

Évaluation des huiles essentielles dans la lutte biologique contre *Sitophilus zeamais* sur maïs en stockage

Chantal Palabina Gese

Institut National pour l'Étude et la Recherche Agronomique (INERA),
Kinshasa, Gombe, RDC. Institut Supérieur Pédagogique et Technique de la
Gombe (ISPT/Gombe), Kinshasa, RDC

Daniel Mudinga Mudinga

Archal Ngandote Mutemusa

Université Pédagogique Nationale, Kinshasa, RDC

Richard Gasigwa Sabimana

Institut National pour l'Étude et la Recherche Agronomique (INERA),
Kinshasa, Gombe, RDC. Université de Kinshasa, Faculté des Sciences
Agronomiques et Environnement, Kinshasa, RDC

Nana Nkiassi Ngadume

Lydie Phemba Botulu

Institut National pour l'Étude et la Recherche Agronomique (INERA),
Kinshasa, Gombe, RDC

[Doi:10.19044/esj.2026.v22n12p118](https://doi.org/10.19044/esj.2026.v22n12p118)

Submitted: 04 February 2026

Accepted: 28 March 2026

Published: 30 April 2026

Copyright 2026 Author(s)

Under Creative Commons CC-BY 4.0

OPEN ACCESS

Cite As:

Palabina Gese, C., Mudinga Mudinga, D., Ngandote Mutemusa, A., Gasigwa Sabimana, R., Nkiassi Ngadume, N. & Phemba Botulu, L. (2026). *Évaluation des huiles essentielles dans la lutte biologique contre Sitophilus zeamais sur maïs en stockage*. European Scientific Journal, ESJ, 22 (12), 118. <https://doi.org/10.19044/esj.2026.v22n12p118>

Résumé

La conservation du maïs après récolte est menacée par *Sitophilus zeamais*, un insecte ravageur responsable de pertes économiques importantes. L'usage excessif d'insecticides chimiques entraîne des résistances et des risques pour la santé et l'environnement, d'où l'intérêt croissant pour des alternatives naturelles comme les huiles essentielles. Cette étude vise à évaluer l'efficacité insecticide de quatre huiles essentielles végétales (*Allium sativum*, *Cymbopogon citratus*, *Eucalyptus robusta*, *Zingiber officinale*) comparée à un insecticide synthétique (Montaz 45WS) dans la lutte contre *S. zeamais* sur des grains de maïs stockés. Les huiles essentielles ont été extraites par

hydrodistillation. L'expérimentation a suivi un plan complètement randomisé avec six traitements répétés trois fois. Les paramètres observés tous les 48 heures pendant 16 jours incluaient : mortalité et survivance des charançons, nombre de grains perforés et nombre de grains sains. Les données ont été analysées par ANOVA au seuil de 5 %, suivie du test LSD. L'huile essentielle d'*A. sativum* et Montaz 45WS ont montré la plus forte efficacité, avec une mortalité maximale de 5,0 et 5,3 individus respectivement, et une meilleure préservation des grains (36,3 grains sains à 16 JAT). *Z. officinale* a été le traitement le moins performant. L'huile essentielle d'*A. sativum* constitue une alternative prometteuse aux insecticides chimiques pour la gestion de *S. zeamais*, combinant efficacité biologique et sécurité environnementale.

Mots-clés: Huiles essentielles, Charançon du maïs, Stockage post-récolte, Biopesticide végétal, Lutte biologique

Evaluation of Essential Oils in the Biological Control of *Sitophilus Zeamis* on Storage Maize

Chantal Palabina Gese

Institut National pour l'Étude et la Recherche Agronomique (INERA),
Kinshasa, Gombe, RDC. Institut Supérieur Pédagogique et Technique de la
Gombe (ISPT/Gombe), Kinshasa, RDC

Daniel Mudinga Mudinga

Archal Ngandote Mutemusa

Université Pédagogique Nationale, Kinshasa, RDC

Richard Gasigwa Sabimana

Institut National pour l'Étude et la Recherche Agronomique (INERA),
Kinshasa, Gombe, RDC. Université de Kinshasa, Faculté des Sciences
Agronomiques et Environnement, Kinshasa, RDC

Nana Nkiassi Ngadume

Lydie Phemba Botulu

Institut National pour l'Étude et la Recherche Agronomique (INERA),
Kinshasa, Gombe, RDC

Abstract

Post-harvest maize preservation is threatened by *Sitophilus zeamais*, a storage pest responsible for significant economic losses. Excessive use of synthetic insecticides leads to resistance and poses health and environmental risks, thereby increasing interest in natural alternatives such as essential oils. This study aims to evaluate the insecticidal efficacy of four plant-based essential oils (*Allium sativum*, *Cymbopogon citratus*, *Eucalyptus robusta*,

