

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

المدرسة الوطنية العليا للفلاحة-الحراش-الجزائر

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURES D'AGRONOMIE-EL HARRACH-
ALGER

THÈSE

En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences
Agronomiques

Option : Santé Végétale en Milieu Agricole Et Forestier.

Sujet

Bio-écologie de la mouche Méditerranéenne des fruits *Ceratitis capitata*
(Wiedemann) (Diptera : Tephritidae) en Mitidja et essais de lutte biologique en
laboratoire.

Présenté par : CHERGUI Sabrina.

Devant le Jury :

Président : M. BICHE M.

Professeur E.N.S.A. EL Harrach.

Directeur de thèse : M. BENZEHRA A.

Professeur E.N.S.A. EL- Harrach.

Examinatrice : Mme BENDIFALLAH L.

Professeur Univ. Boumerdes.

Examineur : M. OUKIL S.

Maître de Recherche I.N.R.A.A

Année Universitaire : 2020/2021

Ceratitis capitata (Wiedemann) (Diptera: Tephritidae) في Mitidja

واختبارات مكافحة البيولوجية في المخبر

ملخص

تعتبر ذبابة الفاكهة البحر الأبيض المتوسط (Diptera ; *Ceratitis capitata* Wiedemann 1824), (Tephritidae), آفة رئيسية في زراعة الفاكهة وهي من الأنواع شديدة التعدد وتتميز بقدرة كبيرة على التكيف والتكاثر ، مما يمنحها مكانة الأنواع الغازية في العديد من البلدان. مع ذلك ، تكشف دراسة ديناميات أن ذبابة فاكهة البحر الأبيض المتوسط في متيجة تتطور لتسعة أجيال سنوية. تم ملاحظة أولها بين شهري فبراير ومايو على البرتقال. الجيل الثاني يحدث في Néflier. حيث تلعب هذا المحصول دورًا مهمًا كمضيف بديل بين مارس ويونيو ، مما يسمح للجيل الشتوي من *Ceratitis capitata* ببدء جيل جديد على هذه الفاكهة المضيفة وبالتالي ضمان استمرار تطور الحشرة. تطور *C. capitata* تسعة أجيال في بساتين الأشجار المختلفة في عام 2016 حيث يبلغ متوسط درجة الحرارة السنوية 18.87 درجة مئوية. الجيل الأول ، هو الأطول و يدوم 128 على الحمضيات بينما الأقصر يحدث في الخوخ والتين و تدوم 16 يومًا. في عام 2018 ، كان هناك 8 أجيال بدلاً من 9. الهجمات كانت بشكل أساسي على ثمار الحمضيات مثل Thomson navel و clementine التي تحمل 1.5 و 1 قرصة / فاكهة على التوالي. ، يعتبر خوخ (Redhaven) هو الأكثر هجومًا بمتوسط عدد يتراوح بين 4 إلى 4.6 قضمات / فاكهة. وفقًا لنوع المصيدة، يتبين أن مصيدة الفرمون أكثر كفاءة في القبض على البالغين من ذبابة الفاكهة. أقصر وقت للشرانق هو 8 أيام (في الصيف) ، وهو أطول للحمضيات (24 يومًا) (في الشتاء). ارتفاع معدلات ظهور البالغين (< 50%).

محلول الديدان الخيطية *Steinernema feltiae* المجربة ضد الطور الأخير من اليرقات والعداري *C. capitata* تظهر أن اليرقات والعداري الصغيرة أكثر عرضة للإصابة بالديدان الخيطية الممرضة للحشرات من الشرانق الأكبر سنًا. و تتناسب ضراوة الديدان الخيطية مع زيادة رطوبة التربة. العلاج الفطري على أساس *B. bassiana* BMAUM M6-4 فعال جدا ضد يرقات الطور الثالث والعداري من *C. capitata* ويقلل من ظهور البالغين بأكثر من 50%. تعد الفطريات الممرضة للحشرات والديدان الخيطية الممرضة للحشرات واعدة كعامل للمكافحة الحيوية يمكن استخدامه في ظل أوضاع مختلفة من الاستخدام الأرضي ضد اليرقات والشرانق والشرانق ، و / أو كقطع للرش أو ملامسة البالغين.

الكلمات الرئيسية: *Ceratitis capitata* ، جيل ، المصيدة ، *Steinernema feltiae* ، *Beauveria bassiana*.

**Bio-écologie de la mouche Méditerranéenne des fruits *Ceratitis capitata* (Wiedemann)
(Diptera : Tephritidae) en Mitidja et essais de lutte biologique en laboratoire.**

Résumé

La mouche méditerranéenne des fruits, *Ceratitis capitata*, Wiedemann, 1824 (Diptera ; Tephritidae) est considérée comme un ravageur clé en arboriculture fruitière. C'est une espèce grandement polyphage qui se distingue par une grande capacité d'adaptation et de propagation, ce qui lui confère le statut d'espèce envahissante dans de nombreux pays. Ceci dit, l'étude de la dynamique des populations révèle qu'en Mitidja, la cératite développe 9 générations annuelles. Dont la 1^{ère} est observée entre le mois de Février et de Mai sur les oranges. La 2^{ème} génération a lieu sur Néflier. Cette culture joue un rôle important en tant qu'hôte alternatif entre Mars et juin, permettant à la génération hivernante de la Cératite de débiter une nouvelle génération sur ce fruit hôte et assure ainsi le développement continu de l'insecte. *C. capitata* développe neuf générations dans les différents vergers arboricoles en 2016 où la température annuelle moyenne est de 18,87° C. La première génération, la plus longue dure 128 sur les agrumes tandis que la plus courte a lieu en été sur pêches et figes et dure 16 jours. En 2018, il y a eu 8 générations au lieu de 9. Les attaques se font principalement sur les agrumes telles que la Thomson navel et la clémentine qui portent respectivement 1,5 et 1 piqûre/fruit. Sur les fruits à pépins, les pêches Redhaven est la plus attaquée avec un nombre moyen variant entre 4 à 4,6 piqûres/fruit. Les captures selon le type de pièges montre que le piège à phéromones est plus performant dans la capture des adultes de la Cératite. Le temps de pupaison le plus court est de 8 jours sûr pêche (en été), il est plus long chez les agrumes (24 jours) (en hiver). Les taux d'émergence des adultes sont élevés sur toutes les cultures fruitières (> 50%). Les suspensions à base du nématode *Steinernema feltiae* contre le dernier stade larvaire de *C. capitata* et les pupes montre que les larves et les jeunes pupes sont les plus susceptibles à l'infection par les nématodes entomopathogènes que les pupes plus âgées. La virulence du nématode est proportionnelle à l'augmentation de l'humidité du sol. Le traitement fongique à base de *B. bassiana* BMAUM M6-4 est très efficace contre les larves du 3^{ème} stade et des pupes de *C. capitata* et provoque une mortalité et réduit l'émergence des adultes de plus de 50%. Les champignons entomopathogènes et les nématodes entomopathogènes sont prometteurs en tant qu'agent de lutte biologique pouvant être utilisé sous différents modes d'application au sol contre les larves, les prépupes, et / ou comme appât par pulvérisation ou contact contre des adultes.

Mots clé : *C. capitata*, génération, piégeage, infestation, *Steinernema feltiae*, *Bauveria bassiana*.

Bio-ecology of the Mediterranean fruit fly *Ceratitidis capitata* (Wiedemann) (Diptera: Tephritidae) in Mitidja and laboratory biological control tests.

Abstract

The Mediterranean fruit fly, *Ceratitidis capitata*, Wiedemann, 1824 (Diptera; Tephritidae) is considered a key pest in fruit arboriculture. It is a highly polyphage species and is characterized by a high capacity for adaptation and propagation, which gives it invasive status in many countries. The study of population dynamics reveals that in Mitidja, Medfly develops 9 annual generations. Of which the 1st is observed between February and May on citrus. The 2nd generation occur on loquat. This culture plays an important role as an alternative host between March and June, allowing the wintering generation of this pest to start a new generation on this host fruit and thus ensure the continued development of the insect. *C. capitata* develops nine generations in the different arboreal orchards in 2016 where the average annual temperature is 18.87 degrees Celsius. The first generation, the longest lasts 128 on citrus fruits while the shortest one takes place on summer, on peaches and figs and lasts 16 days. In 2018, there were 8 generations instead of 9. Attacks are mainly on citrus fruits such as Thomson navel and clementine, which carry 1.5 and 1 sting/fruit respectively. On seed fruit, Redhaven peaches are the most attacked with an average number ranging from 4 to 4.6 stings/fruit. Captures based on the type of traps show that the pheromone trap performs better in catching adults' medfly. The shortest pupation time is 8 days safe sin (in summer), it is longer in citrus fruits (24 days) (in winter). High adult emergence rates (50%). Suspensions based on the *Steinernema feltiae* nematode against the last larval stage of *C. capitata* and pupae show that larvae and young pupae are more susceptible to infection with entomopathogenic nematodes than older pupae. The virulence of the nematode is proportional to the increase in soil moisture. Fungal treatment based on *B. bassiana* BMAUM M6-4 is very effective against larvae of the 3rd stage and pupae of *C. capitata* and causes mortality and reduces the emergence of adults by more than 50%. Entomopathogenic fungi and Entomopathogenic nematodes are promising as a biocontrol agent that can be used under different modes of ground application against larvae, prepupae and pupae, and/or as a bait spraying or contact against adults.

Keywords: *C. capitata*, generation, trapping, infestation, *Steinernema feltiae*, *Bauveria bassiana*.

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je voudrais adresser une pensée à tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, que ce soit, par un conseil, une idée, un coup de main ou, tout simplement leur amitié, m'ont aidée à le réaliser.

je remercie Dieu le tout puissant, de m'avoir donné la force et le courage pour pouvoir suivre ce travail et dépasser toutes les difficultés.

Je voudrais remercier, mon directeur de thèse à **M. BENZEHRA Abdelmadjid**, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Mes remerciements vont également à **M. BICHE Mohamed**, professeur à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique d'EL-HARRACH pour avoir accepté de présider le jury de cette thèse. Qu'elle soit assurée de ma reconnaissance pour avoir accepté de juger et critiquer mon travail me permettant de finaliser ce travail avec toute la rigueur et la curiosité d'un vrai scientifique.

Mes vifs remerciements vont aussi à **Mme BENDIFALLAH Leila**, professeur à l'université de Boumerdes et **M. OUKIL Salah**, Maître de recherche à l'INRA, pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche, en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions, et pour avoir accepté de juger le présent travail.

Je tiens à remercier Monsieur le Professeur **Ismail KARACA** de m'avoir accueillie dans son laboratoire. Je le remercie vivement de m'avoir donné accès au monde de la recherche scientifique. D'avoir mis à ma disposition toutes les informations et le matériel nécessaires me permettant de réaliser ce travail de doctorat dans des conditions optimales. Qu'il soit assuré de toute ma sympathie et de ma reconnaissance de tous les moments passés en sa compagnie.

Je tiens également à remercier le Professeur **Ali Kemal** pour ses conseils, ses commentaires judicieux et ses suggestions précieuses.

Je remercie Madame **BERRAI Hassiba**, Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie, pour sa gentillesse, ses précieux conseils et son aide.

J'exprime également toute ma gratitude à **Umech Gautam** pour son partage généreux de ses connaissances. J'ai beaucoup appris grâce à toi.

Je voudrais également adresser mes plus sincères remerciements à **Tudgce OZEK**, Je me rappellerais longtemps de sa bonne humeur, de sa gentillesse et sa douceur.

Je tiens à remercier spécialement Docteur **SAHARAOUI Lounes** pour sa disponibilité et la qualité de ses conseils et pour l'aide qu'il a fournie.

Je remercie en particulier **M. Yacine**, pour m'avoir donné l'occasion de réaliser mon travail de terrain.

Ces remerciements ne seraient pas complets sans mentionner le soutien et les encouragements fournis tout au long de ces années par mes amis et mes proches. Je remercie mes très chers parents, **Mourad et Khadidja**, qui ont toujours été là pour moi. Je remercie ma sœur **Manel**, et mes frères **Abdelhadi** et **Redouane** pour leurs encouragements.

Je remercie mon cher époux **Amine**, pour son soutien quotidien indéfectible et son enthousiasme contagieux à l'égard de mes travaux comme de la vie en général. Merci de l'amour que tu me portes.

Mes remerciements vont aussi à mes amis qui, avec cette question récurrente, « Quand est-ce que tu la soutiens cette thèse ? », bien qu'angoissante en période fréquente de doutes, m'ont permis de ne jamais dévier de mon objectif.

Je remercie mon amie, **Khadidja**, qui a toujours été là pour moi. Son soutien inconditionnel et ses encouragements ont été d'une grande aide.

Je remercie plus particulièrement mon amie, **Asma**, qui m'a offert son amitié, et son aide. Et qui a su transformer les sorties de terrain en des moments agréables et inoubliables.

Mes remerciements s'adressent également à toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions durant mes recherches.

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude et Je vous souhaite à tous une agréable lecture !

Je dédie cette thèse à :

A MA TRES CHERE MERE

Source inépuisable de tendresse, de patience et de sacrifice. Ta prière et ta Bénédiction m'ont été d'un grand secours tout au long de ma vie.

Tu as été et tu seras toujours un exemple pour moi par tes qualités humaines, ta persévérance et perfectionnisme.

Quoique je puisse dire et écrire, je ne pourrais exprimer ma grande affection et ma profonde reconnaissance. J'espère ne jamais te décevoir, ni trahir ta confiance et tes sacrifices.

Puisse Dieu tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et Bonheur.

A MON TRES CHER PERE

De tous les pères, tu es le meilleur.

Aucune dédicace ne saurait exprimer mes respects, ma reconnaissance et mon profond amour. Puisse Dieu vous préserver et vous procurer santé et bonheur.

A MES FRERES ET MA SOEUR

Je ne saurai traduire sur du papier l'affection que j'ai pour vous, je n'oublierai jamais ces merveilleux moments passés ensemble, j'implore Allah de vous réserver un avenir meilleur.

A MON CHER EPOUX

Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon amour et mon attachement à toi.

Depuis que je t'ai connu, tu n'as cessé de me soutenir et m'encourager. Tu me voulais toujours le meilleur.

Ton amour ne m'a procuré que confiance et stabilité. Tu as partagé avec moi les meilleurs moments de ma vie, et aux moments les plus difficiles de ma vie, tu étais toujours à mes côtés.

A MES BEAUX PARENTS

Vous m'avez accueilli les bras ouverts. Je vous dédie ce travail en témoignage de mon grand respect et mon estime envers vous. Pour vos conseils et votre soutien moral. J'implore dieu qu'il vous apporte bonheur et santé.

A TOUTE MA FAMILLE ET A TOUS MES AMIS

Il me serait difficile de vous citer tous, vous êtes dans mon cœur, affectueusement.

Table des matières

Résumé

Remerciements

Dédicaces

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale	1
-----------------------------	---

PARTIE 1 : REVUES BIBLIOGRAPHIQUES

CHAPITRE I : Généralités sur la cératite

1. Place de la Cératite dans la taxonomie.....	5
2. Caractéristiques morphologiques.....	5
3. Biologie de la Cératite.....	10
3.1. Ponte et incubation	10
3.2. Développement larvaire.....	10
3.3. Pupaison et émergence des adultes.....	10
3.4. Cycle de vie de la Cératite.....	10
4. Ecologie de la Cératite.....	14
4.1. Origine et aire de répartition.....	14
4.2. Influence des facteurs écologiques.....	16
4.2.1. Facteurs climatiques.....	16
4.2.1.1. Température.....	16
4.2.1.2. Humidité relative.....	16
4.2.1.3. Vents.....	16
4.2.1.4. Lumière.....	17
4.2.2 Facteurs édaphiques.....	17
4.2.3. Facteurs biotiques.....	17
4.2.3.1. Hôte.....	17
4.2.3.2. Compétition larvaire.....	17
4.2.3.3. Ennemis naturels.....	18

5. Plantes hôtes, dégâts et moyens de lutte.....	18
5.1. Plantes hôtes.....	18
5.1.1 Importance de l'hôte.....	18
5.1.2. Mécanisme de localisation de la plante hôte.....	19
5.1.3. Etapes de la sélection de l'hôte.....	19
5.1.4. Assimilation des stimuli olfactifs par les insectes.....	20
5.1.5. Composés volatils des plantes.....	21
5.1.5.1 Classification des composés volatils.....	21
5.1.5.2. Fonction des composés volatils.....	21
5.1.5.3. Attractivité des composés volatils.....	22
5.2 Dégâts de la cératite.....	22
5.3 Moyens de lutte.....	24
5.3.1. Mesures prophylactiques et culturales.....	24
5.3.2. Lutte chimique.....	25
5.3.3. Lutte biotechnique.....	27
5.3.3.1. Lutte autocide	27
5.3.3.2. Confusion sexuelle.....	28
5.3.3.3. Piégeage de masse.....	29
5.3.3.4. Surveillance des populations.....	30
5.3.3.5. Bait station.....	31
5.3.4 Lutte biologique.....	32
5.3.4.1. Utilisation d'ennemis naturels.....	32
5.3.4.2. Lutte microbiologique.....	32
5.3.4.2.1. Bactéries entomopathogènes.....	33
5.3.4.2.2. Champignons entomopathogènes.....	34
5.3.4.2.3. Nématodes entomopathogènes.....	37
5.3.4.3. Bio pesticides végétaux.....	39

CHAPITRE II : Présentation de la région d'étude

1. Situation géographique de la Mitidja.....	42
2. Facteurs abiotiques et biotiques.....	43
2.1 Facteurs abiotiques.....	43
2.1.1. Température.....	43
2.1.2. Pluviométrie.....	44
2.1.3. Humidité relative (HR%).....	45
2.1.4. Vent.....	46

2.1.5. Synthèse climatique.....	46
2.1.5.1. Diagramme pluviothermique.....	46
2.1.5.2. Climagramme d'Emberger.....	47
2.1.6 Facteurs édaphiques.....	48
2.1.6.1. Facteurs pédologiques et leurs implications agricoles.....	49
2.1.7. Facteurs Hydrographiques.....	50
2.2 Facteurs biotiques.....	50
2.2.1. Données floristiques.....	50
2.2.2. Données faunistiques.....	51
2.2.2.1. Gastéropodes.....	52
2.2.2.2. Araneides.....	52
2.2.2.3. Insectes.....	52
2.2.2.4. Myriapodes.....	52
2.2.2.5. Batraciens et reptiles.....	52
2.2.2.6. Oiseaux.....	52
2.2.2.7. Mammifères.....	53

PARTIE 2 : RECHERCHE EXPERIMENTALE

CHAPITRE III : Matériel et méthodes

Partie I. Etude de la bio-écologie de *C. capitata*

1. Choix des Vergers d'expérimentation.....	54
1.2. Description des sites.....	54
1.2.1. Verger de néflier.....	54
1.2.2. Verger d'abricotier variété Bulida.....	55
1.2.3. Verger de Pêcher variété Redhaven.....	56
1.2.4 Verger de poirier variété Santa maria.....	57
1.2.5 Verger de Figuier variété Thamourth et Ajenjar.....	57
1.2.6 Verger d'agrumes.....	58
2. Méthodologie.....	59
2.1. Sur terrain.....	59
2.1.1. Types de piégeage.....	59
2.1.1.1 Piège Mc-Phail.....	59
2.1.1.2 Plaques engluées jaunes et bleues.....	60
2.1.2 Etude de l'infestation par la cératite.....	62

2.2. En laboratoire.....	62
2.2.1 Dénombrement d'individus capturés.....	62
2.2.2 Détermination du nombre de générations annuelles.....	63
2.2.3 Etude de l'infestation par <i>C. capitata</i>	64
2.2.3.1 Dégâts selon les piqures sur le fruit.....	64
2.2.3.2 Dégâts selon le nombre de larves par fruit.....	64
2.2.4 Étude de quelques paramètres biologiques de la cératite.....	65
2.2.4.1 Détermination de la durée de pupaison.....	65
2.2.4.2 Taux d'émergence.....	65
2.2.4.3 Sex-ratio.....	66

Partie II. Essais de lutte biologique en laboratoire

1. Matériel biologique.....	66
1.1 Élevage d'insectes.....	66
1.2 Nématode entomopathogène et Choix des doses.....	68
1.3 Isolat fongique.....	68
1.3.1 Préparation de la suspension de spores et leur germination.....	69
2. Méthodologie.....	69
2.1 Essai de lutte biologique par nématode.....	69
2.1.1 Dispositif expérimental pour le traitement des larves.....	70
2.1.1.1 Traitement des larves par contact sur papier filtre.....	70
2.1.1.2 Traitement des larves par pulvérisation du sol.....	70
2.1.2 Dispositif expérimental pour le traitement des pupes.....	71
2.1.2.1. Traitement par contact sur papier filtre.....	71
2.1.2.2. Traitement par pulvérisation du sol.....	72
2.1.3. Dispositif expérimental pour le traitement des adultes.....	72
2.1.4. Influence de l'humidité du sol sur la virulence de <i>S. feltiae</i>	73
2.1.4.1. Détermination de la teneur en eau du sol.....	73
2.1.4.2. Dispositif expérimental pour traitement de larves et de pupes.....	73
2.2. Essai de lutte biologique par champignon.....	74
2.2.1 Dispositif expérimental pour le traitement des larves.....	74
2.2.1.1 Essai sur papier filtre.....	74
2.2.1.2 Essai sur le sol.....	75
2.2.2. Dispositif expérimental pour le traitement des pupes.....	75
2.2.2.1 Essai sur papier filtre.....	75
2.2.2.2 Essai sur le sol.....	76

2.2.3. Dispositif expérimental pour le traitement des adultes.....	77
2.2.3.1 Traitement par contact.....	77
2.2.3.2 Essai biologique par ingestion.....	77

CHAPITRE IV: Résultats et discussion

Partie I : Etude de la bio-écologie

1. Nombre et durée des générations selon la méthode d'accumulation d'unités de chaleur.....	79
1.1. Nombre et durée des générations pour 2016.....	79
1.2. Nombre et durée des générations pour 2017.....	80
1.3. Nombre et durée des générations pour 2018.....	81
2. Nombre et durée des générations selon Audemard and milaire.....	82
2.1. Nombre et durée des générations pour 2016.....	82
2.2. Nombre et durée des générations pour 2017.....	84
2.3. Nombre et durée des générations pour 2018.....	85
3. Comparaison entre les générations observées et prédites.....	87
4. Captures selon le type de piégeage et la culture.....	89
4.1. Piège à phéromones.....	89
4.2 Piège englué jaune.....	89
4.3 Piège englué bleu.....	90
5. Comparaison des captures selon le type de piégeage.....	91
6. Estimation de l'infestation.....	92
6.1. Nombre moyen et taux de piqûres/fruit.....	92
6.1.1. Sur agrumes.....	92
6.1.2. Sur fruits à noyau et à pepins.....	93
6.2 nombre moyen de larves par fruit.....	94
6.2.1 Sur agrumes.....	94
6.2.2. Sur fruits à noyau et à pepins.....	94
7. Paramètres biologiques de <i>C. capitata</i>	95
7.1 Durée de pupaison.....	95
7.2 Taux d'émergence.....	96
7.2.1 Sur Agrumes.....	96
7.2.2. Sur les fruits à noyau et à pépins.....	97
7.3 Sex-ratio.....	97

Partie II. Essais de lutte biologique en laboratoire

1. Essai de lutte biologique par <i>S. feltiae</i>	98
1.1. Traitement des larves par contact sur papier filtre et par pulvérisation du sol...	98
1.1.2. Infection des larves par <i>S. feltiae</i>	99
1.2. Traitement des pupes par contact sur papier filtre et par pulvérisation du sol...	100
1.3. Traitement des adultes par ingestion.....	101
1.4. Influence de l'humidité du sol sur la virulence de <i>S. feltiae</i>	102
2. Essai de lutte biologique par <i>B. bassiana</i>	103
2.1. Pathogénicité vis-à-vis des larves du 3 ^{ème} stade.....	103
2.2. Pathogénicité contre les pupes.....	104
2.3. Pathogénicité contre les adultes.....	105
Discussion.....	108
1. Étude de la bio-écologie de <i>C. capitata</i>	108
2. Pathogénicité de <i>S. feltiae</i>	116
3. Pathogénicité de <i>B. bassiana</i>	119
Conclusion générale et perspectives.....	122
Références bibliographiques.....	127

Liste des figures

Figure 1.	Stades larvaires de <i>C. capitata</i>	6
Figure 2.	Pupes de <i>C. capitata</i>	7
Figure 3.	Adulte de <i>C. capitata</i> . A : Mâle, B: Femelle.....	8
Figure 4.	Patte médiane (P2) de <i>C. capitata</i>	9
Figure 5.	Aile de <i>C. capitata</i>	9
Figure 6.	Cycle de développement de <i>C. capitata</i>	11
Figure 7.	Nombre de générations et plantes hôtes en Algérie.....	12
Figure 8.	Dévagination phénoménale (G X40)	13
Figure 9.	Répartition géographique de <i>C. capitata</i>	15
Figure 10.	Structure d'une sensille.....	20
Figure 11.	Point de pique de <i>C. capitata</i> sur agrumes.....	23
Figure 12.	Fruits piqués par <i>C. capitata</i> impropres à la commercialisation.....	23
Figure 13.	Piège chromatique englué jaune saturé.....	30
Figure 14.	Situation géographique de la Mitidja.....	42
Figure 15.	Diagramme pluviothermique sur 10 années de 2007 à 2016 dans la localité de Dar El Beida.....	47
Figure 16.	Climagramme d'Emberger sur 10 années de 2007 à 2016 de la localité de Dar El-Beida.....	48
Figure 17.	Proportion des classes de sols dans la Mitidja.....	50
Figure 18.	Verger de néflier de la station expérimentale de l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie.....	55
Figure 19.	Verger d'abricotier Variété Bulida de la station expérimentale de l'Université de Saad Dahleb.....	56
Figure 20.	Verger de Pêcher Variété Redhaven de Hatatba (Tipaza)	56
Figure 21.	Verger de poirier Variété Santa maria à l'Institut Technique en d'Arboriculture Fruitière et de la Vigne (ITAFV) (Tassala El Merdja).....	57
Figure 22.	Verger de Figuier Variété Thamourth et Ajenjar. à l'Institut Technique d'Arboriculture Fruitière et de la Vigne (ITAFV) (Tassala El Merdja).....	58

Figure 23.	Piège à phéromones sur Clémentinier.....	59
Figure 24.	Piège à phéromones sur figuier.....	60
Figure 25.	Piège englués jaune et bleu sur quelques spéculations.....	61
Figure 26.	Piqures sur fruits provoquées par <i>C. capitata</i>	64
Figure 27.	Comptage et récupération des larves de <i>C. capitata</i>	65
Figure 28.	Elevage de la cératite.	67
Figure 29.	Juveniles infectueux de <i>S. feltiae</i> vu sous microscope.....	68
Figure 30.	Champignon entomopathogène (aspect macroscopique)	69
Figure 31.	Dispositif expérimental du traitement des larves L ₃	71
Figure 32.	Dispositif expérimental pour le traitement des pupes.....	72
Figure 33.	Dispositif expérimental pour le traitement des adultes.....	73
Figure 34.	Dispositif expérimental pour traitement de larves et de pupes.....	74
Figure 35.	Dispositif expérimental pour le traitement des larves.....	75
Figure 36.	Dispositif expérimental pour le traitement des pupes.....	76
Figure 37.	Dispositif expérimentale pour le traitement des adultes.....	78
Figure 38.	Nombre de générations de <i>C. capitata</i> sur le terrain, selon la méthode d'Audemard et milaire (1975) et Iacob (1977) dans les différents vergers fruitiers de la région de Mitidja, 2016.....	83
Figure 39.	Nombre de générations de <i>C. capitata</i> sur terrain, selon la méthode d'Audemard et milaire (1975) et Iacob (1977) dans les différents vergers fruitiers de la région de Mitidja, 2017.....	84
Figure 40.	Nombre de générations de <i>C. capitata</i> sur terrain, selon la méthode d'Audemard et milaire (1975) et Iacob (1977) dans les différents vergers fruitiers de la région de Mitidja, 2018.....	86
Figure 41.	Nombre total de captures par le piège à phéromones sur les différentes cultures étudiées.....	89
Figure 42.	Nombre total de captures dans le piège englué jaune sur les différentes cultures étudiées.....	90
Figure 43.	Nombre total de captures dans le piège englué bleu sur les différentes cultures étudiées.....	91
Figure 44.	Comparaison entre les captures selon le type de piégeage.....	91
Figure 45.	Nombre moyen et taux de piqures/fruit sur agrumes en 2016.....	92

Figure 46.	Nombre moyen et taux de piqures sur fruits à noyau et à pépins	93
Figure 47.	Nombre moyen de larves par fruit sur agrumes en 2016.....	94
Figure 48.	Nombre moyen de larves par fruit selon les différentes espèces fruitières étudiées.....	95
Figure 49.	Taux moyen d'émergence chez les variétés d'agrumes (2016)	97
Figure 50.	Taux moyen d'émergence chez les fruits à noyau et à pépins.....	97
Figure 51.	Pourcentage de mortalité des larves selon la concentration de <i>S. feltiae</i> du traitement par contact sur papier filtre et par pulvérisation du sol.....	99
Figure 52.	Larve de <i>C. capitata</i> parasitée par <i>S. feltiae</i> vue sous Stéréo-microscope...	100
Figure 53.	Pourcentage d'émergence des pupes de <i>Ceratitis capitata</i> traitées avec les différentes concentrations de <i>S. feltiae</i>	101
Figure 54.	Pourcentage de mortalité (Moyenne \pm SEM) des adultes de <i>C. capitata</i> traités avec différentes concentrations de <i>S. feltiae</i>	102
Figure 55.	Pourcentage de mortalité cumulée en fonction taux d'humidité du sol.....	103
Figure 56.	Pourcentage de mortalité de larves traitées de <i>C. capitata</i> avec la suspension de <i>B. bassiana</i> BMAUM M6-4 à 10^7 conidia /ml et émergence des adultes.....	104
Figure 57.	Pourcentage d'émergence après traitement des pupes de <i>C. capitata</i> avec une suspension de <i>B. bassiana</i> à 10^7 conidies/ml. A : Application sur papier filtre, B : Application au sol.....	105
Figure 58.	Taux de mortalité des adultes de <i>c. capitata</i> en fonction du	106
Figure 59.	Symptômes d'infection chez les adultes de <i>C. capitata</i> induits par <i>B. bassiana</i> isolate BMAUM M6-4.....	107

Liste des tableaux

Tableau 1.	Répartition et date de la première observation de <i>C. capitata</i> dans les pays endémiques.....	14
Tableau 2.	Températures mensuelles moyennes des maxima et des minima de 2016, 2017 et 2018 de la station météorologique de Dar El Beida.....	44
Tableau 3.	Précipitations mensuelles en mm de 2016, 2017 et 2018 de la station météorologique de Dar El Beida.....	45
Tableau 4.	Humidité relative moyenne (%) de 2016, 2017 et 2018 de la station météorologique de Dar El Beida.....	46
Tableau 5.	Vitesse (km/h) moyenne mensuelle du vent de 2016, 2017 et 2018 de la station météorologique de Dar El Beida.....	46
Tableau 6.	Tableau récapitulatif des périodes de piégeage (pièges à phéromones et plaques engluées) sur les différentes cultures fruitières pour 2016, 2017 et 2018.	61
Tableau 7.	Dates d'échantillonnage sur différentes spéculations fruitières.	62
Tableau 8.	Nombre et durée des générations annuelles de <i>C. capitata</i> pour la saison 2016 en Mitidja, calculés en fonction de la constante thermique et du degré/jour selon la méthode de Richmond (1983).	80
Tableau 9.	Nombre et durée des générations annuelles de <i>C. capitata</i> pour la saison 2017 en Mitidja, calculés en fonction de la constante thermique et du degré du jour selon Richmond (1983)	81
Tableau 10.	Nombre et durée des générations annuelles de <i>C. capitata</i> pour la saison 2018 en Mitidja, calculés en fonction de la constante thermique et du degré du jour. Selon Richmond (1983).....	82
Tableau 11.	Estimation du nombre et durée des générations annuelles d'adultes de <i>C. capitata</i> en Mitidja au cours de la saison 2016.....	83
Tableau 12.	Estimation du nombre et durée des générations annuelles d'adultes de <i>C. capitata</i> en Mitidja au cours de la saison 2017, d'après Audemard et Milaire (1975) et Iacob (1977).....	85

Tableau 13.	Estimation du nombre et durée des générations annuelles d'adultes de <i>C. capitata</i> en Mitidja au cours de la saison 2018 d'après Audemard et Milaire (1975) et Iacob (1977).	86
Tableau 15.	Durée de pupaison de la cératite selon la spéculation.	88
Tableau 16.	Sex-ratio selon la spéculation sur trois années consécutives, 2016, 2017, 2018.	96

INTRODUCTION

Introduction

La Mouche méditerranéenne des fruits *Ceratitis capitata* (Wied, 1824) (Diptera : Tephritidae) communément appelée « Cératite », est considérée comme l'une des espèces les plus nuisibles en arboriculture fruitières dans les pays méditerranéens (Malacrida et al. 2007). Depuis son aire d'origine de l'Afrique du centre-est, la cératite s'est répandue sur tout le continent jusqu'au sud et dans le bassin méditerranéen au nord, y compris l'Europe (Gasparich, Silva et al. 1997). Puis l'invasion s'est étendue à l'Amérique centrale et du Sud, à l'Australie occidentale, au Moyen-Orient et aux îles hawaïennes (Malacrida et al. 2007). Signalée pour la première fois en Algérie en 1858 (Bodenheimer, 1951), Elle s'est propagée en particulier, dans toutes les régions littorales et dans les oasis où les conditions bioclimatiques sont favorables à son extension. En effet, ce grand pays, de par sa position géographique et ses diverses conditions pédoclimatiques, a le privilège de mettre en culture plusieurs espèces fruitières et de produire des fruits frais tout au long de l'année. Connue sous le nom de capitale des agrumes, la Mitidja bénéficiant d'un climat méditerranéen subhumide et de sols fertiles, offre une très grande diversification de fruits hôtes dont la production s'étale sur toute l'année permettant ainsi le développement de plusieurs générations de la Cératite sur ces cultures.

