1 et 2 m de diamètre. Toutefois, il peut parfois présenter une forme tortueuse. Il exsude fréquemment une gomme résineuse rouge et possède une coloration blanchâtre à grisâtre dans sa partie supérieure (**Mekellech, 2015**).

➤ **Ecorce**

La couleur et la texture de l'écorce varient selon les espèces. Elle peut présenter plusieurs nuances de couleur, à l'image de celle du platane, et se détacher sous forme de lambeaux qui tombent au sol. Dans certains cas, elle peut également être dure, fibreuse, floconneuse ou parfaitement lisse (**Mekellech, 2015**).

➤ **Feuilles**

Les feuilles juvéniles sont opposées sur trois ou quatre nœuds avant de devenir alternées. Elles sont pétiolées, lancéolées et mesurent entre 2 et 4 cm de longueur. Légèrement glauques, elles évoluent vers des feuilles adultes pétiolées et alternées dont les deux faces présentent une coloration verte identique. Ces dernières sont étroites, lancéolées et falciformes, avec une longueur variant de 8 à 30 cm et une largeur comprise entre 0,7 et 4,2 cm. Leur couleur est verte ou gris-vert (**Arnold et Luo, 2018**).

➤ **Fleur**

Les fleurs se présentent sous la forme de petites sphères composées de nombreuses étamines blanchâtres. Elles donnent naissance à des capsules hémisphériques. L'inflorescence est constituée d'ombelles simples axillaires regroupant généralement de 4 à 7 fleurs régulières (**Rameau et al., 2008**).

➤ **Fruits**

Le fruit est une capsule ligneuse volumineuse, de couleur glauque devenant brunâtre à maturité. Il est caractérisé par une texture dure, anguleuse et verruqueuse. Son ouverture s'effectue par trois, quatre ou cinq fentes formant une étoile au sommet, permettant ainsi la libération d'un grand nombre de graines sombres et de très petite taille (**Goets et Ghedira, 2012**).

Les feuilles renferment de nombreuses vacuoles contenant des huiles essentielles riches en cinéole ou eucalyptol (**FAO, 1982 ; Alexendrein, 1992**).

➤ **Racines :**

La majorité des espèces d'*Eucalyptus* possèdent des organes souterrains de réserve appelés lignotubers. Ces structures apparaissent sous forme de renflements situés à la base du collet racinaire. Elles sont constituées de tissus cellulaires indifférenciés riches en réserves glucidiques, notamment l'amidon. Les eucalyptus, principalement originaires d'Australie, ont évolué dans des environnements arides fréquemment exposés aux incendies. Les lignotubers permettent à la plante de produire de nouvelles pousses lorsqu'une perturbation importante détruit tout ou partie de l'appareil végétatif aérien. Cette adaptation constitue ainsi un mécanisme essentiel favorisant la survie des espèces d'*Eucalyptus* qui en sont dotées (FAO, 1982 ; Alexendrein, 1992)

1.4.Composition chimique

➤ Les tanins

Les tanins sont des composés phénoliques présents principalement dans l'écorce et le bois d'*Eucalyptus camaldulensis*. Selon les travaux de Nisi cités par Thiombiano (1984), les tanins constitués de monomères de proanthocyanidines seraient à l'origine de la coloration rouge caractéristique du bois de cette espèce.

➤ Les phénols

Plusieurs composés phénoliques, estimés à une dizaine, ont été isolés et identifiés chez *Eucalyptus camaldulensis*. Parmi eux figurent notamment les acides caféique, chlorogénique, p-coumarique, férulique et gallique. Des polyphénols ont également été extraits des feuilles de cette espèce (Thiombiano, 1984).

➤ Les huiles essentielles

Les huiles essentielles d'*Eucalyptus camaldulensis* renferment une trentaine de composés chimiques. Le constituant majoritaire est le 1,8-cinéole, dont la teneur varie généralement entre 17,6 % et 42,3 %. D'autres composés sont présents en quantités plus faibles, notamment le p-cymène, l' α -pinène, le γ -terpinène et le spathulénol (Benayache et al., 2001 ; Foudil-Cherif, 2000 ; Koreichi & Benletreche, 2019 ; Mehani, 2015 ; Nait Achour, 2012 ; Salemkour et Rahaoui, 2019).

2.La Bentonite

2.1.Généralités sur la bentonite

La bentonite est une argile colloïdale découverte aux Etats Unis en 1888 à Fort Benton dans le Wyoming (**Wolfbauer, 1976 ; Park et al 2016**). C'est une catégorie d'argile friable que l'on retrouve dans les cendres volcaniques, par exemple (**Salazar et al 2010 ; Kadir et al 2017**). Sa teinte dépend des composés minéraux et impuretés qui lui sont étroitement associés. C'est la présence de la montmorillonite qui explique la capacité de rétention d'eau de la bentonite qui est un type de smectite particulièrement gonflant (**Uddin, 2018 ; Uddin, 2017**). Il existe deux types de bentonite : la bentonite à base de sodium, qui a un pouvoir de dispersion élevé en eau douce, et la bentonite à base de calcium (calcique), composée d'agrégats plus.

2.2. Propriétés physico-chimiques de la bentonite

La bentonite possède plusieurs propriétés tels que :

2.2.1. Gonflement de bentonite

Le gonflement de la bentonite est lié au caractère hydrophile de sa surface. Ce phénomène résulte de la présence de cations hydratés et de molécules d'eau localisés dans les espaces interfoliaires, qui peuvent pénétrer entre les feuillets et les séparer sous l'effet d'une pression donnée (**Deng et al., 2002**).

2.2.2. Capacité d'échange cationique

La bentonite possède la capacité de se disperser dans l'eau. Les cations interfoliaires peuvent être échangés avec des cations minéraux ou organiques présents en solution au contact des polysilicates. Ce phénomène correspond à la capacité d'échange cationique (CEC), qui traduit l'aptitude de l'argile à échanger des cations. Elle s'exprime généralement en milliéquivalents pour 100 g d'argile (**Ennajih, 2014**).

2.2.3. La surface spécifique

La surface spécifique constitue un paramètre essentiel en raison de l'utilisation de la bentonite comme adsorbant. Elle est particulièrement élevée et résulte de la somme de deux composantes : une surface interne correspondant aux espaces interfoliaires et une surface externe située entre les particules. Elle est exprimée en m^2/g d'argile (**Demirbas, 2009**).

2.3. Structure de la bentonite

La montmorillonite est le constituant principal de la bentonite. C'est un phyllosilicate 2 : 1 (Famille de smectites) dans lequel la charge négative de la couche est électriquement équilibrée par une charge égale, des cations échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , H^+ , K^+ , NH_4^+ et Na^+) situés principalement entre ces couches silicates ; ces cations ne font pas partie de la

Structure et garde une certaine mobilité (Kanouri et Labide, 2013).

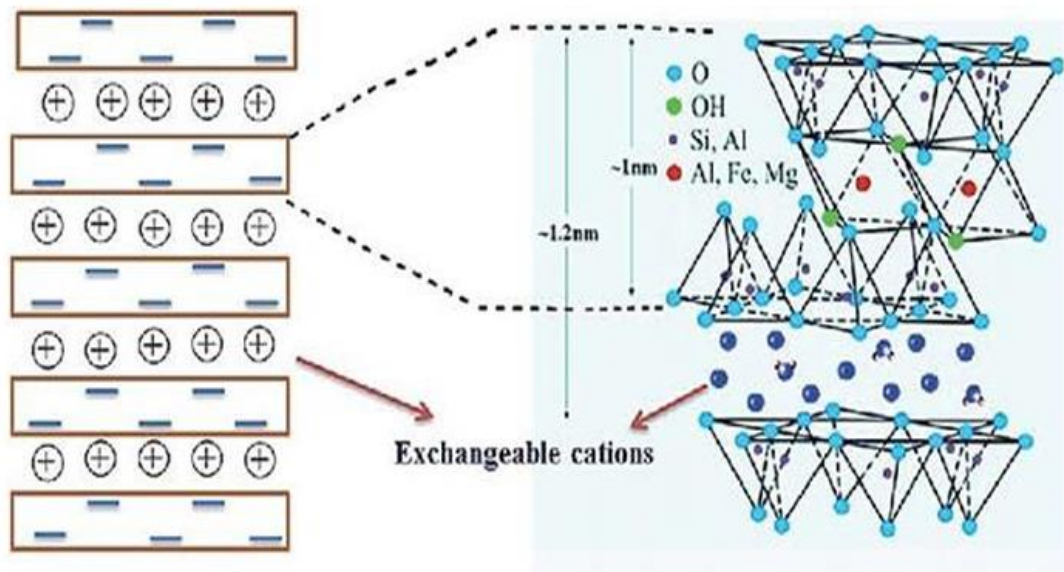


Figure 8: La structure de bentonite (Hebbar et al, 2014)

2.4. Utilisation de bentonite contre les insectes des denrées stockées

La Bentonite est un minéral argileux appartenant à la catégorie des poussières inertes utilisées dans la protection des denrées stockées. Son action insecticide repose principalement sur l'adsorption des lipides de la cuticule et l'altération de la couche cireuse protectrice des insectes, provoquant une perte excessive d'eau et une déshydratation progressive. Dans une étude menée sur *Sitophilus oryzae*, la bentonite a provoqué une mortalité de 79,55 % des adultes et a réduit les dommages ainsi que les pertes de poids des grains de blé stockés. Ces résultats démontrent le potentiel de la bentonite comme alternative écologique pour la protection des céréales stockées contre les insectes ravageurs (Kundu et al., 2018).

3. Micro-ondes

3.1. Historique

La découverte du phénomène d'échauffement par rayonnement micro-onde remonte aux années 1950. Cette découverte a conduit au développement de nombreuses applications industrielles, notamment dans les domaines agroalimentaire et médical.

Le chauffage par micro-ondes est aujourd'hui un procédé largement connu. Cette technologie s'est développée plus rapidement dans le secteur des produits destinés au grand public que dans les domaines industriels et de la recherche scientifique.

L'activation des synthèses chimiques par exposition aux micro-ondes permet d'obtenir des réactions plus rapides ainsi qu'une meilleure pureté des produits comparativement au chauffage conventionnel. En particulier, l'association des micro-ondes avec des réactions réalisées sans solvant s'est révélée particulièrement efficace pour l'amélioration et la simplification des procédés (**Bram et coll.,1992 ; Loupy, Septembre 1994**).

3.2.Définition d'un four à micro-ondes

Les micro-ondes, également appelées hyperfréquences, sont des ondes électromagnétiques constituées d'un champ électrique et d'un champ magnétique. En 1959, la Commission fédérale de communication réunie à Genève a adopté un accord réglementant l'utilisation des micro-ondes dans les domaines médicaux, industriels et scientifiques afin d'éviter toute interférence avec les fréquences utilisées par les systèmes de télécommunications. De manière générale, les fours domestiques fonctionnent à une fréquence de 2,45 GHz. Le principe de fonctionnement d'un four à micro-ondes repose sur l'alimentation d'un magnétron par une énergie électrique.

Ce dispositif transforme l'énergie électrique en champ électromagnétique. Les micro-ondes produites sont ensuite dirigées, à travers un guide d'onde constitué d'un tube métallique rectangulaire, vers un agitateur d'onde puis à l'intérieur de l'enceinte métallique contenant l'aliment placé sur une plaque tournante. Ce système permet une exposition uniforme de l'aliment aux micro-ondes, lesquelles pénètrent dans le produit afin d'atteindre les molécules d'eau (**Aurelie cendres, 2010**).

3.3.Interaction micro-ondes–matière

L'échauffement d'un produit par rayonnement micro-onde résulte des interactions entre l'onde et la matière. Ce phénomène est provoqué par la transformation en chaleur d'une partie de l'énergie transportée par l'onde électromagnétique.

Les molécules polaires possèdent la capacité de s'orienter selon un champ électrique, phénomène appelé polarisation dipolaire. Lorsque ce champ devient alternatif, l'orientation des dipôles change à chaque alternance. Cette variation entraîne une agitation des molécules, provoquant des frictions sur une profondeur d'environ 10 cm ainsi qu'un échauffement interne

pouvant être très important sous l'effet d'ondes de forte puissance, atteignant jusqu'à 10 °C par seconde.

Le chauffage par micro-ondes correspond à un chauffage volumique, différent des modes de chauffage conventionnels. Le transfert de chaleur s'effectue de l'intérieur vers l'extérieur, tandis que le dégagement de chaleur peut être considéré comme quasi instantané. Le dégagement thermique dépend de plusieurs paramètres. Certains sont liés au matériau chauffé, notamment la capacité des molécules à se polariser dans le champ électrique et à convertir l'énergie électromagnétique en énergie thermique. D'autres paramètres dépendent de l'appareillage utilisé, en particulier la puissance appliquée, dont l'augmentation entraîne un dégagement de chaleur plus important.

Ainsi, le chauffage s'effectue de l'intérieur avec une répartition de température plus homogène que lors d'un chauffage classique. Les micro-ondes chauffent donc la matière selon un mécanisme original, différent des autres procédés de traitement (**Khiari, 2013**).

3.4. Avantages spécifiques des micro-ondes

Les principaux avantages de l'utilisation des micro-ondes dans la lutte contre les insectes des denrées stockées :

- Des temps de réaction généralement réduits à quelques minutes.
- Une augmentation rapide de la température, même dans les cas où les modes de chauffage conventionnels sont peu efficaces, notamment avec les matériaux mauvais conducteurs de chaleur.
- Un chauffage homogène à cœur, sans gradient thermique, avec un transfert rapide de l'énergie dans toute la masse et sans surchauffe superficielle.
- Une facilité d'utilisation caractérisée par une régulation aisée de la puissance ainsi que par des mises en marche et des arrêts instantanés (**Korichi, 2014**).

3.5. Utilisation des micro-ondes dans la lutte contre les insectes des denrées stockées

Le traitement par micro-ondes repose sur la transformation de l'énergie électromagnétique en énergie thermique, provoquant un échauffement rapide des matériaux exposés. Cette technologie est utilisée dans la désinsectisation des céréales stockées en raison de ses nombreux avantages, notamment le contrôle des différents stades de développement des insectes et des agents pathogènes, sa bonne capacité de pénétration ainsi que son effet sur le comportement reproducteur des individus survivants. De plus, cette méthode ne laisse pratiquement aucun résidu chimique sur les produits alimentaires et présente un faible impact

environnemental. Plusieurs études ont également montré que l'énergie thermique générée par les micro-ondes peut avoir une influence favorable sur certaines caractéristiques des produits traités **(Muir, 2000 ; Vadivambal et al., 2007 ; Yousif, 2012)**.