Zingiber officinale) compared to a synthetic insecticide (Montaz 45WS) in controlling *S. zeamais* in stored maize grains. Essential oils were extracted through hydrodistillation. The experiment followed a completely randomized design involving six treatments, each replicated three times. Parameters were assessed every 48 hours over 16 days and included weevil mortality and survivorship, number of perforated maize kernels, and number of healthy kernels. Data were analyzed using ANOVA at the 5% significance level, followed by the Least Significant Difference (LSD) test. Essential oil of *A. sativum* and Montaz 45WS exhibited the highest efficacy, with maximum mortality rates of 5.0 and 5.3 individuals respectively, and superior kernel preservation (36.3 healthy grains at day 16 post-treatment). *Z. officinale* showed the lowest performance. The essential oil of *A. sativum* represents a promising natural alternative to chemical insecticides for the management of *S. zeamais*, combining biological effectiveness with environmental safety.

Keywords: Essential oils, Maize weevil (*Sitophilus zeamais*), Post-harvest storage, Botanical biopesticide, Biological control

1. Introduction

La conservation des denrées alimentaires, notamment des céréales comme le maïs, est confrontée à de nombreux défis, dont les infestations par *Sitophilus zeamais*, un ravageur majeur des stocks agricoles. L'usage intensif d'insecticides chimiques, bien qu'efficace à court terme, soulève des préoccupations croissantes en matière de santé humaine, de pollution environnementale et de développement de résistances chez les insectes (Gupta et al., 2023 ; Sarmah et al., 2024).

Dans ce contexte, les huiles essentielles (HE) apparaissent comme une alternative prometteuse. Issues de plantes aromatiques, elles sont reconnues pour leurs propriétés insecticides, répulsives, ovicides et antifécondantes, tout en étant biodégradables et moins toxiques pour les organismes non ciblés (Isman, 2020 ; Gonzalez-Coloma, 2023). Plusieurs études ont démontré leur efficacité contre divers ravageurs de produits stockés, notamment *Sitophilus oryzae*, *Tribolium castaneum* et *Callosobruchus maculatus* (Guarino et al., 2025 ; Bedini et al., 2020).

Des recherches ont été menées sur les méthodes d'extraction des HE (Hassani et al., 2017), leur application dans la conservation des céréales (Camara, 2009 ; Renoz et al., 2021), ainsi que leur mode d'action sur le système nerveux des insectes, notamment par inhibition de l'acétylcholinestérase et interaction avec les récepteurs octopaminergiques (Gupta et al., 2023 ; Isman & Tak, 2017). Toutefois, aucune étude n'a évalué, en conditions contrôlées, l'efficacité des HE de *Eucalyptus robusta*, *Allium*

sativum, *Zingiber officinale* et *Cymbopogon citratus* dans la protection du maïs contre *S. zeamais*.

La présente étude vise à combler cette lacune en testant l'hypothèse nulle selon laquelle les HE ne présentent pas d'effet insecticide significatif comparé au témoin non traité. L'objectif est d'analyser, en laboratoire, l'efficacité de ces quatre HE dans la protection des grains de maïs stockés contre *S. zeamais*, et de ressortir leur potentiel en tant qu'alternatives durables aux insecticides chimiques.

2. Matériels et Méthodes

2.1. Environnement de l'étude

L'étude a été menée dans un cadre académique et technique approprié, garantissant la fiabilité des résultats obtenus. L'extraction des huiles essentielles a été effectuée au sein de l'atelier de transformation agroalimentaire du Département de Chimie et Industries Agricoles, rattaché à la Faculté des Sciences Agronomiques et Environnementales de l'Université de Kinshasa. Cet atelier est équipé pour la manipulation de matières végétales et la distillation de composés volatils, permettant une extraction contrôlée et reproductible des huiles essentielles.

Les essais biologiques ont été réalisés au Laboratoire de Phytopathologie et de Protection des Cultures de la même faculté. Ce laboratoire dispose d'un environnement adapté à l'élevage d'insectes ravageurs, à la conduite d'expériences en conditions semi-contrôlées, et à l'évaluation de l'activité insecticide de substances naturelles. Les coordonnées géographiques du laboratoire sont : 4°25'26" de latitude sud et 15°20'04" de longitude est, situant l'étude dans un climat tropical humide favorable au développement de *Sitophilus zeamais*.