La Cératite est considérée comme l'insecte le plus nuisible en arboriculture fruitière (Malacrida et al. 2007). Elle est très polyphage, et s'attaque à plus de 350 espèces cultivées (Liquido et al. 1991) et cause des dégâts considérables qui peuvent engendrer, dans le cas de fortes attaques, l'anéantissement de la quasi-totalité de la récolte. Les dommages causés par la cératite consistent en des piqûres de pontes et des galeries dans le fruit donnant aux fruits un mauvais aspect extérieur. En effet, les femelles adultes de la cératite pondent dans les fruits au cours de sa maturation. Les larves se nourrissent de la pulpe des fruits encore dans l'arbre en causant des galeries dans le fruit. Les piqûres et les galeries constituent une voie de pénétration des champignons et des bactéries responsables de la décomposition et de la chute prématurée des fruits. Les dégâts constituent ainsi un obstacle majeur pour les exportations car elle dévalorise la marchandise. En outre certains pays importateurs imposent des mesures de quarantaines. Par conséquent, la cératite constitue le principal obstacle à la production et à l'exportation

des fruits (Oukil et al, 2002) et elle entraîne des dépenses monumentales de lutte lorsqu'elle pullule.

En Algérie, De nombreux travaux de recherches ont été réalisés en vue de maîtriser la bio-écologie de la cératite, On cite les travaux de Dridi (1990) qui a fait une étude comparative entre une souche d'élevage et une souche sauvage de *C. capitata* provenant d'Algérie. Ali-Ahmed-Sadoudi (2007, 2012) qui a étudié la biologie de la Mouche à partir des pupes obtenues de différentes variétés fruitières de la Kabylie (poids des pupes, durée de pupaison, taux d'émergence, sex-ratio et la longévité des adultes). L'étude de la dynamique des populations et de la bio-écologie sont très importantes pour tout programme de contrôle car elles fournissent des informations détaillées sur les tendances saisonnières du nuisible en fonction de la disponibilité et l'abondance de l'hôte ainsi que l'influence des conditions climatiques saisonnières sur le cycle de vie de *C. capitata* (Aluja and Mangan 2008). En déterminant les plantes les plus vulnérables aux attaques et les plantes capables de maintenir leur population dans les zones de distribution des mouches.

Pour les années à venir, le réchauffement climatique est un facteur à prendre en compte dans l'évaluation du risque et dans la gestion des bio-agresseurs des cultures. Car en conséquence des changements globaux, le contrôle des populations d'insectes est de plus en plus difficile de par la hausse des températures moyennes qui devrait augmenter leur taux de survie durant l'hiver, leur taux de reproduction et leur nombre de générations par an (Pryor et al. 2014).

En Algérie, les stratégies de lutte contre la mouche Méditerranéenne des fruits, reste essentiellement chimique malgré les inconvénients sur les équilibres écologiques et les résistances apparues chez l'insecte. Le contrôle n'étant pas encore maîtrisé, le ravageur continue à faire des dégâts de plus en plus considérables sur les récoltes, ce qui impacte la quantité et la qualité des fruits. Face à l'inefficacité et aux problèmes posés par l'utilisation de pesticides, les efforts des chercheurs se sont focalisés sur le développement de la lutte biologique contre ce fléau. Parmi les moyens de lutte développés contre la cératite, les pratiques culturales tels que le choix de variétés résistantes et l'élimination de plantes hôtes de moindre importance peuvent s'avérer très efficaces dans la réduction des populations de ce prédateur (Balachowsky et Mesnil, 1953). Des recherches approfondies ont été menées, en vue de substituer aux insecticides

d'autres moyens tels que la lutte biologique et la lutte autocide. Cette dernière appelée aussi technique de l'insecte stérile « TIS », l'efficacité de cette méthode au moyen de lâchers de mâles stérilisés aux rayons gamma a été prouvée et a permis de limiter les populations de ce ravageur dans de nombreux pays comme le Maroc, l'Espagne et le Mexique (Oukil, 1995). Dans la recherche des méthodes alternatives de lutte, le règne végétal offre beaucoup de possibilités. En effet, plus de 59 familles et 188 genres de plantes sont utilisés dans la lutte contre les bio agresseurs (Simmonds et al. 2000). Les métabolites secondaires produits par les plantes constitue une défense directe contre les herbivores (Elsayed 2011). Ils peuvent être anti-appétant, dissuasifs de la ponte ou répulsifs spatiaux ou même insecticides pour certains groupes d'insectes (Levinson et al. 2003). Il est connu que l'utilisation des extraits de plantes contribue à la réduction de l'emploi des pesticides chimiques et la pollution de l'environnement, ce qui constitue une alternative très prometteuse du fait de son efficacité et son innocuité sur l'environnement (Weaver & Subramanyam, 2000). Dans cette perspective des études récentes ont été entreprises dans le but d'évaluer l'effet bio-insecticide des huiles essentielles contre *C. capitata*. Nous citons les travaux de Bachi (2018). Dans le cadre de la lutte biologique contre *C. capitata*, Boudjlida et Soltani (2011), ont testé l'activité insecticide d'un champignon entomopathogène, *Metarhizium anisopliae* contre le troisième stade larvaire et les adultes de *C. capitata*. Nous citons également les travaux de Bachi (2018), qui a étudié l'effet de la suspension condienne de *Penicillium roqueforti* sur les larves et les pupes de la mouche. Outre les champignons entomopathogènes, les nématodes, appartiennent à la microfaune du sol, agissant en symbiose avec des bactéries pour réussir leur activité insecticide (Wraight et al., 2016). Les nématodes entomopathogènes ont attiré l'intention et ont suscité un intérêt considérable des scientifiques pour leur efficacité quant à leur potentiel en lutte biologique.

Dans ce contexte, les travaux de la présente thèse s'inscrivent dans la recherche de moyens de lutte biologiques capables de réduire les populations de la cératite. La première démarche de ce travail consiste en l'étude de la dynamique des populations de la mouche méditerranéenne des fruits *C. capitata* et l'estimation du nombre de générations sous les conditions climatiques actuelles, l'estimation des dégâts et la surveillance de celle-ci à l'aide de deux types de piégeage.

Notre travail vise à proposer des alternatives de lutte biologique. Pour ce faire nous avons évalué l'efficacité de deux entomopathogènes, un nématode et un champignon

en vue de leur utilisation en lutte biologique. Ces nématodes entomopathogènes et champignons entomopathogène vivent dans le sol et sont capables d'infecter un large éventail d'insecte et sont largement utilisés pour lutter contre les insectes nuisibles ayant des stades de développement dans le sol. La mouche méditerranéenne des fruits passant une partie de leur cycle biologique dans le sol, où elle peut être la cible à ces nématodes ou champignons entomopathogènes.

Lors de nos travaux de recherches, nous nous sommes intéressés à l'évaluation de la pathogénicité de l'isolat Turque de *Steinernema feltiae* contre les différents stades de développement de la cératite d'une part, et d'autre part à la détermination de l'influence de la densité du nématode et l'impact de l'humidité du sol sur la virulence de celui-ci.

Nous nous sommes également intéressés à la détermination de la toxicité du champignon de *Bauveria bassiana* vis-à-vis des différents stades de développement de la mouche via différents modes de traitement.

L'objectif tracé est de tester l'efficacité contre les différents stades de développement de l'insecte et de répondre aux questions suivantes : est-ce que la toxicité est significative selon les doses testées du nématode contre *C. capitata*. Si c'est le cas, quelles sont celles qui donneront la mortalité la plus élevée.

Est-ce que l'âge des pupes joue un rôle dans l'efficacité ?

Déterminer l'influence de l'humidité du sol sur l'efficacité de ces nématodes.

Ainsi, cette thèse est scindée en 4 grands chapitres.

Le premier chapitre consiste en une synthèse bibliographique sur la cératite et sur la lutte biologique. Le deuxième chapitre sera consacré à la présentation des zones d'études et des variétés fruitières étudiées. Le troisième rapporte toute la méthodologie appliquée sur le terrain et au laboratoire ainsi que le matériel utilisé. Le quatrième regroupe les différents résultats obtenus accompagnés d'une discussion. Nous terminons par une conclusion générale et quelques perspectives.

Revue bibliographique

CHAPITRE I

=

**Généralités sur la ceratite,
Ceratitis Capitata (Weidemann, 1829).**

1. Place de la ceratite dans la taxonomie

Ceratitis capitata est une espèce qui a été décrite sous plusieurs noms *Trypeta capitata* en 1824 par Wiedemann, *Petalophora capitata* Macepi en 1825, *Trypeta citriperda* Mac leay en 1829 ; *Trypeta hispanica* de Brème en 1842 (Goureau, 1861 ; Laboulbène, 1871) puis *Ceratitis flexuosa* walk en 1856 et *Pardalapsis asparagi* Bezzi en 1942. Balachowsky et Mesnil (1935), ont retenu le nom *Ceratitis capitata* wiedemann 1829.

D'après Hendel (1927), Seguy (1934) et Constantino (1950) *C. capitata* weidemann (1829) est un insecte appartenant à :

- Classe.... Insectes
- Ordre.....Diptères
- Sous ordre.....Brachycères
- Division..... Cyclorraphes
- Groupe.....Schizophores
- Série.....Haplostomates
- Famille.....Tephritidae
- Genre.....*Ceratitis*
- Espèce.....*Ceratitis capitata*. (Weidemann, 1829)

L'espèce *Ceratitis Capitata* (Weidemann, 1829) est communément connue sous le nom de cératite, mouche des fruits ou mouche méditerranéenne des fruits.

2. Caractéristiques morphologiques

2.1. Œuf

De couleur blanc nacré, l'œuf est brillant, de forme allongée et arquée en son milieu. Il est convexe du côté dorsal et concave du côté ventral. Le tégument est nettement visible à la loupe binoculaire et on distingue bien ses particularités au microscope. Il est translucide lorsqu'il est fraîchement pondue et peut être manipulé facilement dans l'eau où

il peut éclore pour éviter la déshydratation (Thomas et al. 2001). L'œuf mesure entre 0,9 à 1,1 mm de long et 0,20 à 0,25 mm de large (Nunez, 1987 ; Elaini, 2003).

Chaque femelle peut déposer 2 à 10 œufs par ponte et arrive à mettre de 300 à 800 œufs durant toute sa vie (Sacantanis, 1951 ; White et Elson-Harris, 1994 ; Diez, 2007). Ils sont lisses et groupés lors de la ponte sous l'épiderme des fruits à une profondeur de 2 à 5 mm (Filippi, 2003). La durée d'incubation varie avec la température (24 à 72h), les seuils thermiques étant de 18 à 38°C (Sacantanis, 1951 ; Diez, 2007).

2.2. Larve

La larve communément appelée asticot, est acéphale, apode, lisse et de couleur blanc crème. Elle mesure environ 1 mm à l'éclosion, de forme conique effilée dans sa partie antérieure et sub-cylindrique et tronquée dans sa partie postérieure. Les antennes bien qu'elles existent, sont peu visibles. Les pièces buccales sont réduites aux crochets mandibulaires qui sont noirâtres. La larve passe par trois stades larvaires (Thomas et al. 2001 ; Jerraya, 2003) qui se différencient par la présence, le nombre, la forme et la taille des stigmates (Figure 1). La larve de 3ème stade est caractérisée par la présence de stigmates fortement chitinisés et par le saut larvaire caractérisant l'espèce, qu'elle réalise en s'arc-boutant et en se détendant brusquement pour tomber au sol, s'y enfoncer et s'y nymphoser (Thomas et al. 2001).

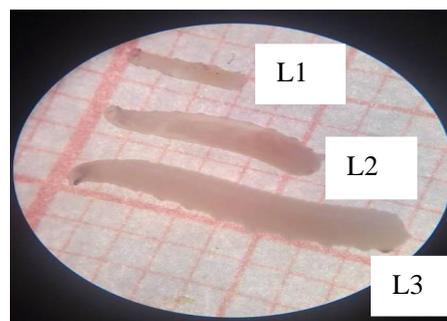


Figure 1. Stades larvaires de *C. capitata* (GX400).

(Originale).

2.3. Pupa

Le troisième stade larvaire (L₃) ne rejette pas son exuvie larvaire qui va lui servir d'enveloppe à l'intérieur de laquelle il se nymphose et forme le puparium. La pupa mesure 4 à 5 mm de longueur, elle a la forme d'un petit tonnelet elliptique, lisse et résistant (Figure

2). (White & Elson- Harris, 1992). Elle change progressivement de couleur pour devenir brun foncé (Thomas et al. 2001 ; Jerraya, 2003).



Figure 2. Pupes de *C. capitata*.
(Originale).

2.4. Adulte

La cératite est une mouche qui mesure environ 4,5 à 6 mm de long. Elle est caractérisée par un thorax noir luisant portant des ailes transparentes à larges bandes jaunes serties de brun (Thomas et al. 2001). Le scutellum entièrement noir dans la moitié apicale, est traversé par une ligne jaune sinueuse sub-basale. *C. capitata* présente un dimorphisme sexuel très net entre le mâle et la femelle. Cette dernière possède un ovipositeur rétractile, large et rougeâtre, permettant l'insertion des œufs dans les fruits (Figure 3B), alors que le mâle possède deux soies orbitales antérieures allongées et terminées chacune par une petite palette en forme de losange de couleur noirâtre (Figure 3A) (Balachowsky & Mesnil, 1935 ; White & Elson-Harris, 1994 ; Duyck, 2005). Outre les soies frontales et l'ovipositeur, le dimorphisme sexuel porte également sur la taille, la structure et la coloration de la pilosité (Jerraya, 2003).

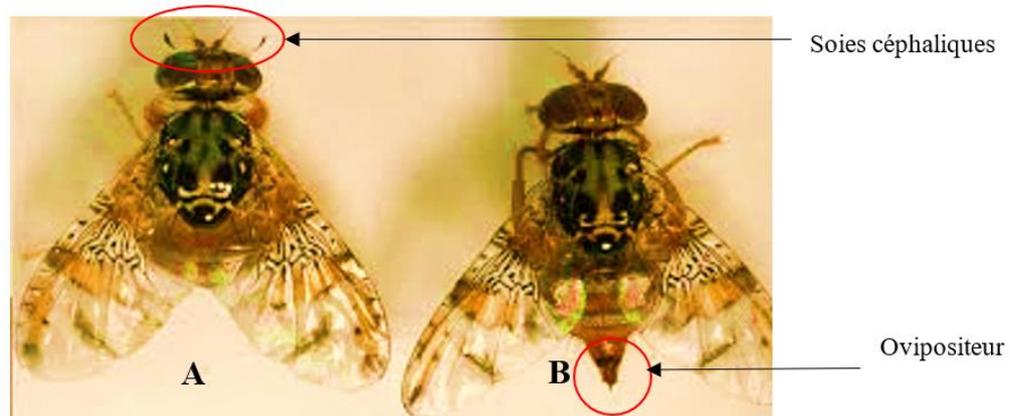


Figure 3. Adulte de *C. capitata*. **A** : Mâle, **B** : Femelle.
(Lachiheb, 2008).

➤ **Tête**

La tête est assez grosse, jaune, avec une bande de couleur brun clair entre les deux yeux à reflet vert émeraude. Le mâle et la femelle sont facilement distinguables grâce à deux caractéristiques morphologiques, le mâle porte deux soies orbitales noires aplaties en lamelles à l'apex qui permettent de les différencier aisément des femelles (Feron, 1962 ; White & Elson-Harris, 1992).

➤ **Thorax**

Le thorax est noir à pruinosités dessinant des bandes argentées ou grises. Les ailes, présentent des colorations typiques en bandes et des taches noires, ce qui la différencie de n'importe quelle autre espèce de mouches de fruits (Weems, 1981 ; Vayssiers et al. 2008).

➤ **Pattes**

Les pattes de *C. capitata* sont de couleur jaune. Au niveau du thorax du mâle, les pattes présentent un tibia médian sans soies vigoureuses disposées de manière à donner un aspect plumeux (Figure 4).

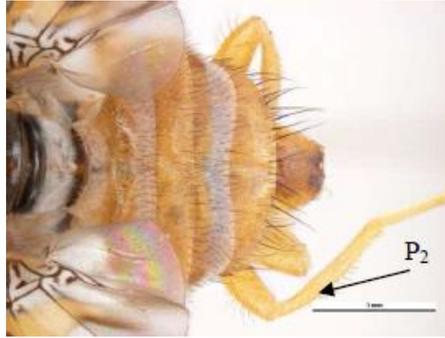


Figure 4. Patte médiane (P2) de *C. capitata* (Jeffrey 2004).

➤ **Ailes**

Au repos, les ailes de 4 à 6 mm de longueur, sont écartées par rapport au corps et inclinées de manière que leur bord extérieur touche presque le substrat, ce qui confère à l'insecte une allure caractéristique. Au niveau de l'aile la bande costale commençant après l'extrémité de la nervure radiale (R1), est séparée de la bande transversale discale par une zone hyaline à l'extrémité de R1 (Thomas et al. 2001). La nervation de l'aile se caractérise par :

- ❖ Deux fractures de la nervure costale (C).
- ❖ La courbure profonde de la cubitale (Cu2) coudée en S.
- ❖ L'angle aigu que fait la 1ère cellule discale avec la nervure médiane M2 (Figure 5).

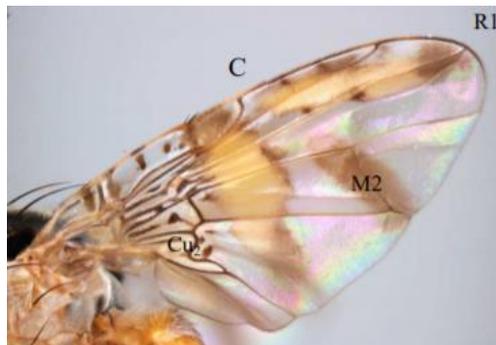


Figure 5. Aile de *C. capitata* (Jeffrey 2004).

C : nervure costale, R1 : radiale 1, M2 : médiane 2, Cu2 : cubitale 2.

➤ **Abdomen**

L'abdomen est fortement élargi, de couleur jaune orangé et rayé transversalement de deux bandes d'un blanc grisâtre (Balachowsky & Mesnil, 1935).

3. Biologie de la ceratite

3.1 Ponte et incubation

Au cours de sa vie, la femelle peut produire 300 à 1000 œufs. Ils sont généralement déposés sous la peau des fruits mûrs et ceux qui sont en début de maturité. Le trou de ponte est facile à remarquer sur les fruits (agrumes et abricots). La durée d'incubation des œufs dépend de la température. L'éclosion débute dans les conditions naturelles à des températures supérieures à 10°C, après 3 à 5 jours d'incubation. Selon Chouibani et al. (2015) l'incubation des œufs est de 2 à 5 jours en été et plus de 20 jours en hiver.

3.2 Développement larvaire

Le développement larvaire comprend trois stades, L₁, L₂ et L₃, il peut varier fortement en fonction du fruit hôte (Zucoloto, 1993). Les larves complètent leur développement dans la pulpe du fruit. La larve de troisième stade appelé « asticot » quitte le fruit par une brusque détente. Elle retombe au sol dans lequel elle s'enfonce pour se nymphoser et donner une puppe. Cette transformation ne dure que quelques heures (Duyck & Quilici, 2001 ; Duyck, 2005). De cette puppe émerge un adulte qui recommence le cycle à nouveau. D'après Delrio (1985) la durée du cycle de développement de la cératite dans la zone méditerranéenne varie de 20 jours en été à 2 ou 3 mois en hiver.

3.3 Pupaison et émergence des adultes

Le troisième stade larvaire ne rejette pas son exuvie qui va lui servir d'enveloppe à l'intérieur de laquelle il se nymphose pour former le puparium. La puppe a la forme d'un petit tonnelet elliptique, lisse et résistant de 4 à 5 mm de longueur. Il change progressivement de couleur pour devenir brun foncé (Fellah, 1996).

3.4 Cycle de vie de la Cératite

Le cycle de développement de la Cératite est régi par l'interaction d'un ensemble de facteurs biotiques (disponibilité de l'espèce fruitière hôte et le degré de maturité du fruit) et abiotiques (température) (Gahbiche, 1993). Le cycle complet de cette espèce varie de 4 à 17 semaines en fonction de la température. La Cératite est une espèce polyvoltine, le nombre de générations par an est déterminé essentiellement par la température. C'est ainsi que plusieurs générations peuvent se succéder durant l'année (Chouibani et al. 2015) (Figure 6).

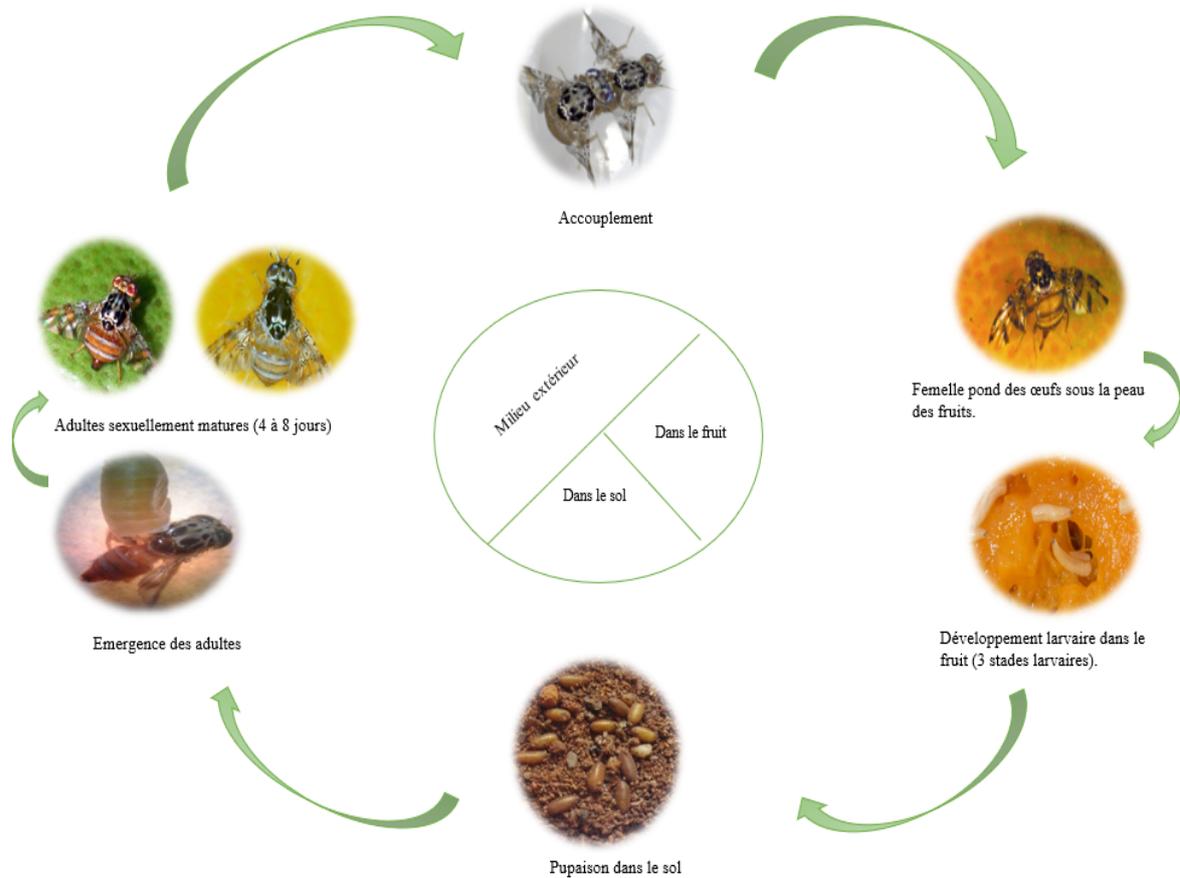


Figure 6. Cycle de développement de *C. capitata*.
(Originale).

3.5 Nombre de générations

L'évolution complète de la cératite est très variable dans une même région. Elle dépend des facteurs climatiques, particulièrement la température mais également des espèces fruitières sur lesquelles ont lieu les pontes (Khoury, 1998 ; Ramade, 2003). Ainsi, on dénombre 12 à 13 générations à Honolulu, 12 à Calcutta, 9 au Caire, 6 à 7 dans le Sud de l'Italie, 5 sur le littoral algérien, 3 ou 4 à Nice et 2 dans la région parisienne (Balachowsky & Mesnil, 1935). Oukil (1995) a résumé le nombre de générations en Algérie dans la figure 7 suivante :

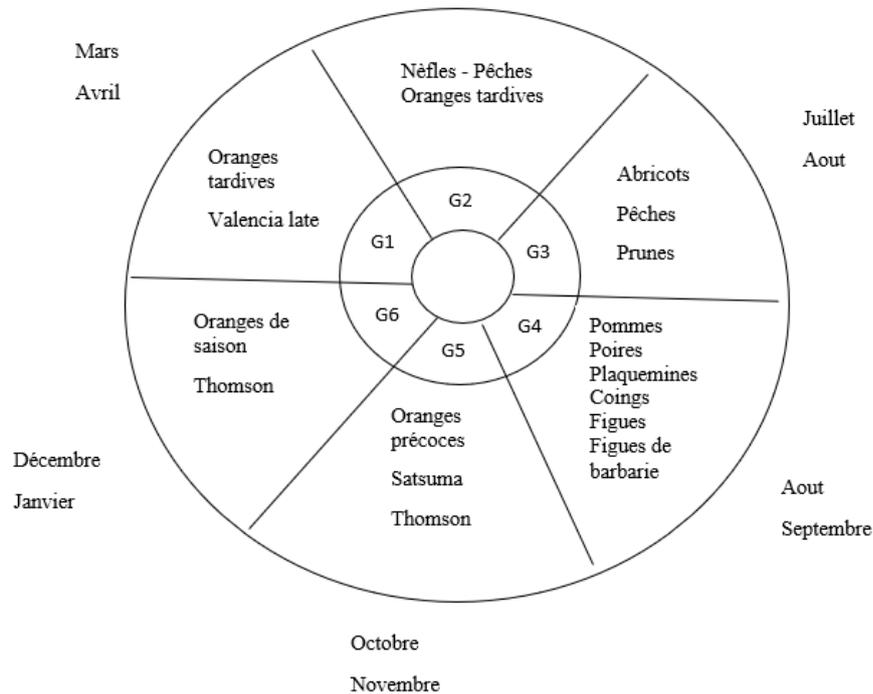


Figure 7. Nombre de générations possibles et plantes hôtes en Algérie (Oukil 1990).

- La première génération qui a lieu en mars /avril ne se trouve que sur les oranges tardives.
- La deuxième génération est composée d'individus peu nombreux et passe presque inaperçue au cours du mois de mai.
- La troisième génération apparaît en juillet où on assiste à des pertes sur des fruits à noyaux (pêche, abricot, prune) ;
- La quatrième génération s'étale de la fin août jusqu'au début du mois de septembre.
- Les deux dernières générations se développent sur les agrumes.

3.6 Longévité des adultes

La longévité des adultes de la cécidomyie peut être très importante (Balachowsky & Mesnil, 1935). En l'absence de nourriture, les adultes meurent 2 ou 4 jours après l'émergence. Habituellement 50% des mouches meurent pendant les premiers mois qui suivent l'émergence. Quelques adultes peuvent vivre jusqu'à une année ou plus, lorsque la nourriture est disponible et les conditions climatiques sont favorables (Weems, 1981).

3.7 Comportement de la cératite

Suite à l'éclosion des œufs, les larves commencent à s'alimenter presque immédiatement. Des tunnels sont formés dans le fruit, mais les larves s'alimentent souvent ensemble jusqu'à ce qu'elles soient presque ou entièrement développées. Elles quittent le fruit souvent juste après l'aube par un véritable saut et se nymphosent dans le sol (Ronald & Jayma, 1992).

Les adultes émergent en plus grand nombre tôt le matin par temps chaud et plus sporadiquement par temps frais (Thomas et al. 2001). Les mâles et femelles ont des agendas différents. Les mâles partagent leur temps entre la nutrition et la copulation, avec une séparation claire entre les deux activités alors que les femelles semblent être plus opportunistes, sans rythme d'activité claire. Elle consacre le soir plutôt à la nutrition. Les mâles étant occupé par la recherche du partenaire, n'ont pas bien profité des heures de la journée pour se nourrir (Khoury, 1998). L'accouplement peut avoir lieu à tout moment tout au long de la journée. Les adultes nouvellement émergés ne sont pas sexuellement murs. Les mâles montrent souvent leur activité sexuelle 4 jours après l'émergence et la plupart des femelles 6 à 8 jours (Ronald & Jayma, 1992).

Chez la cératite, il existe un appel phéromonal, qui consiste en la dévagination d'une ampoule anale qui libère une phéromone très odorante attractive pour les femelles (Figure 8). Ces dernières marquent le site de ponte en y déposant autour du point de pique une phéromone de marquage (HMP = Host Marking Pheromone) qui inhiberait la ponte d'autres femelles (Filippi, 2003). La cératite est souvent inactive la nuit ainsi qu'en période de pluies abondantes.

Dévagination de
l'ampoule anale



Figure 8. Dévagination phénoménale (G X40).

(Khimoud & Louni, 2008)

4. Ecologie de la ceratite

4.1. Origine et aire de répartition

4.1.1. Origine

Le spécimen de type *C. capitata* a été collecté dans l'aire géographique de l'Océan Indien en 1817 probablement sur un bateau transportant une cargaison de fruits collectés à partir d'un port africain. L'Afrique tropicale et en particulier l'Afrique occidentale où vivent plusieurs hyménoptères parasites indigènes de la cératite sont probablement l'habitat d'origine de ce diptère. Selon Buyckx (1994), son origine est plus précisément l'Afrique sub-saharienne à partir de laquelle elle s'est répandue dans les deux hémisphères à une latitude supérieure à 40° de latitude au-delà de laquelle la survie de la cératite est limitée par le froid et les températures hivernales.

4.2. Répartition géographique

La Cératite a été signalée pour la première fois dans les îles de l'Atlantique, Açores, Madère, Cap vert en 1829 ; en Algérie en 1858 et en Egypte en 1904. En 1863, la Cératite a gagné l'Italie du Nord où elle a été signalée en 1878 en Calabre et en Sicile. Ce n'est qu'en 1885 qu'on l'a découvert en Tunisie pour la première fois. En Afrique du Nord, elle existe sur toute la zone littorale et sub - littorale depuis la Tunisie jusqu'au Maroc (Balachowsky et Mesnil, 1935) (Tableau 1).

Tableau 1. Répartition et date de la première signalisation de *C. capitata* dans les pays endémiques (O.E.P.P, 1996).

USA		Pacifique		Europe		Afrique		Proche Orient	
Floride	1929	Australie	1898	Espagne	1842	Algérie	1858	Liban	1904
Texas	1966	Tasmanie	1900	Malte	1845	Tunisie	1885	Palestine	1904
Californie	1975			Italie	1863	Afrique du Sud	1889		
Hawaii	1975			Sicile	1878	Egypte	1904		
				France	1900	Madagascar	1915		
				Turquie	1904				
				Hongrie	1904				

L'aire de répartition de la cératite est très vaste dans le monde (de nombreux pays d'Afrique, d'Amérique centrale, Australie, Hawaï) (Jerraya, 2003). La cératite s'est propagée dans les différentes contrées du globe, non seulement dans les régions tropicales, mais aussi dans les régions tempérées si bien qu'elle est considérée aujourd'hui comme une espèce cosmopolite, outre son installation dans tous les pays du bassin méditerranéen et en particulier dans les zones littorales et sub-littorales, la cératite se cantonne dans la plupart des contrées tropicales et subtropicales du globe (Maddison & Bartlett, 1989). Elle est répandue dans toutes les régions qui ont un climat tempéré et chaud (de type méditerranéen) où elle vit aux dépens des fruits de nombreuses plantes. Cette dispersion rapide est certainement due aux activités diverses de l'homme tels que le transport de fruits, les voyages touristiques et à moindre degré le vent et les migrations naturelles. Les adultes peuvent se disperser sur environ deux kilomètres à la faveur du vent et ne peuvent jamais migrer ou parcourir de plus longues distances (Buyckx, 1994) (Figure 9).