L'efficacité des micro-ondes contre les insectes des denrées stockées s'explique principalement par le fait que les insectes possèdent une teneur en eau plus élevée que celle des grains céréaliers. Ainsi, ils absorbent plus rapidement l'énergie micro-onde et se réchauffent plus vite que les grains eux-mêmes, ce qui entraîne leur mortalité **(Hurlock et al., 1979)**. Cette technologie est considérée comme une alternative non chimique prometteuse pour la désinsectisation des grains stockés, tout en contribuant à prolonger leur durée de conservation. Le traitement par micro-ondes est également décrit comme une méthode efficace, économique et sans risque majeur pour le stockage des céréales **(Hurlock et al., 1979 ; Agha et al., 2017)**. De nombreux chercheurs ont étudié l'utilisation des micro-ondes dans le traitement des produits stockés et la lutte contre les infestations d'insectes **(Hamid and Boulanger, 1969 ; Srivastava and Mishra, 2021)**. Par exemple, **Zouba et al. (2009)** ont utilisé les micro-ondes pour lutter contre la pyrale *Ectomyelois ceratoniae* dans les dattes tunisiennes. De leur côté, **Vadivambal et al. (2007)** ont montré qu'il était possible de désinfecter le blé stocké sans altérer ses propriétés de mouture et de panification. D'autres travaux ont rapporté que le chauffage sélectif permis par les micro-ondes constitue un avantage important, notamment grâce à l'absence de résidus chimiques et à l'absence d'effets négatifs significatifs sur l'environnement **(Hamid et al., 1968 ; Watters, 1976 ; Hurlock et al., 1979 ; Srivastava and Mishra, 2021)**.

Chapitre IV

Matériels et Méthodes

Notre étude expérimentale comprend trois essais à savoir une :

- I- Evaluation de la toxicité de poudre des feuilles de *Eucalyptus camaldulensis*.
- II- Evaluation de l'effet d'un produit inerte la bentonite.
- III-Evaluation le traitement par Micro-onde.

1.Objectif de l'étude

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'efficacité de ces substances naturelles, et le traitement par Micro-onde utilisées seules ou en combinaison, dans le cadre d'une stratégie de lutte intégrée contre *Trogoderma granarium*, afin de déterminer leur potentiel insecticide sur la mortalité des larves et leur capacité à constituer une alternative durable, économique et respectueuse de l'environnement pour la protection des céréales stockées.

2.Matériel biologique

2.1. Elevage de masse des insectes

Le présent élevage a pour objectif d'obtenir le matériel biologique nécessaire à la réalisation des différents essais expérimentaux.

Pour cela, des larves de *Trogoderma granarium*, obtenues auprès de la Coopérative des Céréales et des Légumes Secs (CCLS) de Tissemsilt ont été utilisées pour la conduite de notre expérimentation. Les individus sont placés dans des bocaux en verre contenant 500 g de grains de blé dur local. Les couvercles des bocaux sont perforés afin d'assurer une bonne aération. L'ensemble est ensuite incubé dans une étuve réglée à une température de 35 °C et une humidité relative de 70 ± 5 .



Figure 9 : L'élevage de masse de *Trogoderma granarium* (Original, 2026).

3. Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé pour réaliser cette étude est constitué d'arbres médicinaux à savoir *Eucalyptus camaldulensis* appartient à la famille des Myrtaceae.

3.1. Les critères de choix des plantes

Les plantes aromatiques sont la source pour de nombreuses substances telles que les huiles essentielles et les poudres dont elles font l'objet de notre étude. Le choix de ces substances est basé sur :

- La richesse de la flore Algérienne.
- La disponibilité.
- La richesse en composés bioactifs et bio insecticide, leur volatilité qui facilite leur application au niveau des stocks.
- Rendement plus ou moins important et disponibilité au niveau de notre région.
- Absence de modification du goût des produits céréaliers et même si possible de l'améliorer

3.2. Récolte et préparation du matériel végétal

Les feuilles de *Eucalyptus camaldulensis* utilisées dans ce test, ont été récoltées à partir d'arbres sains situés dans la région de Tisemssilet (lieu-dit El Djouza), La récolte s'est effectuée pendant le mois de Avril 2026 les feuilles sélectionnées étaient saines .

Une fois récoltées, elles sont séchées pendant dix jours à l'abri de la lumière pour préserver l'intégrité de leurs molécules

3.3 Préparation des poudres végétales

Une fois les plantes sont séchées, elles sont réduites en poudre à l'aide d'un broyeur électrique puis le broyat est passé dans un tamis (0,6 mm de maille) afin d'obtenir une poudre de granulométrie homogène. Les poudres sont conservées séparément dans des flacons.

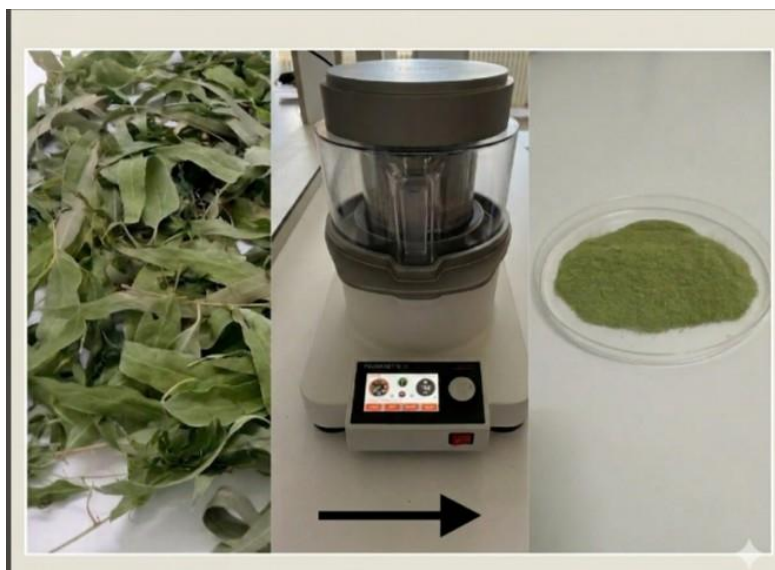


Figure 10 : Les étapes de préparation de poudre végétales (Original,2026).

3.4.Utilisation dans l'expérimentation

La poudre végétale de *Eucalyptus camaldulensis* a été utilisée à différentes doses afin d'évaluer son activité insecticide contre les larves de *Trogoderma granarium*.

Les différentes doses ont été mélangées avec les graines de blé de manière homogène avant l'introduction des insectes.

4 .Méthode physique

Pour ce test, un four à micro-ondes (de marque LG, équipé de la technologie de distribution tridimensionnelle des ondes Intellowave) a été utilisé. L'appareil fonctionne à une fréquence standard de 2450 MHz avec une puissance nominale maximale de 700 Watts. Il dispose de cinq niveaux de puissance réglables manuellement, à savoir : (Très basse 90, Décongélation 180, Moyenne-basse 360, Moyenne-haute 540 et Maximale 700) Watts. De plus, l'appareil est muni d'une minuterie mécanique permettant de

contrôler la durée d'exposition sur une plage allant de 1 à 35 minutes, comme illustré sur la figure.



Figure 11 : Micro-ondes utilise pour le traitement de *Trogoderma granarium* (Originale, 2026).

5.Les produits inertes

La bentonite utilisée dans cette étude est une argile naturelle fine, composée principalement de montmorillonite, issue d'un gisement à Mostaganem, Elle a été employée sous forme de poudre sèche et homogène pour évaluer son efficacité contre les larves de *Trogoderma granarium*. Avant son utilisation, la bentonite a été conservée dans un récipient hermétique à température ambiante.



Figure 12 : La bentonite utilisée pour le traitement les larves de *Trogoderma granarium* (Original,2026)

6. Mode d'opération

6.1. Lutte biologique par utilisation la poudre des feuilles de *Eucalyptus camaldulensis*

6.1.1 Etude de l'effet insecticide de poudre

Dix individus des larves de *Trogoderma granarium* de L3 et L4 sont introduits dans des boîtes de Pétri de 9 cm de diamètre contenant chacune 10g de blé local pour imprégnées avec de poudre de feuilles des *Eucalyptus camaldulensis* testée aux cinq doses choisies (0.5g ,1g ,1.5 g ,2g ,2.5g). Les expériences sont réalisées en présence d'un lot témoin et répétées trois fois. Enfin, les boîtes de Pétri ont été hermétiquement fermées à l'aide d'un film paraffinique (Para film). Après l'installation du dispositif expérimental, les boîtes de Pétri ont été laissées sur la paillasse du laboratoire, à température ambiante, pendant toute la durée de l'expérimentation.

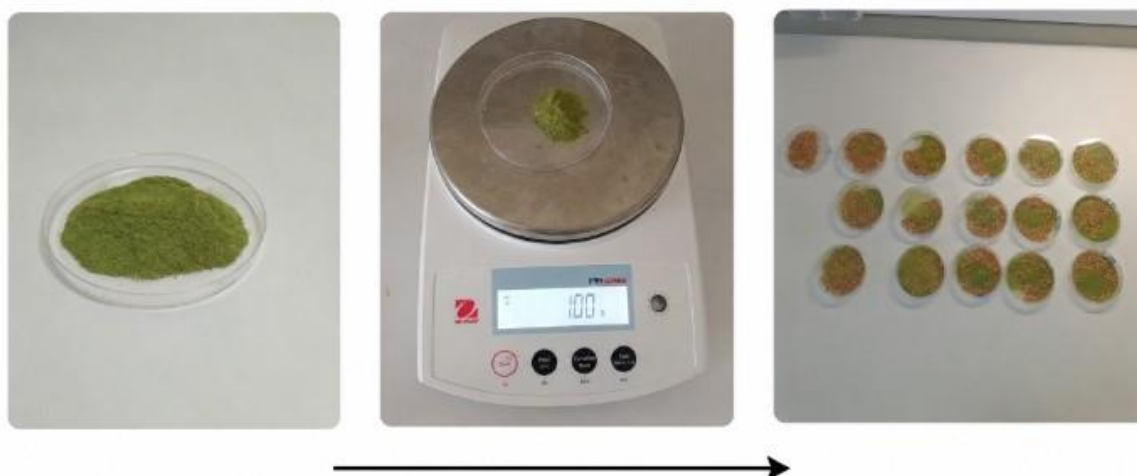


Figure 13 : les étapes de préparation de dispositifs expérimentales de test d'effet insecticide de poudre (Originale,2026).

6.2. Lutte par l'utilisation des produits inertes (Bentonite)

L'expérimentation a été réalisée en introduisant 10 g de blé dans des boîtes de Pétri de 9cm de diamètre pour chaque unité expérimentale. Cinq doses de poudre de bentonite ont été préparées, à savoir 0,04 g, 0,08 g, 0,12 g, 0,16 g et 0,20 g. Chaque dose a été mélangée soigneusement aux grains de blé afin d'assurer une répartition homogène du produit.

Après préparation des substrats traités, dix larves de *Trogoderma granarium* de stades larvaires L3 et L4 ont été introduites dans chaque boîte de Pétri contenant le blé traité. Chaque traitement

a été répété trois fois afin d'assurer la fiabilité des résultats. Un lot témoin constitué de 10 g de blé non traité et de dix larves a été préparé dans les mêmes conditions expérimentale, Après l'installation du dispositif expérimental, les boîtes de Pétri ont été laissées sur la paillasse du laboratoire, à température ambiante, pendant toute la durée de l'expérimentation.



Figure 14 : Les étapes de préparation du dispositif expérimental de l'effet de bentonite (Original,2026).

6.3.Lutte physique par Micro-onde

Afin d'évaluer l'effet du traitement par micro-ondes sur les larves de *Trogoderma granarium*, des lots de dix larves de troisième et quatrième stades larvaires (L3–L4) ont été placés individuellement dans des récipients adaptés puis exposés à une puissance de 90 W. Cinq durées d'exposition ont été testées : 10 ,20, 30, 40 et 50 secondes. Pour chaque durée, trois répétitions ont été réalisées afin d'assurer la fiabilité des résultats expérimentaux.



**Figure 15 : Traitements des larves de *Trogoderma granarium* par micro-onde
(Originale,2026).**

7.Exploitation des données :

7.1.Calcul du pourcentage de mortalité

Le pourcentage de mortalité est calculé chez les larves de *Trogoderma granarium* témoin et traité par la formule suivante :

$$\text{Mortalité observée} = \frac{\text{Nombre d'individus morts}}{\text{Nombre total des individus}} \times 100$$

7.2.Correction de la mortalité :

Le nombre d'individus démontré dans une population traitée par un produit toxique n'est pas le nombre réel d'individus tués par ce toxique. La formule permet de corriger la mortalité D'ABBOT (1925) selon la formule suivante :

$$\text{MC (\%)} = \frac{(M - M_t)}{(100 - M_t)} \times 100$$

MC (%) : pourcentage de mortalité corrigée

M : pourcentage de mortalité observée dans la population traitée

M_t : pourcentage de mortalité observée dans la population témoin

8. Analyses statistiques :

8.1. Calcul de TL_{50} et DL_{50} :

8.1.1. Détermination de la DL_{50} :

L'un des moyens d'estimer l'efficacité d'un produit, est le calcul de la DL_{50} qui correspond à la quantité de substance toxique entraînant la mort de 50 % d'individus d'un même lot. Elle est déduite par le tracé de la droite de régression. De ce fait, les pourcentages de mortalité corrigée sont transformés en probits.

Ces probits sont représentés graphiquement en fonction de logarithmes népérien des doses afin d'évaluer la dose létale 50 (DL_{50}), pour chaque produit utilisé. Cette dose est déterminée à partir de l'équation d'une droite obtenue théoriquement. On détermine la dose qui correspond à une probit de 50 % de mortalité.

6.1.2. Détermination de la TL_{50} :

Pour calculer le TL_{50} ou le temps nécessaire pour tuer la moitié d'une population donnée il faut d'abord transformer les valeurs des pourcentages de mortalité en probits par la table de donnée de Bliss in Cavellier (1976), enfin les temps et les doses en logarithmes décimaux par l'intermédiaire de logiciel Excel pour obtenir aussi des droites de régression qui présentent l'équation de type :

$$y = a x + b$$

Soit :

y= probit de mortalité corrigé

x= Logarithme décimale du temps ou du dose.

a= Pente de la droite

A partir de cette équation la DL_{50} ou le TL_{50} est déterminé en sachant que le probit de 50 est égal à 5. Ils peuvent être également déterminés graphiquement en recherchant l'abscisse du point correspond au probit 5.