Les bulbes de *Cymbopogon citratus* (citronnelle) et d'*Allium sativum* (ail), utilisés comme matières premières pour l'extraction des huiles essentielles, ont été achetés sur le marché local du Rond-point Ngaba à Kinshasa. Ce choix garantit l'authenticité botanique des échantillons et reflète les conditions d'approvisionnement accessibles aux producteurs locaux, renforçant ainsi la pertinence pratique de l'étude.

2.2. Matériel utilisé

Matériel de laboratoire Les équipements utilisés comprenaient des boîtes de Pétri en plastique de 9 cm de diamètre, une pipette à embout, du papier buvard, un dispositif d'hydrodistillation, une éprouvette graduée, une plaque chauffante, un réfrigérateur et une ampoule à décanter.

Matériel biologique Le matériel biologique était constitué de grains de maïs de variété locale, d'une population de *Sitophilus zeamais*, de feuilles fraîches d'*Eucalyptus robusta*, de rhizomes de *Zingiber officinale*, de feuilles

fraîches de *Cymbopogon citratus* et de bulbes d'*Allium sativum*. La population de *S. zeamais* a été prélevée dans un entrepôt de maïs situé au marché de Mbanza.

2.3. Méthodologie

Procédure d'extraction des huiles essentielles Les huiles essentielles des quatre espèces végétales ont été extraites par hydrodistillation. Cette technique consiste à introduire séparément les feuilles d'*E. robusta*, les feuilles de *C. citratus*, les rhizomes broyés de *Z. officinale* et les bulbes écrasés d'*A. sativum* dans un bain-marie porté à ébullition. La vapeur générée est conduite à travers un serpentin refroidi à l'eau courante, puis recueillie dans une éprouvette graduée. L'huile essentielle est obtenue après séparation de la phase aqueuse (hydrolat). Le Laboratoire de Phytopathologie et de Protection des Cultures est situé aux coordonnées géographiques suivantes : 4° 25' 26" de latitude Sud et 15° 20' 04" de longitude Est.

Dispositif expérimental L'expérimentation a été conduite selon un plan complètement randomisé comportant six traitements, chacun répété trois fois. Un volume de 25 µl d'huile essentielle a été appliqué pour chaque répétition, à l'exception du témoin non traité. Le témoin traité consistait en un insecticide synthétique (Momtaz 45WS), formulé en poudre et contenant deux substances actives : Imidaclopride (250 g/kg) et Thirame (200 g/kg), appartenant respectivement aux familles des néonicotinoïdes et des dithiocarbamates. Pour chaque boîte de Pétri, un papier buvard a été placé au fond, suivi de l'ajout de 40 grains de maïs. L'huile essentielle a été appliquée à l'aide d'une micropipette. L'insecticide synthétique a été utilisé à raison de 2 g dilués dans 10 ml d'eau pour enrober les grains. Vingt individus de *S. zeamais* ont été introduits dans chaque boîte, laquelle a ensuite été recouverte d'un tissu blanc fixé par un élastique afin d'éviter toute évasion des insectes. L'expérience a été répétée deux fois, et les résultats présentés correspondent aux moyennes des deux essais.

Variables observées Les observations ont été effectuées toutes les 48 heures. Les paramètres évalués comprenaient : le nombre de charançons morts, le nombre de charançons vivants, le nombre de grains de maïs sains et le nombre de grains endommagés (présence de perforations).

Analyse statistique L'ensemble des données recueillies a été soumis à une analyse de la variance au seuil de signification de 5 %. En cas de différence significative entre les moyennes, une comparaison a posteriori a été réalisée à l'aide du test de la plus petite différence significative (LSD : Least Significant Difference). Les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide du logiciel Statistix 8.0 (version gratuite).

3.1 Résultats

3.1.1 Mortalité des adultes de *Sitophilus zeamais*

L'évolution du nombre moyen de charançons morts en fonction des traitements et du temps est présentée dans le Tableau 1. Les résultats montrent que la mortalité varie significativement selon le type de traitement appliqué et le jour d'observation.

Tableau 1: Nombre moyen de *Sitophilus zeamais* morts

Traitement	2JAT	4JAT	6JAT	8JAT	10JAT	12JAT	14JAT	16JAT
Témoin blanc	0,0b	0,3a	2,0a	2,0ab	2,6abc	2,0ab	4,3a	0,3a
Montaz 45WS	1,0b	1,0a	1,0a	3,6a	5,3a	3,6ab	4,0a	0,3a
HE d' <i>A. sativum</i>	2,6a	0,6a	1,0a	3,3a	2,6abc	5,0a	2,3ab	0,6a
HE de <i>C. citratus</i>	0,6b	1,0a	1,0a	1,6ab	0,6bc	0,6b	1,0b	0,3a
HE d' <i>E. robusta</i>	1,0b	1,0a	1,6a	2,0ab	3,3ab	3,3ab	0,6b	0,6a
HE de <i>Z. officinale</i>	1,0b	1,0a	0,6a	0,3b	0,0c	1,6ab	0,3b	0,0a

Note : Les moyennes suivies de la même lettre dans une colonne ne diffèrent pas significativement au seuil de 5 %. JAT : Jour après traitement ; HE : Huile essentielle.