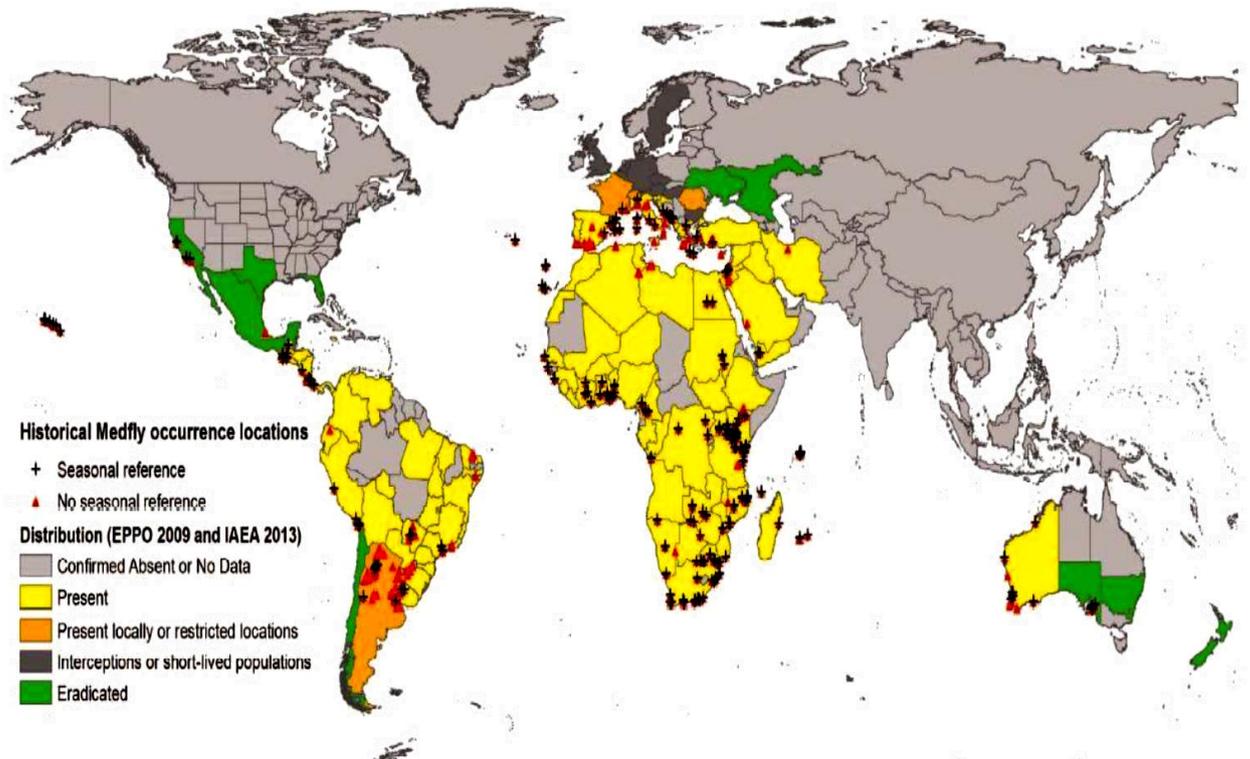


Figure 9. Répartition géographique de *C. capitata* (EPPO 2009).

4.2. Influence des facteurs écologiques

4.2.1 Facteurs climatiques

4.2.1.1. Température

D'après Nunez (1987), la cératite a fait preuve d'une grande tolérance à la chaleur et au froid. Elle allonge la durée de son développement larvaire dans les régions tempérées et la raccourcit dans les contrées tropicales. Selon Bodenheimer (1951), Nunez (1987) et Duyck & Quilici (2002), la température agit sur toutes les fonctions vitales de la cératite. La fécondité journalière augmente pendant les jours ensoleillés. Le nombre de générations s'élève dans les régions chaudes. Les adultes ne supportent pas les fortes températures qui dépassent 45°C ainsi que les basses températures inférieures à 10°C surtout si elles sont accompagnées de pluie. Les œufs deviennent infertiles à des températures minimales de 4 à 7°C et il en est de même pour les fortes températures de l'ordre de 35°C. Cependant, les pupes se montrent plus résistantes aux variations thermiques ; elles survivent à des intervalles allant de 6 à 45°C (Delrio, 1985). L'intervalle thermique pour les différents stades (œufs, larves, pupes et adultes) se situe entre 10 et 35°C. L'optimum est situé entre 23 et 27° C (Nunez, 1987 ; Dridi, 1990).

4.2.1.2. Humidité relative

Les adultes sont inactifs en période de pluie (Ali-Ahmed-Sadoudi, 2007). Cependant, la sécheresse et le manque d'humidité les gênent et les obligent ainsi à se déplacer à la recherche de l'eau (Nunez, 1987). Selon Feron (1957) et Shoukry & Hafez (1979) le taux d'humidité relative de l'air le plus favorable au développement de la cératite se situe entre 60 et 70 %.

4.2.1.3. Vents

Les vents chauds et les vents secs gênent l'activité des adultes et peuvent même entraîner leur mort (Delrio, 1985). Le vent est un facteur important de dispersion, mais gêne considérablement la mouche qui préfère les plantations denses et les arbres touffus (Soria, 1963).

4.2.1.4. Lumière

Selon Feron (1957), les parties du fruit les moins exposées à la lumière présentent plus de piqûres et de pontes. L'accouplement et l'alimentation des adultes se déroulent le jour dès les premières heures, puis diminuent jusqu'à s'annuler à la fin de l'après-midi (Bodenheimer 1951). Pour Nunez (1987), l'idéal du rapport lumière/obscurité pour les différents stades de développement est de 12/12.

4.2.2 Facteurs édaphiques

La pupaison chez la mouche méditerranéenne des fruits se fait dans le sol. Ce dernier joue un rôle prépondérant dans la dynamique des populations de ce ravageur. En effet, en sol à texture fine, la pénétration de la larve est difficile et parfois les pupes se forment en surface ; par contre, en sol à texture grossière, la pénétration est rapide et profonde (Delanoue & Soria, 1954). Medouhes et Kaci (1997) ainsi que Ali Ahmed - Sadoudi (2007) ont démontré que certains sols s'avèrent favorables à la réduction des populations de la cératite.

4.2.3. Facteurs biotiques

4.2.3.1. Hôte

La mouche méditerranéenne des fruits est polyphage ; elle exploite toutes les ressources alimentaires. Elle se disperse sur de grandes distances à la recherche des substrats appropriés. Elle se nourrit principalement de miellat sécrété par des Homoptères, des sécrétions glandulaires végétales, du nectar, de la sève et des extraits de fruits ou à défaut, se contente de gouttelettes d'eau (Delassus et al. 1931 ; Delrio, 1985). La cératite possède la capacité de localiser ses hôtes par des médiateurs chimiques et visuels. Elle est particulièrement attirée par les fruits plus aromatiques (fruits à noyaux, agrumes), de couleur vive proche de la maturation (Weems, 1981 ; Delrio, 1985).

4.2.3.2. Compétition larvaire

La compétition larvaire se rencontre au sein du même fruit dans les situations de manque d'hôtes. Elle affecte la taille, la fécondité et la longévité des mouches (Delrio, 1985). La compétition provoque la mortalité larvaire, les difficultés d'exuviation (pupaison) et aussi la diminution du poids des adultes à l'émergence (Debouzie, 1977).

D'après Albajes & Santiago Alvarez (1980), les densités larvaires élevées augmentent la proportion des femelles par rapport au nombre total d'individus émergés.

4.2.3.3. Ennemis naturels

Les larves âgées et les pupes sont attaquées par une large gamme d'insectes du sol (fourmis, carabes, staphylins). La cératite est également attaquée par des Hyménoptères parasites qui se développent au dépend des larves âgées ou des jeunes pupes. Parmi les principaux parasites nous citons : *Opius humilis*, *Diachasma tryoni* et *Dirhinus giffardii* (Bodenheimer 1951 ; Delrio, 1985 ; Nunez, 1987). Dans le bassin méditerranéen, le parasite le plus commun est *Opius concolor* (Balachowsky & Mesnil, 1935).

5. Plantes hôtes, dégâts et moyens de lutte

5.1. Plantes hôtes

La Cératite est connue par sa large gamme d'hôtes, elle est le ravageur polyphage le plus dangereux des Tephritidae dans les régions tropicales et subtropicales. Elle a 353 plantes hôtes dont les : Myrtaceae, Rosaceae, Rutaceae, Sapotaceae et Solanaceae. Elle peut aussi attaquer quelques cultures maraichères comme la tomate, le poivron et le figuier de Barbarie (*Opuntia ficus-indica*) (Jacquemond et al. 2013).

5.1.1 Importance de l'hôte

Selon Bodenheimer (1951) et Debouzie (1980) l'hôte influe considérablement l'épidémiologie de la Cératite. Cette influence revêt une importance capitale car elle détermine le nombre de générations et donc le nombre de femelles en quête de ponte dans un biotope donné. L'absence d'hôtes pour une période donnée conditionne le niveau des populations. D'après Soria (1962), l'éloignement par rapport aux cultures pouvant être contaminées, conditionne le taux d'infestation. L'hôte le plus accessible par la cératite est celui qui est situé dans la direction des vents dominants et dans les endroits les plus ensoleillés (Bodenheimer, 1951). Back & Pemberton (1918) montrent que la plante hôte influe considérablement sur la vitesse de développement et que le stade de maturation du fruit influe également sur la vitesse de développement larvaire et raccourcit la durée du développement larvaire.

5.1.2. Mécanisme de localisation de la plante hôte

De nombreux insectes utilisent des plantes pour se nourrir, se reproduire ou s'abriter. Certains utilisent une large gamme de plantes (polyphagie) tandis que d'autres se contentent d'un nombre assez restreint ou d'une seule espèce de plante (oligophagie ou monophagie). Toutefois dans les relations plantes-insectes, la polyphagie est le type dominant (Jolivet, 1992). Le choix de la plante est déterminé par un certain nombre de mécanismes qui mettent en évidence la vision, l'olfaction, le toucher et la gustation (Dicke & Van Loon, 2000 ; Descoins, 2007). La localisation à distance se fait grâce aux substances volatiles émises par la plante hôte (Ferry, 2007). Ces composés spécifiques à chaque plante hôte transmettent des informations particulières à des espèces d'insectes spécifiques. Selon Carrière & Roitberg (1995) la spécificité d'un insecte sur une plante hôte aurait alors un fondement génétique. Une fois la plante hôte localisée, sa réceptivité devient fonction de son architecture, de sa phénologie, de sa couleur et de son intensité spectrale (Barbosa & Wagner, 1989 ; Hance, 2001).

5.1.3. Etapes de la sélection de l'hôte

Lors du comportement de sélection de l'hôte, 3 étapes principales se distinguent : la découverte à distance de la plante, la reconnaissance au contact de l'hôte et l'émission des œufs (Robert, 1986). A chaque étape correspondent des stimuli de nature probablement différente. L'insecte utilise les sens suivants : l'odorat, le toucher, le goût et la vision. La recherche de l'hôte s'échelonne sur plusieurs niveaux :

➤ Localisation de l'habitat : pour permettre l'induction du comportement de recherche à longue distance (jusqu'à plusieurs centaines de mètres), la majeure partie des composés chimiques émis par les hôtes sont hautement volatiles (Godfray, 1994). Les stimuli visuels tels que la couleur des plantes hôtes ou la silhouette des arbres semblent jouer un rôle mineur à cette distance (Aluja & Mangan, 2008).

➤ Localisation de l'hôte, du rameau et du fruit : à une distance plus courte, les composés chimiques perçus sont peu voire non volatiles. Les stimuli visuels ont plus d'importance (forme sphérique, taille et couleur du fruit) (Aluja & Mangan, 2008).

➤ L'émission des œufs : Une fois sur le fruit, les femelles évaluent avec leur tarse la texture de la surface et ses propriétés chimiques. Si elles acceptent le fruit et décident de forer, l'exocarpe du fruit est percé et des capteurs à la pointe de l'aculeus envoient les

derniers signaux permettant à la femelle de rejeter le fruit ou de l'accepter et de pondre. Par exemple, les sucres comme le glucose ou le fructose stimulent la ponte (Aluja & Mangan, 2008).

5.1.4. Assimilation des stimuli olfactifs par les insectes

L'unité de base du système sensoriel est le neurone. Le corps des neurones se situe généralement dans l'épiderme juste sous la cuticule. Depuis cette cellule émergent les dendrites et un axone relié au système nerveux central. Un stimulus approprié provoque un changement de potentiel électrique le long de la membrane de la cellule, appelé potentiel récepteur. La production consécutive de ces derniers permet à l'information de se déplacer vers le système nerveux central. Les récepteurs olfactifs sont concentrés sur les antennes sous forme de soies innervées nommées sensilles. Elles recouvrent les branches antennaires par milliers. La cuticule des sensilles est criblée de pores. Les molécules odorantes captées traversent les pores puis diffusent dans le liquide sensillaire et se lient ou non avec certaines protéines spécialisées. Le complexe formé par la molécule odorante et la protéine se fixe alors sur les sites accepteurs de la dendrite de la cellule sensorielle et génère un potentiel d'action (Figure 10).

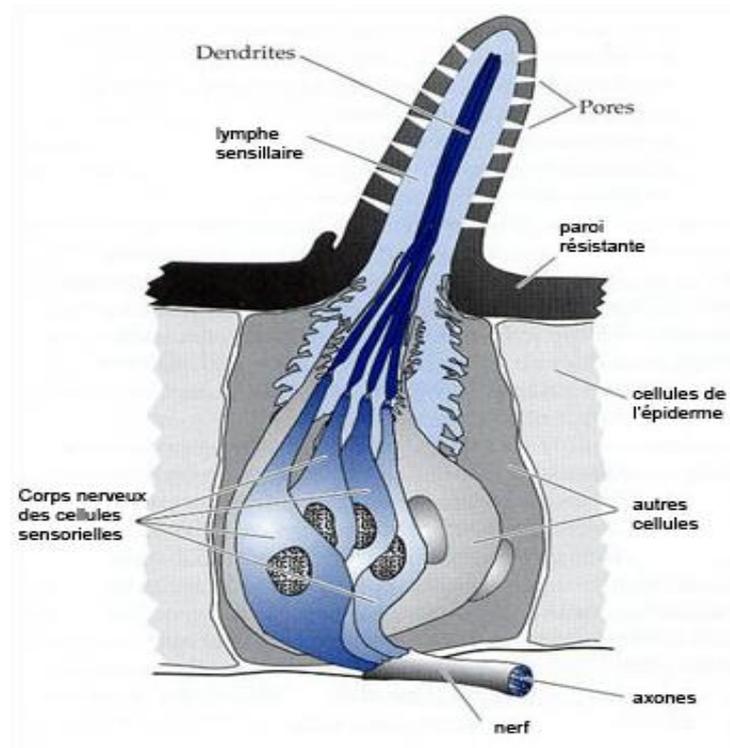


Figure 10. Structure d'une sensille (Source : <http://fourmistpe.free.fr>).

5.1.5. Composés volatils des plantes

5.1.5.1 Classification des composés volatils

Les métabolites secondaires interviennent dans divers rôles comme la structure, la communication ou la défense des plantes. Les composés volatils de plantes constituent 1% des métabolites secondaires. Ils ont une masse moléculaire inférieure à 300 Daltons. Ceci leur donne la propriété d'être dispersés à grande distance. Ils peuvent être regroupés en quatre classes selon leur origine métabolique (Atiama-Nurbel, 2014)

➤ Les terpènes : il s'agit de la plus abondante classe de composés volatils de plantes. Les plus connus sont le géraniol, le linalol et le myrcène.

➤ Les phénylpropanoïdes/benzénoïdes : il s'agit de la seconde classe de composés volatils la plus abondante (Knudsen et al. 2006).

➤ Les dérivés d'acides gras : ils procurent aux fruits et aux légumes une odeur verte et fraîche.

➤ Les dérivés d'acides aminés : ils incluent des aldéhydes, des alcools, des esters, des acides et des composés azotés et soufrés provenant d'acides aminés tels que l'alanine.

5.1.5.2. Fonction des composés volatils

Les composés volatils des plantes permettent la communication entre les plantes et leur environnement. Ils apportent un avantage reproductif en attirant les pollinisateurs au niveau des fleurs, ou bien les animaux disséminateurs de graines au niveau des fruits. Ils ont aussi un rôle dans la protection de la plante contre les herbivores. En cas de dégâts, ces composés agissent directement par effet répulsif sur les phytophages et/ou indirectement par l'attraction de prédateurs ou parasitoïdes des phytophages (Price et al. 1980). Ils protègent la plante contre les facteurs abiotiques, par exemple l'isoprène améliore la thermo tolérance en cas de fortes températures (Pichersky & Gershenzon, 2002).

5.1.5.3. Attractivité des composés volatils par les Tephritidae

Deux catégories de composés chimiques de plantes capables d'attirer les femelles vers un habitat ou une plante hôte, c'est à dire de déclencher chez l'insecte un mouvement orienté vers la source, ont été recensées (Light et Jang, 1996) :

➤ Les composés généraux, non spécifiques à une espèce de plante : il s'agit des composés émis par les feuilles vertes et les fruits immatures, comme les aldéhydes aliphatiques et les alcools.

➤ Les composés spécifiques, émis par les plantes hôtes aux espèces spécialisées de Tephritidae

➤ Les fruits immatures possèdent peu de composés volatils spécifiques. A ce stade, l'interaction entre les signaux visuels et olfactifs qui aident les femelles à s'orienter lors de leur déplacement de feuille à feuille ou de branche à branche sont renforcée (Aluja & Mangan, 2008). Visser (1986) émet 2 hypothèses quant à la perception de composés volatils de plantes par les insectes :

- Présence de composés volatils hautement spécifiques
- Mélange de composés volatils généralistes répartis selon un ratio bien spécifique à chaque espèce de plantes.
- La majorité des études favorisent ce second scénario (Bruce et al. 2005). La discrimination de la plante hôte serait plus due à un traitement central des signaux olfactifs qu'à leur détection initiale.

5.2 Dégâts de la cératite

La cératite, ravageur polyphage, pond ses œufs dans les fruits après leur véraison et ce jusqu'à leur maturité complète. Ce qui fait que les périodes d'infestation coïncident avec la chronologie de maturation des espèces (Lachiheb, 2008). La cératite s'attaque aux variétés précoces et tardives ayant une peau mince (Chouibani et al. 2003). Les points des piqûres sont légèrement soulevés par rapport au niveau de la surface du fruit ou au contraire légèrement affaissés. Puis la tâche s'élargit et devient brunâtre, ainsi donc, la chair sous-jacente pourrit. La tâche des piqûres ne renferme pas d'œufs ou d'individus

morts. Elle se cicatrise lorsque la peau se dessèche en raison de la pourriture (Figure 11A et B).

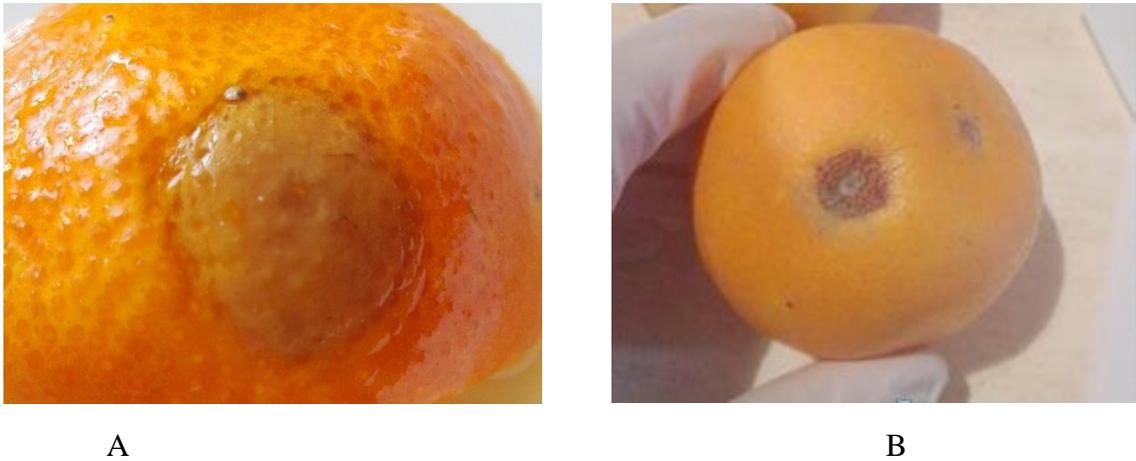


Figure 11. Point de pique de *C. capitata* sur agrumes.

A : Tache élargie brunâtre, **B** : tache desséchée

Les dommages de la cératite se distinguent donc, par les piqûres de pontes et les galeries dans les fruits engendrés par les femelles et les larves. Ces galeries et piqûres constituent une voie de pénétration à des champignons et bactéries qui sont responsables de la décomposition et de la chute prématurée des fruits. Ces dégâts constituent un obstacle majeur pour les exportations en raison de la dévalorisation de la marchandise et des mesures de quarantaines imposées par certains pays importateurs et deviennent carrément impropres à la consommation (Figure 12A et B).



Figure 12. Fruits piqués par *C. capitata* impropres à la commercialisation

A : Chute de fruits impropres à la consommation, **B** : Fruit pourri.

5.3 Moyens de lutte

La lutte contre la Cératite demeure un problème très préoccupant compte tenu de la gravité et de l'ampleur des dégâts associés à la difficulté d'intervention. Plusieurs techniques ont été mises au point depuis le début du siècle sans arriver à éradiquer ce ravageur très polyphage et multivoltine (Jerraya, 2003 ; Lachiheb, 2008). En effet, la mise en place de méthodes de lutte efficaces contre les Tephritidae ravageurs des cultures s'avère difficile. Les œufs et les larves se développent à l'intérieur du fruit tandis que la puppe s'enfouit dans le sol. Par conséquent, l'adulte reste le seul stade exposé aux traitements insecticides aériens ou terrestres. La protection des cultures contre les mouches des fruits, qui a longtemps reposé sur une base agrochimique, (Magaña et al. 2007 ; Boulahia-Kheder et al. 2010) est aujourd'hui à la croisée des chemins à cause des nombreux risques provoqués par ces pratiques. Les méthodes de lutte n'ont généralement intégré que la lutte biologique et chimique dans une démarche curative. L'enjeu actuel serait de passer à une démarche de prévention des infestations de mouches, basée sur un fonctionnement écologique plus équilibré et durable des agrosystèmes. Cette approche s'appuie sur une gestion agro-écologique des communautés végétales (plantes cultivées et non cultivées) et des peuplements animaux (insectes ravageurs, utiles, pollinisateurs) (Deguine et al. 2008). De même, la mise au point de moyens de lutte comportementale (Behavioural Control) par l'élaboration de pièges olfactifs, visuels et autres, reste une priorité dans de nombreux pays du monde. Il convient également d'intégrer les méthodes de surveillance des populations, afin de permettre aux agriculteurs de savoir à quel moment il est nécessaire d'appliquer un traitement insecticide ou encore pour vérifier l'efficacité de la lutte appliquée

5.3.1. Mesures prophylactiques et culturales

Ces mesures consistent à rompre le cycle biologique de l'insecte en empêchant le développement des larves vers le stade adulte.

➤ Il est conseillé d'éviter la présence d'autres plantes hôtes dans les vergers agrumicoles à savoir les néfliers, les bigaradiers, les figuiers de Barbarie, les haies d'*Abelia* et de *Lycium*.

➤ Il est également recommandé d'effectuer un travail du sol avec un labour profond pour exposer les pupes qui sont dans le sol à la forte chaleur et à l'attaque de prédateurs et de parasitoïdes.

➤ Le ramassage des fruits tombés pouvant abriter des larves, leur destruction par enfouissement ou par incinération ainsi que l'élimination des bigarades mûres sur les bigaradiers d'ornementation, sont des mesures prophylactiques efficaces pour briser le cycle biologique de la mouche des fruits (Bachrouch, 2003 ; Jerraya, 2003).

➤ Les haies de figuiers de barbarie à la périphérie des vergers fruitiers jouent le rôle de plante hôte relais pour *C. capitata* en l'absence d'autres espèces fruitières. Leur suppression peut diminuer considérablement la densité des populations et le nombre d'attaques de mouches des fruits. En effet, Alonso Muñoz & García Marí (2009) ont montré que le nombre total de mouches peut augmenter de 50 à 100% sur les arbres de vergers d'agrumes les plus proches des haies de figuiers de barbarie entre les mois de septembre et d'octobre. De ce fait, les associations végétales cyprès, acacias, caroubiers et tamarix sont recommandées lors de la mise en place d'un nouveau verger en remplacement des haies de figuiers de barbarie (Bachrouch, 2003).

➤ La plantation de variétés à maturité non chevauchantes au sein d'un même verger diminue également l'attaque des mouches des fruits (Jerraya, 2003).

5.3.2. Lutte chimique

Les premières campagnes de lutte chimique contre les mouches des fruits ont commencé au début du 20^{ème} siècle avec l'utilisation d'insecticides inorganiques comme l'arséniate de plomb et le fluorosilicate de sodium. Depuis la fin de la deuxième guerre mondiale, les agriculteurs se sont tournés massivement vers les pesticides comme moyen de lutte contre les arthropodes ravageurs. Le DDT est le produit le plus utilisé entre 1945 et 1965 (Metcalf & Luckmann, 1994). Les consommateurs attachent une grande importance à l'apparence des fruits et les produits agricoles devaient être exempts de dommages causés par les insectes, par les maladies ou par des désordres physiques. Les produits chimiques comme les organophosphorés ont remplacé le DDT au début des années 50. Ils ont permis de diminuer les populations de Tephritidae et leurs dommages associés. Cependant, l'utilisation abusive des produits chimiques à des concentrations de plus en plus fortes a conduit à plusieurs désastres écologiques par l'effet des 4R :

résistance, rémanence, résurgence et rupture des chaînes trophiques (Roy et al. 2002). De nos jours, la lutte chimique couramment utilisée contre les Tephritidae, repose sur l'utilisation de pulvérisations (traitements par tâches ou bait sprays) pendant la phase de sensibilité du fruit (Hafsi et al. 2015). Ce traitement consiste en une application d'un insecticide de contact, appartenant généralement à l'une des familles des organophosphorés, carbamates ou pyrethroides, associé à un hydrolysate de protéines qui attire et tue les mouches femelles directement par contact ou inhalation (McPhail, 1939 ; Steiner, 1952).

En Tunisie, ce type de traitement est réalisé soit par voie aérienne, soit par voie terrestre à bas volume, en utilisant une part de Malathion pour 4 parts d'hydrolysate de protéines avec un volume total de 1,5 l/ha (Yana & Stancic, 1967 ; Gahbiche, 1993). Cette protection utilisant les traitements par tâches montre ses limites tant par son efficacité insuffisante sur les ravageurs que par ses lourdes conséquences sanitaires, environnementales et économiques. En effet, de nombreux insectes, y compris certaines espèces de la famille des Tephritidae comme *C. capitata* en Espagne ont développé une résistance au Malathion (Magaña et al. 2007). Michaud (2003) et Michaud & Grant, (2003) ont montré que non seulement les insecticides ont des impacts négatifs sur les insectes bénéfiques, mais aussi, ils peuvent entraîner la prolifération de ravageurs secondaires (Gerson & Cohen, 1989).

Suite à la directive européenne du 15 juillet 1991 (91/414) concernant la commercialisation et le retrait de nombreuses matières actives, le Malathion a été progressivement remplacé en 2008 par des insecticides plus respectueux à l'environnement tel que le Spinosad (Chueca et al. 2007). Ce dernier a un meilleur profil environnemental parce qu'il est considéré comme faiblement toxique pour les ennemis naturels par rapport au Malathion (Williams et al. 2003 ; Urbaneja et al. 2009). Il a également montré son efficacité à l'égard de *C. capitata* (Hafsi et al. 2015). D'autres substances chimiques sont actuellement autorisées contre *C. capitata* : Il s'agit de chlorpyrifos-méthyl, deltaméthrine, etofenprox, lambda-cyhalothrine, cyperméthrine, flucythrinate et phosmet. Des régulateurs de croissance peuvent également être utilisés comme agents chimiostérilisants (Alfaro et al. 2010). Ce sont des insecticides qui agissent en interférant avec les cibles hormonales et la biosynthèse des téguments. C'est le cas du Lufenuron, un inhibiteur de synthèse de la chitine, qui a fait l'objet de plusieurs études

dans la lutte contre *C. capitata* (Navarro - Llopis et al. 2004 ; Chang et al. 2012). Des essais ont été conduits en Tunisie par Bachrouch (2003) avec l'utilisation de la chémostérilisation dans le cadre d'un programme de lutte intégrée. Les résultats obtenus ont montré une diminution de 79% de la population des mâles de *C. capitata* ainsi qu'une réduction au niveau des dégâts sur fruits.

Dans les conditions algériennes, le premier traitement doit être effectué vers la fin du mois de septembre, période correspondant à la réceptivité des variétés précoces, les clémentines et les Navels. Le 2ème traitement doit être réalisé 15 jours après le 1^{er} ou bien quand on enregistre plus de 3 mouches par piège et par jour (Bennai & Hamadache, 2012). La méthode consiste en une utilisation d'un volume réduit de bouillie à l'hectare (200l/h), soit sur l'un des côtés de l'arbre seulement en employant 1 litre de bouillie/arbre, soit sur une rangée sur deux en employant 2 litres de bouillie/arbre. Dans ce cas, il est nécessaire d'ajouter à l'insecticide 2 litre/ha d'eau du produit hydrolysate de protéine comme attractif (Bennai & Hamadache, 2012).

5.3.3. Lutte biotechnique

Selon Boller (1983) et Fellah (1996), le principe de la lutte biotechnique consiste à utiliser des stimuli physiques et chimiques ou agents qui agissent sur le comportement ou le développement des insectes nuisibles.

5.3.3.1. Lutte autocide ou Technique de l'insecte stérile (TIS)

Le concept de la lutte autocide est basé sur la capacité d'élever, de stériliser et de relâcher un nombre suffisamment important de mâles stériles compétitifs pour submerger la population sauvage dans une région géographique selon un ratio dépendant du potentiel reproductif des espèces. Il repose donc sur l'introduction en grand nombre, dans une population naturelle, d'individus mâles modifiés c'est à dire rendus stériles. Le lâcher d'un nombre important de mouches stériles parmi la population sauvage favorise une forte probabilité d'accouplement entre femelles sauvages et mâles stériles. La forte compétition entre les deux populations devrait anéantir la population sauvage à travers la fécondation des femelles sauvages par les mâles stériles (Mcinnis et al. 1994 ; Hendrichs et al. 2002).

Cette méthode offre une réelle alternative aux moyens de contrôle classiquement utilisés parce qu'elle garantit une parfaite spécificité et ne requiert pas l'introduction d'une nouvelle espèce dans l'environnement. La technique de l'insecte stérile est une méthode de lutte biologique contre les insectes nuisibles notamment *C. capitata*. Elle commence à s'imposer devant les traitements chimiques du fait qu'elle est très efficace et respectueuse de l'environnement, sans conséquences négatives sur la santé humaine.

Il est intéressant de noter que l'utilisation de mâles stériles ne rentre pas totalement dans la définition stricte de la lutte biologique qui ne fait appel qu'à l'emploi d'ennemis naturels. Dans ce cas, l'utilisation de mâles stériles ou stérilisants est une composante du contrôle génétique des populations, qui se définit comme « la dissémination, l'accouplement ou l'hérédité de facteurs qui réduisent les dommages du ravageur » (Alphey, 2014). Les techniques classiques de séparation des sexes, basées sur les différences de taille ou de comportements, ont été améliorées par un sexage génétique qui permet une élimination sélective des femelles précocement au cours du développement, et ainsi une efficacité et une rentabilité accrues de la Technique de l'insecte stérile (TIS). Cette dernière a été utilisée contre *C. capitata* au Costa Rica, en Espagne, aux Etats-Unis (California, Hawaii), en Italie, au Mexique, au Nicaragua et au Pérou (Roessler & Chen, 1994). En effet elle est une des premières espèces à avoir bénéficié du sexage à Madère, au Guatemala, et en Tunisie. Plusieurs études ont montré que, pour être efficace, la Technique de l'insecte stérile (TIS) doit être appliquée en combinaison avec d'autres méthodes de lutte dans le cadre d'une stratégie de lutte intégrée (Barry et al. 2003 ; Alfaro et al. 2010). Elle est préférentiellement utilisée dans une population de densité moyenne à faible de *C. capitata* ou encore au niveau d'une zone isolée afin d'éviter les ré-infestations (Jacas et al. 2010).

5.3.3.2. Confusion sexuelle

La lutte par confusion sexuelle consiste à diffuser dans l'atmosphère du verger des quantités importantes de phéromone sexuelle de synthèse de façon à désorienter les mâles empêchant ainsi la rencontre des sexes. Cette méthode ne présente aucun avantage pratique pour la cécidite à cause de ses exigences techniques et du coût élevé des phéromones sexuelles (Aboussaid et al. 2007).

5.3.3.3. Piégeage de masse

Cette méthode consiste à combiner plusieurs facteurs tels que le stimulus olfactif et visuel qui affectent les populations de la mouche. Cette méthode est utilisée pour le piégeage de masse en vue de réduire au maximum la population des adultes (Aboussaid et al. 2007). Le piégeage de masse a pour but de prévenir les dégâts sur les fruits destinés à la consommation locale ou à l'exportation. Elle permet, en effet, la capture d'une importante proportion de la population des mouches avant leur alimentation, leur accouplement et la ponte des femelles. Le succès de ce procédé nécessite la combinaison d'un piège très efficace et un attractif très sélectif (Koul et al. 2004). Cette technique est adaptée aux grandes surfaces (> 1ha) en dépit de sa cherté (achat, pose, retrait) (Aboussaid et al. 2007). Son efficacité est plus importante si la densité de la population de l'insecte est faible et si cette technique est appliquée dans une région où la migration de l'insecte vers la zone traitée est limitée (El-Sayed et al. 2006). La saturation rapide des pièges avec les adultes de l'insecte dans les zones à forte densité de populations représente la cause principale de l'échec de cette technique (Figure 13) (De Meyer, 2013).