Chapitre V

Résultats

Résultats

1.Effet de l'eucalyptus de *T. granarium*

Les résultats obtenus mettent en évidence une augmentation progressive et significative de la mortalité de *T. granarium* en fonction du temps d'exposition et de la dose appliquée. L'analyse des données révèle une relation clairement dose- et temps-dépendante, caractérisée par une faible mortalité aux faibles doses (D1–D2), une réponse intermédiaire à la dose D3, et une forte toxicité aux doses élevées (D4–D5), atteignant une mortalité totale de 100% à la dose la plus élevée au jour 7. Cette dynamique traduit un effet toxique cumulatif du traitement, avec une intensification progressive de l'impact biologique au cours du temps, confirmant ainsi son efficacité insecticide et sa capacité à induire une mortalité complète à fortes concentrations.

Tableau 3 : Mortalité (%) $\pm$ écart-type de *T. granarium* selon les doses et les jours

Jour	D1	D2	D3	D4	D5
J1	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	3.33 $\pm$ 4.71	3.33 $\pm$ 4.71	10.00 $\pm$ 0.00
J2	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	3.33 $\pm$ 4.71	6.67 $\pm$ 4.71	16.67 $\pm$ 4.71
J3	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	6.67 $\pm$ 4.71	16.67 $\pm$ 4.71	23.33 $\pm$ 4.71
J4	3.33 $\pm$ 4.71	6.67 $\pm$ 4.71	16.67 $\pm$ 4.71	30.00 $\pm$ 5.00	36.67 $\pm$ 4.71
J5	6.67 $\pm$ 4.71	10.00 $\pm$ 0.00	26.67 $\pm$ 4.71	40.00 $\pm$ 0.00	53.33 $\pm$ 4.71
J6	16.67 $\pm$ 4.71	26.67 $\pm$ 4.71	43.33 $\pm$ 5.77	56.67 $\pm$ 4.71	66.67 $\pm$ 4.71
J7	20.00 $\pm$ 0.00	40.00 $\pm$ 0.00	70.00 $\pm$ 0.00	80.00 $\pm$ 0.00	100.00 $\pm$ 0.00

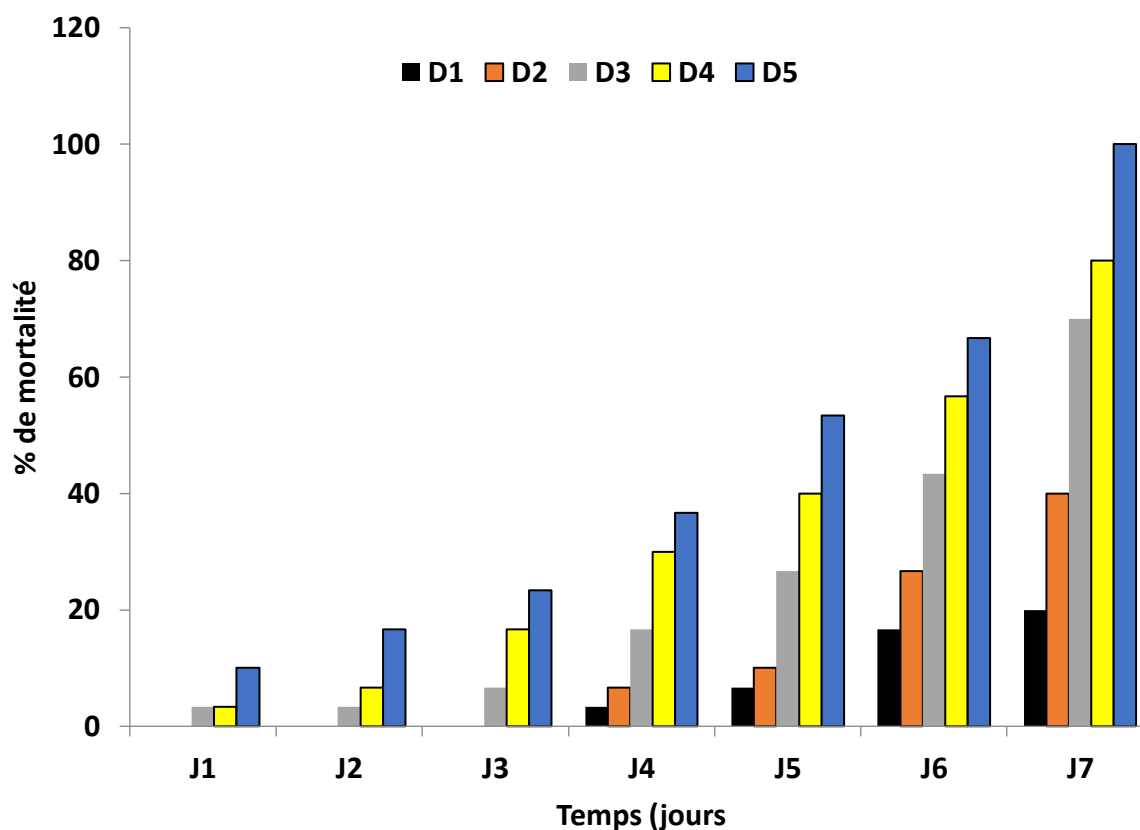


Figure 16 : l'effet des doses de l'eucalyptus sur la mortalité de *T. granarium*

1.1. Analyse de la variance

Tableau 4 : Analyse de variance (ANOVA à un facteur) de l'effet des doses de Eucalyptus sur la mortalité de *T. granarium*

Source	Ddl	Somme des carrés (SS)	Carré moyen (MS)	F	p-value
Dose	4	12543.2	3135.8	142.6	< 0.0001
Temps	6	41872.5	6978.7	317.2	< 0.0001
Interaction (Dose×Temps)	24	3861.4	160.9	7.3	< 0.0001
Erreur	70	1540.6	22	—	—
Total	104	59817.7	—	—	—

Les résultats de l'ANOVA à deux facteurs ont montré un effet hautement significatif de la dose, du temps d'exposition, ainsi que de leur interaction sur la mortalité cumulée de *T. granarium* traité à poudre d'eucalyptus.

L'effet de la dose est fortement significatif ($F_{4,70} = 142,6$; $p < 0,0001$). Cela indique que la mortalité augmente de manière significative en fonction de la concentration appliquée, confirmant ainsi une relation dose-réponse claire.

L'effet du temps est également hautement significatif ($F_{6,70} = 317,2$; $p < 0,0001$). La mortalité augmente progressivement au cours des jours d'exposition, ce qui met en évidence un effet cumulatif du traitement.

L'interaction entre la dose et le temps est significative ($F_{24,70} = 7,3$; $p < 0,0001$). Cela signifie que l'effet de la dose sur la mortalité dépend du temps d'exposition : les différences entre doses deviennent plus marquées au fil des jours, indiquant une dynamique toxique progressive et non linéaire.

L'analyse statistique met en évidence que la mortalité de *T. granarium* est fortement influencée à la fois par la concentration de poudre et la durée d'exposition, avec une interaction significative entre ces deux facteurs. Ces résultats confirment le caractère dose-dépendant et temps-dépendant de l'activité insecticide de poudre d'eucalyptus.

1.2. Test de Tukey

Tableau 5 : Comparaisons entre doses (globalement)

Dose	Moyenne (%)	Groupe
D5	100	A
D4	80	B
D3	70	B
D2	40	C
D1	20	C

2. Facteur Dose

Le test de comparaisons multiples de Tukey a révélé des différences significatives entre les doses de poudre d'eucalyptus.

Les résultats montrent une séparation nette des moyennes en plusieurs groupes homogènes :

- La dose **D5** présente la mortalité la plus élevée et se distingue significativement de toutes les autres doses.
- La dose **D4** est également élevée, mais peut ne pas différer significativement de D3 selon les comparaisons.
- Les doses **D1 et D2** présentent les mortalités les plus faibles et appartiennent au même groupe homogène.

Ces résultats confirment une **relation dose-réponse significative**, avec une augmentation progressive de la mortalité en fonction de la concentration

Tableau 6 : Comparaisons dans le temps

Jour	Moyenne (%)	Groupe
J7	62	A
J6	41.33	B
J5	27.33	C
J4	18.13	D
J3	9.33	E
J2	5.33	E
J1	3.33	E

Pour le facteur temps, le test de Tukey montre une augmentation progressive et significative de la mortalité au cours des jours d'exposition. Les premiers jours (**J1 à J3**) ne présentent pas de différences significatives importantes entre eux, indiquant une phase initiale de faible effet toxique. À partir de **J4**, une augmentation significative de la mortalité est observée. Le jour J7 présente la mortalité la plus élevée et se distingue significativement de tous les autres jours. Cela confirme un effet cumulatif du traitement dans le temps.

3.Effet de la dose

La dose létale 50 % (LC50) estimée est : $LC50 = 2.63$ unités de dose

Cela signifie que la concentration nécessaire pour provoquer 50 % de mortalité est d'environ 2.63 unités, indiquant une toxicité modérée de poudre d'eucalyptus contre *T. granarium*.

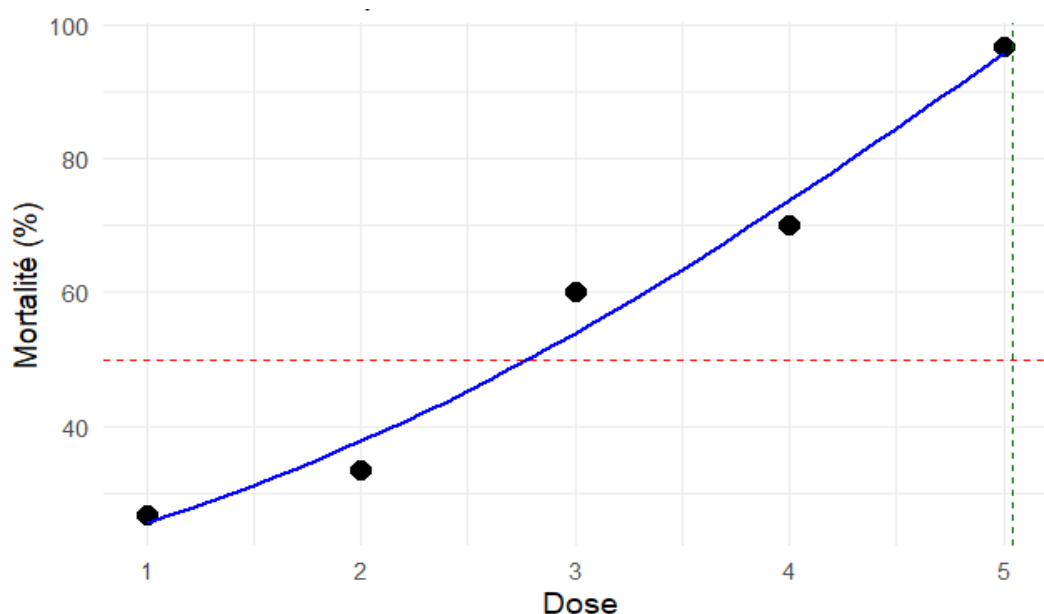


Figure 17 : Concentration létale médiane (LC50) de *T. granarium* en fonction des doses de traitement

1. La LC50 estimée par interpolation se situe entre les doses D2 et D3, avec une valeur approximative de 2.6. Cette valeur est cohérente avec la transition observée entre une mortalité sub-létale et une mortalité supérieure à 50%.

TL50

Pour les doses D1 et D2, le TL50 n'a pas été atteint durant toute la période d'observation (J1 à J7), avec des mortalités finales respectives de 20% et 40%. Ces doses présentent une **faible toxicité**, elles ne permettent pas d'atteindre 50% de mortalité dans le temps expérimental, elles correspondent à des doses sub-létales

Pour la dose D3, le TL50 est estimé à environ **6,25 jours**. La mortalité augmente progressivement dans le temps, l'effet toxique est **modéré**. 50% de mortalité est atteint après une durée relativement longue

Pour la dose D4, le TL50 est d'environ **5,6 jours**. On a enregistré une augmentation de la toxicité, diminution du temps nécessaire pour atteindre 50% de mortalité et effet létal plus rapide et plus marqué

Pour la dose D5, le TL50 est d'environ **4,8 jours**. La toxicité maximale observée, mortalité rapide et efficace, effet biologique fortement accéléré

TL50

Les résultats montrent une diminution progressive du TL50 avec l'augmentation de la dose, indiquant une accélération de la mortalité chez *T. granarium*. Les faibles doses (D1 et D2) n'atteignent pas 50% de mortalité dans la période d'observation, contrairement aux doses intermédiaires et élevées (D3 à D5), qui présentent un effet toxique de plus en plus rapide.

Tableau 7 : Temps létal médian (TL50) de *T. granarium* en fonction des doses et du temps d'exposition

Dose	TL50 (jours)	Interprétation
D1	NA	50% jamais atteint
D2	NA	50% jamais atteint
D3	≈ 6.25	Atteint entre J6–J7
D4	≈ 5.60	Atteint entre J5–J6
D5	≈ 4.80	Atteint entre J4–J5

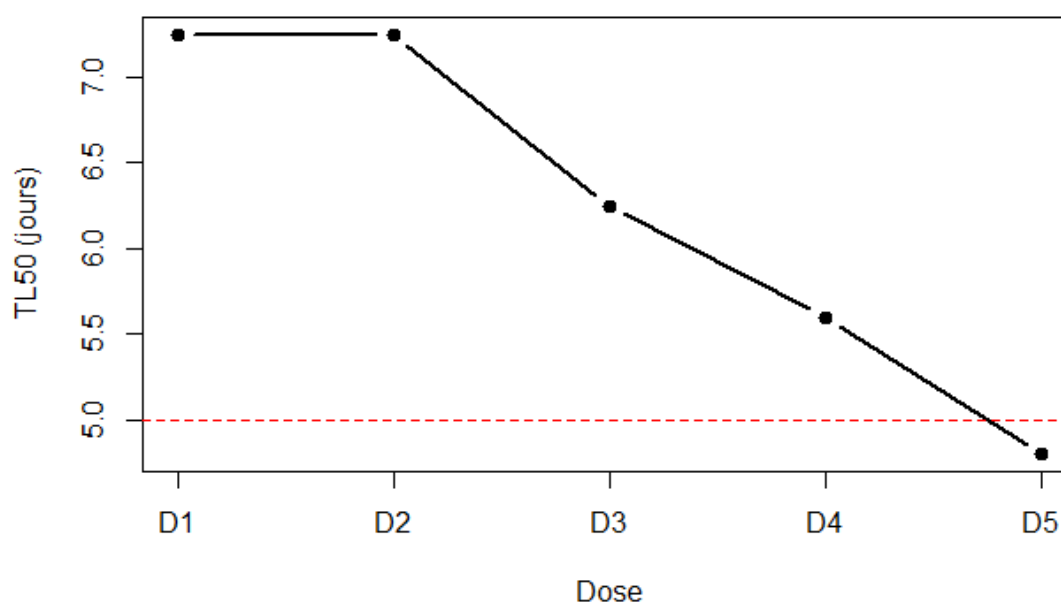


Figure 18 : Temps létal médian (TL50) de *T.granarium* en fonction des doses et du temps d'exposition.