À 2 jours après traitement (2 JAT), l'huile essentielle d'*Allium sativum* a induit la plus forte mortalité (2,6 individus), tandis que l'huile essentielle de *Cymbopogon citratus* a enregistré la plus faible (0,6). À 4 JAT, tous les traitements ont montré une mortalité similaire ($\approx 1,0$), sauf le témoin blanc (0,3), qui reste significativement inférieur. À 6 JAT, le témoin blanc présente paradoxalement la plus forte mortalité (2,0), suggérant une mortalité naturelle ou un effet de stress environnemental.

À 8 et 10 JAT, le traitement au Montaz 45WS s'est révélé le plus efficace, avec respectivement 3,6 et 5,3 individus morts. À 12 JAT, l'huile essentielle d'*A. sativum* a surpassé les autres traitements avec une mortalité de 5,0. À 14 JAT, le témoin blanc a enregistré la plus forte mortalité (4,3), tandis que *Zingiber officinale* a montré la plus faible (0,3). Enfin, à 16 JAT, les huiles essentielles d'*A. sativum* et d'*Eucalyptus robusta* ont induit la plus forte mortalité (0,6), alors que le témoin blanc, Montaz 45WS et *C. citratus* ont enregistré les plus faibles (0,3).

L'analyse de variance a révélé des différences significatives entre les traitements aux 2e, 8e, 10e, 12e et 14e jours ($p < 0,05$).

Ici seules les colonnes 8 10 12 14 sont statiquement différentes par les lettres ; il faut en tenir compte dans l'analyse des résultats

3.1.2 Survivance des adultes de *Sitophilus zeamais*

Le Tableau 2 présente le nombre moyen de charançons vivants selon les traitements et les jours d'observation. De manière générale, une réduction progressive du nombre de charançons vivants est observée dans les traitements les plus efficaces.

Tableau 2: Nombre moyen de *S. zeamais* vivants

Traitement	2JAT	4JAT	6JAT	8JAT	10JAT	12JAT	14JAT	16JAT
Témoin blanc	20,0a	19,6a	17,6a	15,6ab	13,0abc	11,0bc	6,6b	6,3b
Montaz 45WS	19,0a	18,0ab	17,0a	13,3ab	8,0d	4,3d	0,3c	0,0c
HE d' <i>A. sativum</i>	17,3b	16,6b	15,6a	12,3b	9,6cd	4,6d	2,3c	1,6c
HE de <i>C. citratus</i>	19,3a	18,3ab	17,3a	15,6ab	15,0ab	14,3ab	13,3a	13,0a
HE d' <i>E. robusta</i>	19,0a	18,0ab	16,3a	14,3ab	11,0bcd	7,6cd	7,0b	6,3b
HE de <i>Z. officinale</i>	19,0a	18,8ab	17,3a	17,0a	17,0a	15,3a	15,0a	15,0a

À 2 JAT, le témoin blanc présente le plus grand nombre de charançons vivants (20,0), tandis que l'huile essentielle d'*A. sativum* enregistre la plus faible (17,3). À 4 JAT, *A. sativum* reste le traitement le plus performant (16,6), avec une différence significative par rapport au témoin (19,6). À 6 JAT, aucune différence significative n'est observée entre les traitements.

À 8 JAT, *Z. officinale* présente le plus grand nombre de survivants (17,0), tandis que *A. sativum* enregistre le plus faible (12,3). À 10 et 12 JAT, Montaz 45WS est le plus efficace (8,0 et 4,3), suivi de *A. sativum* (9,6 et 4,6). À 14 et 16 JAT, Montaz 45WS affiche les plus faibles valeurs (0,3 et 0,0), indiquant une efficacité insecticide maximale, tandis que *Z. officinale* conserve le plus grand nombre de survivants (15,0).

3.1.3 Détérioration des grains de maïs (grains perforés)

Les données du Tableau 3 indiquent que le nombre moyen de grains de maïs perforés par les charançons varie peu entre les traitements, avec des différences significatives uniquement observées à 4 JAT.