Les stimuli visuels et olfactifs sont utilisés pour développer différents types de pièges (Epsky & Heath, 1998). Les propriétés telles que la teinte (longueur d'onde dominante de la lumière réfléchie), la saturation (pureté spectrale de la lumière réfléchie) et la clarté (intensité de la lumière réfléchie) peuvent intervenir dans le choix de la femelle (Epsky & Heath, 1998). Le piège de couleur jaune développé par Remund & Boller (1983) s'avère efficace contre les Tephritidae. Il a été toujours utilisé dans la surveillance et la lutte contre *Rhagoletis cerasi* (Diptera : Tephritidae).

Les attractifs, naturels, synthétiques, liquides ou secs couramment utilisés visent principalement les femelles. La méthode se basent essentiellement sur un attractif alimentaire (protéines) ou olfactif contenant l'odeur de l'hôte (Allwood et al. 2002). Plusieurs attractifs alimentaires synthétiques ont été développés en utilisant l'ammoniac et ses dérivés dans le but de résoudre le problème des insectes non ciblés qui sont capturés par les pièges. Par exemple, un attractif alimentaire (appât) constitué de l'acétate d'ammonium et de putrescine est largement utilisé pour capturer différentes espèces du genre *Anastrepha*. En ajoutant la triméthylamine à cette formulation, l'attractif permet de capturer les femelles de *C. capitata* (Heath et al. 2004). Historiquement, les attractifs liquides à base de protéines ont été utilisés pour capturer les deux sexes (femelles et

mâles) d'une large gamme d'espèces de mouches des fruits mais ils capturent également un grand nombre d'insectes non ciblés (Heath et al. 1995 ; Koul et al. 2004).

Les coûts liés aux pièges, les dépenses pour le matériel et la main d'œuvre représentent les limites majeures de cette technique. Le choix de la densité des pièges est basé à la fois sur des considérations économiques et sur l'attractivité de l'appât (Lanier, 1990). Pour la plupart des pièges testés, une densité de 50 pièges/ha est suffisante pour assurer une protection des fruits dans des régions isolées à faible densité de population (Miranda et al. 2001 ; Navarro-Llopis et al. 2008).



Figure 13. Piège chromatique englué jaune saturé.

5.3.3.4. Surveillance des populations

La dynamique des populations de *C. capitata* se fait en surveillant les adultes par le biais de pièges spécifiques à raison de 1 à 2 pièges par hectare (Papadopoulos et al. 2001). Pour estimer l'abondance des populations d'adultes, il existe deux types de pièges de surveillance :

- Les pièges pour les mâles utilisant un attractif sexuel (ou para-phéromone) comme le trimedlure et l'huile des racines de gingembre pour diverses espèces du genre *Ceratitidis* et le méthyl-eugénol ou le cue-lure pour nombreuses espèces du genre *Bactrocera* et *Dacus*.
- Les pièges à attractifs alimentaires à base de protéines comme le « Nulure », le « Buminal » ou la « levure de *Torula* », qui capturent essentiellement les femelles qui ont besoin de protéines pour la maturation sexuelle et le développement des œufs (Hagen &

Finney, 1950 ; Shelly et al. 2014). Ces pièges à attractifs alimentaires montrent leur limite quant à leur efficacité (attractivité faible, distance réduite d'attraction, durée de vie limitée au champ, contraintes d'utilisation et attraction d'espèces non-cibles) (McPheron & Steck, 1996 ; Siderhurst & Jang, 2010).

5.3.3.5. Bait station

Le bait station est similaire au piégeage de masse du fait que c'est un système composé par un mélange d'attractif alimentaire et d'insecticide appliqué dans des dispositifs accrochés sur les plantes hôtes. La technique de bait station utilise une substance toxique plutôt qu'un piège pour éliminer les adultes de l'insecte cible (Koul et al. 2004 ; El-Sayed et al. 2006).

L'absence de problème lié à la saturation des pièges avec les différents insectes piégés font que le traitement par le bait station est préféré dans des situations de forte densité de l'insecte cible (De Meyer, 2013). Un autre avantage du bait station est que les mouches n'ont pas besoin d'entrer dans le piège pour être affectées par l'effet nocif des insecticides additionnés à la formulation de l'attractif. Il leur suffit d'être en contact avec le dispositif pour qu'elles soient affectées par l'insecticide. Cette technique de bait station a été testée contre plusieurs espèces de Tephritidae comme *Bactrocera zonata* dans des vergers de mangue (Temerak et al. 2012) et *C. capitata* dans des vergers d'agrumes (Navarro-Llopis et al. 2013). Différents dispositifs du système bait stations ont été testés dans plusieurs pays comme le Magnet-Med et le prototype L & K en Espagne (Navarro-Llopis et al. 2013 ; Navarro-Llopis et al. 2015) pour lutter contre différentes familles d'insectes comme les Lépidoptères (Mansour 2010 ; Kroschel & Zegarra 2013) et les Tephritidae (Martinez-Ferrer et al. 2012).

En Tunisie, dans une étude comparative avec le piégeage de masse, le bait station utilisant le dispositif Ceranock a été testé pour la première fois dans les vergers de pêcher précoce. Les résultats ont montré que les dispositifs Ceranock du bait station sont plus efficaces que le piégeage de masse par rapport à la réduction du niveau de la population imaginaire de *C. capitata* et du taux de fruits piqués (Bouagga et al. 2014).

5.3.4 Lutte biologique

5.3.4.1. Utilisation d'ennemis naturels

La lutte biologique contre les mouches des fruits a plus d'un siècle. Elle a commencé en 1902 lorsque le gouvernement australien a décidé d'entreprendre une campagne de lutte contre *C. capitata* (Clausen et al. 1965). Peu après, des programmes similaires ont été lancés en Italie et à Hawaï (Funasaki et al. 1988). Les ennemis naturels peuvent jouer un rôle essentiel dans la régulation des populations de ravageurs. La faune auxiliaire indigène n'est pas toujours suffisante pour contrôler les ravageurs et les introductions par des lâchers de parasitoïdes peuvent aider à contrôler les bioagresseurs. L'ennemi naturel doit être le plus sélectif possible envers le ravageur que l'on veut combattre. De point de vue efficacité, cette méthode pose beaucoup de problèmes notamment les difficultés dans l'élevage du parasitoïde ainsi que celles liées à la relation hôte-parasite (Aboussaid et al. 2007).

Il existe plusieurs parasitoïdes vis-à-vis de la cémentite ; il s'agit d'*Opius concolor* (Hymenoptera : Braconidae), d'*Opius incisi* (Hymenoptera : Braconidae), d'*Opius kraisi* (Hymenoptera : Braconidae). D'autres parasitoïdes comme *Diachasmimorpha tryoni* (Hymenoptera : Braconidae) et *Fopius arisanus* (Hymenoptera : Braconidae) ont été utilisés en Australie, Hawaï, dans le sud et le centre de l'Amérique et ont montré une efficacité satisfaisante (Wong et al. 1992).

5.3.4.2. Lutte microbiologique

L'organisme antagoniste est un microorganisme appartenant à plusieurs taxons de virus et de bactéries (Regnaut-Roger, 2005). Ces micro-organismes sont présents dans l'environnement (sol, air, eau) et infectent leur hôte soit par ingestion, par la cuticule ou par les orifices. Le pathogène se multiplie dans l'hôte en lui causant des dégâts par destruction des tissus, par septicémie ou toxémie qui entraînent sa mort plus ou moins immédiate (Rampelotti et al. 2007). Les micro-organismes sont très intéressants car ils possèdent un spectre d'action étroit grâce à leur mode d'action. Il existe plusieurs stratégies d'application. Il est possible de pulvériser le micro-organisme ou de traiter avec des molécules dérivées de celui-ci. Dans le cas de l'utilisation d'organisme microscopique soit on promeut sa présence dans l'environnement de l'hôte, soit on les introduit en essayant de les acclimater dans un espace-temps défini (Bawin, 2016).

L'utilisation de micro-organismes entomopathogènes est une alternative très prometteuse pour assurer une protection phytosanitaire performante de par l'ubiquité naturelle des agents microbiologiques dans les écosystèmes, leur grande variété, leur dissémination facile, leur spécificité d'action et aussi leur persistance dans l'environnement.

Les formulations de biocides à base de micro-organismes deviennent de plus en plus performantes avec des prix compétitifs (Ahmed et al. 1994 ; Starnes et al. 1993). Tous les micro-organismes possèdent des formes de résistance qui leur permettent de persister dans l'environnement et de perpétuer leur cycle de vie (Jourdeuil et al. 1992). Cependant, ils ont des spectres d'action assez étroits à cause de certains facteurs abiotiques qui peuvent limiter leur développement optimal. Par exemple les UV (Gardner et al. 1977), les variations sub optimales de température (Roberts & Campbell, 1977 ; Doberski, 1981) et de l'humidité (Riba & Marcandier, 1984 ; Khachatourians, 1987) sont dérivées pour la plupart des micro-organismes. Il existe plusieurs stratégies d'application. Il est possible de pulvériser le micro-organisme ou de traiter avec des molécules dérivées de celui-ci.

5.3.4.2.1. Bactéries entomopathogènes

Selon Starnes et al. (1993), plus d'une centaine de bactéries ont été identifiées comme ayant un potentiel d'utilisation en lutte biologique. Parmi ces bactéries, nous citons la souche *Bacillus thuringiensis* (Bt) dont on a extrait une toxine. Cette dernière révèle un effet insecticide vis-a- vis des larves et des adultes de la cératite (Aboussaid et al. 2007). Cette bactérie a des toxines sous forme de cristaux lors de la sporulation, qui a fait l'objet de développement de plusieurs produits commerciaux. Les préparations commerciales contiennent directement le principe actif (Chaufaux, 1997). Certaines souches de *B. thuringiensis* possèdent une spore et une inclusion parasporale composées d'une ou de plusieurs toxines protéiques.

Quatre types de toxine peuvent être isolées du *B. thuringiensis*, les α -exotoxines (Kushner et al. 1957 ; Toumanoff, 1953) ; β -exotoxines (Heimpel, 1967 ; Heimpel & Angus, 1963) ; δ -endotoxines et γ -exotoxines (Heimpel, 1967 ; Heimpel & Angus, 1963). Dans le mésenteron de l'insecte, en présence d'un pH stomacal basique (8,9), le cristal va se désintégrer pour libérer une endotoxine, un polypeptide toxique qui va provoquer

une rapide baisse de l'ATP au niveau des cellules stomacales, un gonflement de cellules épithéliales, une paralysie du tube digestif et un déséquilibre ionique dans l'hémolymphe. L'insecte meurt par inanition (Fast, 1981 ; Cloutier & Cloutier, 1992 ; Greathead et al. 1992 ; Miller et al. 1983) ou par une septicémie provoquée par la multiplication de la bactérie dans l'hémolymphe et les tissus.

Les inclusions cristallines produites par *B. thuringiensis* sont appelées δ -endotoxines ou toxines Cry (pour Crystal). La nomenclature des toxines Cry est basée sur la chronologie de la découverte des toxines Cry et sur l'identité de séquence des acides aminés. En effet, les premières toxines Cry découvertes sont appelées Cry1, les suivantes Cry 2 et ainsi de suite. Parmi les 335 toxines Cry connues et produites par les différentes souches de *B. thuringiensis*, au moins 125 ont une activité insecticide qui est spécifique à un ordre d'insectes. Par exemple, les protéines Cry1 et Cry2 sont actives sur certains Lépidoptères, alors que les toxines Cry3 sont actives sur certains Coléoptères d'une part et d'autre part les toxines Cry4 sur des espèces de Diptères, (Bravo et al. 2011 ; Palma et al. 2014). En plus des toxines Cry, les différentes souches de *B. thuringiensis* sont capables de produire d'autres δ -endotoxines en phase de sporulation, ce sont les toxines Cyt aux propriétés cytolytiques. Les toxines Cyt ont une activité insecticide spécifique contre certains diptères. Elles sont capables de former des pores non spécifiques dans les membranes des cellules épithéliales intestinales en agissant sur les phospholipides insaturés membranaires (Thomas & Ellar, 1983). De plus, la présence des toxines Cyt semble être importante pour renforcer l'action de certaines toxines Cry (Wirth et al. 2005). *B. thuringiensis* est efficace contre certaines espèces de coléoptères, lépidoptères et diptères (Ahmed et al. 1994). Cependant il ne serait pas efficace contre les acridiens en raison de l'acidité intestinale (Greathead et al. 1994).

5.3.4.2.2. Champignons entomopathogènes

Les champignons entomopathogènes sont des agents de lutte d'un grand intérêt. Ils constituent une alternative de contrôle grâce à une application facile, un contrôle efficace des insectes nuisibles et une sécurité vis-à-vis de l'homme et de l'environnement (Sinha, 2016 ; Choudhary et al. 2016). Plus de 700 espèces de champignons sont répertoriées comme étant entomopathogènes (Hajek & St. Leger, 1994) et causent des infections chez les insectes se trouvant sur la surface du sol ou souterrains. Ils appartiennent aux sous-taxons des Mastigomycotina, Zygomycotina, Ascomycotina et Deuteuromycotina. Les

espèces des genres *Beauveria*, *Metarhizium*, *Verticillium*, *Erynia*, *Hirsutella*, *Entomophthora* et *Entomophaga* sont les plus utilisées en lutte biologique (De Kouassi, 2001) et ont l'avantage d'affecter les différents stades de développement de l'organisme nuisible (Butt et al. 2016) y compris les œufs (Samuels et al. 2002 ; Ferreira et al. 2005).

De nombreuses études indiquent le potentiel des champignons entomopathogènes pour le contrôle des Tephritidae (Castillo et al. 2000 ; Sookar et al. 2008). Des isolats de champignons appartenant aux genres *Aspergillus*, *Beauveria* et *Metarhizium* ont affecté négativement les populations adultes de *C. capitata*, *C. rosa*, *C. fasciventris* et *Zeugodacus cucurbitae* aussi bien au laboratoire qu'en plein champ (Ekesi, 2010 ; Yang et al. 2015).

Le champignon *Beauveria bassiana* (Hypocreales : Clavicipitaceae) est un hyphomycète naturellement présent dans les sols du monde entier (Sabbahi, 2008). Il est cosmopolite, ubiquitaire et saprophyte (Ishii et al. 2015 ; Ortiz-Urquiza et al. 2010 ; Sabbahi, 2008). *B. bassiana* très utilisé en lutte biologique, est doté d'une grande virulence et peut infecter l'hôte par simple contact (Meyling et al. 2009). Ce champignon est généraliste (Shimazu, 2004) et s'attaque à un large éventail d'insectes ravageurs (Saranraj & Jayaparakash, 2017), soit 707 espèces dispersées dans 15 ordres, 149 familles et 521 genres (Zimmermann, 2007). Il a souvent été retrouvé sur des insectes infectés dans les zones tempérées et tropicales (Zimmermann, 2007).

Le processus d'infection de *B. bassiana* s'accomplit en quatre étapes différentes : l'attachement, la germination, la pénétration et la dissémination.

❖ La phase d'adhésion des champignons entomopathogènes consiste à pénétrer la cuticule des insectes, un réseau de polymère composé de chitine. L'adhésion est la première étape du processus d'infection. Elle se déclenche par un mécanisme de reconnaissance et de compatibilité des spores avec les cellules tégumentaires de l'insecte (Vey et al. 1982). Cette phase est scindée en deux étapes distinctes :

➤ La première, passive, est la fixation sur la cuticule, réalisée grâce à des interactions hydrophobes et des forces électrostatiques (Holder & Keyhani, 2005).

➤ La seconde, active, est caractérisée par la production d'un mucilage qui va engendrer une modification épicuticulaire aboutissant à la germination (Holder & Keyhani 2005 ; Meikle et al. 2007).

❖ La phase de germination est la formation d'un tube germinatif qui dépend des conditions environnementales et de la physiologie de l'hôte (composition biochimique de la cuticule) qui peut favoriser ou inhiber la germination (Latge et al. 1987). Cette étape est décisive. Elle s'accomplit après la fixation de la spore à la cuticule de l'insecte. En plus de la température et de l'humidité, les facteurs nutritionnels, chimiques et physiques peuvent influencer la germination (Butt & Beckett, 1994), Latge et al. (1987), ont démontré que pour que *B. bassiana* puisse germer et former un tube germinatif, des sources de carbone et d'azote sont nécessaires.

La phase de différenciation est une phase importante dans le processus d'infection. Au cours de cette phase, la spore germée, produit une structure appressoriale, qui sert de point d'ancrage et de ramollissement de la cuticule, ce qui a pour effet de favoriser la pénétration de la spore (Magalhaes et al. 1989).

❖ La phase de pénétration de l'hôte est que celui-ci perfore la cuticule par la pression mécanique et par la production d'enzymes (lipases, protéases, chitinases...) en dégradant la cuticule pour se nourrir et coloniser l'insecte (Butt, 1990). La cuticule de l'insecte est un réseau de polymère non-vivant composé de chitine jusqu'à 70 % de protéines (Clarkson & Charnley, 1996). Une fois que le champignon a pu accéder à l'hémocoel, il commence à utiliser les nutriments disponibles pour sa croissance et sa reproduction. Pedrini et al. (2007) ont émis l'hypothèse que les isolats fongiques qui se développent abondamment dans l'hémolymphe, tuent l'insecte en consommant ses nutriments et en endommageant physiquement les tissus perturbant ainsi la physiologie de l'hôte

❖ La phase de dissémination du champignon est de franchir avec succès la cuticule et de percer l'épiderme adjacent de la cuticule, il entre dans le système circulatoire ouvert de l'insecte, l'hémocoel. Le champignon se multiplie par la suite à l'intérieur de tous les organes de l'insecte hôte et il s'accroît sous forme de blastospores. Ceci peut faciliter la dispersion et la colonisation de l'hémocoel et optimise l'assimilation rapide des nutriments. Il semble qu'une utilisation efficace des sucres sanguins est nécessaire pour une croissance optimale du pathogène. Bien que le glucose joue un rôle central dans le métabolisme de l'insecte, il est généralement présent à très faibles concentrations.

❖ La production des toxines se produit lorsque le champignon atteint l'hémocoel. Il entame la production d'hyphes qui circuleront à travers l'hémolymphe. Pour se faire, le champignon doit surmonter les mécanismes immunitaires de l'hôte. L'espèce *Metarhizium anisopliae* produit des composés toxiques non enzymatiques tels que les destruxines (DTX) et les cytochalasmes qui lui permettent de surmonter les mécanismes de défense de l'hôte et de proliférer (Inglis et al. 2001). Les toxines ont des effets divers sur différents tissus d'insectes. Les destruxines dépolarisent la membrane du muscle de l'insecte en activant les canaux calcium. En outre la fonction des hémocytes d'insectes peut être empêchée également par les destruxines (Bradfish, 1990). Sous les conditions optimales, la mort de l'insecte survient normalement 3 à 5 jours à partir du moment de l'infection. Quand l'insecte meurt, le champignon produit un antibiotique : l'oosporine qui lui permet de surmonter la compétition des bactéries saprophytes dans le tube intestinal de l'insecte (Inglis et al. 2001). Le champignon entame alors une phase saprophytique. Les spores sont produites par les conidiophores qui émergent du cadavre, préférentiellement au niveau inter segmentaire si les conditions environnementales sont adéquates. Le cadavre est alors couvert par un feutrage mycélien blanc constitué d'hyphes et de conidiophores portant des conidies. La phase saprophytique ne dépend pas de l'humidité relative, elle est par contre sous l'influence de la température (Ferron, 1977).

❖ Le potentiel infectieux des champignons entomopathogènes comme agents de lutte biologique dépend de leurs propriétés physiologiques, de la population de l'hôte et des conditions du milieu (Ferron et al. 1991). La virulence et la spécificité de l'hôte sont deux éléments essentiels dans le choix d'un bon candidat à la lutte biologique. Il a été démontré que les insectes d'une même population révèlent une sensibilité qui diffère selon les isolats de *B. bassiana* (Todorova et al. 1994). À une échelle industrielle, les épreuves biologiques standardisés de laboratoire sont essentielles afin de vérifier le potentiel insecticide des préparations produites et de suivre leur stabilité de conservation (Ferron et al. 1991).

5.3.4.2.3. Nématodes entomopathogènes

L'utilisation de nématodes entomopathogènes en tant qu'agents de bio-contrôle a une longue histoire. Les premières utilisations remontent aux années 1930, elles étaient axées sur la lutte biologique classique, comme dans le cas de l'introduction de *Steinernema*

glaseri (Rhabditida : Steinernematidae) pour lutter contre le coléoptère japonais *Popilla japonica* aux États-Unis. Mais l'avènement des pesticides chimiques peu de temps après, étouffa très tôt la recherche dans ce domaine (Smart, 1995). Les nématodes entomopathogènes ont refait surface en tant qu'agents potentiels de bio contrôle dans les années 1960 et 1970 où les recherches portent essentiellement sur *Steinernema carpocapsae* (Rhabditida : Steinernematidae) (Jackson & Moore, 1969 ; Pye & Burman, 1977). Dans les années 80, la production à grande échelle des nématodes entomopathogènes dans des bioréacteurs est activement étudiée (Bedding, 1981 ; Gaugler, 1981). Plusieurs espèces de Nématodes entomopathogènes dont *Steinernema carpocapsae*, *S. feltiae* et *Heterorhabditis megidis*, sont maintenant produites commercialement et sont disponibles au public dans une formulation appropriée pour un stockage à court terme (Ehlers, 2001 ; Dillon, 2003). Ce n'est que récemment que Koppert a commencé la production d'*Heterorhabditis downesi* (Rhabditida : Heterorhabditidae) pour les essais aux Pays-Bas. Les juveniles infectueux (IJ) peuvent désormais être produits à un coût relativement bas et en quantité importante. La méthode d'application privilégiée est inondative, c'est-à-dire l'application à court terme d'un grand nombre de nématodes pour créer un impact direct sur la population des ravageurs (Feaster & Steinkraus, 1996 ; Shapiro-Ilan et al. 2006 ; Dillon et al. 2007).

Les nématodes entomopathogènes représentent une guildes de nématodes vivant dans le sol capable d'infecter un large éventail d'insectes. Les genres *Steinernema* et *Heterorhabditis* sont largement utilisés pour lutter contre les insectes nuisibles ayant des stades de développement dans le sol (Grewal et al. 2005). Ces deux familles sont largement étudiées. Jusqu'à présent, environ 90 espèces de Steinernematidae et 20 espèces de Heterorhabditidae ont été décrits (Labaude & Griffin, 2018). Quelques espèces notamment *S. carpocapsae*, *S. feltiae* (fera l'objet de notre étude) et *Heterorhabditis bacteriophora* sont disponibles dans le commerce (Lacey et al. 2015), dans de nombreuses régions du monde pour contrôler un certain nombre d'insectes nuisibles (Kaya & Gaugler, 1993 ; Kaya et al. 2006). Les Tephritidae passant une partie de leur cycle biologique dans le sol, peuvent être la cible de nématodes entomopathogènes. L'ensemble des espèces de nématodes appartenant aux genres *Heterorhabditis* et *Steinernema* ont montré une efficacité dans les essais au laboratoire et dans les vergers (Lindgren & Vail, 1986 ; Toledo et al. 2006 ; Kamali et al. 2013).

Les nématodes entomopathogènes ont une relation mutualiste avec les bactéries des genres *Xenorhabdus* et *Photorhabdus* (Kaya & Gaugler, 1993). Cette association symbiotique bactéries-nématodes est à la base de la pathogénicité et de l'efficacité du nématode en tant qu'agent de lutte biologique (Ehlers & Hokkanen, 1996). En effet, les stades juvéniles infectieux (IJ) pénètrent dans l'hôte par des orifices naturels ou par la cuticule d'insecte (Peters & Ehlers, 1994) et libèrent leurs bactéries symbiotiques dans l'hémocoel. L'hôte est rapidement tué par septicémie. Les juvéniles infectieux (IJ) se développent, deviennent adultes pour donner naissance à plusieurs générations successives jusqu'à ce que les ressources deviennent rares. Lorsque les nutriments sont consommés dans le cadavre des insectes, le nématode émerge du cadavre et se dispersent dans le sol à la recherche d'un nouvel hôte (Griffin et al. 2005).

5.3.4.2.4. Bio pesticides végétaux

Une autre stratégie de lutte biologique repose sur l'exploitation des résistances naturelles des plantes. L'abondance et la diversité des métabolites secondaires représentent une source importante de molécules qui font l'objet d'un investissement majeur dans le domaine de la recherche. Le bio pesticide d'origine végétale le plus utilisé est l'huile de neem, un insecticide extrait des graines d'*Azadirachta indica* (Schmutterer, 1990). Il contient plusieurs molécules actives dont l'azadirachtine, la nimbidine, la solanine, le déacétylazadirachtinol et le méliantriol. Le principal ingrédient actif de cette huile est l'azadirachtine qui se définit comme un mélange de sept isomères de tétranortritarpinoïde possédant la propriété de perturber la morphogénèse et le développement embryonnaire des insectes (Correia et al. 2013 ; Srivastava et al. 2007). Cependant, ces molécules naturelles se dégradent rapidement par la lumière.

Il existe sur le marché des pyréthrinoïdes de synthèse qui sont beaucoup plus stables que leurs homologues naturels, extraits de la plante *Tanacetum (Chrysanthemum) cinerariaefolium* plus communément appelé pyrèthre. Cette dernière est une plante herbacée vivace, dont les fleurs contiennent des principes actifs, appelés pyréthrinés qui attaquent le système nerveux de tous les insectes.

Certaines huiles végétales, qui n'ont pas d'activité antiparasitaire intrinsèque, peuvent se retrouver sur le marché en tant que biopesticide. Dans ce cas, ce sont leurs propriétés physiques qui sont à exploiter. Ainsi, l'huile de colza est l'ingrédient principal de

quelques produits comme le VegOil® car, aspergée sur les feuilles et les ravageurs, elle forme un film huileux qui asphyxie ces déprédateurs.

Les plantes à pesticides intégrés (Plant Incorporated-Protectants, PIPs) sont des organismes modifiés par génie génétique. Elles sont capables de produire et d'utiliser des substances pesticides afin de se protéger contre des insectes, des virus ou des champignons. Les PIPs les plus connues sont des plants de pommes de terre, maïs et coton ayant la particularité de produire la protéine Cry de *B. thuringiensis* (Meissle et al. 2011). Pour l'agence américaine de protection de l'environnement (*United States, Environmental Protection Agency, US.EPA*), les PIPs sont une catégorie de bio pesticides. Les premières PIPs ont été cultivées aux États-Unis d'Amérique en 1995/1996. Les surfaces agricoles mondiales cultivées en PIPs sont passées de 11,4 millions d'hectares en 2000 à plus de 80 millions en 2005 (Shelton et al. 2002 ; Bates et al. 2005). Certains pays de l'Union européenne émettent des réticences quant à leur utilisation. En effet, pour des raisons qualifiées d'éthique, morale et des réserves sur leur sûreté biologique, seuls 5 des 27 pays membres de l'Union européenne ont adopté leur utilisation (Kumar et al. 2008). Ainsi, le maïs Bt (*Bacillus thuringiensis*) est couramment cultivé en Espagne, Portugal, Roumanie, Pologne et Slovaquie, alors que la lignée de maïs Bt MON810 est formellement interdite dans certains pays comme la France, l'Autriche, l'Allemagne, la Grèce, le Luxembourg et la Hongrie (Meissle et al. 2011).

5.3.4.2.4.1.1 Les Huiles essentielles

Les huiles essentielles sont des mélanges naturels complexes de métabolites secondaires volatils, isolés par hydrodistillation ou par expression mécanique (Kalemba, 2003). Elles sont obtenues à partir d'une matière première végétale botaniquement définie. Elle est souvent séparée de la phase aqueuse par un procédé physique n'entraînant pas de changement significatif de sa composition. Selon Padrini & Lucheroni (1996), les huiles essentielles, appelées aussi essences, sont des mélanges de substances aromatiques produites par de nombreuses plantes et présentes sous forme de minuscules gouttelettes dans les feuilles, la peau des fruits, la résine, les branches, les bois, mais également à partir de gommages qui s'écoulent du tronc des arbres. Elles sont présentes en petites quantités par rapport à la masse du végétal. Elles sont odorantes et très volatiles.

5.3.4.2.4.1.2. Exemples de produits à base de plantes

Certains composés végétaux, tels que les composés volatiles de fruits et des feuilles, sont particulièrement attractives pour femelles de la mouche méditerranéenne à la recherche d'hôtes (Levinson et al. 1990). D'autres composés peuvent être anti-appétant, dissuasif de la ponte ou répulsif spatial pour certains groupes d'insectes (Levinson et al. 2003). Par exemple, certains extraits de fougère *Elaphoglossum piloselloides* ont été dissuasifs de la ponte vis-à-vis de *C. capitata* (Socolsky et al. 2008), alors qu'il existe des substances toxiques et répulsives dans les extraits de certaines espèces de plantes de Tagetes contre les mâles et les femelles de la cécidomyie. (Lopez et al. 2011). Les Huiles essentielles de deux cultivars de Citrus limon ont un effet répulsif contre les femelles adultes de *C. capitata*, même si *Citrus spp* est son hôte (Faraone et al. 2012). Les odeurs émises par les plantes non hôtes peuvent également exercer une répulsion sur ces insectes à la recherche de leurs hôtes appropriés (Khan et al. 2008). Par exemple, quand une mouche des fruits gravides est à la recherche d'hôtes, elle volera principalement vers les sources d'odeurs émises par les fruits mûrissants au lieu des sources d'odeurs des fruits non mûrs et /ou d'hôte non approprié (fruits avec des composés toxiques, des substances antifédants, etc.) (Demirel, 2007).

Ces exemples montrent que les composés secondaires des plantes ont un potentiel de contrôle à l'égard de *C. capitata* à travers la gestion comportementale. Le développement d'une méthode de lutte biologique contre un ravageur nécessite quatre étapes :

- Etudier la biologie du ravageur
- Etudier la biologie des ennemis naturels du ravageur
- Mettre au point une production répondant au besoin des expérimentations tant au laboratoire qu'en conditions naturelles
- Valider les expérimentations en laboratoire par des tests en plein champ (Brunel & Fournet, 2002).

CHAPITRE II

Présentation de la région d'étude.

1. Situation géographique de la Mitidja

Avec une superficie de 1400 km², la Mitidja compte parmi les plus grandes plaines sublittorales algériennes. Orientée parallèlement au relief côtier dans une direction est-nord-est vers ouest-sud-ouest, la plaine de la Mitidja est limitée à l'est par l'oued Boudouaou, à l'ouest par l'oued Nador tandis que ses deux principaux flancs sont bordés par deux reliefs élevés : les collines du Sahel algérois au nord et l'Atlas blidéen au sud (Mutin, 1977). Elle s'allonge d'Est en Ouest sur une centaine de kilomètres et s'étire sur une profondeur variant de 5 à 20 km (Imache & al. 2011). D'altitude moyenne de 50m, elle présente une faible pente orientée vers la mer (Imache et al. 2011). Elle est divisée en deux unités physiques : la Basse Mitidja ou Mitidja Est et la Haute Mitidja ou Mitidja Ouest (Imache et al. 2011). Ses sols fertiles bénéficient d'un climat tempéré de type méditerranéen et d'une pluviométrie suffisante (Imache et al. 2011). Grande plaine agricole, elle est consacrée à la culture des agrumes dans la partie orientale et à celle de la vigne dans la partie occidentale (Figure 14).

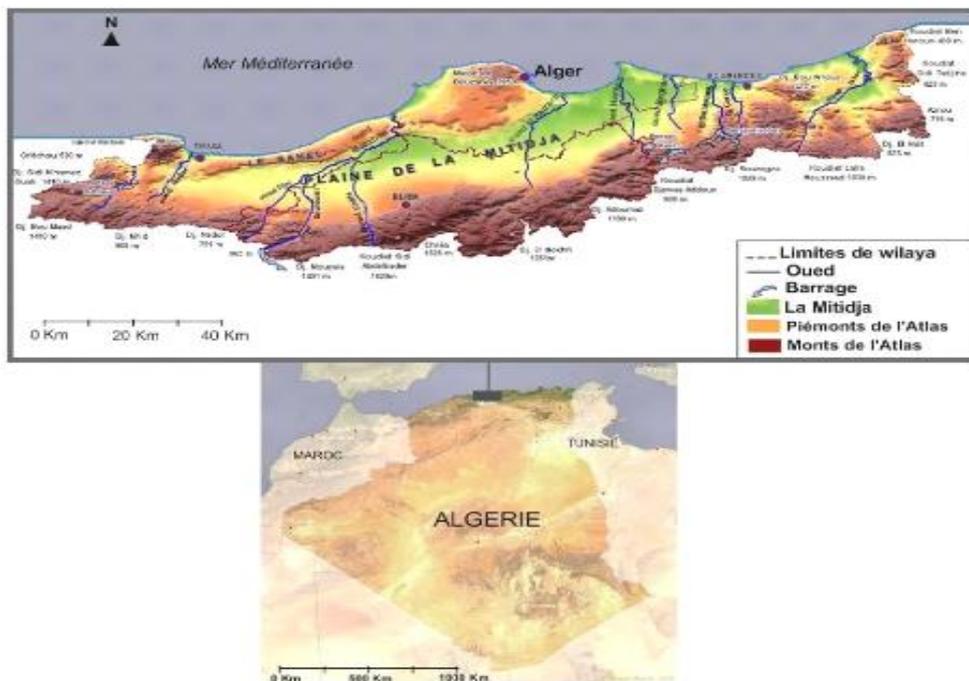


Figure 14. Situation géographique de la Mitidja.

(Source : Programme d'aménagement côtier (PAC) 2006).

2. Facteurs abiotiques et biotiques

2.1 Facteurs abiotiques

Selon Dajoz (1985) l'étude du milieu avec tous ses paramètres est indispensable afin de mieux comprendre la répartition des êtres vivants dans leur biotope. En effet, le climat avec toutes ses composantes est un facteur limitant pour tous les êtres vivants. Il règle non seulement leur activité et leur cycle de vie, mais aussi leur répartition dans l'espace et dans le temps.