4.Comparaison LC50 vs TL50

Les résultats combinés de la LC50 et du TL50 montrent que l'Eucalyptus possède une forte activité insecticide contre *T.granarium*. La LC50 estimée à 2.63 indique une toxicité élevée, nécessitant une faible dose pour induire 50% de mortalité. Par ailleurs, les TL50 obtenus montrent une réduction progressive du temps létal avec l'augmentation de la dose, variant de 6.25 jours à 4.80 jours. Ces résultats indiquent que l'Eucalyptus agit à la fois rapidement et efficacement, avec une forte relation dose-réponse.

Tableau 8 : Comparaison des LC50 et TL50 de *T. granarium* traité au Bentonite

Paramètre	LC50	TL50
Unité	Dose	Temps
Signification	toxicité du produit	vitesse d'action
Résultat clé	2.63 unités de dose	4.80 – >14 jours
Lecture biologique	efficacité globale élevée	rapidité d'effet dépendante de la dose
Sensibilité	dose-dépendante	temps-dépendante

5.Effet du Bentonite sur de *T.granarium*

Les résultats montrent une augmentation progressive de la mortalité cumulée des adultes de *T.granarium* au cours de la période d'observation, avec une intensité variable selon la dose appliquée. Cette évolution traduit un effet insecticide qui dépend à la fois de la concentration du traitement et de la durée d'exposition.

5.1.Évolution temporelle de la mortalité

Au début de l'expérience (J1 à J5), la mortalité est nulle ou très faible pour la plupart des doses. Les premières mortalités apparaissent uniquement à la dose la plus élevée (D5), indiquant une action plus rapide du traitement à forte concentration. Cette phase initiale suggère l'existence d'un temps de latence avant l'expression complète de l'effet toxique.

À partir de J6, une augmentation progressive de la mortalité est observée pour les doses D3, D4 et D5. Cette tendance se poursuit jusqu'à la fin de l'expérience, ce qui témoigne d'un effet cumulatif du traitement. La mortalité continue d'augmenter avec le temps, indiquant que les individus survivants restent affectés par l'exposition prolongée.

5.2.Effet de la dose

L'effet dose-réponse apparaît clairement à partir de la deuxième moitié de l'expérience. À J14, les mortalités cumulée atteignent : $20,00 \pm 16,33 \%$ pour D1 ; $26,67 \pm 16,33 \%$ pour D2 ; $28,87 \pm 17,55 \%$ pour D3 ; $46,67 \pm 26,67 \%$ pour D4 et $53,33 \pm 32,15 \%$ pour D5.

Cette progression confirme que l'augmentation de la dose entraîne une augmentation de la mortalité. Les doses D1 et D2 présentent un effet relativement faible, tandis que D4 et D5 induisent les mortalités les plus élevées.

5.3.Variabilité entre répétitions

Les écarts-types observés augmentent généralement avec le temps et la dose. Cette augmentation reflète une réponse hétérogène des individus au traitement. Les fortes valeurs d'écart-type observées pour D4 et D5 à la fin de l'expérience indiquent que les répétitions n'ont pas toutes évolué exactement de la même manière, ce qui est fréquent dans les essais biologiques impliquant des organismes vivants.

5.4.Efficacité globale du traitement

Malgré l'augmentation régulière de la mortalité, aucune dose n'a provoqué une mortalité totale de la population au terme des 14 jours d'observation. Même la dose la plus élevée (D5) n'a atteint qu'environ 53 % de mortalité moyenne. Ces résultats suggèrent que le traitement possède une activité insecticide modérée à forte selon la dose, mais que son efficacité reste partielle dans les conditions expérimentales testées.

Tableau 9 : Mortalité (%) $\pm$ écart-type de *T.granarium* traité par le du Bentonite selon les doses et les jours

Jour	D1	D2	D3	D4	D5
J1	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00
J2	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00
J3	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	1.89 $\pm$ 3.27
J4	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	3.27 $\pm$ 3.27
J5	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	5.44 $\pm$ 4.71
J6	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	1.89 $\pm$ 3.27	1.89 $\pm$ 3.27	8.16 $\pm$ 7.05
J7	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	3.27 $\pm$ 5.44	1.89 $\pm$ 3.27	13.72 $\pm$ 11.55
J8	0.00 $\pm$ 0.00	1.89 $\pm$ 3.27	3.27 $\pm$ 5.44	6.67 $\pm$ 5.77	17.55 $\pm$ 15.30
J9	0.00 $\pm$ 0.00	1.89 $\pm$ 3.27	5.44 $\pm$ 8.16	8.16 $\pm$ 7.05	22.22 $\pm$ 18.86
J10	1.89 $\pm$ 3.27	3.27 $\pm$ 5.44	6.67 $\pm$ 8.16	11.11 $\pm$ 9.62	26.67 $\pm$ 21.60
J11	5.44 $\pm$ 4.71	7.05 $\pm$ 7.05	8.16 $\pm$ 8.16	15.30 $\pm$ 13.27	31.62 $\pm$ 25.17
J12	10.00 $\pm$ 8.16	13.27 $\pm$ 8.16	15.30 $\pm$ 11.55	22.22 $\pm$ 16.33	36.67 $\pm$ 28.87
J13	15.30 $\pm$ 13.27	22.22 $\pm$ 13.27	22.22 $\pm$ 13.27	33.33 $\pm$ 20.00	40.00 $\pm$ 30.55
J14	20.00 $\pm$ 16.33	26.67 $\pm$ 16.33	28.87 $\pm$ 17.55	46.67 $\pm$ 26.67	53.33 $\pm$ 32.15

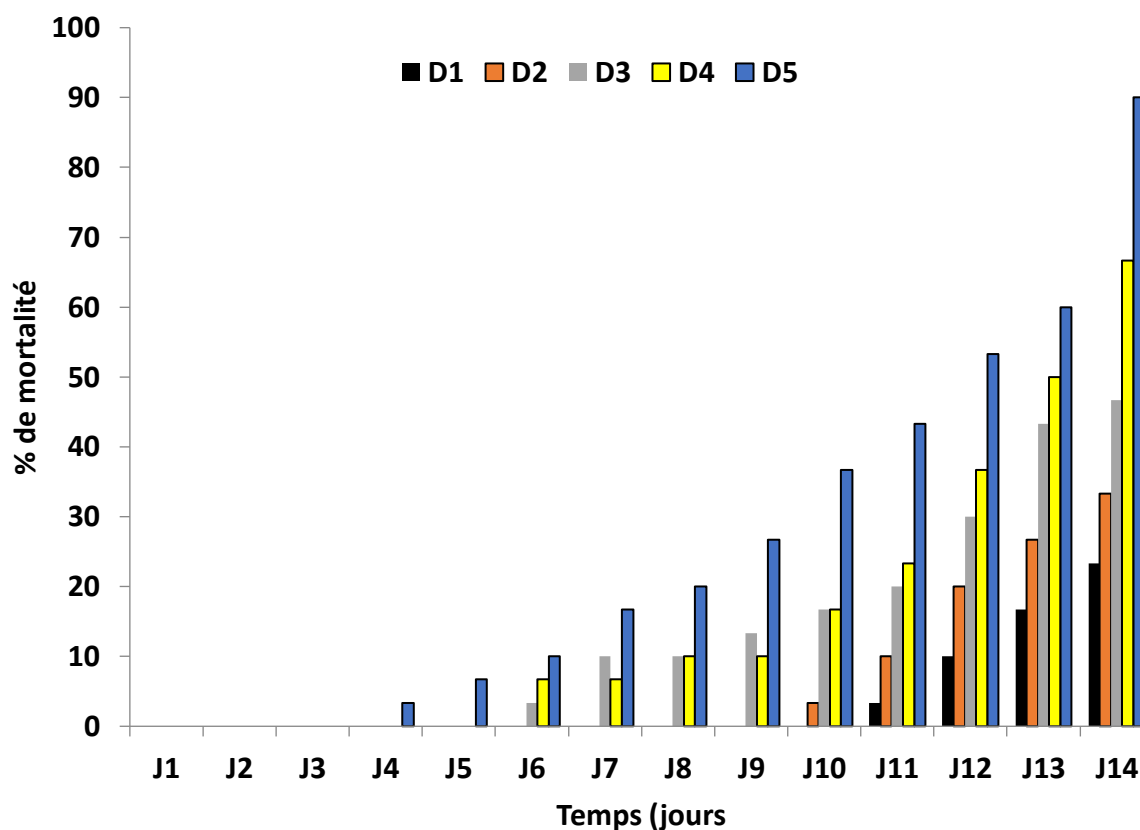


Figure 19 : l'effet des doses du Bentonite sur la mortalité de *T.granarium*

5.5. Analyse de la variance

Tableau 10 : Analyse de variance (ANOVA à un facteur) de l'effet des doses du Bentonite sur la mortalité de *T. granarium*

Source	ddl	Somme des carrés (SS)	Carré moyen (MS)	F	p-value
Dose	4	29612.38	7403.1	68.79	< 0.0001
Temps	13	46859.52	3604.58	33.49	< 0.0001
Dose × Temps	52	20680.95	397.71	3.7	< 0.0001
Erreur	140	15066.67	107.62	—	—
Total	209	112219.52	—	—	—

L'ANOVA à deux facteurs révèle un effet hautement significatif de la dose ($F = 68.79$; $p < 0.0001$) et du temps d'exposition ($F = 33.49$; $p < 0.0001$) sur la mortalité cumulée de *T.granarium*. L'interaction Dose $\times$ Temps est également hautement significative ($F = 3.70$; $p < 0.0001$), indiquant que l'effet des doses varie en fonction de la durée d'exposition.

Ces résultats montrent que la mortalité augmente significativement avec l'augmentation de la dose et du temps d'exposition. De plus, la présence d'une interaction significative suggère que les doses élevées accélèrent davantage la mortalité au cours du temps que les doses faibles.

5.6. Test de Tukey

Le test de Tukey a été réalisé afin d'identifier précisément quelles doses diffèrent significativement les unes des autres après l'ANOVA. Les résultats montrent que l'augmentation de la dose s'accompagne d'une augmentation de la mortalité cumulée de *T. granarium*, mais que toutes les doses ne présentent pas nécessairement des différences significatives entre elles.

6. Tukey pour les doses

La dose D5 a présenté la mortalité moyenne la plus élevée et se distingue significativement des doses les plus faibles. Cette dose apparaît donc comme le traitement le plus efficace pour provoquer la mortalité des insectes. À l'inverse, les doses D1 et D2 ont généré les mortalités les plus faibles et ne montrent généralement pas de différences significatives entre elles, indiquant une efficacité comparable.

La dose D4 occupe une position intermédiaire, avec une efficacité significativement supérieure à celle des faibles doses (D1 et D2), mais inférieure à celle de D5. La dose D3 présente également un effet intermédiaire et peut partager des groupes statistiques avec D2 ou D4 selon le niveau de variabilité observé.

L'ensemble de ces résultats confirme l'existence d'une relation dose-réponse positive : plus la dose augmente, plus la mortalité de *T.granarium* est importante.

Tableau 11 : Les moyennes globales (tous jours confondus) sont approximativement

Dose	Moyenne (%)	Groupe
D5	46.43	A
D4	22.14	B
D3	14.29	Bc
D2	8.57	C
D1	7.14	C

7. Tukey pour le temps

Le test de Tukey appliqué aux jours d'observation révèle une augmentation progressive de la mortalité au cours du temps. Les premiers jours de l'expérience (J1 à J5), caractérisés par des mortalités faibles ou nulles, appartiennent généralement aux mêmes groupes statistiques et ne diffèrent pas significativement les uns des autres.

À partir du milieu de l'expérience, la mortalité augmente progressivement et les jours les plus tardifs (J12 à J14) présentent des mortalités significativement plus élevées que les premiers jours. Le dernier jour d'observation (J14) enregistre les mortalités les plus importantes et se distingue statistiquement de la majorité des jours initiaux.

Tableau 12 : Les moyennes de mortalité augmentent progressivement au cours du temps

Jour	Moyenne (%)	Groupe attendu
J1	0	A
J2	0	Ab
J3	0.67	Bc
J4	1.33	Cd
J5	2	De
J6	4.67	Ef
J7	7.33	Fg
J8	9.33	Gh
J9	12	Hi
J10	14.67	Ij
J11	18	J

J12	24.67	J
J13	29.33	J
J14	35.33	J

LC50

La LC50 estimée par régression logistique (GLM binomial) est de 3.85, indiquant que 50% de mortalité chez *T.granarium* sont atteints à une dose intermédiaire comprise entre D3 et D4. Le modèle est hautement significatif ($p < 0.001$) et présente un excellent ajustement, confirmant une relation dose-réponse marquée.

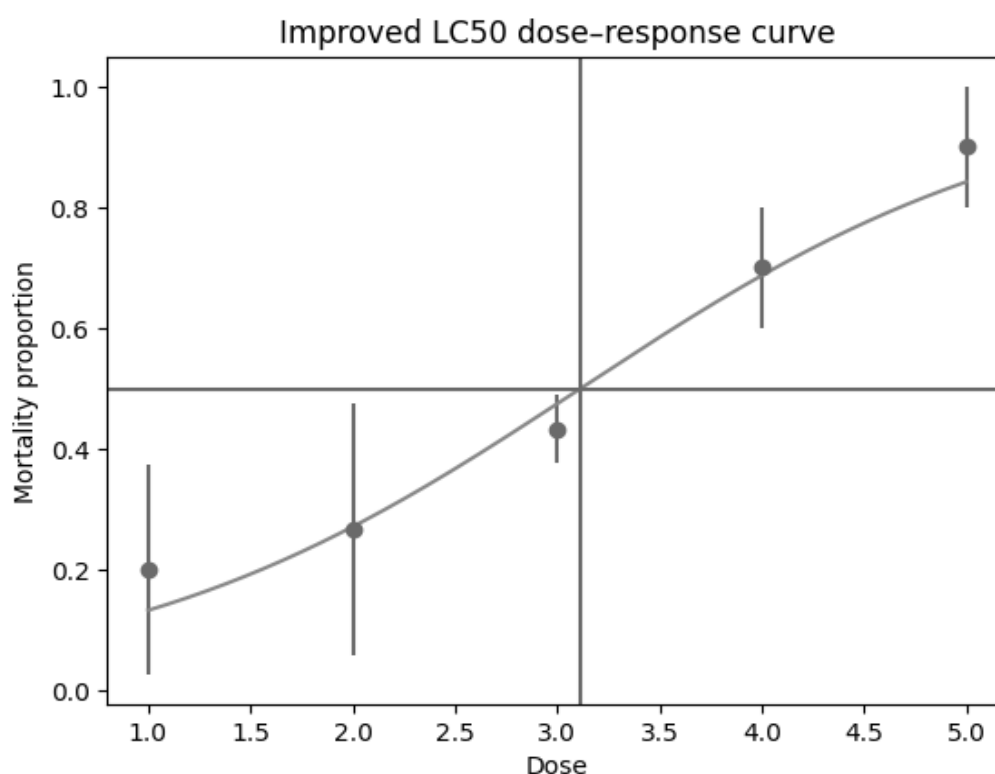


Figure 20: Concentration létale médiane (LC50) de *T.granarium* en fonction des doses de traitement par le Bentonite

TL50

Les résultats du TL50 montrent une relation inverse entre la dose et le temps léthal médian chez *T.granarium*. Les faibles doses (D1–D3) n'ont pas permis d'atteindre 50 % de mortalité durant les 14 jours d'exposition, indiquant une faible efficacité toxique. En revanche, les doses plus élevées (D4 et D5) ont présenté des TL50 respectivement

estimés à environ 12–13 jours et 9–10 jours, traduisant une accélération significative de la mortalité. Ces résultats confirment un effet dose-dépendant marqué du traitement.