Tableau 3: Nombre moyen de grains de maïs perforés

Traitement	2JAT	4JAT	6JAT	8JAT	10JAT	12JAT	14JAT	16JAT
HE d' <i>A. sativum</i>	0,6a	2,3a	0,3a	0,0a	1,0a	1,0a	0,0a	0,3a
HE de <i>C. citratus</i>	2,3a	0,3bc	0,0a	0,0a	1,0a	0,0a	0,0a	0,0a
HE d' <i>E. robusta</i>	0,6a	1,0abc	0,0a	0,3a	1,3a	0,0a	0,0a	0,3a
HE de <i>Z. officinale</i>	2,3a	0,0c	0,6a	0,3a	0,0a	1,0a	0,6a	0,3a
Témoin blanc	0,3a	1,3abc	1,0a	0,0a	0,6a	0,6a	0,6a	0,0a
Montaz 45WS	1,3a	2,0ab	1,0a	0,0a	0,3a	0,6a	0,3a	0,0a

Note : Les moyennes suivies de la même lettre dans une colonne ne diffèrent pas significativement au seuil de 5 %. JAT : Jour après traitement ; HE : Huile essentielle.

Seule la colonne 4 montre des différences (mieux axer l'analyse sur ces valeurs stat). À 2 JAT, le traitement à l'huile essentielle d'*E. robusta* présente le plus faible nombre de grains perforés (0,3), tandis que Montaz 45WS enregistre le plus élevé (2,3). À 4 JAT, le témoin blanc affiche le plus grand nombre de grains perforés (2,3), et Montaz 45WS le plus faible (0,3). À 6 JAT, les huiles essentielles de *E. robusta* et *Z. officinale* induisent le plus de perforations (1,0), tandis que le témoin blanc reste le moins affecté (0,3).

À 8 JAT, seules les huiles essentielles de *A. sativum* et *C. citratus* montrent des perforations (0,3), les autres traitements n'en présentent aucune. À 12 JAT, les huiles essentielles de *C. citratus* et le témoin blanc enregistrent le plus grand nombre de grains perforés (1,0), tandis que *E. robusta* et *Z. officinale* en présentent le plus faible (0,6). À 14 JAT, les huiles essentielles de *C. citratus* et *E. robusta* induisent le plus de perforations (0,6), tandis que *Z. officinale* enregistre le plus faible (0,3). À 16 JAT, les traitements à *A. sativum*, *C. citratus* et le témoin blanc présentent le plus grand nombre de grains perforés (0,3).

3.1.4 Intégrité des grains de maïs (grains sains)

Le Tableau 4 présente le nombre moyen de grains de maïs sains, c'est-à-dire non perforés par les charançons. Les résultats montrent une stabilité relative entre les traitements tout au long de l'expérimentation, sans différence significative.

Tableau 4: Nombre moyen de grains de maïs sains

Traitement	2JAT	4JAT	6JAT	8JAT	10JAT	12JAT	14JAT	16JAT
HE d' <i>A. sativum</i>	39,3a	37,0a	36,6a	36,6a	35,6a	34,6a	34,6a	34,3a
HE de <i>C. citratus</i>	37,6a	37,3a	37,3a	37,3a	36,3a	36,3a	36,3a	36,3a
HE d' <i>E. robusta</i>	39,3a	38,3a	38,3a	38,0a	36,6a	36,6a	36,6a	36,3a
HE de <i>Z. officinale</i>	37,6a	37,6a	37,0a	36,6a	36,6a	35,6a	35,0a	34,6a
Témoin blanc	39,6a	38,3a	37,3a	37,3a	36,6a	36,0a	35,3a	35,3a
Montaz 45WS	38,6a	36,6a	35,6a	35,6a	35,3a	34,6a	34,3a	34,3a

Note : Les moyennes suivies de la même lettre dans une colonne ne diffèrent pas significativement au seuil de 5 %. JAT : Jour après traitement ; HE : Huile essentielle.

Idem stat: À 16 JAT, les traitements à l'huile essentielle d'*A. sativum* et au Montaz 45WS conservent le plus grand nombre de grains sains (36,3), tandis que le témoin blanc enregistre le plus faible (35,3), suggérant une meilleure protection conférée par ces deux traitements.

4. Discussion

4.1 Lien avec les Objectifs de Développement Durable

Les résultats de cette étude s'inscrivent dans une approche agroécologique qui répond à plusieurs Objectifs de Développement Durable (ODD) définis par les Nations Unies. En évaluant l'efficacité d'huiles essentielles végétales comme alternatives aux insecticides chimiques dans la protection du maïs stocké contre *Sitophilus zeamais*, cette recherche contribue aux axes suivants :

- **ODD 2 – Éliminer la faim, assurer la sécurité alimentaire et promouvoir une agriculture durable** : La réduction des pertes post-récolte par des moyens naturels améliore la disponibilité des denrées

alimentaires et renforce la sécurité alimentaire, notamment dans les zones rurales à faibles ressources.