2.1.1. Température

La température est l'élément le plus important du climat, elle agit sur l'activité biologique et écologique des êtres vivants. Les variations de température ont un impact considérable sur la vie de tous les organismes (Sherwood et al. 2016), car les espèces ne peuvent vivre que dans des intervalles thermiques distincts (Dreux, 1980). De même Dajoz (2006), affirme que ce paramètre influe sur la vitesse de développement, le nombre de générations autant que sur la fécondité. Le facteur thermique agit directement sur la vitesse de réaction des individus, sur leur abondance et leur croissance (Berlioz, 1950 ; Dajoz, 1971 ; Ramade, 1984 ; Faurie et al. 1998 ; Mackenzie et al. 2006). La température dépend de plusieurs paramètres tel que la nébulosité, la latitude et l'exposition (Faurie et al. 2012). Mutin (1997) confirme que les températures enregistrées dans la région de la Mitidja sont influencées par la mer méditerranéenne. Les données météorologiques prises en considération sont celles de la station météorologique de Dar El Beida. En effet, les données des températures de 2016, 2017 et 2018 sont regroupées dans le tableau 2.

D'après le tableau 2, la température moyenne annuelle de l'année 2016 est de 18,5°C. Celle-ci a légèrement augmenté à 19,7°C en 2017 puis elle a connu une baisse (15°C) en 2018. Les températures maximales enregistrées pour l'année 2016, 2017 et 2018 sont respectivement de 32°C ; 34,3°C et 32,7°C qui se rencontrent durant les mois de Juillet et Aout. Par contre, les températures minimales enregistrées en 2016, 2017 et 2018 sont respectivement de 6,4°C en mars, 5°C et 5,5°C en janvier. En 2016, les mois le plus froids sont mars (6.4°C) et janvier (6,8°C) tandis qu'en 2017, ce sont les mois de décembre et janvier qui s'avèrent le plus froid avec des températures respectives de 5,6 et 5°C. Les températures minimales indiquant les mois les plus froid en 2018 sont

décembre et janvier qui se distinguent par des températures respectives de 5,5°C et 5°C. Les mois les plus chauds en 2016 sont août (31,5°C) et septembre (30,4°C) tandis qu'en 2017, ce sont juillet et août avec des températures respectives de 33,3 et 34,3°C et en 2018 ce sont juillet (32,1°C) et août (32,7°C).

Tableau 2. Températures mensuelles moyennes des maximas et des minimas de 2016, 2017 et 2018 de la station météorologique de Dar El Beida

Paramètres	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moy	Années
M°C	19.4	19.2	19.3	21.7	24.8	29.5	32	31.5	30.4	29.1	22	18.6	24.8	2016
m°C	6.8	7.4	6.4	9.7	11.5	15.3	19.2	19.2	17.3	15.6	10.2	8.3	12.2	
(M+m)/2	13.1	13.3	12.9	15.7	18.2	22.4	25.6	25.4	23.9	22.4	16.1	13.5	18.5	
M°C	15,7	19,2	21,5	22,3	26,6	31	33,3	34,3	30,3	26,5	21	16,5	26,1	2017
m°C	5	8,2	7,3	8,9	12,6	17,8	20,4	22,6	16,7	11,5	7,6	5,6	13,3	
(M+m)/2	10,3	13,7	14,4	15,6	19,7	24,4	26,9	28,4	23,5	18,7	13,6	10,9	19,7	
M°C	18.1	15.8	19	21.9	22.8	28	32.1	32.7	30.2	25.6	21.6	19.2	23,5	2018
m°C	5.5	4.8	8.7	9.7	11.7	15	20	19.8	19.2	14.2	10	5.6	15	
(M+m)/2	11.4	10.2	14	16	17.5	21.8	26.2	25.5	24.6	19.7	15.7	11.9	15	

- ◆ M : Moyenne mensuelle des températures maximales.
- ◆ m : Moyenne mensuelle des températures minimales.
- ◆ (M + m) /2 : Moyenne mensuelle des températures.

2.1.2. Pluviométrie

La pluviométrie constitue un facteur d'importance fondamentale (Ramade, 1984) et le volume annuel des pluies conditionne la distribution des espèces dans les aires biogéographiques (Ramade, 1984). Autant son insuffisance que son excès sont néfastes aux animaux (Faurie et al. 1984). Le régime pluviométrique, étant donné son action directe sur les insectes et le fait par ailleurs, qu'il conditionne le développement des plantes hôtes, a une influence souvent déterminante sur les fluctuations des populations dans le temps et sur les variations affectant éventuellement leur répartition dans l'espace (Bues, 1988). Le rythme pluviométrique au niveau de Dar El Beida est de type méditerranéen, caractérisé par une irrégularité annuelle et interannuelle (Mutin, 1977). Les hauteurs mensuelles des précipitations de 2016 et 2018 sont regroupées dans le Tableau 3 suivant :

Tableau 3. Précipitations mensuelles en mm de 2016, 2017 et 2018 de la station météorologique de Dar El Beida

Mois \ Années	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
P. 2016	72,4	80,5	125	35,1	37,8	2,5	0,8	0	5,3	8,9	101,4	190,5	660,2
P. 2017	254,8	18,1	55,1	22,1	8,9	5,4	0	2,5	34,6	16	201,7	157,7	776,9
P. 2018	33,2	69,6	121,2	98,8	62	32,1	0	0	25,9	65,3	95,8	31,5	635,3

P(mm) : Précipitations et / ou la fonte des neiges total (mm).

On constate que la pluviométrie se distingue par une baisse considérable d'avril à octobre. En 2016, les plus grandes quantités de pluie ont été enregistrées pendant les mois de novembre et décembre avec 101,4 et 190,5 mm alors qu'en 2017 c'était les mois de novembre, décembre et janvier qui sont les plus pluvieux avec des quantités respectives 201,7, 157,7 et 254,8 mm, soit une pluviosité annuelle de 776,9 mm. En revanche en 2018, c'est le mois de mars qui a enregistré 121,2 mm et en avril 98,8 qui ont reçu les précipitations les plus importantes, soit une quantité de pluie annuelle de 635,3mm qui s'avère l'année la moins pluvieuse. On remarque que les précipitations se caractérisent par une irrégularité des quantités mensuelles de pluie d'une année à l'autre.

2.1.3. Humidité relative (HR%)

Selon Dajoz (1985), l'humidité relative agit sur la densité des populations en provoquant une diminution du nombre d'individus en conditions hygrométriques défavorables. Faurie et al. (2012) Soulignent que l'humidité est liée à plusieurs facteurs : la température, la quantité d'eau tombée, le nombre de jour de pluie, la forme de précipitations, et le vent. D'après le tableau 4 ci-dessus, l'humidité relative est élevée pendant toutes les années 2016, 2017 et 2017 avec des humidités relatives variant de 63,7% en septembre et 83,7% en décembre 2016. Elle est légèrement plus élevée en 2017 et 2018 où elle est respectivement de 71,4 et 73,4%.

Tableau 4. Humidité relative moyenne (%) de 2016, 2017 et 2018 de la station météorologique de Dar El Beida

Mois \ Années	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
2016	78	72,3	74,5	75,8	70,4	65,1	66,8	64,5	63,7	67,5	69,8	83,7	71,0
2017	79,7	71,3	71,8	72,3	69,6	68,2	66	66,3	67	70,3	74,9	79,3	71,4
2018	75,9	77	72,8	74,5	79,2	71,9	65,3	67,5	72,2	71,6	71,2	81,6	73,4

H.R. Moy (%) : Humidité relative moyenne

2.1.4. Vent

D'après Dajoz (1985), le vent agit non seulement sur le degré de la température et la vitesse d'évaporation, ce qui explique son pouvoir desséchant, mais aussi il est considéré comme un agent d'éparpillement des animaux et des végétaux (Dajoz, 2006). Le vent constitue peut-être un facteur limitant dans certains biotopes. L'exposition de la végétation à des vents violents peut limiter son développement (Ramade, 2003). Le tableau 5 montre que la vitesse moyenne annuelle du vent oscille entre 3,1 km/h pour l'année 2016 et 2017 à 10,38 km/h en 2018. La vitesse la plus élevée est enregistré en mois de Mars (14,5 km/h).

Tableau 5. Vitesse (km/h) moyenne mensuelle du vent de 2016, 2017 et 2018 de la station météorologique de Dar El Beida (Tutiempo, 2017).

Mois \ Années	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moy
2016	2,6	4,1	3,3	2,9	3,2	3,2	3,9	3,9	2,9	2,4	2,7	2,1	3,1
2017	2,8	3,8	3,1	3,5	3,1	3,2	3,2	3,5	3,1	7,5	7,7	9,2	3,3
2018	9	10,5	14,2	11,5	10,1	10,9	10,8	10	10	10,2	10,6	6,6	10,38

2.1.5. Synthèse climatique

2.1.5.1. Diagramme pluviothermique

Le climat d'une région donnée peut être synthétiser à partir des facteurs climatiques comme les températures T (°C) et les précipitations P (mm) qui vont nous permettre de

distinguer les périodes sèches et les périodes humides. Selon Dajoz (1985) on parle de période de sécheresse quand le total des précipitations P(mm) est égal ou inférieur au double des températures T (°C) alors que Dreux (1980) détermine la période sèche lorsque la courbe des températures est au-dessus de celle des précipitations et elle est dite humide. Le diagramme pluviothermique est réalisé sur la base des données climatiques de 2007 à 2016, soit 10 ans, pour la localité de Dar El-Beida. Il montre de deux périodes, l'une sèche ? s'étale sur 5 mois, de mi-mai à début d'octobre et l'autre humide apparaît du début d'octobre à la mi-mai, soit 7 mois environ (Figure 15).

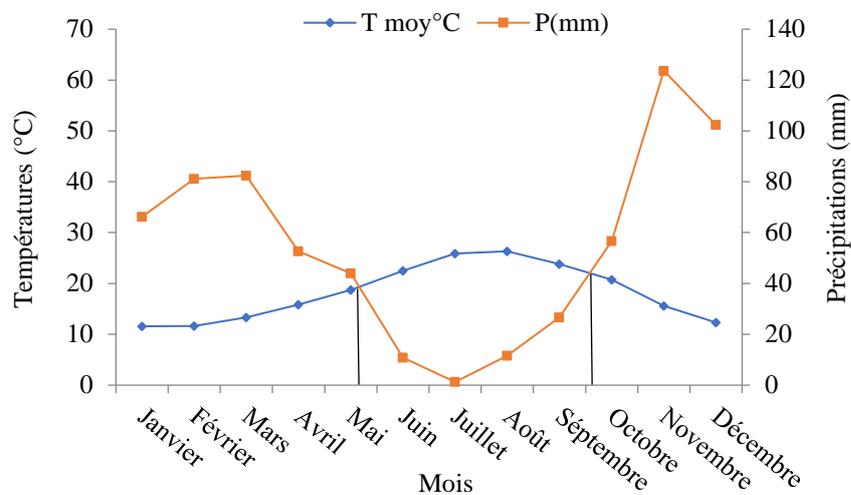


Figure 15. Diagramme pluviothermique sur 10 années de 2007 à 2016 dans la localité de Dar El Beida.

2.1.5.2. Climagramme d'Emberger

Le climagramme d'Emberger permet de distinguer l'étage bioclimatique auquel appartient la région d'étude. Il est obtenu par le calcul du quotient pluviométrique Q_2 grâce à l'équation simplifiée de Stewart (1969).

$$Q_2 = 3,43 * P / (M-m)$$

- Q_2 : Quotient pluviométrique d'Emberger.
- P : Précipitations annuelles exprimées en mm
- M : Moyenne des températures maximales en °C du mois le plus chaud
- m : Moyenne des températures minimales en °C du mois le plus froid

Selon les données climatiques sur 10ans, 2007 à 2016, le quotient pluviométrique Q_2 de la région d'étude calculé sur une période de dix ans entre 2007 et 2016 est égal à 83,81. La projection de cette valeur sur le climagramme d'Emberger indique que la région de Dar El- Beida est située dans l'étage climatique sub - humide caractérisé par un hiver tempéré (Figure 16).

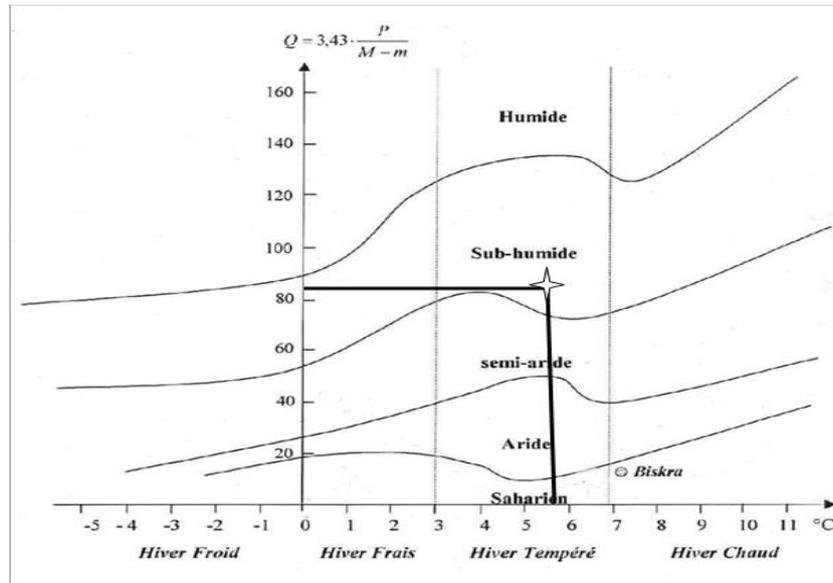


Figure 16. Climagramme d'Emberger sur 10 années de 2007 à 2016 de la localité de Dar El-Beida.

2.1.6 Facteurs édaphiques

Du point de vue physique, le relief de la Mitidja révèle deux ensembles morphologiques qui sont la plaine et les reliefs collinaires pseudo-montagneux. La partie correspondant à la plaine occupe presque la moitié de la Mitidja. Les sols sont caractérisés par une faible déclivité. Les alluvions quaternaires dominent dans la partie orientale. Les argiles, les marnes et le grès s'y retrouvent accumulés (Niane, 1979). Dans la partie méridionale, les dépôts du pliocène caractérisent les sols cristalliformes ainsi que des roches sédimentaires. La bordure méridionale de la Mitidja est marquée par la venue du matériel volcanique abondant dû à l'effondrement qui s'est réalisé à partir du miocène (Mutin, 1977). Les dépôts quaternaires occupent la plaine de Boudouaou. Les alluvions résultent de la phase de comblement et de remblaiement de la Mitidja. Ces alluvions ont une épaisseur qui dépasse deux mètres. La partie méridionale de la Mitidja repose sur des dépôts solides qui se sont surélevés depuis le pliocène vers le quaternaire. Ces sols cristalloylliens ont une dureté assez importante (MRE, 2003).

Selon Dreux (1980), les facteurs édaphiques renferment toutes les propriétés physiques et chimiques du sol qui ont une action écologique sur les êtres vivants. Les sols constituent l'élément essentiel des biotopes (Ramade, 1984).

2.1.6.1. Facteurs pédologiques et leurs implications agricoles

La formation des sols est représentée par un processus complexe qui consiste en une transformation des roches situées à la surface de la croûte terrestre. Les principaux caractères du sol qui peuvent intervenir sur la vie des organismes sont sa structure physique, sa composition chimique et les particularités des substances circulant comme le gaz, l'eau et les substances minérales (Dreux, 1980). Il existe trois types de sols dans la région de Mitidja. D'abord de part et d'autre de l'oued de Boudouaou, s'étend une bande étroite d'alluvions récentes jusqu'à son embouchure caractérisant les sols peu évolués sur lesquels les plantations d'agrumes sont accompagnées par des vignobles, des cultures maraichères et des champs de fourrages. Le long de la côte entre Surcouf et Boudouaou El Bahri sur 2 500 ha, il y a des sols calcimagnésiques carbonatés riches en calcaire, ce qui permet le développement de la vigne, des cultures maraichères et céréalières. Le troisième type de sol est à sesquioxydes de fer. Il s'étend entre Ouled Moussa, Hamadi et Boudouaou sur 5.000 ha environ. Sur ce type de sol s'implantent avec succès la vigne et les céréales. Mais l'arboriculture fruitière donne de biens maigres résultats. On distingue 5 classes de sols (Figure 17) :

- Les sols peu évolués riches en limon et sable.
- Les sols hydromorphes ont une texture argilo-limoneuse.
- Les sols à sesquioxydes de fer sont des terres rouges limono-argileux.
- Les vertisols sont riches en argile et en limon fin.
- Les sols carbonatés (calcimagnétiques) se composent d'alluvions limono-argileuses à forte teneur en calcaire.

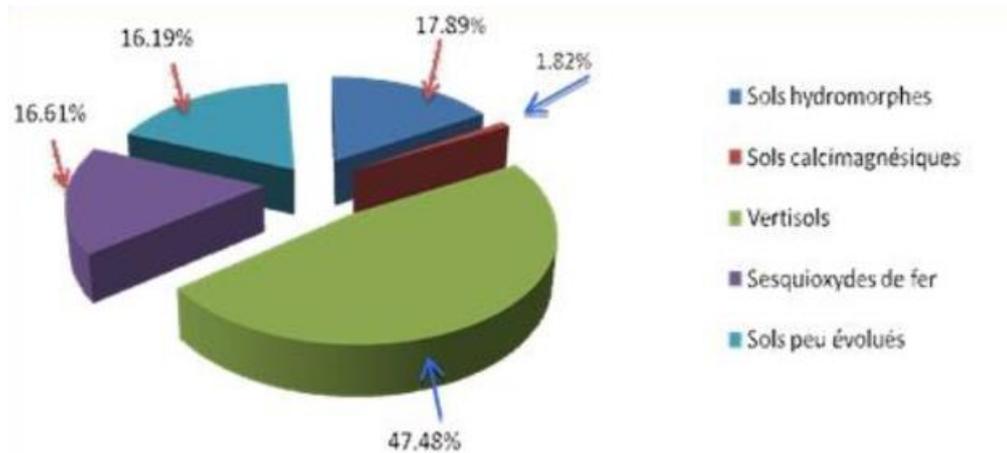


Figure 17. Proportion des classes de sols dans la Mitidja (Mutin, 1977).

2.1.7. Facteurs Hydrographiques

Sur toute sa superficie, la Mitidja est traversée par différents oueds s'écoulant généralement du sud vers le nord, prenant leur source dans le massif de Blida. D'Est en Ouest, ces oueds sont oued de Réghaïa, oued Hamiz, Oued Djemaa, oued El Harrach, oued Chiffa, oued Bouroumi, oued Djer et oued Mazafran (Mutin, 1977). Deux aquifères principaux se trouvent sur la grande partie de la plaine de la Mitidja, l'un quaternaire des alluvions grossières et l'autre astien gréseux ou gréso-calcaire. Ces deux derniers sont séparés par un complexe argilo-marneux, d'épaisseur très variable selon les endroits (Benziada, 2003).

2.2 Facteurs biotiques

2.2.1. Données floristiques

Selon Wojterski (1988), la partie orientale de la Mitidja est l'une des plaines les plus fertiles en Algérie. Il y a deux strates : La première est arborescente avec des brise-vent, des arbres ornementaux, des arbres fruitiers et des groupements de plantes spontanées. La strate herbacée comprend les cultures maraichères et les plantes adventices qui se côtoient. D'après Mutin (1977) elle dispose d'un couvert végétal très riche, renfermant une grande diversité, on y trouve

- Les brises vents tels que le :
 - Le cyprès commun (*Cupressus sempervirens*).

- Le pin d'Alep (*Pinus halepensis*) et le pin parasol (*P. pinea*).
- Le filao (*Casuarina torulosa*).
- L'eucalyptus (*Eucalyptus camaldulensis*).
- Le peuplier blanc (*Populus alba*) et le peuplier noir (*P. nigra*).
- Le chêne vert (*Quercus ilex*)
- Le faux poivrier (*Schinus molle*)
- Les arbres fruitiers telles que le
 - L'oranger (*Citrus sinensis*).
 - Le citronnier (*Citrus limon*).
 - L'olivier sauvage (*Olea europea sativa*)
 - Le figuier (*Ficus carica*).
 - Le néflier du Japon (*Eriobotria japonica*).
 - Le poirier (*Pyrus communis*)
 - L'abricotier (*Prunus armeniaca*)
- Les plantes arbustives telles que :
 - Le chêne kermès (*Quercus coccifera*)
 - Le buisson ardent (*Crataegus pyracantha*).
 - Le rosier de chine (*Hibiscus rosasinensis*).
 - Le lierre (*Hedera helix*).
 - Le pittosporum du Japon (*Pittosporum tobira*).
- Les graminées et les adventices telles que :
 - L'avoine sauvage (*Avena sterilis*).
 - L'orge des rats (*Hordeum murium*).
 - Le brome (*Bromus catharticus* ; *B. tectorum* et *B. sterilis*).
 - Le chardon (*Galactites tomentosa*).
 - Le coquelicot (*Papaver rhoeas*).
 - Le muguet de pampus (*Salpichroa origanofolia*).

2.2.2. Données faunistiques

La partie orientale de la Mitidja est caractérisée par une faune très diversifiée (Mohammedi-Boubekka, 2007). On y trouve les :

2.2.2.1. Gastéropodes

La Mitidja possède une faune riche et très variée. Elle comprend des invertébrés comme les Gastéropodes (Milacidae, Helicidae et Enidae) (Molinari, 1989). A titre d'exemple, on cite *Otala punctata* Müller (1774), *Milax nigricans* Schulz (1836) et *Eobania vermiculata* Müller (1774), signalées aux abords du marais de Réghaïa. Quant à Chikhi (2001), il note à Mâamria au Nord de Rouiba *Euparypha pisana* Müller (1774) et *Helicella* sp.

2.2.2.2. Araneides

Les araneides et les pseudoscorpionides sont présents aussi bien dans les cultures maraichères que dans les vergers.

2.2.2.3. Insectes

Parmi les insectes, on peut rencontrer des odonoptères, des mantoptères, des orthoptères, des homoptères, des coléoptères et des diptères (Doumandji & Mitiche, 1991).

2.2.2.4. Myriapodes

De même, Chikhi (2001) dans la région de Dergana a noté la présence de Myriapodes tels que *Polydesmus* sp et *Scutigera coleoptrata* Fabricius. Il a également cité *Psocoptera* sp, *Gyllulus* sp, *Pyrrhocoris apterus* Linné et les *Pompilidae*.

2.2.2.5. Batraciens et reptiles

Chikhi (2001) signale que les batraciens comprennent *Discoglossus pictus* Oth. (1837), *Bufo viridis* (Laurenti, 1768) et *Bufo mauritanicus* Schlegel (1841). Dans les reptiles il y a des Lacertidae, des Geckonidae et des Colubridae.

2.2.2.6. Oiseaux

Les oiseaux sont représentés par près d'une centaine d'espèces dont il faut mentionner le Moineau domestique *Passer domesticus* (Linné, 1758), le Moineau espagnol *Passer hispaniolensis* (Temminck, 1820), le moineau hybride *Passer domesticus* × *Passer hispaniolensis*, l'étourneau sansonnet *Sturnus vulgaris* Linné,

1758, le Verdier *Carduelis chloris* (Linné, 1758) et la Caille des blés *Coturnix coturnix* (Linéé, 1758). Molinari (1989) signale qu'il existe des espèces aquatiques comme les grèbes (*Podiceps*), les cormorans (*Phalacrocorax*), les hérons (*Ardea*, *Bubulcus*, *Egretta*), les anatidés (*Anas*, *Aythya*), les rallidés (*Fulica*, *Gallinula*), les laridés (*Larus*), les rapaces diurnes (*Circus*) et les limicoles (*Charadrius*).

2.2.2.7. Mammifères

Les traces du Sanglier *Sus scrofa* (Linné 1758) peuvent être observées dans les vergers d'agrumes près de Réghaïa. Parfois, on entend les hurlements aigus du Chacal doré *Canis aureus* (Linné 1758) depuis Ain El Kahla près d'Ain Taya ou même aux alentours de Hamadi. La Genette *Genetta geneta* (Linné 1758), le Surmulot *Rattus norvegicus* (Linné 1769) et le Mulot *Apodemus sylvaticus* (Linné 1758) sont signalés aux abords du marais de Réghaïa (Molinari 1989).

RECHERCHE EXPERIMENTALE

CHAPITRE III

Partie I : Etude de la bio-écologie de *C. capitata*

L'objectif de cette étude consiste en une estimation du nombre de générations de *C. capitata* sous les conditions climatiques actuelles en Mitidja et de prédire, par la méthode des degrés-jours, ses périodes d'apparition dans le but de sélectionner le moment opportun d'intervention contre ce ravageur. Il vise également à déterminer l'influence de la variété fruitière par rapport à l'infestation par la cératite.

1. Choix des Vergers d'expérimentation

Le choix des vergers d'étude a été fait sur la base de plusieurs facteurs dont les plus importants sont l'abondance de la cératite, la faible utilisation des insecticides, l'accessibilité aux vergers ainsi que la sécurité.

1.2. Description des sites

1.2.1. Verger de néflier

Le verger de néflier (36.17° Nord, 3.15° Est) se localise dans la station expérimentale de l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie (ENSA) d'El – Harrach, à 7kms à l'est d'Alger. Il s'étend sur une superficie de 0,5 ha à une altitude de 20 m environ. Ce verger comprend 6 rangées distantes entre elles de 6m, et 27 arbres au total. L'espace entre les arbres est de 5m. Ce verger se caractérise par une absence totale d'entretien (absence de traitements chimiques, de désherbage et de taille). Les fruits ne sont pas récoltés et constituent une source de ré-infestation. Un piège à phéromone est installé au centre du verger et deux pièges englués ont été accrochés d'une manière aléatoire, entre le 10 Avril et 30 Mai, à raison d'une sortie tous les 10 jours afin de suivre la dynamique des populations de la Cératite (Tableau 6, Figure 18).



Figure 18. Verger de néflier de la station expérimentale de l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie.

1.2.2. Verger d'abricotier variété Bulida.

Le verger d'abricotier Variété Bulida (36°50 Nord, 2°87 Est) se localise à la station expérimentale de l'Université de Saad Dahleb à 6 km à l'est de Blida, à une altitude de 188 m. Il s'étend sur une superficie de 1 ha et de densité de plantation de 6x6 m, soit 139 arbres au total. Ce verger se distingue par l'absence total d'entretien (absence de traitements chimiques, absence de désherbage et de taille). Les fruits ne sont pas récoltés ni ramassés du sol et constituent de ce fait un foyer d'infestation et de ré-infestation. Un piège à phéromone est installé au centre du verger et deux pièges englués ont été accrochés d'une manière aléatoire, entre le 10 Mai et le 10 juillet, à raison d'une sortie tous les 10 jours afin de suivre la dynamique des populations de la Cératite (Tableau 6, Figure 19).



Figure 19. Verger d'abricotier de la station expérimentale de l'Université de Saad Dahleb.

1.2.3. Verger de Pêcher variété Redhaven

Le verger de pêcher variété Redhaven (36°31 N, 2°46 E) est situé à Hatatba au nord-est de Tipaza à 16 km environ au nord-ouest de Blida et à 39 km au nord de Médéa. Il s'élève à une altitude de 620 m. C'est une exploitation privée de 2 ha qui est très bien entretenue. Ce verger comprend 11 lignes distantes entre elles de 6m, soit 556 arbres au total. Le désherbage mécanique, la taille et l'irrigation se font d'une façon régulière. Les traitements phytosanitaires sont réalisés contre la mouche blanche et la Mouche méditerranéenne des fruits, ils sont appliqués entre juin et aout. Un piège à phéromone est installé au centre du verger et deux pièges englués ont été accrochés d'une manière aléatoire, entre le 10 juin et le 20 Aout, à raison d'une sortie tous les 10 jours afin de suivre la dynamique des populations de la cératite (Tableau 6, Figure 20).



Figure 20. Verger de Pêcher variété Redhaven de Hatatba (Tipaza)

1.2.4 Verger de poirier variété Santa maria

Le verger de poirier (36°31 Nord et 2°46 Est) se localise à Htatba située au nord-est de la Wilaya de Tipaza. C'est une exploitation privée de 1 ha qui renferme la variété Santa maria. Ce verger comprend 11 lignes distantes de 6m, avec une densité de plantation est de 6*6m, soit un total de 139 arbres. Un piège à phéromone est installé au centre du verger et deux pièges englués ont été accrochés d'une manière aléatoire, entre le 20 juillet et le 30 Aout, à raison d'une sortie tous les 10 jours afin de suivre la dynamique des populations de la cératite (Tableau 6, Figure 21).



Figure 21. Verger de poirier à Htatba.

1.2.5 Verger de Figuier variété Thamourth et Ajenjar

Le verger de Figuier (36°55 Nord, 2°55 Est) se localise à la ferme de démonstration de Tassala El Merdja de l'Institut Technique d'Arboriculture Fruitière et de la Vigne (ITAFV) à 50 m d'altitude. Il s'étend sur une superficie de 1,76 ha. L'entretien se limite à un désherbage mécanique et ne subit aucun traitement phytosanitaire. Ce verger comprend 5 rangées distantes entre elles de 6m comprenant chacune 5 arbres, soit 25 arbres au total. Un piège à phéromone est installé au centre du verger et deux pièges englués ont été accrochés d'une manière aléatoire, entre le 10 Aout et le 30 Septembre, à raison d'une sortie tous les 10 jours afin de suivre la dynamique des populations de la cératite (Tableau 6, Figure 22).



Figure 22. Vergers de Figuier de l'Institut Technique D'arboriculture Fruitière et de la Vigne (ITAFV).

1.2.6 Vergers d'agrumes

Le verger se localise ($36^{\circ}55$ Nord et $2^{\circ}55$ Est), à la ferme de démonstration de Tassala El Merdja à l'Institut Technique d'Arboriculture Fruitière et de la Vigne (ITAFV) à 50m d'altitude. Il s'étend sur une superficie de 2,71 ha. Il est constitué d'une collection d'agrumes qui se compose de 12 variétés dont 7 ont fait l'objet de notre étude à savoir la Clémentine, la New hall navel, la Navelina, la Washington navel, la Thomson navel, la Valencia late et la Navelate. Chaque variété comprend 6 à 10 lignes distantes entre elles de 6m tandis que l'espace entre les arbres est de 5m. La clémentine et la Washington navel sont constituées de 9 rangées x 15, soit 135 arbres chacune. La Thomson navel, la navelina, New hall navel et la navelate ont chacune 6 rangées x 15 soit 90 arbres pour chacune d'entre elles. La double fine améliorée est constituée de 12 rangés x 15 soit 174 arbres. L'entretien du verger consiste en un désherbage mécanique, une taille des arbres et une irrigation régulière. Les traitements phytosanitaires sont réalisés entre les mois d'août et septembre pour lutter contre les cochenilles, les aleurodes, les acariens, les pucerons, la mouche blanche et la Mouche méditerranéenne des fruits. Un piège à phéromone est installé au centre de chaque verger et deux pièges englués ont été accrochés d'une manière aléatoire, entre le 10 Octobre et le 10 Mai, à raison d'une sortie tous les 10 jours afin de suivre la dynamique des populations de la cératite (Tableau 6, Figure 23).



Figure 23. Piège à phéromones sur Clémentinier.

2. Méthodologie

2.1. Sur terrain

L'expérimentation s'est déroulée entre janvier 2016 et décembre 2018, en raison d'une sortie tous les 10 jours, afin de suivre la dynamique des populations de la Cératitee. Et d'évaluer le degré d'infestation des variétés fruitières étudiées.

2.1.1. Types de piégeage

2.1.1.1 Piège McPhail

Les pièges McPhail sont utilisés pour le suivi des vols des mâles de *C. capitata*. Ils se composent d'une base en forme d'entonnoir inversé couvert par une cloche transparente (figure 24). A l'intérieur de la partie supérieure de la cloche se trouve un distributeur central de phéromone. Les pièges sont utilisés en combinaison avec les diffuseurs de phéromone spécifiques (capsules). Les mouches pénètrent dans le piège par l'ouverture de l'entonnoir inversé, en réponse à la phéromone qui est dans la partie supérieure de la cloche. Ils restent à l'intérieur du piège, car ils sont attirés par l'odeur de la phéromone et par la lumière qui pénètre dans la partie supérieure transparente. Lorsqu'ils s'épuisent, ils tombent et se noient alors dans la solution d'eau savonneuse du fond de l'entonnoir contenant l'attractif sexuel (phéromone synthétique à base de Trimedlure dont la rémanence est de 60 jours).

Un piège est installé au centre de chaque verger d'étude, de la période de véraison jusqu'à la récolte des fruits. Chaque piège est suspendu au niveau de la strate moyenne de la frondaison de l'arbre à l'abri des vents dominants à hauteur d'homme. Les relevés des captures se font 3 fois par mois à raison d'une sortie tous les 10 jours, soit 3 sorties

par mois pour chaque culture. Le renouvellement des capsules à phéromones se fait tous les mois.



Figure 24. Piège à phéromones sur figuier.

2.1.1.2 Plaques engluées jaunes et bleues

Les plaques chromatiques sont des pièges englués de couleur jaune ou bleu disposés d'une manière aléatoire à raison d'un piège par verger pour suivre le vol des adultes de *C. capitata*. La surface des plaques est couverte par une couche engluée qui fixe l'insecte sans qu'elle sèche même sous de températures élevées. Les plaques en matière plastique, colorées attirent les insectes volants grâce aux stimuli de la couleur (Figures 25A, B, C, D).