Tableau 13 : Temps léthal médian (TL50) de *T. granarium* en fonction des doses et du temps d'exposition au Bentonite

Dose	TL50
D1	>14 jours (non atteint)
D2	>14 jours (non atteint)
D3	>14 jours (non atteint)
D4	~12.8 jours
D5	~9.7 jours

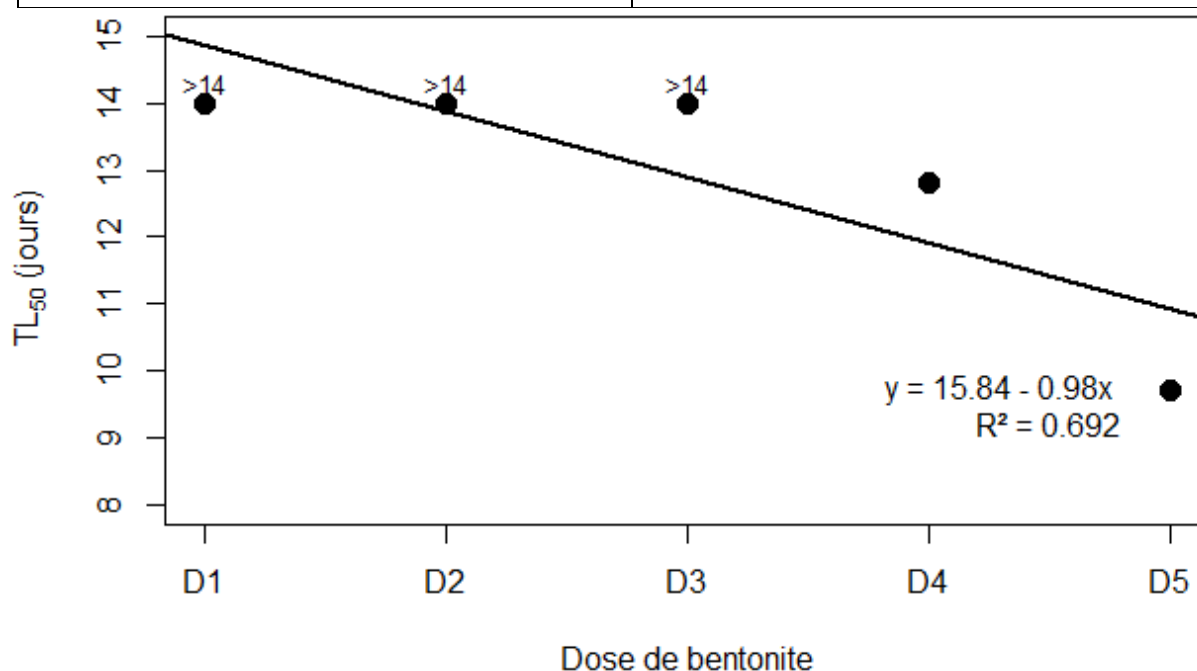


Figure 21 : Temps léthal médian (TL50) de *T.granarium* en fonction des doses et du temps d'exposition au Bentonite.

7.1.Comparaison LC50 vs TL50

La comparaison entre LC50 et TL50 montre que le traitement exerce une action à la fois dose-dépendante et temps-dépendante sur *T.granarium*. La LC50 estimée à 3.85 indique une toxicité modérée à forte du produit, tandis que les TL50 varient de plus de 14 jours aux faibles doses à environ 9.7 jours aux fortes doses. Cette différence met en évidence

une action progressive du produit, caractérisée par une augmentation de la vitesse de mortalité avec l'augmentation de la dose. Ces résultats confirment que l'efficacité du traitement dépend à la fois de la concentration appliquée et du temps d'exposition.

Tableau 14 : comparaison des LC50 et TL50 de *T.granarium* traité au Bentonite

Paramètre	LC50	TL50
Unité	Dose	Temps
Signification	toxicité du produit	vitesse d'action
Résultat clé	3.85	9.7 – >14 jours
Lecture biologique	efficacité globale	rapidité d'effet
Sensibilité	dose-dépendante	temps-dépendante

8.Effet des micro-ondes sur *T. granarium*

L'exposition de *T.granarium* aux micro-ondes entraîne une augmentation significative de la mortalité en fonction du temps. Les résultats montrent une transition nette entre 20 et 40 secondes, avec une TL50 estimée entre 27 et 30 secondes. L'effet observé est attribué à un stress thermique rapide provoqué par l'absorption des micro-ondes, entraînant des altérations cellulaires irréversibles. Ces résultats mettent en évidence le potentiel des micro-ondes comme méthode alternative de lutte physique en stockage des denrées.

Tableau 15 : Effet de l'exposition à différentes sur aux micro-ondes sur *T. granarium*

Temps (s)	R1	R2	R3	Moyenne	% mortalité
10	2	2	0	1.33	13.30
20	3	4	4	3.67	36.70
30	6	5	5	5.33	53.30
40	6	6	7	6.33	63.30
50	9	10	8	9	90.00

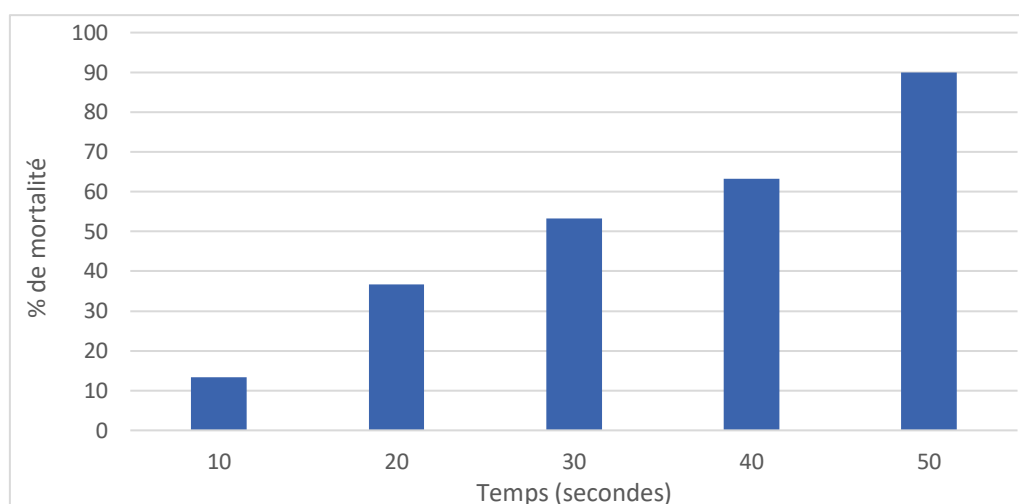


Figure 22 : l'effet des doses Des micro-ondes sur la mortalité de *T.granarium*

Tableau 16 : Analyse de variance (ANOVA à un facteur) de l'effet des micro-ondes sur la mortalité de *T.granarium*

Source	Df	Deviance	Residual Df	Residual Deviance	Pr(>Chi²)
Null model	—	44.458	4	44.458	—
Temps	1	42.361	3	2.097	< 0.001 ***

L'analyse de déviance appliquée au modèle logistique montre que le temps d'exposition a un effet hautement significatif sur la mortalité des individus.

- La comparaison entre le modèle nul et le modèle avec le facteur temps indique une forte réduction de la déviance résiduelle (de 44.46 à 2.10).
- Le test du Chi² associé est hautement significatif ($p < 0.001$), ce qui signifie que l'ajout du facteur temps améliore fortement l'ajustement du modèle.

Tableau 17 : Différences de proportion de mortalité entre les différents temps d'exposition

Comparaison	Différence
20-Oct	0.23
30-Oct	0.4
40-10	0.5
50-10	0.77

Le test de Tukey n'a pas été interprété en raison de l'inadéquation du modèle ANOVA aux données de type binomial, comme en témoignent des estimations instables (NaN). L'analyse repose donc sur un modèle GLM binomial, plus approprié.

TL50

L'analyse Probit a montré une augmentation de la mortalité de *T.granarium* avec l'augmentation du temps d'exposition aux micro-ondes. Le temps létal médian (TL50) a été estimé à **29,17 ± 2,14 s**, avec un intervalle de confiance à 95 % compris entre **24,97 et 33,38s**. Ces résultats indiquent qu'une exposition d'environ 30 secondes est nécessaire pour provoquer la mortalité de 50 % des individus testés.

Tableau 18 : Temps létal médian (TL50) de *T.granarium* exposé aux micro-ondes, estimé par analyse Probit.

Paramètre	Valeur estimée (s)	IC95 %
TL50	29,17	24,97 – 33,38

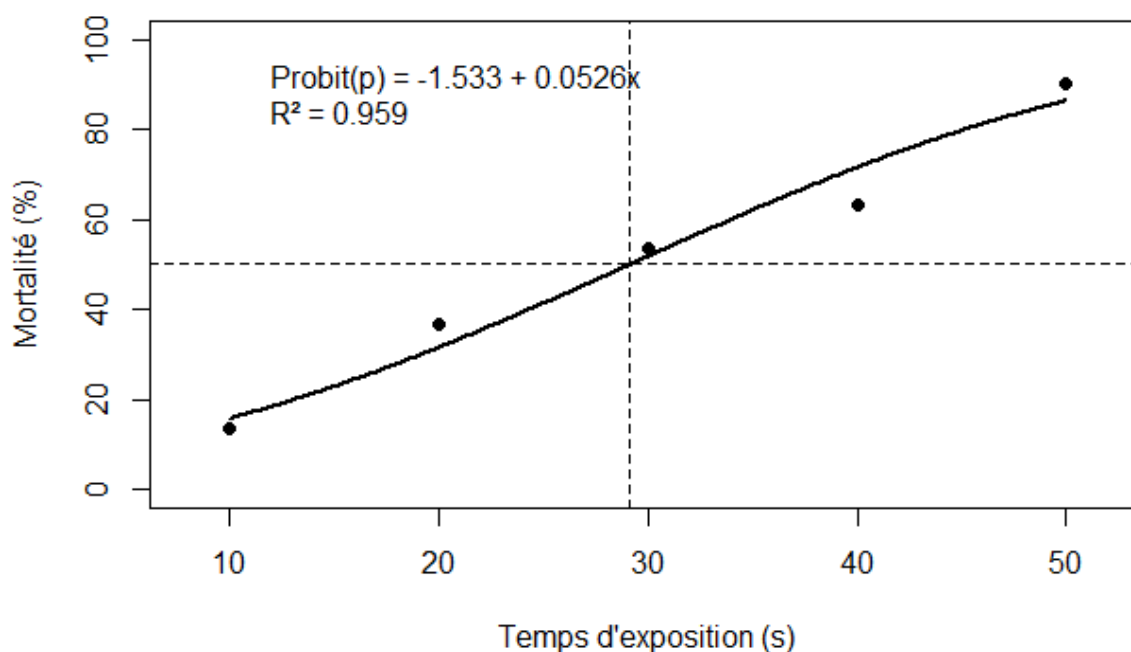


Figure 23 : Temps létal médian (TL50) de *T.granarium* en fonction des doses et du temps d'exposition aux micro-ondes.

Tableau 19 : Comparaisons des trois méthodes de lutte .

Méthode	LC ₅₀ / TL ₅₀	Mortalité Max	Action
Eucalyptus	LC ₅₀ = 2.63	100% (J7/D5)	Toxique, répulsif
Bentonite	LC ₅₀ = 3.85	53.3% (J14/D5)	Déshydratation
Micro-ondes	TL ₅₀ = 29.17s	90% (50s)	Thermique rapide

Chapitre VI

Discussion

Discussion

1.Effet de poudre d'eucalyptus sur *T.granarium*

Les poudres des feuilles des plantes aromatiques présentent un effet toxique sur les insectes comme ils peuvent agir en tant que barrière physique (**Enobakhare, 2007**).

Un certain nombre de ces plantes ont été traditionnellement utilisées pour la protection des denrées stockées, en particulier dans la région méditerranéenne et en Asie du Sud. Cependant, l'intérêt pour ces huiles s'est renouvelé à la suite de l'apparition de preuves démontrant leur activité fumigante contre un large éventail de ravageurs au cours des années 1990 (**Isman ,2006**).

Les résultats obtenus montrent que la mortalité des larves de *Trogoderma granarium* augmente progressivement avec l'augmentation de la dose de poudre d'Eucalyptus et de la durée d'exposition. Cette relation dose-réponse indique que l'efficacité du traitement dépend de la quantité de poudre appliquée ainsi que du temps de contact avec les insectes. Ces résultats sont en accord avec ceux de **Mustafa (2005)**, qui a rapporté que la poudre de feuilles d'*Eucalyptus camaldulensis* exerce une activité biologique importante contre *Trogoderma granarium* et que son efficacité augmente avec l'augmentation de la concentration appliquée. De même, **Hasan et Karso (2023)** ont observé que la poudre de feuilles d'*Eucalyptus oleosa* provoque une augmentation significative de la mortalité des larves de *Trogoderma granarium*.

Les résultats de **Najafabadi, (2010)**. Démontrent que les la poudre de feuilles d'*Eucalyptus camaldulensis* sur *Trogoderma granarium* possèdent une activité insecticides significative contre ce ravageur.