- **ODD 12 – Établir des modes de consommation et de production durables** : L'utilisation de biopesticides à base d'huiles essentielles favorise une gestion responsable des intrants agricoles, en réduisant la dépendance aux produits chimiques de synthèse et leurs impacts écotoxiques.
- **ODD 13 – Prendre des mesures urgentes pour lutter contre les changements climatiques** : Les huiles essentielles, issues de plantes locales, présentent une empreinte écologique réduite et s'intègrent dans des pratiques agricoles à faible émission de gaz à effet de serre.
- **ODD 9 – Bâtir une infrastructure résiliente, promouvoir une industrialisation durable et encourager l'innovation** : Cette étude valorise les ressources végétales locales et encourage le développement de solutions phytosanitaires innovantes, adaptées aux contextes africains.
- **ODD 15 – Préserver et restaurer les écosystèmes terrestres** : En limitant l'usage d'insecticides chimiques, cette approche contribue à la protection de la biodiversité, notamment des insectes non ciblés et des pollinisateurs, essentiels au bon fonctionnement des agroécosystèmes.

Ainsi, cette recherche participe activement à la transition vers une agriculture plus durable, résiliente et respectueuse de l'environnement.

Les résultats de cette étude révèlent une efficacité variable des huiles essentielles de quatre espèces végétales (*Allium sativum*, *Cymbopogon citratus*, *Eucalyptus robusta*, *Zingiber officinale*) ainsi que de l'insecticide synthétique Montaz 45WS dans la lutte contre *Sitophilus zeamais*, ravageur majeur du maïs entreposé.

4.2 Efficacité insecticide des traitements

L'huile essentielle d'*A. sativum* a montré une forte activité insecticide, avec une mortalité maximale observée à 12 jours après traitement (JAT). Cette efficacité est attribuée à l'allicine, un composé soufré aux propriétés biocides bien documentées (Bell, Cuthbertson, & Audsley, 2015; Liu et al., 2023). L'allicine agit en perturbant les membranes cellulaires et en inhibant des enzymes vitales chez les insectes.

Le traitement synthétique Montaz 45WS, contenant de l'imidaclopride et du thirame, a également démontré une efficacité élevée, avec une réduction quasi totale de la population de charançons à 16 JAT. Ces substances agissent respectivement comme neurotoxique et fongicide, mais leur usage prolongé peut entraîner des phénomènes de résistance et des impacts écotoxiques (Devi et al., 2020).

Les huiles essentielles de *E. robusta* et *C. citratus* ont montré une efficacité modérée. *E. robusta* contient du 1,8-cinéole (eucalyptol), reconnu pour ses propriétés insecticides et répulsives (Rehman et al., 2023; Gharib et al., 2020). *C. citratus*, riche en citral et géraniol, possède des effets larvicides et antifongiques, bien que leur volatilité puisse limiter leur persistance (Ganjewala et al., 2019).

L'huile essentielle de *Z. officinale* a été la moins efficace. Malgré la présence de zingibérène et de shogaol, connus pour leurs effets insecticides, leur concentration ou biodisponibilité semble insuffisante dans ce contexte (Sinha & Ray, 2024).

4.3 Intégrité des grains de maïs

Les traitements les plus efficaces ont également permis de préserver l'intégrité des grains. À 16 JAT, les huiles essentielles d'*A. sativum* et le Montaz 45WS ont maintenu le plus grand nombre de grains sains, tandis que le témoin blanc a enregistré une détérioration plus marquée. Cela confirme que la réduction de la population de *S. zeamais* est directement corrélée à la préservation des grains (Chaubey, 2017).

Le nombre de grains perforés est resté faible dans tous les traitements, avec des différences significatives uniquement à 4 JAT. Cela suggère que les huiles essentielles, même à efficacité modérée, peuvent exercer un effet répulsif ou perturbateur sur le comportement alimentaire des charançons.

4.4 Perspectives et implications

Ces résultats soulignent le potentiel des huiles essentielles, en particulier celle d'*A. sativum*, comme alternative naturelle aux insecticides chimiques. Leur efficacité, combinée à une faible toxicité pour l'environnement et les utilisateurs, en fait des candidats prometteurs pour une agriculture durable.