Sur l'arbre, les pièges collants sont suspendus perpendiculairement au tronc de l'arbre, par un fil métallique à hauteur d'homme, à environ 1,70 m du sol, à l'abri des vents dominants. Après chaque relevé qui a lieu 3 fois par mois, soit à 10 jours d'intervalle, les plaques chromatiques sont systématiquement remplacées et le nombre d'individus de la cératite sont dénombrés sur le terrain à l'œil nu.

Les pièges sont accrochés aux arbres à hauteur d'homme, de la période de fructification jusqu'à la récolte, selon la culture fruitière (Tableau 6). Les relevés se font 3 fois par mois à raison d'une sortie tous les 10 jours afin de suivre la dynamique des populations de la mouche méditerranéenne des fruits, soit 3 sorties par mois pour chaque culture. L'expérimentation a eu lieu dans 6 vergers de la Mitidja pendant trois années successives de janvier 2016 à décembre 2018, soit 3 années consécutives.

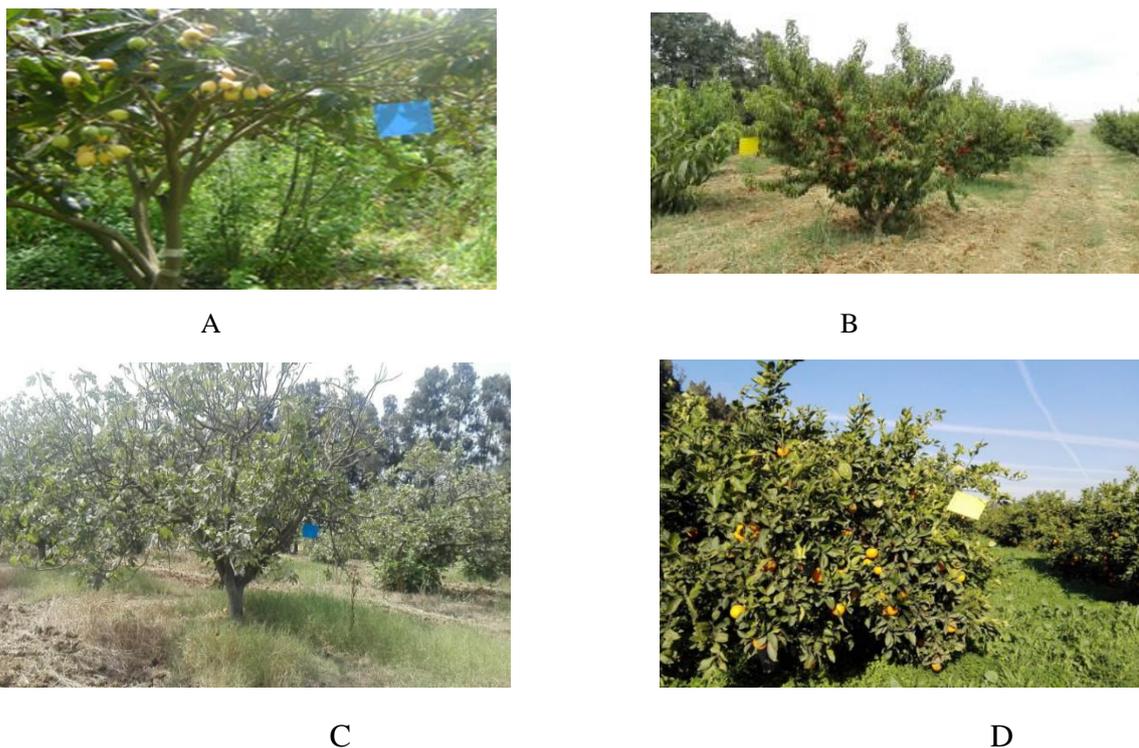


Figure 25. Piège englués jaune et bleu sur quelques spéculations.

A : Plaque bleue sur Poirier, **B** : Plaque jaune sur Pêcher, **C** : Plaque bleue sur Figuier, **D** : Plaque jaune sur espèce Thomson navel.

Tableau 6. Tableau récapitulatif des périodes de piégeage (pièges à phéromones et plaques engluées) sur les différentes cultures fruitières pour 2016, 2017 et 2018.

Culture fruitière	Date de piégeage	
	Du	au
Agrumes	10 octobre (2016/2017/2018)	10 mai (2016/2017/2018)
Nêfles	10 avril (2016/2017/2018)	20 juin (2016/2017/2018)
Abricots	10 mai (2016/2017/2018)	10 juillet (2016/2017/2018)
Pêches	10 juin (2016/2017/2018)	20 août (2016/2017/2018)
Poires	20 juillet (2016/2017/2018)	30 août (2016/2017/2018)
Figues	10 août (2016/2017/2018)	30 août (2016/2017/2018)

2.1.2 Etude de l'infestation par la cératite.

Afin d'évaluer le degré d'infestation des variétés fruitières étudiées par *C. capitata*, nous avons procédé à un échantillonnage des fruits. Les fruits sont ramassés à maturité au moment de la récolte. Ils sont transportés en laboratoire dans des sachets en matière plastique sur lesquels nous indiquons l'espèce fruitière, la date et le lieu de prélèvement. Il a été pris dans chaque verger 5 arbres sur lesquels nous prélevons au hasard 15 fruits. Au total 75 fruits sont prélevés par variété. Le prélèvement des fruits a été effectué au moment de la récolte (Tableau 7). Les fruits de chaque variété ont été placés séparément dans des boîtes en matière plastique de dimensions 15 * 40 * 25 cm pendant une semaine (figure 26).

Tableau 7. Dates d'échantillonnage sur différentes spéculations fruitières.

Culture fruitière	Date d'échantillonnage		
	2016	2017	2018
Clémentine	20-oct-2016	/	/
New hall navel	10-dec-2016	/	/
Navelina	10-dec-2016	/	/
Thomson navel	10-nov-2016	/	/
Washington navel	20-nov-2016	/	/
Navelate	20-02-2016	/	/
Valencia late	10-03-2016	/	/
Double fine améliorée	27-02-2016	/	/
Nèfles	03-04-2016	20-04-2017	20-04-2018
Abricots	20-06-2016	20-06-2017	10-06-2018
Pêches	17-07-2016	20-07-2017	20-07-2018
Poires	17-08-2016	17-08-2017	17-08-2018
Figues	10-09-2016	10-09-2017	10-09-2018

2.2. En laboratoire

2.2.1. Dénombrement d'individus capturés

Le dénombrement des individus capturés par les différents pièges dans chaque spéculation fruitière (agrumes, nèfles, abricots, pêches, poires, figues) a été réalisé afin de suivre l'évolution du nombre d'individus de la cératite en vue de la détermination de

la dynamique des populations ainsi que le nombre de générations. Les captures par les pièges à phéromone sont mises dans des piluliers sur lesquels sont mentionnés la date, le lieu et la spéculation fruitière.

2.2.2. Détermination du nombre de générations annuelles

Deux méthodes de calcul du nombre de générations annuelles de la cératite ont été utilisées pour la réalisation de cette étude.

➤ La première méthode dépend de la détermination des unités thermiques quotidiennes cumulées de l'insecte en transformant la température quotidienne maximale, minimale et le seuil de développement (zéro de développement) en unités de degré quotidien (DDU) selon la formule de Richmond et al. (1983).

$$\text{DDU} = (\text{Max. Temp.} + \text{Min. Temp.}) / 2 - \text{Seuil (zero) de développement}$$

Ensuite, l'estimation de nombre de générations annuelles de *C. capitata* sur terrain peut être possible en utilisant les valeurs de la constante thermique de développement (C) de l'insecte en appliquant la formule suivante de Jasic (1975).

$$\text{Nombre de Générations} = \Sigma (\text{D.D.U}) / C$$

Les valeurs estimées du seuil de développement (zéro de développement) (t_0) et de la constante thermique (C) de la cératite pour se développer de l'œuf à l'adulte est de 12,4°C (Muñiz & Zalom, 1997) et 260°D (Duyck & Quilici, 2002).

➤ La deuxième méthode suggérée par Audemard et Millaire (1975) et corrigée par Iacob (1977), dépend du nombre moyen hebdomadaire de mâles capturés par les pièges à phéromones. Ces nombres ont été accumulés au cours de l'année d'étude, puis illustrés graphiquement sur du papier semi-Gauissien (échelle Gausse). Ainsi, le nombre et la durée des générations annuelles sur le terrain pourront être identifiés.

2.2.3 Etude de l'infestation par *C. capitata*

2.2.3.1 dégâts selon les piqûres sur le fruit

En laboratoire, nous avons procédé, au comptage du nombre de fruits piqués et du nombre de piqûres par fruit. Les piqûres peuvent être visibles à l'œil nu ou sous la loupe binoculaire. Elles donnent un mauvais aspect au fruit (Figure 26 A, B, C, D).



A



B



C



D

Figure 26. Piqûres sur fruits provoquées par *C. capitata*.

A : Sur Pêche, **B** : Poire ; **C** : Clémentine, **D** : Figue.

2.2.3.2 Dégâts selon le nombre de larves par fruit.

Les fruits de chaque variété ont été placés séparément dans des boîtes en matière plastique de dimensions 15 * 40 * 25 cm pendant une semaine. Ensuite, les larves contenues dans le fruit pour chaque variété sont récupérées par dissection et comptées (Figure 27).



A

B

Figure 27. Comptage et récupération des larves de *C. capitata*.

A : sur Pêches, B : sur Figes

2.2.4 Étude de quelques paramètres biologiques de la cératite selon les espèces fruitières

Cette étude vise à déterminer l'influence de la variété du fruit hôte sur quelques paramètres biologiques du ravageur à savoir la durée de pupaison, le taux d'émergence et le sex-ratio, pour atteindre une meilleure connaissance de sa biologie et afin de rechercher l'hôte préférentiel et le plus sensible à la Cératite. Pour cela la méthode adoptée est la suivante :

2.2.4.1. Détermination de la durée de pupaison

Elle correspond à la période allant de la formation des pupes jusqu'à l'émergence des adultes. Elle est déterminée à partir des pupes issues des fruits de chaque variété.

2.2.4.2. Taux d'émergence

Le taux d'émergence est calculé en prenant en considération le nombre d'adultes émergés sur le nombre total de pupes obtenues. Le taux d'émergence est calculé par la formule suivante :

$$\text{Taux d'émergence} = [\text{Nombre d'adultes émergés} / \text{Nombre total de pupes}] \times 100$$

2.2.4.3. Sex-ratio

Le Sex-ratio se calcule sur la base du nombre de femelles sur le nombre total d'adultes émergés. Le sex-ratio est calculé pour voir s'il existe un lien entre l'alimentation larvaire et le sexe des futures adultes.

$$\text{Sex-ratio} = \text{Nombre de femelles} / \text{Nombre total d'adultes}$$

Partie II : Essais de lutte biologique en laboratoire

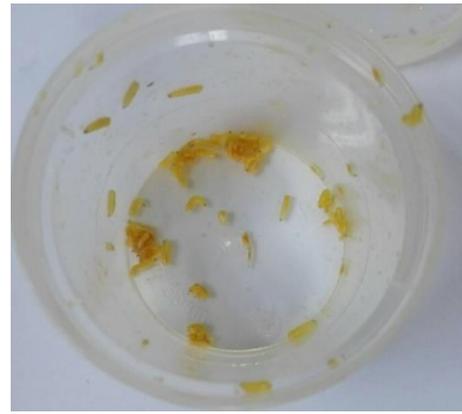
1. Matériel biologique

1. 1 Élevage d'insectes

L'élevage de la cératite a été réalisé au département de protection des végétaux de l'Université Suleyman Demirel, à $25 \pm 1^\circ\text{C}$ et 65% d'humidité relative, sous photopériode de 14h10 (L : D). Les larves ont été élevées dans des boîtes de Pétri stériles contenant un régime alimentaire artificiel qui se compose d'eau (56 ml), de sucre (12 g), d'Hcl (0,3 ml), de germe de blé (4 g), de levure (3 g), d'acide benzoïque (0,3 g), de son de blé (23 g). Les adultes reçoivent de l'eau et un régime solide composé de saccharose et de levure et des fruits (Figure 28A, B, C, D, E).



A



B



C



D



E

Figure 28. Elevage de la cératite

A : Larves dans le milieu de culture, **B** : L₃ récupérées du milieu de culture, **C** : Cages d'élevage des adultes, **D** : Adultes de cératite sur agrumes, **E** : Pupes récupérées.

1.2 Nématode entomopathogène et Choix des doses

Les essais biologiques ont été effectués avec une souche commerciale turque de *S. feltiae* (Nematac 10 million) fournie par BioGlobal Company (Antalya) (Figure 29). Les suspensions aqueuses de nématodes ont été préparées à différentes concentrations de 50, 100 et 200 IJ/ml. Les concentrations ont été choisies selon la dose recommandée par Georgis & Hague (1991) qui est de 2,5 à 5 x 10⁹ IJ/ha, soit 25 à 50 IJ/cm².

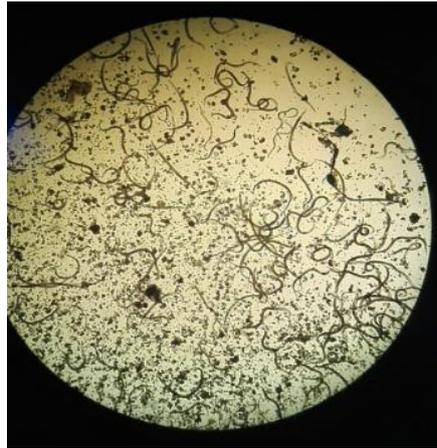


Figure 29. Juveniles infectueux de *S. feltiae* vu sous microscope.

1.3. Isolât fongique

Le champignon entomopathogène *Beauveria bassiana* BAUM M6-4 utilisé dans les essais biologiques a été isolé d'un échantillon de sol prélevé sur des terres agricoles de la province d'Isparta (Baydar et al. 2016). Il a été démontré dans des travaux antérieurs que cet isolat de *B. bassiana* strain BMAUM M6-4 cause une infection aux stades larvaires précoces et tardifs de la processionnaire du pin *Thaumetopoea pityocampa* (Lepidoptera : Nodontidae) (Sezer GÖK et al. 2018) et aux larves de *Spodoptera littoralis* (Lepidoptera : Noctuidae) (İlker Cirbin et al. 2017) (Figure 30).



Figure 30. Champignon entomopathogène
(Aspect macroscopique).

1.3.1 Préparation de la suspension de spores et leur germination.

Les champignons ont été incubés à l'obscurité à $25\pm 2^{\circ}\text{C}$ dans un milieu gélosé à la pomme de terre. Les spores se sont développés 10 jours après leur plantation. Les suspensions de spores ont été préparées en prélevant à l'aide d'une spatule stérile, de petits fragments du champignon en fructification dans la boîte de Pétri. Le prélèvement se fait par grattage de la surface de la boîte de Pétri avant d'être introduits dans un tube à essai en ajoutant 20 ml d'eau stérile pure (H_2O) contenant 0,3% de Tween 80. La solution ainsi obtenue (solution mère) est agitée grâce à un agitateur pendant 10 minutes pour une libération maximale des spores. La concentration de la solution entomopathogène 10^7 a été évaluée à l'aide d'une cellule hématimétrique « Cellule de Thoma ».

2. Méthodologie

2.1 Essais de lutte biologique par Nématode entomopathogène

Les nématodes entomopathogènes ont un intérêt considérable pour les scientifiques du fait de leur efficacité contre les déprédateurs et leur potentiel en lutte biologique. La présente étude a donc, pour objectif d'évaluer la pathogénicité de l'isolat turque de *Steinernema feltiae* contre les différents stades de développement de *Ceratitis capitata* et d'étudier l'influence de la densité des nématodes dans la suspension appliquée ainsi que l'influence de l'humidité du sol sur la virulence des nématodes. La partie expérimentale

est réalisée au sein du département de protection des végétaux de l'Université Suleyman Demirel.

2.1.1 Dispositif expérimental pour le traitement des larves

2.1.1.1 Traitement des larves par contact sur papier filtre

Le traitement a été effectué dans des boîtes de Pétri de 9cm de diamètre contenant du papier filtre déposé au fond de la boîte. Les traitements ont été donc effectués sur le papier filtre en utilisant trois doses de 50, 100 et 200 IJ/ml pour chacune des répétitions. Au terme du traitement, les boîtes de Petri sont recouvertes d'un filet à mailles très fines. Le dispositif de traitement comprend 4 blocs ayant chacun 4 répétitions, dont un témoin et 3 traités ayant 25 larves/boîte/répétitions, soit 4 blocs*4 répétitions *25 larves, ce qui donne au total 400 larves pour l'essai. Le témoin a été traité avec 1 ml d'eau distillée dépourvu de pathogène (Figure 31A). Les essais biologiques ont eu lieu dans une chambre contrôlée à une température de $25 \pm 1^\circ\text{C}$, une humidité relative de $62\% \pm 5\%$ et une photopériode de 16/8).

Le comptage des larves mortes à lieu 48h après le traitement. Les larves, ayant survécu à l'infection, se transforment en pupes que nous avons suivies jusqu'à l'émergence. Les individus morts ont été disséqués sous microscope pour déterminer l'absence ou la présence des nématodes en vue de vérifier l'efficacité de l'entomopathogène.

2.1.1.2 Traitement des larves par pulvérisation du sol

Comme dans le cas précédent, le dispositif expérimental se compose de quatre blocs ayant chacun 4 répétitions, dont un témoin et 3 traités. Chaque répétition contient 25 larves, soit au total 4*4 observations*25, soit au total 400 individus comme pour le cas du traitement par contact sur papier filtre (Figure 31B). 25 larves du 3^{ème} stade ont été déposées dans une boîte en matière plastique contenant 50g de sol naturel tamisé ayant une humidité de 10% sur lequel on a pulvérisé 1 ml de la suspension contenant le nématode à la concentration appropriée c'est à dire de 50, 100 et 200 IJ/ml. Le témoin a reçu le même volume de Tween 80 à 0,1%. Les essais biologiques ont toujours eu lieu dans une chambre contrôlée ($25 \pm 1^\circ\text{C}$, Humidité relative de $62\% \pm 5\%$ et une photopériode de 16/8).

Le comptage de la mortalité des larves a lieu après 48h en tamisant le sol. Les individus morts ont été disséqués sous microscope pour déterminer l'absence ou la présence des nématodes en vue de vérifier l'efficacité de l'entomopathogène. Les larves qui se sont transformées en pupes sont également comptées et observées quotidiennement jusqu'à l'émergence des adultes. Pour chaque dose, nous avons procédé comme dans le schéma ci-dessous (Figure 31 B).

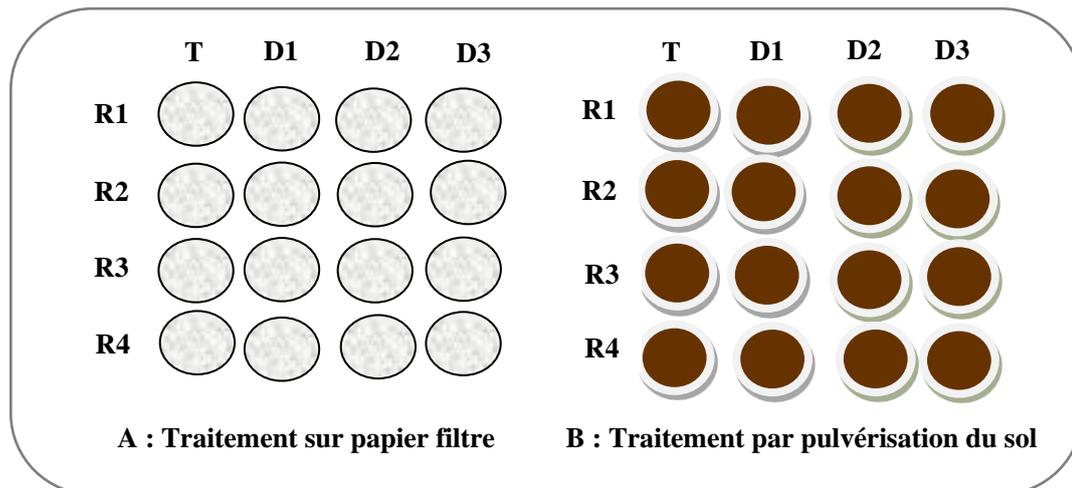


Figure 31. Dispositif expérimental du traitement des larves L₃.
A : Traitement sur papier filtre, **B** : Traitement par pulvérisation

2.1.2 Dispositif expérimental pour le traitement des pupes

2.1.2.1. Traitement par contact sur papier filtre :

Le traitement a été effectué contre des pupes jeunes et âgées avec des concentrations de 50, 100 ou 200 IJ/ml. Il a été fait dans des boîtes de Pétri en matière plastique de 9cm de diamètre, contenant dans leur fond du papier filtre. Contrairement aux cas précédents, le dispositif de traitement se compose de deux blocs pour chacune des concentrations testées : l'un pour les pupes jeunes ayant moins de deux jours, et l'autre pour les pupes âgées (plus de 2 jours), le 3^{ème} bloc est destiné pour le témoin. Chaque bloc comporte 4 répétitions pour le traitement sur papier filtre (Figure 32A). Ceci dit, on introduit 25 pupes jeunes et 25 pupes âgées dans les boîtes contenant du papier filtre traité avec les concentrations de 50, 100 et 200 IJ/ml. Au terme du traitement, les boîtes de Petri sont recouvertes d'un filet à mailles très fines. Les traitements ont eu lieu dans une chambre

contrôlée à $25 \pm 1^\circ\text{C}$, une humidité relative de $62\% \pm 5\%$ et une photopériode de 16/8. Le comptage de la mortalité et des émergences a lieu 15 jours après le traitement.

2.1.2.2. Traitement par pulvérisation du sol

Le dispositif expérimental adopté est le même que celui des pupes traitées sur papier filtre, (Figure 32B). L'infection à l'aide du pathogène a eu lieu dans des pots en matière plastique, de 9 cm de diamètre et 5cm de hauteur, contenant 50g de sol naturel tamisé ayant une d'humidité de 10%. La suspension contenant le nématode est pulvérisée à la surface du sol. Le témoin a reçu 1 ml de Tween 80 sans nématodes. 24 h après le traitement du sol, 25 pupes jeunes et 25 âgées de 6 jours, sont transférés dans des pots que l'on recouvre à l'aide d'un filet à mailles très fines. La mortalité ainsi que les émergences se font quotidiennement pendant 15 jours de suite afin de vérifier l'infection des pupes qui seront disséquées par la suite sous le microscope.

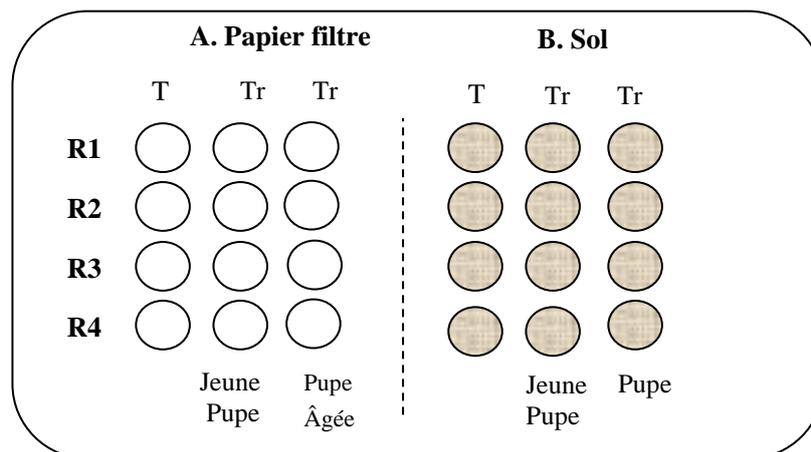


Figure 32. Dispositif expérimental pour le traitement des pupes.

A : Traitement sur papier filtre, **B** : Traitement par pulvérisation sur le sol.

2.1.3. Dispositif expérimental pour le traitement des adultes

Le traitement des adultes a été effectué dans quatre blocs dont un témoin ayant chacun 4 répétitions (Figure 33). Les mêmes concentrations ont été utilisées comme dans les cas précédents (50, 100 et 200 IJ/ml) auxquelles on rajoute pour chaque concentration du coton imbibé une solution sucrée de 1ml. Le témoin dépourvu de nématode, ne reçoit que du coton imbibé de la solution glucosée. Le traitement s'effectue dans une cage de dimensions 10cm×20cm×15cm. Dès le premier jour du traitement, la cératite commence à s'alimenter. Le comptage de la mortalité s'effectue au 5^{ème} jour après le traitement.

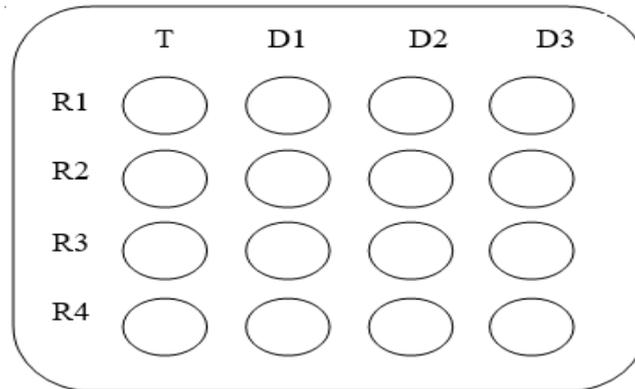


Figure 33. Dispositif expérimental pour le traitement des adultes.

2.1.4. Influence de l'humidité du sol sur la virulence de *S. feltiae*

2.1.4.1. Détermination de la teneur en eau du sol

L'influence de l'humidité sur la virulence de *S. feltiae* vis-à-vis des larves et des pupes est étudiée sous trois niveaux d'humidité du sol à savoir 100%, 75% et 50%. Au préalable, un échantillon de 100g du sol a été analysé au Laboratoire des sciences du sol à l'université Suleyman Demirel, afin d'en déterminer sa teneur en eau et sa capacité de rétention, ce qui a donné une valeur 28,96 ml qui représente une humidité de 100%. Après normalisation, nous obtenons 21,72 ml et 14,48ml que l'on rajoute à 100g pour avoir respectivement une humidité relative du sol de 75% et de 50%.

2.1.4.2. Dispositif expérimental pour traitement de larves et de pupes.

Pour évaluer l'influence de l'humidité du sol sur la virulence de *S. feltiae*, le dispositif expérimental se compose de deux blocs qui se compose d'un témoin et d'un traité et 4 répétitions, soit 8 observations pour chaque humidité déterminée ci-dessus 100%, 75% et 50%, ce qui fait au total 24 observations. Le traitement a lieu dans des pots en matière plastique de dimensions 12 cm x 6cm contenant 100 mg de sol traités avec suspension aqueuse de 100 juvéniles infectieux (IJ)/ml avant d'introduire 10 larves. Le témoin reçoit 2 ml de l'eau distillée dépourvue de nématodes. On procède de la même manière pour les humidités, de 75% et 50%. Les pots sont fermés avant d'être mis dans des incubateurs à $25\pm 1^{\circ}\text{C}$, $70\%\pm 10\%$ d'humidité relative et une photopériode de 12h (Figure 34). Le

dispositif expérimental ainsi que le traitement des pupes sont identiques à celui des larves. La mortalité aussi bien des larves que des pupes est notée 5 jours après le traitement.

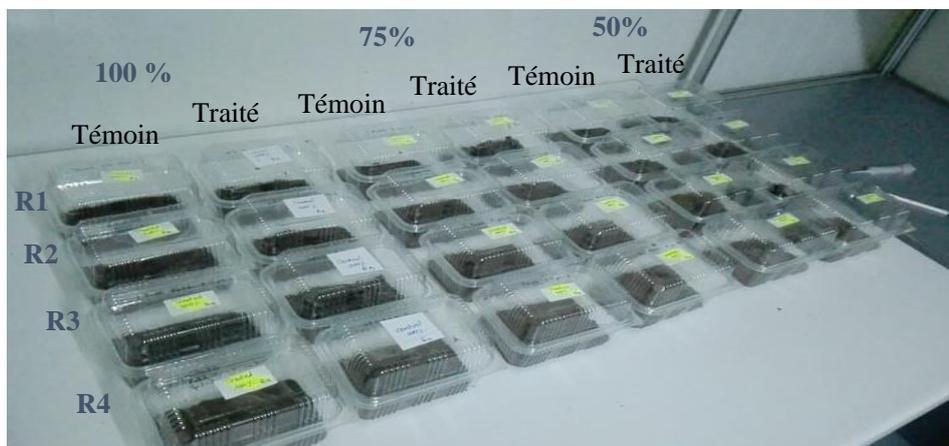


Figure 34. Dispositif expérimental pour traitement de larves et de pupes.

2.2. Essais de lutte biologique par champignon entomopathogène

Le but consiste en une étude de méthodes alternatives basées sur l'utilisation de produits bio-insecticides naturels à base de champignons pour lutter contre la mouche méditerranéenne des fruits *C. capitata*. Le travail met en exergue l'efficacité de la souche turque de *Beauveria bassiana* BMAUM M6-4 à contrôler les différents stades de *C. capitata* via différentes voies d'infection. Cette expérimentation est réalisée au sein du département de protection des végétaux de l'Université Suleyman Demirel de Turquie.

2.2.1. Dispositif expérimental pour le traitement des larves

2.2.1.1 Essai sur papier filtre

Les larves du troisième stade proviennent de l'élevage artificiel. Le dispositif expérimental de traitement se compose de deux blocs ayant chacun 4 répétitions, soit au total 8 observations*15larves, ce qui fait 120 larves pour tout l'essai, c'est-à-dire 60 larves pour le témoin et 60 larves pour le traité. On dépose donc 15 larves du 3^{ème} stade dans une boîte de Pétri stérile de 9 cm de diamètre et de 1,5 cm de hauteur, contenant en son fond du papier filtre imbibé d'un volume de 3 ml de la suspension de conidies à 10^7 Conidies/ml. Le lot témoin a été pulvérisé avec le même volume d'une solution de Tween 80 à 0,1% (Figure 35A). L'expérimentation s'est déroulée dans une chambre contrôlée à

une température de $25\pm 1^{\circ}\text{C}$, à une humidité relative de $62\pm 5\%$ et à une photopériode de 16 : 8 (L : D). La mortalité a été évaluée 3, 7, 12 et 15 jours après le traitement.

2.2.1.2 Essai sur le sol

Le dispositif expérimental de traitement est identique à celui réalisé sur du papier filtre sauf que l'on met du sol dans le récipient (Figure 36B). On dépose un lot de 15 larves du 3^{ème} stade dans un récipient de dimensions de $10\times 6\times 2\text{cm}$ contenant 50g de sol naturel qui provient d'un verger de pêcher à Isparta. Au préalable, le sol a été tamisé et stérilisé avant d'être utilisé comme substrat d'incubation ou comme dispositif d'auto-inoculation chez les larves prépuparisantes. Puis, on pulvérise 3 ml de suspension de conidies à 10^7 sur le sol dans chacune des répétitions. Le témoin reçoit le même volume de Tween 80 à 0,1%. L'expérimentation s'est déroulée dans une chambre contrôlée à une température de $25\pm 1^{\circ}\text{C}$, une humidité relative de $62\pm 5\%$ et une photopériode de 16 : 8 (L : D).

La mortalité des larves a été dénombrée 3, 7, 12 et 15 jours après le traitement. Les larves ayant survécu au traitement, sont suivies jusqu'à l'émergence des adultes.

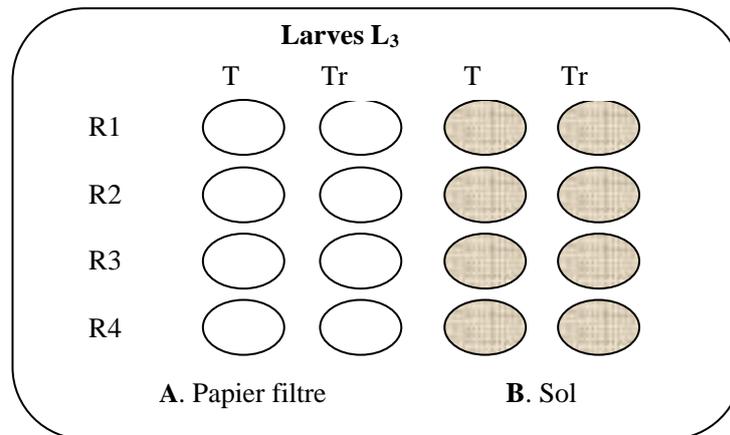


Figure 35. Dispositif expérimental pour le traitement des larves.

A : traitement sur papier filtre, **B** : Traitement sur sol.

2.2.2 Dispositif expérimental pour le traitement des pupes

2.2.2.1 Essai sur papier filtre

Le dispositif expérimental se compose de 3 blocs, un bloc est destiné aux jeunes pupes et un pour les pupes âgées et un témoin. Chaque essai comprend 4 répétitions, soit 12 observations ayant chacune 15 larves, ce qui fait 180 pupes pour les deux essais de

traitement sur jeunes et pupes âgées. Un lot de 15 pupes âgées de 1 jour et de 6 jours, a été donc déposé sur du papier filtre après l'avoir pulvérisé avec un volume de 3ml de la suspension de conidies dans une boîte de Pétri. Le papier filtre du lot témoin a été pulvérisé avec le même volume de solution à 0,1% de Tween 80. L'expérimentation s'est déroulée dans une chambre contrôlée à une température de $25\pm 1^\circ\text{C}$, à une $62\pm 5\%$ d'humidité relative et à une photopériode de 16 : 8 (L : D). La mortalité des pupes a été dénombrée 15 jours après le traitement (Figure 36A).