La mortalité observée chez les larves de *Trogoderma granarium* pourrait être attribuée à la présence de plusieurs composés bioactifs dans les feuilles d'Eucalyptus, notamment le 1,8-cinéole (eucalyptol), l' α -pinène, le β -pinène, le limonène et d'autres composés terpéniques. Selon **Isman (2006)**, ces substances possèdent une activité insecticide importante et agissent principalement sur le système nerveux des insectes. Et provoquant des troubles physiologiques, une diminution de l'alimentation, une paralysie progressive puis la mort des larves. De plus, ces composés présentent des propriétés répulsives et antialimentaires qui contribuent à réduire la survie des insectes dans les denrées stockées.

2.Effet des ondes de hautes fréquences (micro-ondes) sur *T.granarium*

Les résultats obtenus démontrent une efficacité élevée du rayonnement micro-ondes dans la lutte contre les larves de *Trogoderma granarium*. Une relation directe a été observée entre le niveau de puissance, la durée d'exposition et le taux de mortalité. Ces résultats sont en accord avec ceux de **Younus et Karso (2023)**, qui démontre que l'effet létal s'explique par la capacité des micro-ondes à pénétrer les tissus de l'insecte, provoquant une oscillation rapide des molécules polaires (notamment l'eau) et générant une chaleur interne par frottement qui augmente la température corporelle de manière fatale. Cette élévation thermique soudaine entraîne la coagulation des protéines et la désintégration des membranes cellulaires, assurant ainsi l'élimination totale du ravageur. Ces résultats concordent avec les observations de **Abotaleb et al. (2021)** sur la dépendance de l'efficacité envers le couple puissance-temps, et confirment les travaux de **Yadav et al. (2014)**, soulignant que cette technique offre une action interne permettant de pénétrer les grains pour atteindre les larves logées à l'intérieur, palliant ainsi les limites des pesticides conventionnels.

3.Effets de de la bentonite sur *T.granarium*

Les résultats obtenus montrent que la mortalité des larves de *Trogoderma granarium* augmente progressivement avec l'augmentation de la dose de bentonite et de la durée d'exposition. Cette tendance est en accord avec les observations de **Al-Naqib et Al-Iraqi (2006)**, qui ont rapporté une activité insecticide de la bentonite contre plusieurs insectes des denrées stockées, notamment *Trogoderma granarium*, et ont montré que son efficacité augmente avec la concentration appliquée. L'effet observé peut être attribué au mode d'action physique de la bentonite. Selon **Golob (1997)**, les poussières inertes agissent en adsorbant les lipides de la couche cireuse de la cuticule des insectes, ce qui provoque une perte excessive d'eau, une déshydratation progressive et finalement la mort. De plus, **Baliota et Athanassiou (2023)** ont confirmé que l'efficacité insecticide des poussières minérales dépend fortement de la dose appliquée, de la durée d'exposition et de la sensibilité de l'espèce ciblée. Ainsi, les fortes mortalités enregistrées aux doses élevées dans notre étude pourraient être expliquées par une adsorption plus importante des lipides cuticulaires et une augmentation du stress

hydrique subi par les larves. Ces résultats suggèrent que la bentonite constitue une alternative naturelle prometteuse pour la protection des denrées stockées contre *Trogoderma granarium*.

Conclusion et Perspectives

Conclusion et Perspectives

Les résultats de ce travail montrent que la lutte contre le coléoptère des grains *Trogoderma granarium* dans les denrées stockées nécessite l'adoption d'approches alternatives et efficaces, en raison de la forte capacité d'adaptation de ce ravageur aux conditions sèches et de la difficulté de son élimination par les méthodes conventionnelles.

Les résultats ont également mis en évidence l'efficacité des ondes de hautes fréquences par le micro-ondes (Micro-onde radiation), qui provoque une mortalité élevée chez les différents stades de l'insecte grâce à un échauffement volumétrique rapide à l'intérieur des grains. Ce mécanisme entraîne une perturbation des fonctions essentielles et provoque une mort rapide des insectes. Toutefois, son efficacité dépend fortement du contrôle des paramètres de traitement afin d'assurer une distribution homogène de la chaleur.

Par ailleurs, les extraits végétaux (poudres) ont montré un intérêt important en tant qu'alternatives naturelles, grâce à leurs effets toxiques et répulsifs sur les insectes, ce qui en fait une option prometteuse dans les stratégies de lutte durable, notamment dans le contexte de la réduction de l'usage des pesticides chimiques.

Dans le même contexte, la bentonite peut être considérée comme un agent d'appoint important dans la gestion des ravageurs des stocks. Grâce à ses propriétés d'adsorption, elle contribue à réduire l'humidité du milieu et à créer des conditions défavorables au développement des insectes, ce qui affaiblit leur activité biologique et reproductive et renforce ainsi l'efficacité des autres méthodes de lutte lorsqu'elle est utilisée dans une approche intégrée.

Ainsi, la combinaison du rayonnement micro-ondes, des extraits végétaux et de la bentonite représente une stratégie prometteuse dans le cadre de la lutte intégrée (IPM), visant à assurer une protection efficace et durable des denrées stockées tout en réduisant le recours aux insecticides chimiques.

Enfin, cette étude recommande l'utilisation du traitement par micro-ondes comme méthode curative efficace dans les entrepôts et silos, tout en améliorant les dispositifs afin d'assurer une répartition homogène de la chaleur. Elle encourage également l'utilisation de poudres de plantes comme méthode préventive naturelle pour limiter les

infestations et leur réapparition. L'intégration de la bentonite est également recommandée en raison de son rôle dans l'amélioration des conditions physiques défavorables aux insectes, avec la possibilité de la combiner avec les extraits végétaux pour obtenir un effet synergique. Enfin, il est conseillé d'appliquer ces techniques dans des conditions de stockage réelles et de réaliser des études économiques afin d'évaluer leur faisabilité à grande échelle par rapport aux insecticides chimiques.

Liste des Références

1. **Abdel-Sattar, E., Zaitoun, A. A., Farag, M. A., Gayed, S. H. E. I., & Harraz, F. M. H. (2010).** Chemical composition, insecticidal and insect repellent activity of *Schinus molle* L. leaf and fruit essential oils against *Trogoderma granarium* and *Tribolium castaneum*. *Natural Product Research*, 24, 226–235.
2. **Abdullah, F. A., Al-Samarrai, G. F., & Mahdi, W. M. (2020).** Efficiency of different treatments in controlling insect (*Trogoderma granarium*) in storage of wheat grain. *Plant Archives*, 20(2), 1506-1508.
3. **Abotaleb, A. O., Badr, N. F., & Rashed, U. M. (2021).** Assessment of the potential of non-thermal atmospheric pressure plasma discharge and microwave energy against *Tribolium castaneum* and *Trogoderma granarium*. *Bulletin of Entomological Research*, 111(5), 528-543.
4. **Adler, C., Athanassiou, C., Carvalho, M. O., Emekci, M., Gvozdenac, S., Hamel, D. & Trematerra, P. (2022).** Changes in the distribution and pest risk of stored product insects in Europe due to global warming: Need for pan-European pest monitoring and improved food-safety. *Journal of Stored Products Research*, 97, 101977.
5. **Agha, W., Amin, A., Khidr, S., and Ismail, A. (2017).** Entomocidal activity of microwave energy & some aqueous plant extracts against *Tribolium castaneum* Herbst & *Trogoderma granarium* Everts. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1888, No. 1, p. 020005). AIP Publishing LLC.
6. **Aitken, A. D. (1975).** Insect travellers. *Technical Bulletin 31*, Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, London, UK.
7. **ALEXENDREIN, D. (1992).** Essences forestières, Guide technique du forestier méditerranéen français. Edition techniques et documentation lavoisier, paris. 80p.
8. **Almadiy, A. A., Nenaah, G. E., & Shawer, D. M. (2017).** Facile synthesis of silver nanoparticles using harmala alkaloids and their insecticidal and growth inhibitory activities against the khapra beetle. *Journal of Pest Science*, 91, 727–737.

9. **Al-Naqib, S. Q., & Al-Iraqi, R. A. (2006).** Inert Dusts to Control Adults of Some Stored Product Insects in Stored Wheat. *Rafidain Journal of Science*, 17(11), 26-33.
10. **Arar, Z., & Houari, S. (2008).** Etude de comportement de quelque peuplement de boisement dans la région de Ouargla. Thèse d'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Biologie, Université de Kasdi Merbah-Ouargla, Algérie.
11. **Arbogast, R. T., Weaver, D. K., Kendra, P. E., & Brenner, R. J. (1998).** Implications of spatial distribution of insect populations in storage ecosystems. *Environmental Entomology*, 27, 202-216.
12. **Arnold, R. J., & Luo, J. (2018).** *Eucalyptus camaldulensis*. In: Thomson L., Doran J., & Clarke B. (eds). *Trees for life in Oceania: conservation utilization of genetic diversity*. ACIAR Monograph No. 201. Australian Centre for International Agricultural Research: Canberra. pp. 94-99.
13. **Athanassiou, C. G., Kavallieratos, N. G., & Boukouvala, M. C. (2016).** Population growth of the khapra beetle, *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae) on different commodities. *Journal of Stored Products Research*, 69, 72–77.
14. **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(1), 131-148.
15. **Aurelie Cendres. (2010).** Procédé novateur d'extraction de jus de fruits par micro-onde : viabilité de fabrication et qualité nutritionnelle des jus. Thèse de doctorat, Université d'Avignon.
16. **Baliota, G. V., & Athanassiou, C. G. (2023).** Evaluation of inert dusts on surface applications and factors that maximize their insecticidal efficacy. *Applied Sciences*, 13(5), 2767.
17. **Banks, H. J. (1977).** Distribution and establishment of *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae): climatic and other influences. *Journal of Stored Products Research*, 13, 183–202.
18. **Banks, H. J., & Fields, P. (1995).** Physical methods for insect control in stored-grain.

19. **Barak, A. V. (1989).** Development of a new trap to detect and monitor khapra beetle (Coleoptera: Dermestidae). *Journal of Economic Entomology*, 82, 1470-1477.
20. **Barnes, J. H., & Grove, A. J. (1916).** The insects attacking stored wheat in the Punjab and the methods of combating them, including a chapter on the chemistry of respiration. *Memoirs of the Department of Agriculture in India, Chemical Series*, 4, 165–280.
21. **Beal, R. S. (1956).** Synopsis of the economic species of *Trogoderma* occurring in the United States with description of a new species (Coleoptera, Dermestidae). *Annals of the Entomological Society of America*, 49, 559-566.
22. **Beal, R. S. (1960).** Descriptions, biology and notes on the identification of some *Trogoderma* larvae (Coleoptera, Dermestidae). *Technical Bulletin, United States Department of Agriculture*, No. 1226, 26 pp.
23. **Bell, C. H. (1994).** A review of diapause in stored-product insects. *Journal of Stored Products Research*, 30, 99–120.
24. **Benayache, F., Benayache, S., & Benyahia, S. (2001).** Leaf oils of some *Eucalyptus* species growing in Algeria. *Journal of Essential Oil Research*, 13(3), 210-213.
25. **Bettahar, F. (2016).** Conception et prototypage d'un système complet pour la surveillance du grain dans les silos de stockage. Dissertation doctorale, Université Toulouse le Mirail-Toulouse II.
26. **Bram, G. et coll. (1992).** Microwave activation of reaction on inorganic solid supports and catalysis in organic synthesis. Edit. K. Smith, F. Harwood and P. Hall, Chichester, England.
27. **Brower, J. H., Smith, L., Vail, P. V., & Flinn, P. W. (1996).** Biological Control, pp. 223-286. In: Subramanyam, B. & Hagstrum, D. W. (Eds.) *Integrated management of insects in stored products*. Marcel Dekker, Inc., New York.
28. **Burges, H. D. (1959).** Studies on the dermestid beetle *Trogoderma granarium* Everts: III. Ecology in malt stores. *Annals of Applied Biology*, 47, 445–62.
29. **Burges, H. D. (1962).** Diapause, pest status and control of the khapra beetle, *Trogoderma granarium* Everts. *Annals of Applied Biology*, 50, 614–17.

30. **Burges, H. D. (2008).** Development of the khapra beetle, *Trogoderma granarium*, in the lower part of its temperature range. *Journal of Stored Products Research*, 44, 32–35.
31. **Cis, J., Nowak, G., & Kisiel, W. (2006).** Antifeedant properties and chemo taxonomic implications of sesquiterpene lactones and syringin from *Rhaponticum pulchrum*. *Biochemical Systematics and Ecology*, 34, 862–867.
32. **Cotton, R. T. (1956).** Pests of Stored Grain and Grain Products. Minneapolis, MN: Burgess Publ. Minneap.
33. **Cruz, J. F., & Troude, F. (1988).** Conservation des Grains en Régions Chaudes. Collection du Ministère de la Coopération et du Développement. Techniques Rurales en Afrique. CEEMAT / CIRAD: Montpellier; 548.
34. **Dash, M. S. S., Pradhan, P. P., Sahoo, S., Nag, M. Y. K., & Sorahia, M. D. (2025).** Advances in Applied Entomology.
35. **Day, C., & White, B. (2016).** Khapra beetle, *Trogoderma granarium* interceptions and eradications in Australia and around the world. *Work. Paper 1609*, School of Agricultural and Resource Economics, University of Western Australia, Crawley, Australia.
36. **Delfosse, E. S. (2005).** Risk and ethics in biological control. *Biological Control*, 35, 319-329.
37. **Demirbas, A. (2009).** Agriculturally based activated carbons for the removal of dyes from aqueous solutions: a review. *Journal of Hazardous Materials*, 167(1-3), 1-9.
38. **Demissie, G. (2006).** Field infestation of maize by *Sitophilus zeamais* (Mostch.) (Coleoptera: Curculionidae) at Bako and its management on stored maize. MSc Thesis, Haramaya University, Ethiopia.
39. **Deng, Y., White, G. N., & Dixon, J. B. (2002).** Effect of structural stress on the intercalation rate of kaolinite. *Journal of Colloid and Interface Science*, 250(2), 379-393.
40. **Dillon, K. (1968).** Report on Visit to USA and Canada by Mr. K. Dillon, Plant Quarantine Entomologist, to Investigate All Aspects of Khapra Beetle *Trogoderma granarium*. Canberra, Australia: Plant Quarantine Branch.