Des recherches complémentaires sont toutefois nécessaires pour :

- Optimiser les concentrations et formulations des huiles essentielles.
- Évaluer leur persistance et leur mode d'action.
- Tester leur efficacité sur d'autres ravageurs et en conditions réelles de stockage.

4.5 Limites de l'étude

Bien que cette étude ait permis d'évaluer l'efficacité insecticide de certaines huiles essentielles dans la lutte contre *Sitophilus zeamais*, plusieurs limites doivent être soulignées :

- **Conditions expérimentales contrôlées** : Les essais ont été réalisés en laboratoire, dans un environnement stable et isolé. Ces conditions ne reflètent pas nécessairement les fluctuations de température,

d'humidité et de ventilation observées dans les entrepôts agricoles réels, ce qui peut influencer l'efficacité des huiles essentielles.

- **Durée d'observation restreinte** : L'expérimentation s'est déroulée sur une période de 16 jours. Or, les effets à long terme des huiles essentielles sur la dynamique des populations de ravageurs, la dégradation des composés actifs et la réinfestation des grains n'ont pas été évalués.
- **Concentration fixe des huiles essentielles** : Une seule concentration a été testée pour chaque huile essentielle. Il aurait été pertinent d'explorer une gamme de doses afin d'identifier les seuils optimaux d'efficacité et de toxicité.
- **Absence d'analyse chimique des huiles essentielles** : Les huiles utilisées n'ont pas été soumises à une caractérisation chromatographique (GC-MS), ce qui limite la compréhension des composés bioactifs responsables de l'activité insecticide.
- **Effets non ciblés non évalués** : L'étude n'a pas pris en compte les effets potentiels des huiles essentielles sur la qualité organoleptique des grains, ni sur les organismes non ciblés (microbiote, insectes bénéfiques).

Ces limites suggèrent que des recherches complémentaires, en conditions semi-réelles ou sur le terrain, sont nécessaires pour valider l'applicabilité pratique des huiles essentielles dans la gestion durable des ravageurs de stockage.

Conclusion

Les résultats de cette étude ont mis en évidence l'efficacité variable des huiles essentielles dans la lutte contre *Sitophilus zeamais*, principal ravageur du maïs entreposé. Parmi les quatre espèces végétales testées, l'huile essentielle d'*Allium sativum* s'est montrée particulièrement performante, avec une mortalité significative des charançons et une meilleure préservation des grains. Le traitement au Montaz 45WS a également démontré une grande efficacité, mais soulève des questions quant à sa durabilité et à ses effets environnementaux.

Les huiles essentielles de *Eucalyptus robusta* et *Cymbopogon citratus* ont présenté une efficacité modérée, tandis que celle de *Zingiber officinale* s'est révélée moins prometteuse dans le cadre de cette étude. En général, les huiles essentielles testées ont eu un effet bénéfique sur la réduction des pertes post-récolte, offrant une alternative naturelle aux insecticides chimiques.

Recommandations

1. **Renforcement des recherches appliquées** : Il est recommandé de poursuivre les essais en conditions semi-réelles ou sur le terrain afin de valider l'efficacité des huiles essentielles dans des contextes de stockage diversifiés.
2. **Analyse physico-chimique des huiles essentielles** : Une caractérisation des composés actifs par chromatographie (GC-MS) serait utile pour identifier les molécules responsables de l'activité insecticide et pour optimiser les formulations.
3. **Exploration de formulations combinées** : L'association de certaines huiles essentielles, ou leur intégration dans des nanoémulsions, pourrait accroître leur efficacité et leur persistance sur les grains.
4. **Valorisation agro-industrielle locale** : Il serait pertinent de promouvoir la production locale d'extraits végétaux en tant que biopesticides accessibles et durables, particulièrement dans les zones rurales à faible accès aux intrants agricoles conventionnels.
5. **Intégration dans les politiques de gestion post-récolte** : Les huiles essentielles devraient être considérées comme des outils stratégiques dans les plans nationaux de gestion des pertes post-récolte et de sécurité alimentaire, en lien avec les objectifs de développement durable.

Conflit d'intérêts : Les auteurs n'ont signalé aucun conflit d'intérêts.

Disponibilité des données : Toutes les données sont incluses dans le contenu de l'article.

Déclaration de financement : Les auteurs n'ont obtenu aucun financement pour cette recherche.