2.2.2.2 Essai sur le sol

Le dispositif expérimental adopté est le même que celui du traitement sur papier filtre sauf que les récipients contiennent du sol qui provient d'un verger de pêcher à Isparta. Au préalable, le sol a été tamisé et stérilisé avant d'être utilisé comme substrat d'incubation. Dans chaque répétition, on dépose dans une boîte de dimensions de $10\times 6\times 3$ qui contiennent 50 g de sol traité par 3ml de suspension de conidies à 10^7 . Le traitement a été effectué sur 15 pupes âgées d'un jour et 15 pupes âgées de 6 jours pour le traitement de pupes âgées. Les témoins contenant également 15 pupes/répétition reçoivent dans les deux traitements de Tween 80 à 0,1% (Figure 36B). L'expérimentation s'est déroulée dans une chambre contrôlée à une température de $25\pm 1^\circ\text{C}$, à une $62\pm 5\%$ d'humidité relative et à une photopériode de 16 : 8 (L : D). La mortalité des pupes a été dénombrée 15 jours après le traitement.

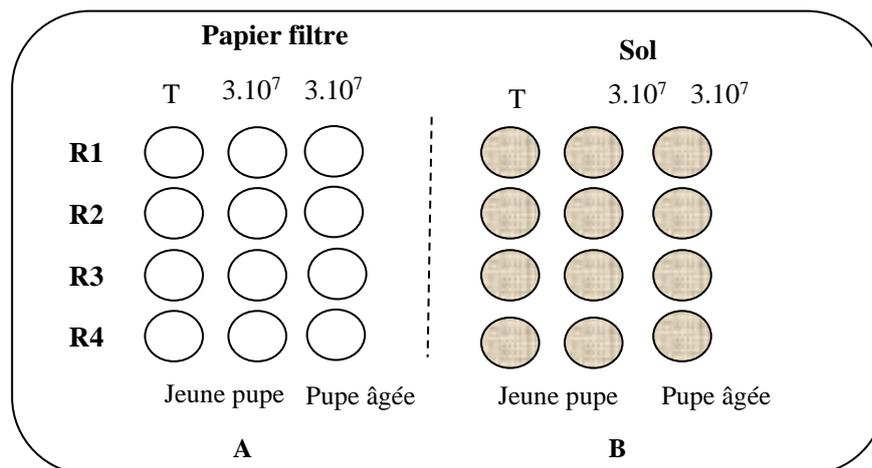


Figure 36. Dispositif expérimental pour le traitement des pupes.

A : traitement sur papier filtre, **B** : Traitement sur sol.

2.2.3. Dispositif expérimental pour le traitement des adultes

2.2.3.1 Traitement par contact

Le dispositif expérimental se compose de trois blocs dont un pour les mâles et un pour les femelles parmi lesquels il y a un bloc témoin. Chaque bloc comprend 4 répétitions qui reçoivent chacune 15 mâles qui sont introduits dans des boîtes de dimensions de 11×11×6cm. Au préalable un papier filtre est déposé au fond des boîtes sur lequel il a été pulvérisé 3 ml de la suspension de conidies à 10^7 avant d'introduire les adultes. Les mouches en se déplaçant sur le papier filtre traité amassent des spores via leur corps. Chaque boîte reçoit du coton imbibé d'eau et une quantité de nourriture sucrée. Les témoins sont traités par le Tween 80 à 0,1%. L'essai est refait pour les femelles de la même manière que les mâles dans les blocs qui leur sont destinés. L'expérimentation s'est déroulée dans une chambre contrôlée à une température de $25\pm 1^\circ\text{C}$, une humidité relative de $62\pm 5\%$ et une photopériode de 16 : 8 (L : D). Le dénombrement de la mortalité est effectué après 3, 7, 12 et 15 jours du traitement (Figure 37A). Les adultes morts sont retirés, puis transférés dans une boîte de Pétri stérile contenant du papier filtre humide et fermé hermétiquement avec du parafilm. Les boîtes de Pétri sont conservées à une température de 25°C et sont contrôlées quotidiennement afin de vérifier les symptômes dus à l'infection fongique.

2.2.3.2 Essai biologique par ingestion

Le dispositif expérimental se compose de trois blocs dont un pour les mâles et un pour les femelles parmi lesquels il y a un bloc témoin comme ci-dessus (Figure 37B). 3 ml de suspension de *B. bassiana* à une concentration de 10^7 conidies / ml a été mélangé avec 1 ml de préparation nutritive pour les adultes et placées sur du coton. Ce régime alimentaire est servi aux mâles et femelles adultes de *C. capitata* âgés de cinq jours. Les mouches consomment ce régime alimentaire traité dans les 2 à 3 jours qui suivent. Les témoins reçoivent un régime sans conidies fongiques.

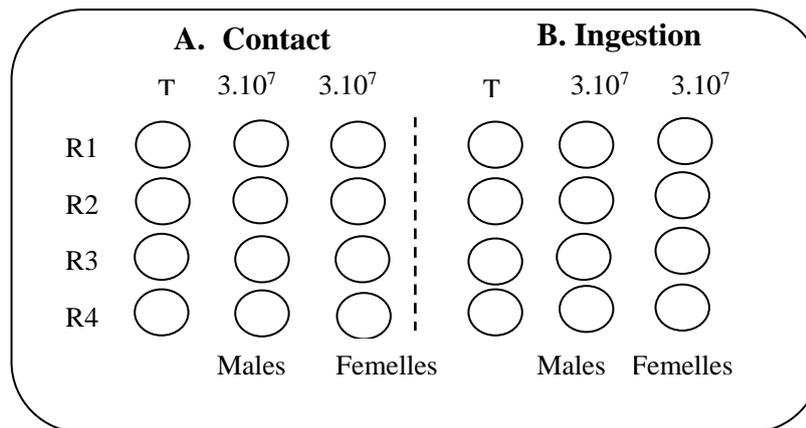


Figure 37. Dispositif expérimental pour le traitement des adultes.

A : Traitement par contact, **B** : Traitement par ingestion.

3. Traitement des données

3.1 Mortalité corrigée

La mortalité corrigée (MC) a été calculée selon la formule d'Abbott (1925) afin d'éliminer tous les risques de mortalité naturelle. Elle s'écrit de la manière suivante :

$$\text{Mortalité corrigée (MC \%)} = (M1 - Mt) * 100 / (100 - Mt)$$

M1 : le pourcentage de la mortalité dans le lot traité

Mt : le pourcentage de la mortalité dans le lot témoin.

MC : la mortalité corrigée.

3.2. Analyse des données

Les résultats sont soumis à une analyse de la variance (ANOVA) à l'aide du logiciel Xslstat2016.

CHAPITRE IV

Partie I : Etude de la bio-écologie de *C. capitata*

1. Nombre et durée des générations selon la méthode d'accumulation d'unités de chaleur

Sous les conditions climatiques de 2016, 2017 et 2018, le nombre, la durée et les dates approximatives des générations annuelles ont été estimés en fonction des valeurs du seuil de développement ($t_0 = 12,4^\circ \text{C}$ (Muñiz & Zalom, 1997) et de la constante thermique (C) de *C. capitata* nécessaire pour accomplir une génération c'est à dire à se développer du stade œuf à l'adulte. Selon Duyck & Quilici, (2002), il y a 260 unités thermiques.

1.1 Nombre et durée des générations pour 2016

C. capitata développe neuf générations dans les différents vergers arboricoles en 2016 où la température annuelle moyenne est de $18,87^\circ \text{C}$. La première génération, la plus longue, a lieu en hiver, elle dure 128 jours de janvier à début mai, tandis que la seconde s'est produite entre le 8 mai et la première semaine de juin puis à partir de ce dernier, commence la 3ème génération jusqu'à la fin de ce mois-ci. La quatrième génération apparait entre la fin juin et la dernière semaine du mois de juillet, elle dure 23 jours. La cinquième génération émerge en fin de juillet et disparaît en début d'août tandis que la sixième génération a eu lieu dans la première semaine d'août et se termine en fin d'août, elle dure 20 jours. La septième génération, la plus courte dure 14 jours et apparait à la fin d'août et ce jusqu'à la première semaine de septembre, la huitième génération du 9 septembre au 18 octobre et la dernière génération et neuvième a eu lieu du 19 octobre au 2 décembre, elle dure 45 jours (Tableau 8).

Tableau 8. Nombre et durée des générations annuelles de *C. capitata* pour la saison 2016 en Mitidja, calculés en fonction de la constante thermique et du degré jour selon la méthode de Richmond (1983).

Mois	Moy T° (t)	Taux de (G)	Génération	Durée (Jours)	De	Au	Culture fruitière
janv	12,8	0,048	1 ^{-ère}	128	01-janv	07-mai	Agrumes (oranges tardives).
fev	13,7	0,145	2 ^{-ème}	31	08-mai	08-juin	Nèfles.
mars	14,4	0,238	3 ^{-ème}	21	09-juin	29-juin	Abricots.
avrl	15,6	0,369	4 ^{-ème}	23	30-juin	22-juil	Pêches.
mai	19,7	0,87	5 ^{-ème}	14	23-juil	05-août	Pêches.
juin	24,4	1,385	6 ^{-ème}	20	6-août	29-août	Pêches
juill	26,9	1,729	7 ^{-ème}	16	30-août	08-sept	Pêches, Figes
août	28,4	1,908	8 ^{-ème}	40	09-sept	18-oct	Figes
sept	23,5	1,281	9 ^{-ème}	45	19-oct	02-dec	Agrumes.
oct	19,4	0,835	/	/	/	/	
nov	14,6	0,254	/	/	/	/	
dec	13,1	0,083	/	/	/	/	
Moy	18,87	0,76	/	34	/	/	

1.2 Nombre et durée des générations pour la Saison de 2017

En janvier 2017, il n'y a pas eu de génération en raison des basses températures qui sont en moyenne de $10,3^{\circ}\text{C} < t_0$. En effet, la première génération a duré 129 jours, elle a eu lieu entre début de février et début mai, la seconde du début mai à 9 juin, soit 31 jours, la 3eme génération du 10 juin à début juillet, soit 22 jours, la quatrième génération du début juillet au 19 juillet, soit 18 jours, la cinquième du 20 juillet à début d'août, soit également 18 jours. La septième génération est la plus courte puisqu'elle dure 16 jours, elle a eu lieu du début d'août jusqu'à la dernière semaine d'août tandis que la septième génération, elle apparait de la fin août au 18 septembre, soit 27 jours. La huitième génération dure 24 jours, du 19 septembre au 12 octobre et la dernière du 13 octobre au 23 novembre et dure 42 jours (Tableau 9).

Tableau 9. Nombre et durée des générations annuelles de *C. capitata* pour la saison 2017 en Mitidja, calculés en fonction de la constante thermique et du degré du jour selon Richmond (1983).

Mois	Moy T° (t)	Taux de (G)	Génération	Durée (Jours)	De	Au	Culture fruitière
janv	10,3	0	/				
fev	13,7	0,14	1 ^{ère}	129	1-fev	09-mai	Agrumes (oranges tardives).
mars	14,4	0,24	2 ^{ème}	31	10-mai	09-juin	Nèfles.
avr	15,6	0,37	3 ^{ème}	22	10-juin	01-juill	Abricots.
mai	19,7	0,87	4 ^{ème}	18	02-juill	19-juill	Pêches précoces.
juin	24,4	1,38	5 ^{ème}	18	20-juill	6-août	Pêches.
juill	26,9	1,73	6 ^{ème}	16	7-août	22-août	Pêches.
août	28,4	1,91	7 ^{ème}	27	23-août	18-sept	Pêches, Figs.
sept	23,5	1,28	8 ^{ème}	24	19-sept	12-oct	Figs.
oct	18,7	0,75	9 ^{ème}	42	13-oct	23-nov	Agrumes.
nov	13,6	0,14	/	/	/	/	
dec	10,9	0	/	/	/	/	
Moyenne	18,34	0,73	/	36,33	/	/	

1.3 Nombre et durée des générations pour la Saison de 2018

Sous les conditions climatiques de 2018, la cécidomyie n'a développé que 8 générations annuelles. La première génération a eu lieu entre mars et le 20 mai, soit 81 jours, la deuxième entre le 20 mai et le 22 juin, elle dure 33 jours, la 3ème génération du 23 juin au 13 juillet, soit 21 jours, la quatrième génération entre le 13 juillet et le 1^{er} août, soit 19 jours. La cinquième génération, la plus courte, dure 18 jours, elle commence du 1^{er} au 18 août, la sixième génération entre le 19 août et le 8 septembre. La septième génération débute du 8 septembre au 29 septembre alors que la huitième et dernière génération, a eu lieu entre le 29 septembre et le 08 novembre, soit 40 jours (Tableau 10).

Tableau 10. Nombre et durée des générations annuelles de *C. capitata* pour la saison 2018 en Mitidja, calculés en fonction de la constante thermique et du degré du jour selon Richmond (1983).

Mois	Moy T° (t)	Taux de (G)	Génération	Durée (jours)	De	Au	Culture fruitière
janv	11,4	0,00	/	/	/	/	/
fev	10,2	0,00	/	/	/	/	/
mars	14	0,19	1 ^{-ère}	81	01mars	20 mai	Agrumes (oranges tardives).
avrl	16	0,42	2 ^{-ème}	33	20 mai	22 juin	Nêfles
mai	17,5	0,61	3 ^{-ème}	21	22-juin	13 juill.	Abricots.
jui	21,8	1,08	4 ^{-ème}	19	13-juil	01 août	Pêches précoces
juill	26,2	1,65	5 ^{-ème}	18	1 Août	19 août	Pêches
aout	26,5	1,68	6 ^{-ème}	20	19 Août	08 sept	Pêches
sept	24,6	1,41	7 ^{-ème}	21	08-sept	29 sept	Figues
oct	19,7	0,87	8 ^{-ème}	40	29-sept	08 nov.	Figues
nov	15,7	0,38	/	/	/	/	Agrumes
dec	11,9	0,00	/	/	/	/	/
Moy	17,96	0,69	/	31,6	/	/	/

2. Nombre et durée des générations selon Audemard and milaire (1975) et Jacob (1977)

2.1. Nombre et durée des générations pour la Saison de 2016

C. capitata accomplit neuf générations annuelles au cours de la saison 2016, la première génération s'est produite entre début janvier et fin avril, elle dure environ 111 jours, la 2^{ème} génération a eu lieu entre fin avril et début juin, la 3^{ème} génération s'est produite entre le 10 et la fin de juin, soit 20 jours, la 4^{ème} génération s'est produite de fin juin au 20 juillet, soit 20 jours, la 5^{ème} génération du 20 juillet au 10 août. Vient ensuite la 6^{ème} génération du 10 août à la fin août. Celle-ci est suivie par la 7^{ème} génération qui s'est produite entre la fin août et la fin septembre tandis que la 8^{ème} génération a lieu de la fin septembre au 10 novembre et la dernière et 9^{ème} génération du 10 novembre à fin décembre.

Le nombre moyen hebdomadaire des males dans une génération a été déterminé. En effet, il a été dénombré 268, 251, 218 et 231 adultes/piège/semaine respectivement pour

la 4^{ème}, 5^{ème}, 6^{ème}, et 7^{ème} génération en été tandis qu'en hiver il a été enregistré 11,36 adultes/piège/semaine pendant la première génération (Tableau 11, Figure 38).

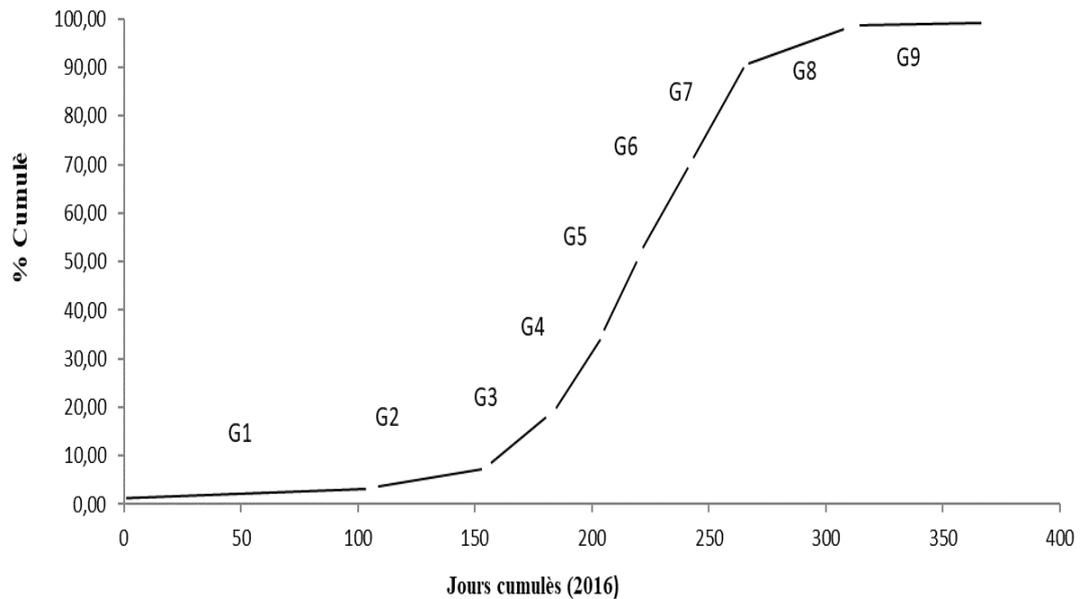


Figure 38. Nombre de générations de *C. capitata* sur le terrain, selon la méthode d'Audemard et milaire (1975) et Iacob (1977) dans les différents vergers fruitiers de la région de Mitidja, 2016.

Tableau 11. Estimation du nombre et durée des générations annuelles d'adultes de *C. capitata* en Mitidja au cours de la saison 2016.

Nombre de Générations	Emergence de la génération	Fin de la génération	Durée de la génération (jours)	Nombre moyen hebdomadaire des males dans une génération.
1 ^{-ère}	01-janv	20-avril	111	11,36
2 ^{-ème}	20-avril	10 juin	71	46
3 ^{-ème}	10 juin	30-juin	20	47
4 ^{-ème}	30-jun	20-juil	20	268
5 ^{-ème}	20-juil	10-aout	21	251
6 ^{-ème}	10-aout	30-aout	20	218
7 ^{-ème}	30-aout	30-sept	31	231
8 ^{-ème}	30-sept	10-nov	41	55
9 ^{-ème}	10-nov	30-dec	50	15

2.2. Nombre et durée des générations pour la Saison de 2017

En 2017, il y a également 9 générations de *C. capitata*. La première génération a été observée du 1^{er} janvier à la mi-avril, elle dure 107 jours, la 2^{ème} génération du 17 avril au 27 mai, soit 40 jours, la 3^{ème} génération de fin mai à fin juin, soit et 30 jours, la 4^{ème} génération de juin à fin juillet. Puis, il y a la 5^{ème} génération qui commence en fin de juillet et ce jusqu'à début août, soit 11 jours et la 6^{ème} a lieu du début d'août à la fin du même mois, elle dure 20 jours. La 7^{ème} et la 8^{ème} génération a lieu respectivement de la fin d'août à la fin de septembre et de la fin de septembre à début de novembre. La dernière génération a été observée de la mi-novembre à la fin de décembre.

Le nombre moyen hebdomadaire des mâles pour chaque une génération s'élève à 185,3 ; 350,7 ; 246 et 304 adultes piège/semaine respectivement pour la 4^{ème}, 5^{ème}, 6^{ème} et la 7^{ème} génération en saison estivale. Ce nombre moyen hebdomadaire des mâles est de 16,6 adultes/ piège/semaine pour la première génération hivernale (Tableau 12, Figure 39). La première génération d'hiver dure plus longtemps, mais la densité de la population est la plus faible 11,36 et 16,55 mâles/génération respectivement en 2016 et 2017 alors que les générations qui ont lieu en été sont plus courtes et contiennent ont un nombre plus élevé d'individus.

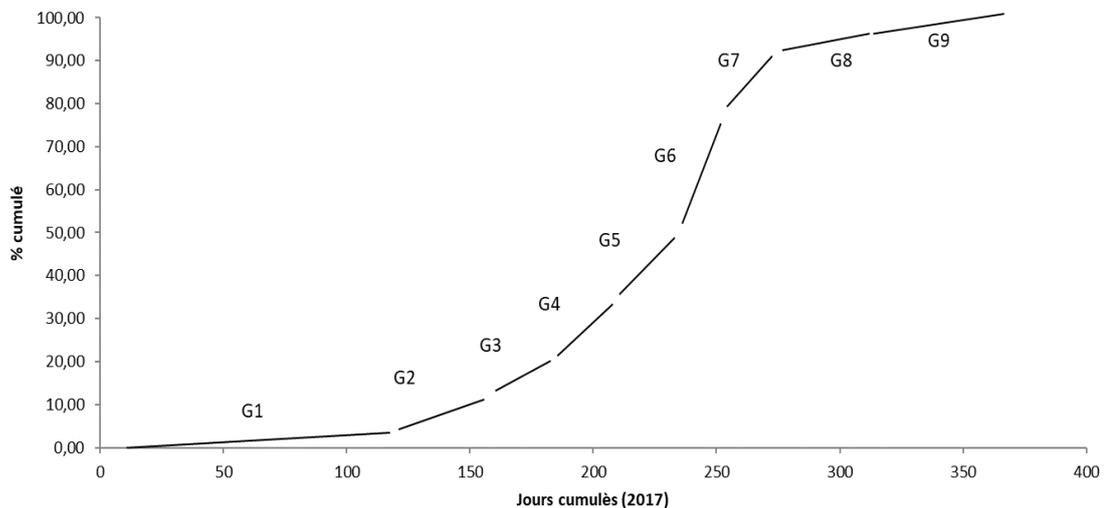


Figure 39. Nombre de générations de *C. capitata* sur terrain, selon la méthode d'Audemard et milaire (1975) et Iacob (1977) dans les différents vergers fruitiers de la région de Mitidja, 2017.

Tableau 12. Estimation du nombre et durée des générations annuelles d'adultes de *C. capitata* en Mitidja au cours de la saison 2017, d'après Audemard et Milaire (1975) et Iacob (1977).

Nombre de Générations	Date approximative d'occurrence		Durée de la génération (jours)	Nombre moyen hebdomadaire de males dans une génération.
	Emergence de la génération	Fin de la génération		
1 ^{ère}	01-janv	17-avril	107	16,6
2 ^{ème}	17-avr	27-mai	40	53,8
3 ^{ème}	27-mai	27-juin	30	70
4 ^{ème}	27-juin	27-juil.	30	185,3
5 ^{ème}	27-juill	7-aout	11	350,7
6 ^{ème}	7-aout	27-aout	20	246,7
7 ^{ème}	27-aout	27-sept	30	304,8
8 ^{ème}	27-sept	7-nov	40	50,4
9 ^{ème}	7-nov	27-dec	50	24,2

2.3 Nombre et durée des générations pour la Saison de 2018

Il y a 8 générations de *C. capitata* au cours de l'année 2018 ; la 1^{ère} génération a été observée entre le 1^{er} janvier et le 10 mai, soit 131 jours, la 2^{ème} entre le 10 mai et le 30 juin, elle dure 41 jours, la 3^{ème} entre fin juin et 20 juillet, soit 30 jours, la 4^{ème} entre le 20 juillet et 10 Aout, la 5^{ème} entre 10 aout et 30 août, la 6^{ème} entre le 30 aout au 20 septembre. La 7^{ème} génération a lieu entre le 20 septembre et le 20 octobre. Quant à la 8^{ème} et dernière génération, elle se situe entre le 20 octobre et la fin de décembre. Le nombre moyen hebdomadaire des males pour chaque une génération s'élève à 223, 270, 190 adultes/piège/semaine) sont observées respectivement pour la 5^{ème}, 6^{ème} et 7^{ème} en saison estivale. Ce nombre moyen hebdomadaire des mâles est faible, il est de 9 adultes/piège/semaine) pour la première génération en saison hivernale (Tableau 13, Figure 40). Comme dans les cas précédents, la première génération d'hiver de la mouche méditerranéenne est la plus longue, mais celle-ci contient une faible population des mâles 11,36 ; 16,55 et 9 respectivement pour 2016, 2017 et 2018. Par contre les générations estivales sont plus courtes mais contiennent plus d'individus.

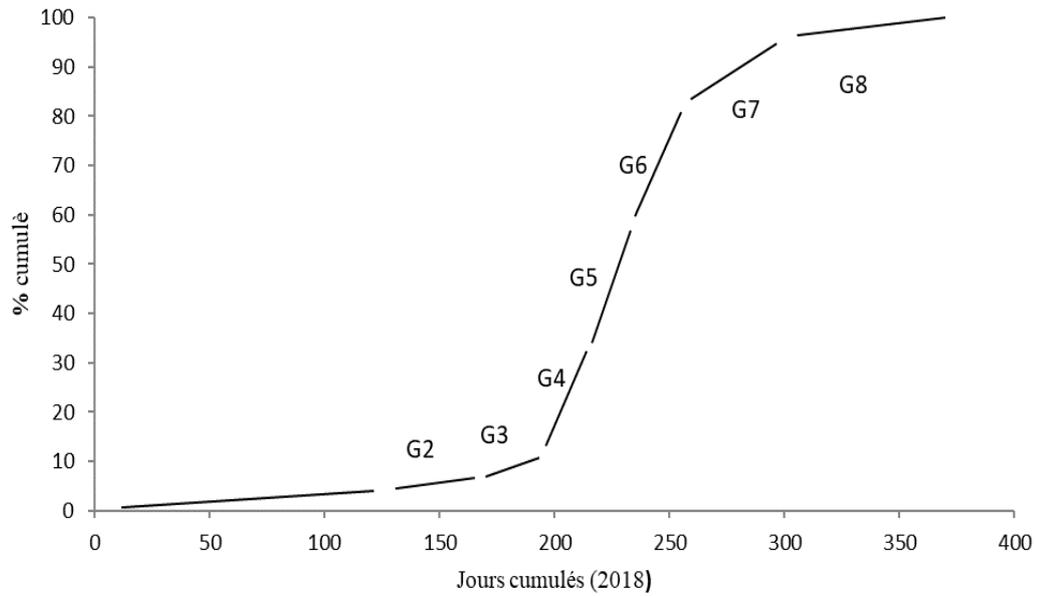


Figure 40. Nombre de générations de *C. capitata* sur terrain, selon la méthode d'Audemard et milaie (1975) et Iacob (1977) dans les différents vergers fruitiers de la région de Mitidja, 2018.

Tableau 13. Estimation du nombre et durée des générations annuelles d'adultes de *C. capitata* en Mitidja au cours de la saison 2018 d'après Audemard et Milaire (1975) et Iacob (1977).

Nombre de Générations	Emergence de la génération	Fin de la génération	Durée de la génération (jours)	Nombre moyen hebdomadaire de males dans une génération
1 ^{ère}	01-janv	10-mai	131	9
2 ^{ème}	10-mai	30-juin	41	14
3 ^{ème}	30-juin	20-juil	30	27
4 ^{ème}	20-juil	10 août	21	99
5 ^{ème}	10 août	30 août	20	223
6 ^{ème}	30 août	20-sept	21	270
7 ^{ème}	20-sept	20-oct	30	199
8 ^{ème}	20-oct	30-dec	71	80

3.Comparaison entre les générations observées et prédites

En 2016, les générations observées correspondent aux générations prévues c'est-à-dire qu'ils ont approximativement lieu à la même date. Les générations 3, 5 et 6 sont légèrement décalées de 1 à 4 jours. Les générations 2, 8 et 9 présentent un décalage plus ou moins important par rapport à celles prévues. En effet, le décalage est de 1 mois et 9 jours pour la G9 observée et celle prévue, 21 jours pour la G8, et 18 jours pour G2. En 2017 seule la G6 observée a lieu à la même date que la G6 prévue. La variation des dates est importante entre les générations prévues et la génération observées, elle est de 7 jours pour la 4^{ème} et la 5^{ème} et 36 jours pour la 9^{ème}. En 2018, la différence de date d'apparition des générations observées et prévues varie de 3 jours pour la 4^{ème} à 36 jours pour la 1^{ère} génération. Les dates des générations devraient en principe correspondre aux dates prévues. Cependant, les prévisions et les observations ne présentent pas un fort décalage exception faite pour la 1^{ère} génération. Les générations observées en dépit du décalage ont eu lieu à quelques jours avant ou après par rapport aux prévisions.

Tableau 14. Comparaison entre les générations observées (piège à phéromones) et prévues selon la méthode des degrés-jours (DD) accumulés au cours des années 2016, 2017 et 2018 en Mitidja.

Année	Nombre de générations	Générations observées	Générations attendues ou prévues
2016	G1	01-janv	01-janv
	G2	20-avr	08-mai
	G3	10-juin	09-juin
	G4	30-juin	30-juin
	G5	20-juil	23-juil
	G6	10-Aout	6-aout
	G7	30-Aout	30-aout
	G8	30-sept	09-sept
	G9	10-nov	19-oct
2017	G1	01-janv	1-fev
	G2	17-Avrl	10-mai
	G3	27-mai	10-juin
	G4	27-juin	02-juil
	G5	27-juil	20-juil
	G6	7-Aout	7-aout
	G7	27-Aout	23-aout
	G8	27-sept	19-sept
	G9	07-nov	13-oct
2018	G1	01-janv	01-mars
	G2	10-mai	20-mai
	G3	30-juin	22-juin
	G4	20-juil	13-juil
	G5	10 aout	1 Aout
	G6	30 aout	19 Aout
	G7	20-sept	08-sept
	G8	20-oct	29-sept

4. Captures selon le type de piégeage et la culture

4.1. Piège à phéromones

Les captures les plus importantes de mâles de la cératite, en 2016, ont été faites sur le pêcher où il a été dénombré 1791 individus et 1753 individus sur le figuier. Chez les agrumes, c'est la Thomson Navel qui est la plus infestée et les captures sont de l'ordre de 428 individus. Pour l'année 2017, les captures s'élèvent à 1970 sur pêcher et 2479 individus sur figuier. Les spéculations notamment le néflier et l'abricotier (300 et 319) sont plus infestés que les agrumes où nous avons dénombré 212 individus sur la Thomson navel et 200 individus sur la Clémentine. En 2018, le pêcher occupe la première position avec 1447 individus capturés et relègue donc le figuier en deuxième position avec 935 individus. Parmi les variétés d'agrumes, la Thomson navel est la plus infestée quel que soit l'année (Figure 41).

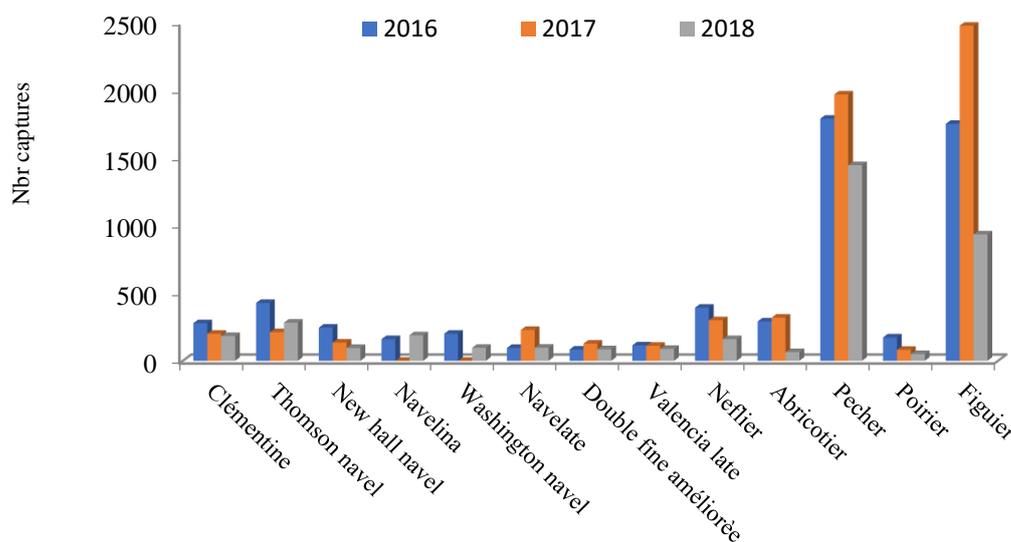


Figure 41. Nombre total de captures par le piège à phéromones sur les différentes cultures étudiées.

4.2 Piège englué jaune

Les adultes de la cératite capturés par les pièges englués jaunes s'élèvent à 439, 482 et 353 sur pêcher et 353, 443 et 345 sur figuier respectivement en 2016, 2017 et 2018. En revanche l'abricotier et le néflier avec de faibles captures par rapport au pêcher et au figuier, sont donc moins infestés. La mouche fréquente peu les agrumes du fait que toutes les variétés contiennent peu d'individus dont le nombre ne dépasse pas 166 chez la Thomson navel qui est la plus infestée par rapport aux agrumes. Celle-ci est suivie de la Clémentine même si elle ne comporte pas beaucoup d'individus (213 individus). D'une

façon générale, les agrumes, le néflier et l'abricotier sont peu infestés par la mouche (Figure 42).