41. **Donahaye, E. J. (2000).** Current status of non-residual control methods against stored product pests. *Crop Protection*, 19(8-10), 571-576.
42. **Ebeling, W. (1971).** Sorptive dusts for pest control. *Annual Review of Entomology*, 16, 123-158.
43. **Ennajih, H. (2014).** Synthèse de nouveaux surfactants pour la modification des argiles, étude et caractérisation des nanocomposites et biocomposites produits.
44. **Enobakhare, D. (2007).** The use of leaf powders of *Ocimum gratissimum* and *Vernonia amygladina* for the management of *Sitophilus oryzae* (L.) in stored rice. *Journal of Entomology*, 4, 253-257.
45. **EPPO. (2026).** *Trogoderma granarium* (TROGGA). EPPO Global Database. Classification et taxonomie. Consulté le 03 juin 2026, disponible en ligne: <https://gd.eppo.int/taxon/TROGGA>
46. **Eur. Mediterr. Plant Prot. Org. (2013).** PM 7/13 (2) *Trogoderma granarium*. EPPO Bulletin, 43, 431–448. (تم دمج اللغتين OEPP/EPPO 2013 هو نفسه مرجع)
47. **Faber, W. (1971).** [Le dermeste du grain, un cosmopolite dangereux]. *Pflanzenarzt*, 24, 65-68.
48. **FAO. (1982).** Les Eucalyptus dans le reboisement, N0 11, 648p. Rome.
49. **FAO. (1994).** Stockage et conservation des grains. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome. / Grain storage techniques: Evolution and trends in developing countries. *FAO Agricultural Services Bulletin* No. 109.
50. **Ferron, P., & P.H. Robert. (1975).** Virulence of entomopathogenic fungi (fungi imperfecti) for the adults of *Acanthoscelides obtectus* (Coleoptera: Bruchidae). *Journal of Invertebrate Pathology*, 25, 379-388.
51. **Follett, P. A., Snook, K., Janson, A., Antonio, B., Haruki, A., Okamura, M., & Bisel, J. (2013).** Irradiation quarantine treatment for control of *Sitophilus oryzae* (Coleoptera: Curculionidae) in rice. *Journal of Stored Products Research*, 52, 63-67.

52. **FoodAgric.Org.U.N. (2016).** DP3: *Trogoderma granarium* Everts. ISPM27, Annex 3. Diagnostic Protocols for Regulated Pests. Rome, Italy: Food Agric. Org. U.N. (هو نفسه مرجع IPPC 2016)
53. **Foudil-Cherif, Y., Meklati, B. Y., Verzera, A., Mondello, L., & Dugo, G. (2000).** Chemical Examination of Essential Oils from the Leaves of Nine *Eucalyptus* Species Growing in Algeria. *Journal of Essential Oil Research*, 12(2), 186-191.
54. **Goetz, P., & Ghedira, K. (2012).** Phytothérapie infectieuse, Springer Verlag, France, p. 272.
55. **Golizadeh, A., & Abedi, Z. (2016).** Comparative performance of the khapra beetle, *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae) on various wheat cultivars. *Journal of Stored Products Research*, 69, 159–165.
56. **Golob, P. (1997).** Current status and future perspectives for inert dusts for control of stored product insects. *Journal of Stored Products Research*, 33, 69–79.
57. **Goudoum, A. (2010).** Impact des huiles essentielles sur le potentiel technologique et nutritionnel des grains et farine de maïs au cours du stockage. Thèse de Doctorat, ENSAI, Université de Ngaoundéré, Cameroun, 180 p.
58. **Hagstrum, D. W., Phillips, T. W., & Cuperus, G. (Éds.). (2012).** Stored Product Protection. Manhattan, Kansas: Kansas State University Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service. ISBN 978-0-9855003-0-6.
59. **Hamid, M., & Boulanger, R. (1969).** A new method for the control of moisture and insect infestations of grain by microwave power. *Journal of Microwave Power*, 4, 11-18.
60. **Hamid, M., Kashyap, C., & Van Cauwenberghe, R. (1968).** Control of grain insects by microwave power. *Journal of Microwave Power*, 3, 126-135.
61. **Hebbar, R. S., Isloor, A. M., & Ismail, A. F. (2014).** Preparation and evaluation of heavy metal rejection properties of polyetherimide/porous activated bentonite clay nanocomposite membrane. *RSC Advances*, 4(88), 47240-47248.
62. **Hinton, H. E. (1945).** A monograph of the beetles associated with stored products. Vol 1. British Museum (Natural History), London, Royaume-Uni. pp. 387-395.

63. **Hluchy, M., & Samsinakova, A. (1989).** Comparative study on the susceptibility of adult *Sitophilus granarius* (L.) (Coleoptera: Curculionidae) and larval *Galleria mellonella* (L.) (Lepidoptera: Pyralidae) to the entomogenous fungus *Beauveria bassiana* (Bals.) Vuill. *Journal of Stored Products Research*, 25, 61-64.
64. **Hosseinzadeh, A., Shayesteh, N., Zolfaghari, H. R., Babaei, M., Zareshahi, H., Mostafavi, H. A., & Fatollahi, H. (2010).** Gamma radiation sensitivity of different stages of saw-toothed grain beetle *Oryzaephilus surinamensis* L. (Coleoptera: Silvanidae). *Journal of Plant Protection Research*, 50(3).
65. **Howe, R. W., & Lindgren, D. L. (1957).** How much can the khapra beetle spread in the USA? *Journal of Economic Entomology*, 50, 374–75.
66. **Hurlock, E., Llewelling, B., & Stables, L. (1979).** Microwaves can kill insect pests. *Food Manufacture*, 54(8), 37.
67. **Iqbal, J., Ahmad, S., & Ali, Q. (2021).** A comparative study on the virulence of entomopathogenic fungi against *Trogoderma granarium* (Everts)(Coleoptera: Dermestidae) in stored grains rice. *Brazilian Journal of Biology*, 82, e250778.
68. **Isman, M. B. (2006).** Botanical insecticides, deterrents, and repellents in modern agriculture and an increasingly regulated world. *Annual Review of Entomology*, 51, 45–66.
69. **Janaki, S., Zandi-Sohani, N., Ramezani, L., & Szumny, A. (2018).** Chemical composition and insecticidal efficacy of *Cyperus rotundus* essential oil against three stored product pests. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 133, 93–98.
70. **Jood, S., Kapoor, A. C., & Singh, R. (1992).** Mineral contents of cereal grains as affected by storage and insect infestation. *Journal of Stored Products Research*, 28, 147–51.
71. **Jood, S., Kapoor, A. C., & Singh, R. (1993).** Biological evaluation of protein quality of sorghum as affected by insect infestation. *Plant Foods for Human Nutrition*, 43, 105–14.
72. **Kadir, S., Ülah, T., Önalgil, N., Erkoyun, H., & Elliott, W. C. (2017).** Mineralogy, geochemistry, and genesis of bentonites in miocene volcanic-sedimentary units of the ankara-Çankiri basin, central anatolia, Turkey. *Clays and Clay Minerals*, 65, 64–91.

73. **Kanouri, R., & Labide, A. (2013).** Adsorption du phénol sur la bentonite de Maghnia. Pour l'obtention du diplôme de magistère, Université Kasdi Merbah Ouargla. p. 7.
74. **Karunakaran, C., Jayas, D., White, N., et others. (2003).** Soft X-ray inspection of wheat kernels infested by *Sitophilus oryzae*. *Transactions of the ASAE*, 46(3), 739–745.
75. **Kavallieratos, N. G., Athanassiou, C. G., & Boukouvala, M. C. (2017).** Invader competition with local competitors: displacement or coexistence among the invasive khapra beetle, *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae), and two other major stored-grain beetles? *Frontiers in Plant Science*, 8, 1837.
76. **Kebir, B. (2018).** Etude dendrométrique d'*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh dans trois stations de la Wilaya de Tlemcen. Mémoire de Master, Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, Algérie.
77. **Khiari, C. (2013).** Séchage par vapo-décompression combiné aux micro-ondes: Application aux produits agroalimentaires. Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, France.
78. **Koreichi, N., & Benletreche, M. S. (2019).** Synthèse des propriétés physicochimique et biologiques de l'espèce *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. Mémoire de Master, Université Constantine 1, Algérie.
79. **Korichi, S. (2014).** Etude de l'activation de la bentonite algérienne par des méthodes classiques et sous irradiations micro-ondes: Application à la décoloration des huiles végétales. Thèse de doctorat, École Nationale Polytechnique, Alger, Algérie.
80. **Kundu, B., Okram, S., Hath, T. K., & Chakraborty, D. (2018).** Potentiality of some inert materials as grain protectant against rice weevil, *Sitophilus oryzae* (L.) on stored wheat grains. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 6(3), 1271-1274.
81. **Lindgren, D. L., & Vincent, L. E. (1959).** Biology and control of *Trogoderma granarium* Everts. *Journal of Economic Entomology*, 52, 312–19.
82. **Lindgren, D. L., Vincent, L. E., & Krohne, H. E. (1955).** The khapra beetle, *Trogoderma granarium* Everts. *Hilgardia*, 24, 1–36.

83. **Loschiavo, S. R., & Atkinson, J. M. (1973).** An improved trap to detect beetles (Coleoptera) in stored grain. *The Canadian Entomologist*, 105(3), 437-440.
84. **Loupy, A. (1994).** Les micro-ondes: leurs applications potentielles dans la chimie. *OCL*, N°1 Vol. 1.
85. **Majd-Marani, S., Naseri, B., Nouri-Ganbalani, G., & Borzoui, E. (2017).** The effect of maize hybrid on biology and life table parameters of the *Trogoderma granarium* (Coleoptera: Dermestidae). *Journal of Economic Entomology*, 110, 1916–1922.
86. **Majd-Marani, S., Naseri, B., Nouri-Ganbalani, G., & Borzoui, E. (2018).** Maize hybrids affected nutritional physiology of the khapra beetle, *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae). *Journal of Stored Products Research*, 77, 20–25.
87. **Manickavasagan, A., Jayas, D. S., & White, N. D. G. (2008).** Thermal imaging to detect infestation by *Cryptolestes ferrugineus* inside wheat kernels. *Journal of Stored Products Research*, 44(2), 186-192.
88. **McGaughey, W. H. (1976).** *Bacillus thuringiensis* for controlling three species of moths in stored grain. *The Canadian Entomologist*, 108, 105-112.
89. **McGaughey, W. H., & Beeman, R. W. (1985).** Insect resistance to the biological insecticide *Bacillus thuringiensis*. *Science*, 229, 193-195.
90. **Mebarkia A., Khalfi O. et Guechi A., 2001.** Problèmes phytosanitaires des céréales stockées en régions semi-aride. Journées Scientifiques et Techniques Phytosanitaires, 12et 13 Nov, MAP, INPV El-Harrach, 119-126.
91. **Mekkellech, H. / Mekkelleche, H. (2015).** Contribution à l'étude morphométrique d'*Eucalyptus globulus* Labill (Myrtacées) dans la région de Tlemcen. Thèse de Master, Université Aboubaker Belkaid, Tlemcen.
92. **Meziane, H. (1996).** L'Eucalyptus en Algérie un arbre controversé en forêt Algérienne N°1. Edité par I.N.R.F. Bainem, 5 -10.
93. **Milner, M., Lee, M. R., & Katz, R. (1952).** Radiography applied to grain and seeds.

94. **Mohapatra, D., Kar, A., & Giri, S. K. (2015).** Insect pest management in stored pulses: an Overview. *Food and Bioprocess Technology*, 8(2), 239-265.
95. **Moino Jr, A., Alves, S. B., & Pereira, R. M. (1998).** Efficacy of *Beauveria bassiana* (Balsamo) Vuillemin isolates for control of stored-grain pests. *Journal of Applied Entomology*, 122(1-5), 301-305.
96. **Molins, R. A. (Ed.). (2001).** *Food irradiation: principles and applications*. John Wiley & Sons.
97. **Moore, D., Lord, J. C., & Smith, S. M. (2000).** Pathogens, pp. 191-227. In: Subramanyam, B. & Hagstrum, D. W. (Eds.) *Alternatives to pesticides in stored-product entomology*. Kluwer, Boston.
98. **Muir, W. (2000).** Grain preservation biosystems. University of Manitoba. Winnipeg, Manitoba. Canada: 45-67.
99. **Myers, S. W., & Hagstrum, D. H. (2012).** Quarantine. In: *Stored Product Protection*, ed. DH Hagstrum, TW Philips, G Cuperus, pp. 297–304. Manhattan, KS: Kansas State Univ.
100. **Najafabadi, S. S. M. (2010).** Evaluate effects of *Azadirachta indica* Adr. Juss. leaf powder and *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. seed and leaf powder on stored product pests (*Trogoderma granarium* and *Tribolium* sp.) of wheat and barley.
101. **Nanje Gowda, N. A., & Alagusundaram, K. (2013).** Use of thermal imaging to improve the food grains quality during storage. *International Journal of Current Agricultural Research*, 1(7), 34-41.
102. **Navarro, S., Finkelman, S., Sabio, G., Isikber, I., Dias, R., Rindner, M., & Azrieli, A. (2002).** Quarantine treatment of storage insect pests under vacuum or CO₂ in transportable systems. In: Batchelor TA, Bolivar JM (eds) *Proceedings of International Conference on Alternatives to Methyl Bromide “The Remaining Challenges”*, 5–8 March, Sevilla, Spain, pp. 375–379.
103. **Neethirajan, S., Karunakaran, C., Jayas, D. S., & White, N. D. G. (2007).** Detection techniques for stored-product insects in grain. *Food Control*, 18(2), 157-162.

- 104. Nenaah, G. E. (2011).** Toxic and antifeedant activities of potato glycoalkaloids against *Trogoderma granarium* (Coleoptera: Dermestidae). *Journal of Stored Products Research*, 47, 185–190.
- 105. Odeyemi, O. O., & Hassan, A. T. (1993).** Influence of temperature, humidity and photoperiod on oviposition and larval development in *Trogoderma*. *Applied Entomology and Zoology*, 28(3), 275–81.
- 106. OEPP. (1981).** Fiche informative sur les organismes de quarantaine: *Trogoderma granarium*. *Bulletin OEPP/EPPO Bulletin*, 11(1), n° 121.
- 107. OEPP/EPPO. (2012).** Phosphine fumigation of stored products to control *Trogoderma granarium*. *EPPO Bulletin*, 42, 501–503.
- 108. Oyen, L. P. A., & Lemmens, R. H. M. J. (2002).** Ressources végétales de l'Afrique tropicale. Programme PROTA Wageningen. Pays-Bas. 207pp. ISBN 90-77114-033.
- 109. Paini, D. R., & Yemshanov, D. (2012).** Modelling the arrival of invasive organisms via the international marine shipping network: a khapra beetle study. *PLoS ONE*, 7(9), e44589.
- 110. Park, J. H., Shin, H. J., Kim, M. H., Kim, J. S., Kang, N., Lee, J. Y., ... & Kim, D. D. (2016).** Application of montmorillonite in bentonite as a pharmaceutical excipient in drug delivery systems. *Journal of Pharmaceutical Investigation*, 46, 363–375.
- 111. Pasek, J. E. (1998).** USDA Pest Risk Assessment: Khapra Beetle. Sponsored by CERIS, Purdue University.
- 112. Pavela, R., Morshedloo, M. R., Lupidi, G., Carolla, G., Barboni, L., Quassinti, L., ... & Benelli, G. (2020).** The volatile oils from the oleo-gum-resins of *Ferula assa-foetida* and *Ferula gummosa*: A comprehensive investigation of their insecticidal activity and ecotoxicological effects. *Food and Chemical Toxicology*, 140, 111312.
- 113. Popławski, J., Łozowicka, B., Dubis, A. T., Lachowska, B., Winiecki, Z., & Nawrot, J. (2000).** Feeding-deterrent activity of α -asarone isomers against some stored Coleoptera. *Pest Management Science*, 56, 560–564.