References:

1. Ahmadi, E., Khajehali, J., Jonckheere, W., & Van Leeuwen, T. (2022). Biochemical and insecticidal effects of plant essential oils on insecticide resistant and susceptible populations of *Musca domestica* L. point to a potential cross-resistance risk. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, *184*, 105115. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2022.105115>
2. Bedini, S., Flamini, G., Cosci, F., & Canale, A. (2020). Broad-spectrum biocidal activity of essential oils against stored-product pests. *Journal of Pest Science*, *93*(2), 589–602. <https://doi.org/10.1007/s10340-019-01165-3>

3. Bell, H. A., Cuthbertson, A. G. S., & Audsley, N. (2015). The potential use of allacin as a biopesticide for the control of the house fly, *Musca domestica* L. *International Journal of Pest Management*, 61(4), 287–292. <https://doi.org/10.1080/09670874.2015.1120363>
4. Camara, A. (2009). *Effet des huiles essentielles dans la conservation des céréales stockées*. Thèse de doctorat, Université de Ouagadougou.
5. Chaubey, M. K. (2017). Study of insecticidal properties of garlic and bel essential oils against *Sitophilus zeamais*. *Journal of Entomology*, 14(5), 191–198. <https://doi.org/10.3923/je.2017.191.198>
6. Devi, M. A., Singh, T. K., & Singh, N. I. (2020). Chemical compositions and insecticidal efficacies of four aromatic essential oils on *Sitophilus oryzae*. *International Journal of Tropical Insect Science*, 40, 1–9. <https://doi.org/10.1007/s42690-020-00102-1>
7. Ganjewala, D., Gupta, A. K., & Kumar, S. (2019). Antifungal and larvicidal activities of citral and geraniol. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 52(17–18), 1–12. <https://doi.org/10.1080/03235408.2019.1651579>
8. Gharib, R., Allaf, K., & Boutekdjiret, C. (2020). Retention of eucalyptol, a natural volatile insecticide, in delivery systems. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 122(5), 1900402. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201900402>
9. Gonzalez-Coloma, A. (2023). Essential oils as biopesticide ingredients. *Agriculture*, 13(6), 1141. <https://doi.org/10.3390/agriculture13061141>
10. Guarino, S., Abbate, L., Arif, M. A., & Peri, E. (2025). Insecticidal activity of single essential oil constituents against stored-product pests. *International Journal of Tropical Insect Science*, 45, 185–191.
11. Gupta, I., Singh, R., Muthusamy, S., Sharma, M., & Singh, H. P. (2023). Plant essential oils as biopesticides: Applications, mechanisms, innovations, and constraints. *Plants*, 12(16), 2916. <https://doi.org/10.3390/plants12162916>
12. Hassani, M., Benkhalifa, A., & Tebbouche, S. (2017). Méthodes d'extraction et efficacité des huiles essentielles dans la lutte contre les insectes ravageurs. *Revue des Bioressources*, 9(1), 45–52.
13. Isman, M. B. (2020). Bioinsecticides based on plant essential oils: A short overview. *Zeitschrift für Naturforschung C*, 75(7–8), 179–182. <https://doi.org/10.1515/znc-2020-0038>
14. Isman, M. B., & Tak, J. H. (2017). Inhibition of acetylcholinesterase by essential oils and monoterpenoids: A relevant mode of action for insecticidal essential oils? *Biopesticides International*, 13(2), 71–78.
15. Liu, Y., Zhang, X., & Chen, L. (2023). Investigating the toxic effects of allacin on insects. In *Proceedings of the IRC Conference on Science*,

- Engineering, and Technology* (pp. 421–430). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-981-99-8369-8_42
16. Rehman, R., Khan, M. A., & Shah, S. A. (2023). Insecticidal potential of *Eucalyptus camaldulensis* essential oil. *Chemical Papers*, 77, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s11696-023-03244-x>
 17. Renoz, F., Demeter, S., Degand, H., Nicolis, S. C., Lebbe, O., Martin, H., Deneubourg, J. L., Fauconnier, M. L., Morsomme, P., & Hance, T. (2021). Proteomic analysis of *Mentha arvensis* essential oil effects on *Sitophilus granarius*. *Journal of Pest Science*, 95, 381–395. <https://doi.org/10.1007/s10340-021-01361-3>
 18. Sarmah, K., Das, S., & Kalita, J. (2024). Innovative formulation strategies for botanical- and essential oil-based insecticides. *Journal of Pest Science*, 98, 1–30.
 19. Sinha, N., & Ray, S. (2024). The potential of ginger (*Zingiber officinale*) extracts as a bio-pesticide. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 12(3), 1–6. <https://www.entomoljournal.com/archives/2024/vol12issue3/PartA/12-2-34-160.pdf>
 20. Tebbouche, S. (2023). *Utilisation des huiles essentielles dans la lutte contre les ravageurs des denrées stockées*. Mémoire de Master, Université de Bejaïa.