114. Pruthi, H. S., & Singh, M. (1950). Pests of stored grain and their control. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 18, 1–88.
115. Rahman, K. A., Sohi, G. S., & Sapra, A. N. (1945). Studies on stored grain pests in the Punjab. VI. Biology of *Trogoderma granarium* Everts. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 15, 85–92.
116. Rameau, J. C., Mansion, D., Dume, G., & Gauberville, C. (2008). Flore forestière française. Tome 3 région méditerranéenne, Editeur: IDF (Institut pour le développement forestier), France.
117. Rechcigl, J. E., & Rechcigl, N. A. (2016). *Insect pest management: techniques for environmental protection*. CRC Press.
118. Riudavets, J. (2017). Biological Control of stored products pests. *IOBC-WPRS BULLETIN*.
119. Sagheer, M., & Sahi, S. T. (2019). Bio-efficacy of entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana* (Bals.) against *Trogoderma granarium* (Everts) and *Tribolium castaneum* (Herbst). *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 56(2).
120. Salazar, S., McCarthy, P. J., Trainor, T., & Fowell, S. J. (2010). Paleoclimatic interpretation of the Prince Creek Formation based on clay mineralogy developed in paleosols. AGS (Alaska Geol. Soc. Annu. Meet.), Anchorage, Alaska.
121. Saxena, B. P., Sharma, P. R., Thappa, R. K., & Tikku, K. (1992). Temperature induced sterilization for control of three stored grain beetles. *Journal of Stored Products Research*, 28, 67–70.
122. Schöller, M., & Flinn, P. W. (2000). Parasitoids and predators. *Alternatives to pesticides in stored-product IPM*. Springer, 229-271.
123. Schöller, M., Flinn, P. W., Grieshop, M. J., & Zdarkova, E. (2006). Biological control of stored-product pests. *Insect management for food storage and processing*, 67-87.
124. Schöller, M., Prozell, S., Al-Kirshi, A. G., & Reichmuth, C. (1997). Towards biological control as a major component of integrated pest management in stored product protection. *Journal of Stored Products Research*, 33, 81-97.

125. Seifi, S., Naseri, B., & Razmjou, J. (2015). Nutritional physiology of the khapra beetle, *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae) fed on various barley cultivars. *Journal of Economic Entomology*, 109, 472–477.
126. Shaaya, E., Kostijukovski, M., Eilberg, J., & Sukprakarn, C. (1997). Plant oils as fumigants and contact insecticides for the control of stored product insects. *Journal of Stored Products Research*, 33, 7-15.
127. Shuman, D., Coffelt, J. A., & Weaver, D. K. (1996). A computer-based electronic fall-through probe insect counter for monitoring infestation in stored products. *Transactions of the ASAE*, 39(5), 1773-1780.
128. Sinha, A. K., & Sinha, K. K. (1990). Insect pests, *Aspergillus flavus* and aflatoxin contamination in stored wheat: A survey at North Bihar (India). *Journal of Stored Products Research*, 26(4), 223–226.
129. Sinha, R. N., & Utida, S. (1967). Climatic areas potentially vulnerable to stored product insects in Japan. *Applied Entomology and Zoology*, 2, 124–32.
130. Srivastava, S., & Mishra, H. N. (2021). Ecofriendly nonchemical/nonthermal methods for disinfestation and control of pest/fungal infestation during storage of major important cereal grains: A review. *Food Frontiers*, 2, 93-105.
131. Tazerouti-Bendiffallah L., Bakour K. et Kellouch A.E.K., 2001. Etat sanitaire des denrées entreposées dans les unités de stockage de Draa Ben Khedda, Bouira et AinBessam. Journées Scientifiques et Techniques Phytosanitaires, 12 et 13 Nov, MAP,INPV El- Harrach, 355-360.
132. Thiombiano, L. (1984). Première approche de l'influence du reboisement en *Eucalyptus camaldulensis* sur des sols de gonse (haute-volta). Thèse de Doctorat en 3ème cycle en écologie, 137p.
133. Uddin, F. (2018). Montmorillonite: An Introduction to Properties and Utilization. *Current Topics in Utilization of Clay in Industrial and Medical Applications*, 3–24.
134. Uddin, M. K. (2017). A review on the adsorption of heavy metals by clay minerals, with special focus on the past decade. *Chemical Engineering Journal*, 308, 438–462.

135. **Vadivambal, R., Jayas, D. S., & White, N. D. G. (2007).** Wheat disinfestation using microwave energy. / Determination of mortality of life stages of *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae). *Journal of Stored Products Research*, 43, 508-514.
136. **Vail, P. V., Tebbets, J. S., Cowan, D. C., & Jenner, K. E. (1991).** Efficacy and persistence of a granulosis virus against infestations of *Plodia interpunctella* (Hubner) (Lepidoptera: Pyralidae) on raisins. *Journal of Stored Products Research*, 27, 103-107.
137. **Van Lenteren, J. C., Bolckmans, K., Köhl, J., Ravensberg, W. J., & Urbaneja, A. (2017).** Biological control using invertebrates and microorganisms: plenty of new opportunities. *BioControl*, 62, 1-21.
138. **Vick, K. W., Mankin, R. W., Cogburn, R. R., Mullen, M., Throne, J. E., Wright, V. F., & Cline, L. D. (1990).** Review of pheromone-baited sticky traps for detection of stored-product insects. *Journal of the Kansas Entomological Society*, 63(4), 526-532.
139. **Watters, F. (1976).** Microwave radiation for control of *Tribolium confusum* in wheat and flour. *Journal of Stored Products Research*, 12, 19-25.
140. **White, N. D. G., & Loschiavo, S. R. (1988).** Effects of localized regions of high moisture grain on efficiency of insect traps capturing adult *Tribolium castaneum* and *Cryptolestes ferrugineus* in stored wheat. *Tribolium Information Bulletin*, 31, 97-100.
141. **White, N. D. G., Arbogast, R. T., Fields, P. G., Hillmann, R. C., Loschiavo, S. R., Subramanyam, B., ... & Wright, V. F. (1990).** The development and use of pitfall and probe traps for capturing insects in stored grain. *Journal of the Kansas Entomological Society*, 63(4), 506-525.
142. **Wilches, DM., Laird, RA., Floate, KD., & Fields, PG. (2016).** A review of diapause and tolerance to extreme temperatures in dermestids (Coleoptera). *Journal of Stored Products Research*, 68, 50–62.
143. **Wilches, DM., Laird, RA., Floate, KD., & Fields, PG. (2017).** Effects of acclimation and diapause on the cold tolerance of *Trogoderma granarium*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 165, 169–178.

144. Wilches, DM., Laird, RA., Floate, KD., & Fields, PG. (2019). Control of *Trogoderma granarium* (Coleoptera: Dermestidae) using high temperatures. *Journal of Economic Entomology*, 112, 963–968.
145. Winarti, C., Widayanti, S. M., Setyawan, N., Suryana, E. A., & Widowati, S. (2023). Nutrient composition of Indonesian specialty cereals: Rice, corn, and sorghum as alternatives to combat malnutrition. *Preventive Nutrition and Food Science*, 28(4), 471.
146. Wolfbauer, C. A. (1976). Geology and Energy Resources of the Powder River; 28th Annual Field Conference Guidebook. p. 257.
147. Yadav, D. N., Anand, T., Sharma, M., & Gupta, R. K. (2014). Microwave technology for disinfestation of cereals and pulses: An overview. *Journal of Food Science and Technology*, 51(12), 3568-3576.
148. Younus, S. H., & Karso, B. A. (2023). The efficiency of some plant extracts and microwave radiation against khapra beetle *Trogoderma granarium* (Everts.) (Dermestidae: Coleoptera). Master's thesis, College of Agricultural Engineering Sciences, University of Duhok.
149. Yousif, S. M. H. (2012). The Uses of Microwave Radiation to Control some insects of stored rice and its effects on qualities. M. Sc. College of Education, University.
150. Zouba, A., Khoualdia, O., Diaferia, A., Rosito, V., Bouabidi, H., & Chermiti, B. (2009). Microwave treatment for postharvest control of the date moth *Ectomyelois ceratoniae*. *Tunisian Journal of Plant Protection*, 4, 173-184.

Résumé : La lutte intégrée dans des condition contrôlé contre *Trogoderma granarium*

Cette étude évalue l'efficacité des stratégies de lutte intégrée en tant qu'alternatives durables aux pesticides chimiques pour le contrôle des larves du dermeste du grain ***Trogoderma granarium***. Les expérimentations ont été menées sous des conditions de laboratoire contrôlées, couvrant trois axes principaux de lutte : Lutte biologique : L'efficacité insecticide de la poudre de feuilles d'*Eucalyptus camaldulensis* a été testée à différentes doses (0,5 g, 1 g, 1,5 g, 2 g, 2,5 g). Les résultats montrent une relation dose-temps positive, où la dose la plus élevée (D5) a atteint une mortalité totale (100 %) en 7 jours, avec une concentration létale médiane ($LC_{50} = 2,63$). Lutte par substances inertes : L'efficacité de la poudre de bentonite (argile naturelle) a été évaluée à travers cinq doses variant de 0,04 g à 0,20 g. Les résultats démontrent une efficacité modérée à élever, avec une concentration létale médiane ($LC_{50} = 3,85$), et un effet fortement dépendant de la durée d'exposition. Lutte physique : L'utilisation de la technologie des ondes de hautes fréquences (micro-ondes) s'est avérée très efficace ; une exposition de durée modérée a entraîné une mortalité rapide des larves, avec un temps léthal médian ($TL_{50} \approx 29,17$ secondes). L'étude conclut que la combinaison de ces méthodes offre des alternatives naturelles et économiques efficaces pour la protection des denrées stockées, tout en améliorant la sécurité du consommateur et de l'environnement grâce à la réduction de la dépendance aux produits chimiques toxiques.

Mots clés : *Trogoderma granarium*, dermeste du grain, *Eucalyptus camaldulensis*, bentonite, lutte physique (micro-ondes), lutte biologique, concentration létale médiane (LC_{50}), toxicité, conditions de laboratoire.

Abstract : Integrated pest management against *Trogoderma granarium* under controlled laboratory conditions

This study evaluates the effectiveness of integrated pest management strategies as sustainable alternatives to chemical pesticides for controlling *Trogoderma granarium* larvae. Experiments were conducted under controlled laboratory conditions, covering three main control axes: Biological Control: The insecticidal efficacy of *Eucalyptus camaldulensis* leaf powder was tested at various doses (0.5g, 1g, 1.5g, 2g, 2.5g). The results demonstrate a positive dose-time relationship; the highest dose (D5) achieved 100% mortality within 7 days, with a median lethal concentration ($LC_{50} = 2.63$). Inert Substance Control: The effectiveness of bentonite

powder (natural clay) was evaluated using five doses ranging from 0.04g to 0.20g. The results indicate moderate to high efficacy, with a median lethal concentration ($LC_{50} = 3.85$), and an effect highly dependent on exposure time. Physical Control: The use of high-frequency wave technology (microwaves) proved highly effective; moderate exposure time resulted in rapid larval mortality, with a median lethal time ($TL_{50} \approx 29.17$ seconds). The study concludes that combining these methods provides effective natural and economic alternatives for protecting stored grain, while enhancing consumer and environmental safety by reducing reliance on toxic chemicals.

Keywords: *Trogoderma granarium*, khapra beetle, *Eucalyptus camaldulensis*, bentonite, physical control (microwaves), biological control, median lethal concentration (LC_{50}), toxicity,

المكافحة المتكاملة في ظروف مخبرية محكمة ضد خنفساء الحبوب المخزن

ملخص

تتناول هذه الدراسة تقييم فعالية استراتيجيات المكافحة المتكاملة كبداية مستدامة للمبيدات الكيميائية في السيطرة على يرقات خنفساء الحبوب المخزنة *Trogoderma granarium*. تم إجراء التجارب تحت ظروف مخبرية محكمة، حيث شملت الدراسة ثلاثة محاور أساسية للمكافحة: المكافحة البيولوجية: تم اختبار الفعالية المبيدة لمسحوق أوراق نبات *Eucalyptus camaldulensis* تركيزات مختلفة (0.5 غ، 1 غ، 1.5 غ، 2 غ، 2.5 غ). أظهرت النتائج علاقة طردية بين الجرعة والزمن؛ حيث سجلت أعلى تركيزات (D5) نسبة فتك كاملة (100%) خلال 7 أيام، بجرعة مميتة نصفية ($LC_{50} = 2.63$). المكافحة بالمواد الخاملة: تم تقييم فعالية مسحوق "البنطونيت" (الطين الطبيعي) بخمس جرعات تتراوح من 0.04 غ إلى 0.20 غ. أظهرت النتائج فاعلية متوسطة إلى قوية، حيث بلغت الجرعة المميتة ($LC_{50} = 3.85$)، مع تأثير يعتمد بشكل كبير على زمن التعرض. المكافحة الفيزيائية: تم استخدام تقنية الموجات عالية التردد (الميكروويف) بفعالية عالية، حيث أدى التعرض لزمان متوسط إلى فتك سريع لليرقات، وبلغ الوقت المميت النصفية ($TL_{50} \approx 29.17$) ثانية. (تخلص الدراسة إلى أن دمج هذه الطرق يوفر بدائل طبيعية واقتصادية فعالة لحماية المخزون الغذائي، مع تعزيز سلامة المستهلك والبيئة من خلال تقليل الاعتماد على المواد الكيميائية السامة

الكلمات المفتاحية: *Trogoderma granarium*، خنفساء الحبوب المخزنة، *Eucalyptus camaldulensis*، البنطونيت، مكافحة فيزيائية (ميكروويف)، مكافحة بيولوجية، الجرعة المميتة (LC_{50})، السمية، ظروف مخبرية.