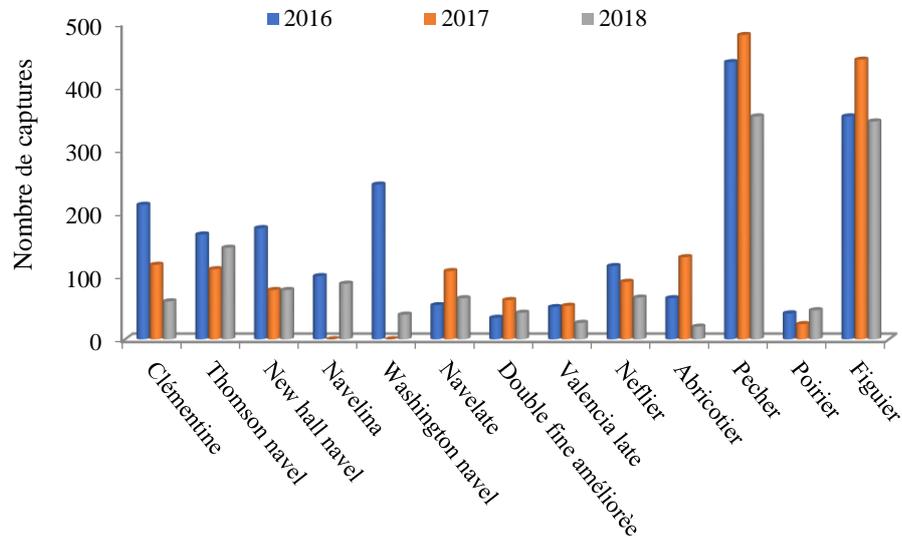


Figure 42. Nombre total de captures dans le piège englué jaune sur les différentes cultures étudiées.

4.3 Piège englué bleu

La figure 43 met en évidence les résultats sur le nombre total de captures des adultes de la Cératite sur les différentes cultures fruitières cumulés dans les pièges englués Bleus. Dans le verger de pêches, les captures s'élèvent à 217, 398 et 259 individus respectivement pour 2016, 2017 et 2018 alors que le figuier qui présente le plus grand nombre de captures, comprend un total de 306, 208 et 249 individus en 2016, 2017 et 2018. Parmi les différentes variétés d'agrumes, les captures les plus élevées de *C. capitata* sont enregistrées sur les variétés Thomson navel, la Clémentine et la Washington navel avec un nombre respectif d'individus de 173, 148 et 197 (Figure 43).

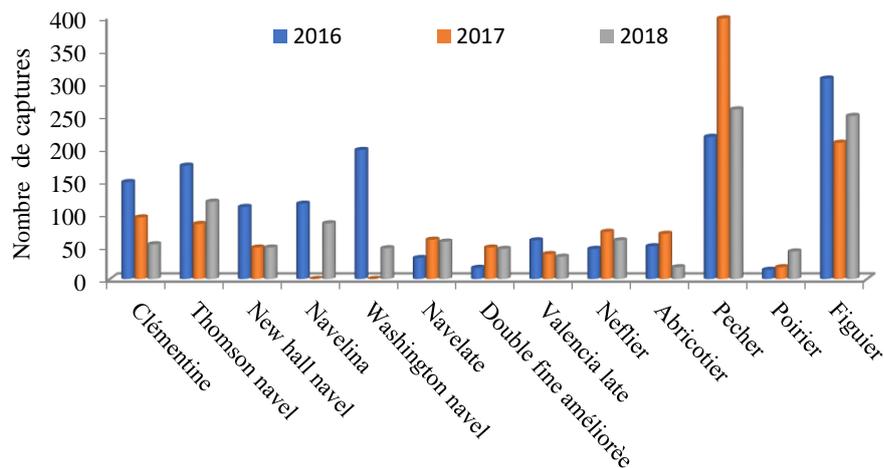


Figure 43. Nombre total de captures dans le piège englué bleu sur les différentes cultures étudiées.

5. Comparaison des captures selon le type de piégeage

La comparaison entre les captures selon le type de piégeage montre que le piège à phéromone est le plus efficace quant au nombre d'individus capturés. En effet le cumul des captures sans tenir compte de la spéculation s'élève à 11.777 captures. Par contre sur les plaques engluées jaunes, il a été enregistré à peine 3093 individus tout comme d'ailleurs les plaques engluées bleues dont le nombre de captures s'avère faible dans la mesure où il été dénombré pas plus de 2048 individus. En résumé, il apparait clairement que les plaques engluées jaunes, bien qu'ils ne soient pas aussi efficaces que les pièges à phéromones, ils restent cependant, plus performants que les plaques engluées bleues. Après analyse de la variance il ressort que la différence est très hautement significative ($F=8,93$, $DDL= 2$; $Pr = 0,0003$) entre les captures. La comparaison des moyennes deux à deux grâce au test de Newman et keuls, donne deux groupes dont l'efficacité est différente : les pièges englués jaunes et bleus ont sensiblement la même efficacité et forment un même groupe alors que les phéromones ont plus de capacité de capture par rapport aux pièges précédents (Figure 44).

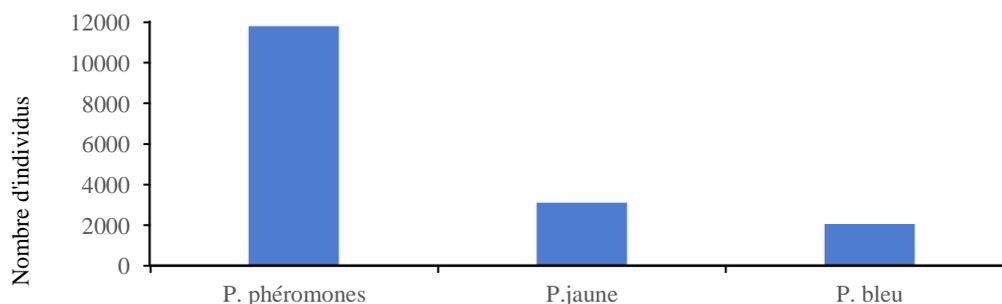


Figure 44. Comparaison entre les captures selon le type de piégeage

6. Estimation de l'infestation

6.1. Nombre moyen et taux de piqûres/fruit

6.1.1. Sur agrumes

Les attaques selon la présence des piqûres sur les fruits se divisent en trois groupes, le premier renferme la Thomson navel et la clémentine qui portent respectivement 1,5 et 1 piqûre/fruit. Le deuxième groupe renferme les variétés ayant entre 0,55 et 0,68 piqûre/fruit : il s'agit de la Navelate, la valencia et la double fine améliorée. Le dernier groupe se compose de la New Hall, la Navelina et la Washington navel qui se distinguent respectivement par 0,71 ; 0,76, et de 0, 89 piqûre/fruit (Tableau 45 A).

Le calcul du taux d'infestation sur les variétés d'agrumes a été effectué uniquement pour l'année 2016 pour des raisons qui ne dépendent pas de notre volonté. D'après les résultats, la variété d'orange Thomson navel se distingue par le taux de fruit piqué le plus élevé qui est estimé à 21,7%. Il est suivi par la clémentine (18,4%) et la Navelina (13,4%). Par contre, les variétés d'agrumes tardives présentent des taux d'attaques plus faibles de l'ordre de 7,8 et 5,5%. Les dommages causés par la cératite sont sous forme de piqûres et des galeries dans les fruits qui ont lieu lors de la ponte. Elles engendrées par les femelles et les larves (Tableau 45 B).

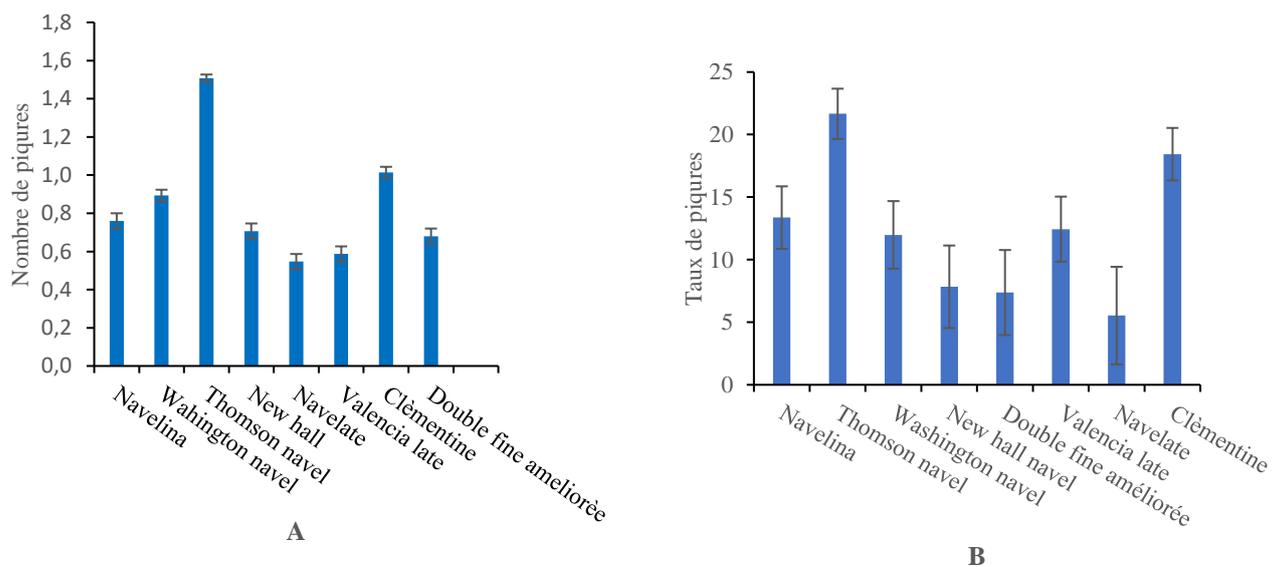


Figure 45. Nombre moyen et taux de piqûres/fruit sur agrumes en 2016.

A : Nombre de piqûres/fruit, **B** : Taux de piqûres/fruit.

6.1.2. Sur fruits à noyau et à pépins

L'estimation de l'infestation en fonction du nombre de piqûres par fruit révèle que la pêche Redhaven est la plus attaquée avec un nombre moyen variant entre 4 ; 4,3 et 4,6 piqûres/fruit respectivement en 2016, 2017 et 2018. Elle est suivie par les figues 2,8 et 2,9 en 2016 et 2017. Pour les nèfles, les piqûres sur fruit sont importantes essentiellement en 2017 (2,9 piqûres/fruit), mais les attaques restent tout de même significatives en 2016 et 2017 (2 et 1,4 piqûres/fruit). Par contre les abricots portent plus 2,2 piqûres/fruit en 2017 mais en 2016 et 2018, les fruits respectifs portent 2,6 et 2,2 piqûres/fruit (Figure 46 A).

D'une façon générale, La pêche (Redhaven) se caractérise par des taux élevés de fruits attaqués aussi bien en 2018 avec 39,7% et 2016 (38,2%) qu'en 2017 où le taux est de 34%. Vient ensuite les figues avec 34% ; 32,7% et 39,6% de fruits endommagés respectivement en 2016, 2017 et 2018. Les spéculations les moins attaquées sont par ordre décroissant les abricots et les nèfles avec respectivement 17,4% et 10,4% pour l'année 2016. Chez les abricots les taux d'attaques en 2017 et 2018 sont différents dans la mesure où les taux respectifs sont de 17,3% et 15,1%. Dans le même ordre d'idées les nèfles ont subi peu d'attaques par rapport aux autres spéculations malgré leur importance de point vu économique car elles s'élèvent à 10,3% environ quel que soit l'année. Quoiqu'il en soit les abricots et les nèfles restent les moins affectés par les attaques de la cératite (Figure 46 B).

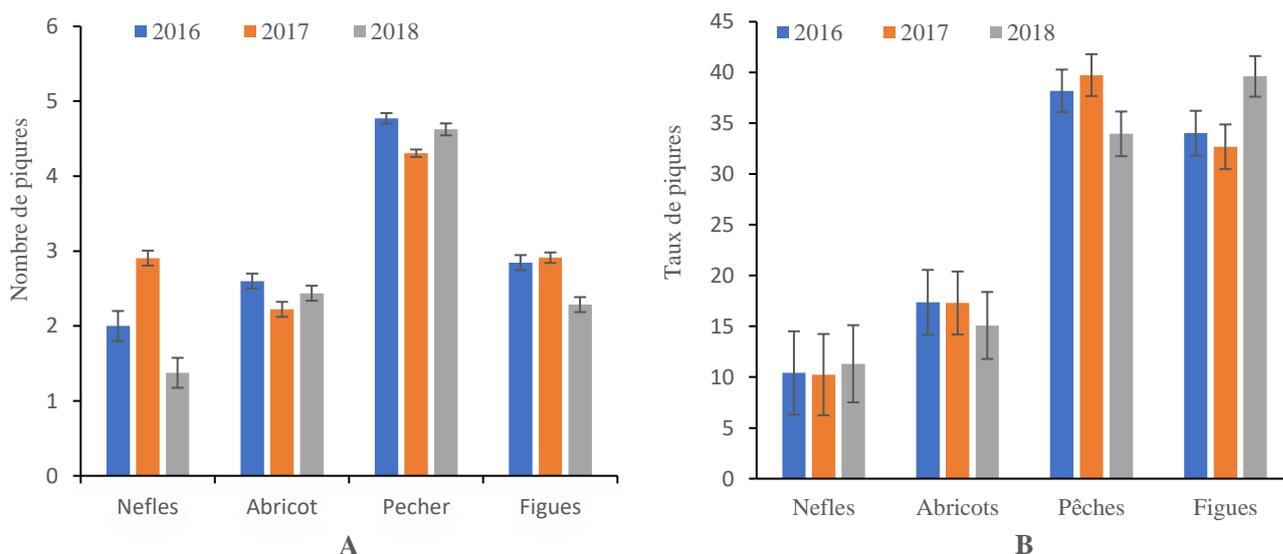


Figure 46. Nombre moyen et taux de piqûres sur fruits à noyau et à pépins.

A : Nombre moyen de piqûres, **B** : Taux de piqûres.

6.2. Nombre moyen de larves/fruit

6.2.1. Sur agrumes

Le nombre moyen de larves par fruit varie selon les variétés d'agrumes. Il ressort, en effet, que la Washington Navel et la Navelate compte respectivement 1,9 et 1,6 larves en moyenne par fruit alors que la New Hall porte 1,4 en moyenne de larve/fruit. En revanche, les oranges tardives telles que Valencia late, la Thomson Navel sont moins infestées dans la mesure où elles portent chacune 1,1 larve/fruit en plus de la double fine améliorée (0,9). La Navelina et la clémentine contiennent respectivement 1,3 et 1,2 larves/fruit (Figure 47).

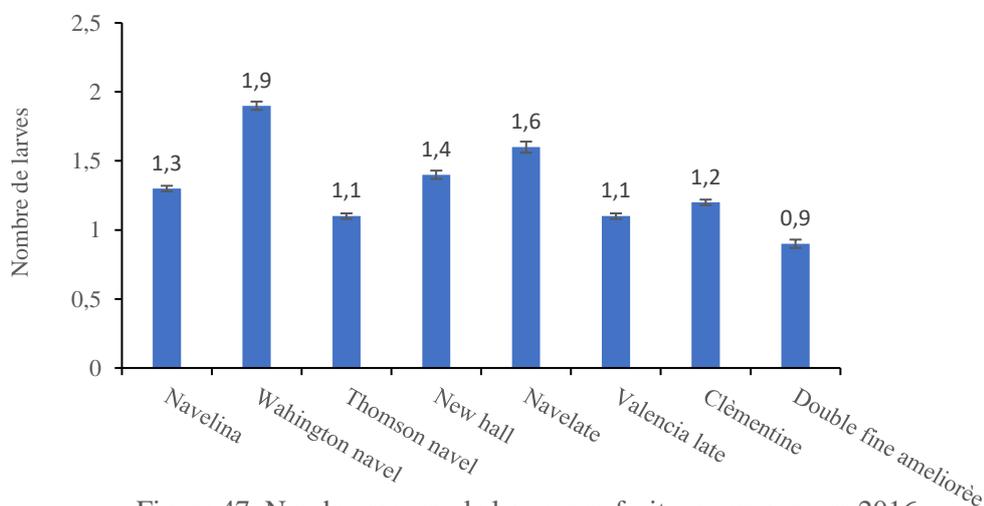


Figure 47. Nombre moyen de larves par fruit sur agrumes en 2016.

6.2.2. Sur fruits à noyau et à pépins

La variété de pêche Redhaven est la plus touchée par la cératite pendant les trois années du fait que le nombre moyen de larves contenues dans le fruit est le plus élevé. En 2016, les pêches contiennent pas moins de 16 larves/fruit qui augmentent à 19,3 larves/fruit en 2017 avant de chuter à 14 larves/fruit en 2018. En comparaison avec les autres spéculations les pêches demeurent les plus attaquées. En 2016, 2017 et 2018 les figes ne sont pas moins attaquées dans la mesure où le nombre de larves dans le fruit s'élèvent respectivement à 10,1 ; 12,6 et 9 larves/fruit. Les Abricots et les nèfles semblent les moins affectés, bien qu'ils soient eux aussi grandement attaqués. En 2018, les nèfles renferment entre 4,1 larves/fruit tandis que les abricots comprennent 3,7 larves/fruit en 2016 (Figure 48).

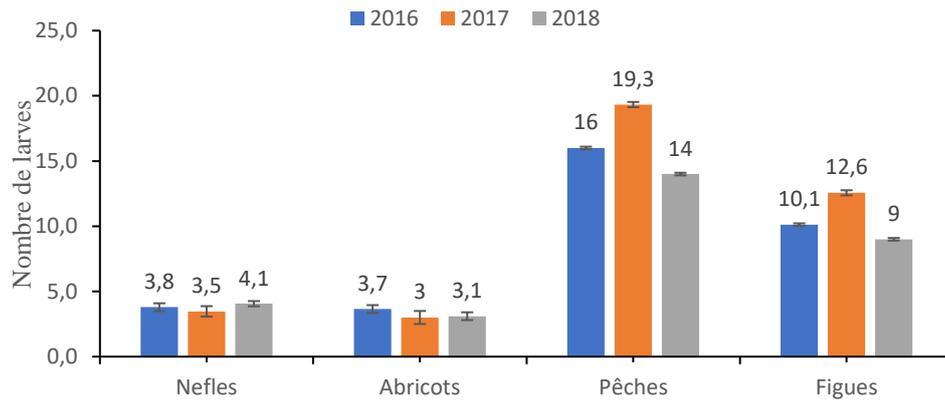


Figure 48. Nombre moyen de larves par fruit selon les différentes espèces fruitières étudiées.

7. Paramètres biologiques de *C. capitata*

7.1. Durée de pupaison

La durée de pupaison diffère selon la spéculation. En effet, elle varie de 7 jour chez les figes à 30 jours chez la Valencia late. La Double fine améliorée possède également une durée de pupaison longue de 29 jours. Ce sont toujours les agrumes dont la pupaison est la plus longue. On cite à titre d'exemple la New hall navel, la Navelina, la Washington navel, et la Navelate dont la durée de pupaison est de 28 jours, mais chez la Thomson navel, la pupaison est de 26 jours et beaucoup moins chez la Clémentine (18 jours). Les Nèfles, les Abricots et les Pêches ont par ordre décroissant une pupaison de 15, 10 et 8 jours (Tableau 15).

Tableau 15. Durée de pupaison de la cératite selon la spéculation.

Variété	2016	2017	2018
Clémentine	18±2,83	/	/
New hall navel	28±0,00	/	/
Navelina	28±0,00	/	/
Thomson navel	26±2,83	/	/
Washington navel	28±2,65	/	/
Navelate	28±0,71	/	/
Valencia late	30±1,41	/	/
Double fine améliorée	29±0,00	/	/
Nèfles	15±1	15±0,7	15±1,41
Abricots	10±1	9±0,7	11±00
Pêches	8±0,5	8±0,0	8±0,5
Poires	/	/	/
Figues	8±1,15	8±1,5	8±0,0

/: Pas d'information (aucune larve obtenue).

7.2 Taux d'émergence

7.2.1 Sur Agrumes

Sur les variétés d'agrumes, le taux d'émergence est faible et varie entre 22,63% pour la Navelina à 46,33% pour la Clémentine. On peut diviser le taux d'émergence en trois groupes par ordre croissant : le premier groupe renferme la Navelina (22,6%) et la Navelate (22,9%), le deuxième groupe comprend les taux qui varient de 31,3 à 69,1%. Il s'agit de la double fin améliorée (31,3%), la Thomson Navel (31,9%), la Washington Navel (37,1%) et la Valentia (39,1%). Le dernier groupe se compose de la New Hall Navel (41,6%) et de la Clémentine (46,3%) (Figure 49).

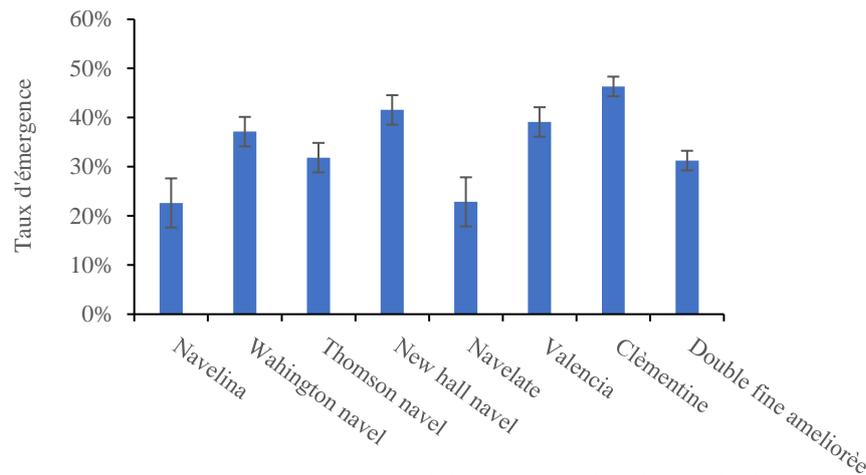


Figure 49. Taux moyen d'émergence chez les variétés d'agrumes (2016).

7.2.2. Sur les fruits à noyau et à pépins

Le taux d'émergence varie selon la spéculation. Chez la pêche (Redhaven) le taux est le plus élevé ; il est de l'ordre de 73,3 et 78% en 2016 et 2017. Ce taux baisse sensiblement à 71% en 2018. Ensuite viennent les figes (Azenjer) avec des taux de 71,4 ; 74 et 76% respectivement en 2016, 2017 et 2018. Par rapport aux nèfles, les abricots ont un taux d'émergence plus élevés quel que soit l'année (Figures 50).

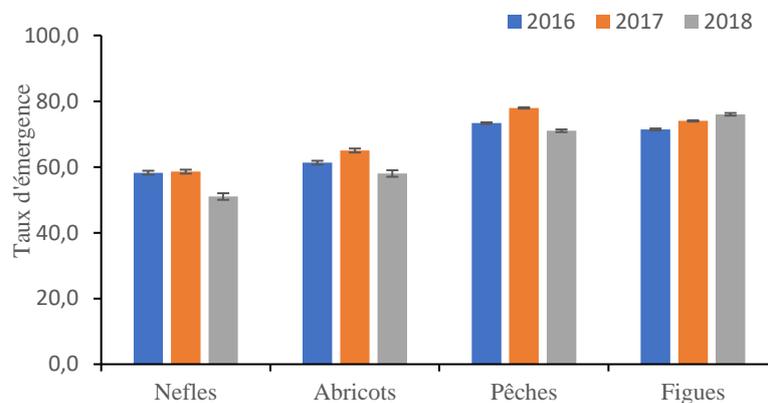


Figure 50. Taux moyen d'émergence chez les fruits à noyau et à pépins

7.3 Sex-ratio

D'après les résultats, la sex-ratio varie selon la spéculation. Celui-ci varie de 0,40 à 0,63. Il est en faveur des femelles issues de la pêche (Redhaven) et des figes, il atteint respectivement 0,60 et 0,63. Par contre, nous avons obtenu une sexe ratio de 0,59 et 0,55 pour les mouches issues d'abricot et des fruits de nèfles. Le sex ratio est égal 0,5 pour

celles issues de la double fine améliorée. Pour le reste des variétés d'agrumes, la sex ratio est inférieure à 0,5 (Tableau 16).

Tableau 16. Sex ratio selon la spéculation sur trois années consécutives, 2016, 2017, 2018.

Spéculations	2016	2017	2018
Navelina	0,40	/	/
Wahington navel	0,43	/	/
Thomson navel	0,44	/	/
New hall navel	0,40	/	/
Navelate	0,42	/	/
Valencia	0,50	/	/
Clémentine	0,47	/	/
Double fine améliorée	0,50	/	/
Nèfles	0,55	0,5	0,5
Abricots	0,59	0,5	0,55
Pêches	0,63	0,6	0,6
Figues	0,63	0,6	0,6

Partie II : Essai de lutte biologique en laboratoire

1. Essai de lutte biologique par nématode entomopathogène

1.1. Traitement des larves par contact sur papier filtre et par pulvérisation du sol

Le traitement par contact sur papier filtre a provoqué des taux de mortalité de 28%, 56% et 69%, soit 7,14 et 17 individus respectivement pour les concentrations de 50, 100 et 200 IJ, alors que celui par pulvérisation du sol, les mêmes concentrations ont donné des taux respectifs de mortalité de 23, 54 et 82%, soit 6, 14 et 21. Aucune mortalité n'a été enregistrée dans le témoin (Figure 51 A et B). Quant à la mortalité cumulée, elle est légèrement supérieure dans le traitement du sol par pulvérisation (31 larves) que dans celui du traitement sur papier filtre (28 larves).

L'analyse de la variance indique une différence très hautement significative entre les doses appliquées sur papier filtre ($F = 136,33$, $ddl = 12$, $P < 0,0001$) et par pulvérisation du sol ($F = 358,02$, $ddl = 12$, $P < 0,0001$) et le Test de Newman-Keuls révèle que la plus grande dose provoque la mortalité la plus grande pour les deux traitements. Nous avons également comparé les deux traitements entre eux à l'aide du Test t pour deux échantillons indépendants/Test bilatéral qui ne révèle pas de différence significative. Par conséquent, la virulence du pathogène est la même pour les deux traitements. Ces derniers après 24h, ont généré une mortalité cumulée sur papier filtre de 69% alors que celle du traitement par pulvérisation du sol, s'élève à 82% (Figure 51).

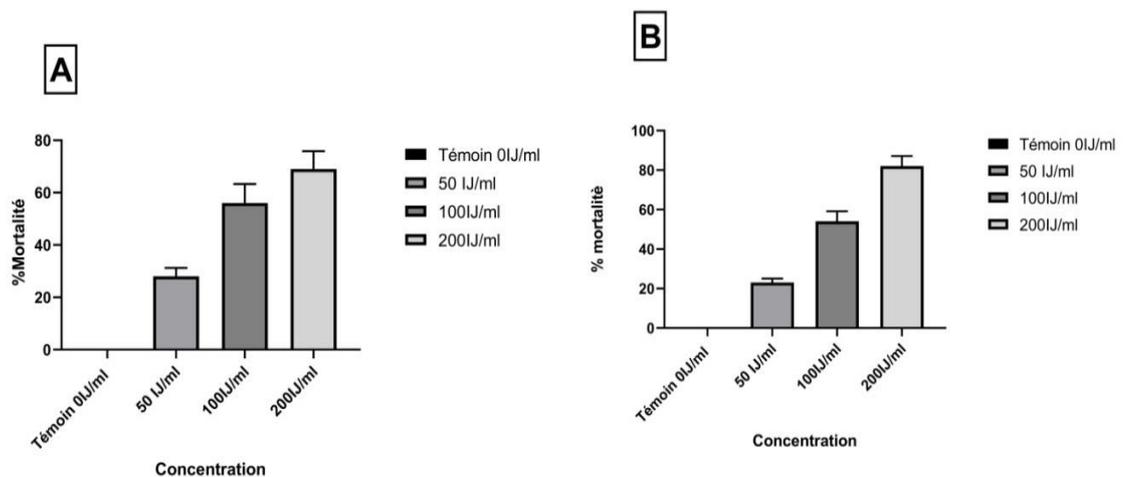


Figure 51. Pourcentage de mortalité des larves selon la concentration de *S. feltiae* du traitement par contact sur papier filtre et par pulvérisation du sol.

(A) Papier filtre, (B) Pulvérisation du sol.

1.1.2 Infection des larves par *S. feltiae*

Les premiers signes d'infection des larves par les nématodes sont apparus dès les premières heures qui ont suivi le traitement. Il se produit, en effet, un changement de couleur chez les larves. Après 6h du traitement, les premiers individus morts sont observés. L'émergence dans le témoin est de 100%. L'examen des larves mortes au Stéréo microscope fait apparaître nettement la présence du pathogène (Figure 52), indiquant ainsi que celles-ci (larves) ont été infectées. Les larves ayant survécu à l'infection ont été suivies jusqu'à leur transformation en puce qui dure quelques heures environ. Le taux d'émergence est d'autant plus élevé que la dose est faible. A titre d'exemple la dose de 50 IJ a permis une émergence de 70,9%. En revanche, l'émergence est de 43% à la dose de 200 IJ. Au niveau du témoin, il y a eu 100% d'émergence

En d'autres termes, la mortalité est d'autant plus élevée que la dose est élevée. Par contre les émergences sont inversement proportionnelles à la dose, autrement dit les émergences sont d'autant plus élevées que la dose est faible (Figure 53B).

Les pupes âgées contrairement aux jeunes pupes ont une mortalité plus faible de 7, 9 et 10, soit 27%, 36% et 38%, ce qui correspond à des émergences de 73%, 54% et 62% pour les doses respectives de 50, 100 et 200 IJ. La mortalité dans le témoin est nulle comme dans les cas précédents. Le Test t pour deux échantillons indépendants / Test bilatéral dévoile une différence significative de la mortalité entre les pupes jeunes et âgées.

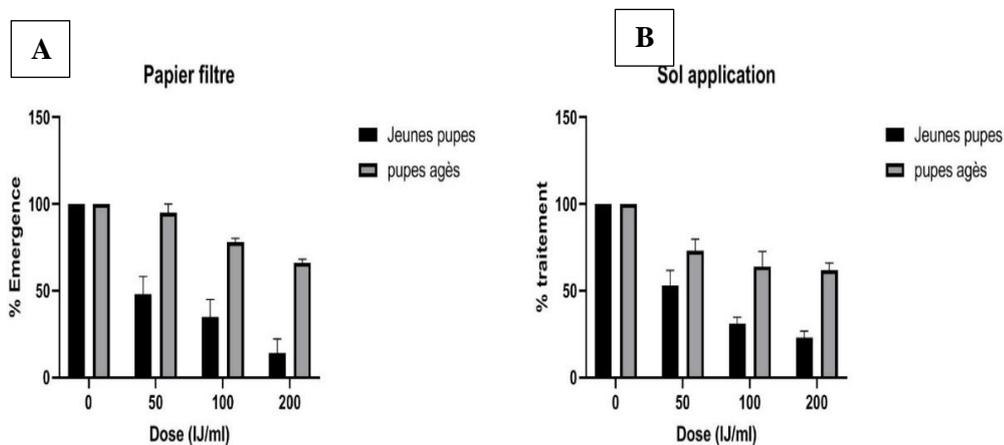


Figure 53 : Pourcentage d'émergence des pupes de *C. capitata* traitées avec les différentes concentrations de *S. feltiae*.

(A) Papier filtre, (B) Pulvérisation du sol.

1.3. Traitement des adultes par ingestion

Le traitement à base de la suspension de nématodes à 50 IJ/ml, 100 IJ/ml et 200IJ/ml a provoqué respectivement une mortalité de 26%, 54% et 69%. Ceci dit, le taux de mortalité est d'autant plus important que la dose est forte ($F=219,82$, $DF=12$, $P<0.0001$). Dans le témoin, il n'y a pas eu d'infection (Figure 54).

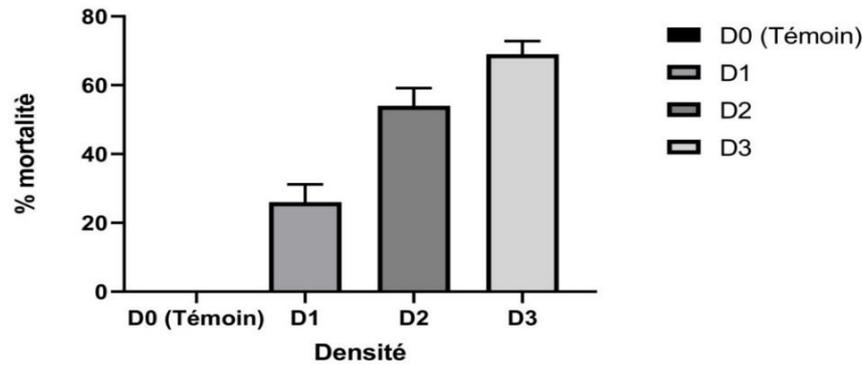


Figure 54. Pourcentage de mortalité (Moyenne \pm SEM) des adultes de *C. capitata* traités avec différentes concentrations de *S. feltiae*.

1.4. Influence de l'humidité du sol sur la virulence de *S. feltiae*

L'humidité du sol a un effet sur la virulence de *S. feltiae* à l'égard des larves et des pupes. En effet, l'analyse de la variance indique une différence hautement significative entre les différents niveaux d'humidité aussi bien pour les larves ($F=41,32$; $DF=3$; $P<0.0001$) que pour les pupes et ($F=19.1$, $DF=3$, $P<0.0001$).

S. feltiae a provoqué une mortalité plus élevée chez l'hôte lorsque l'humidité du sol représente 75% de la capacité du champ, ce qui a provoqué 82% et 38% de mortalité chez les larves et les pupes, tandis que l'efficacité des autres traitements est faible lorsque l'humidité est de 100% et 50%. Aucune mortalité n'a été observée chez le témoin. En résumé, l'efficacité des nématodes est similaire à 100% et à 50% d'humidité de la capacité du terrain, mais, elle est plus efficace à 75% de la capacité du terrain, contre les deux stades du sol (Figure 55).

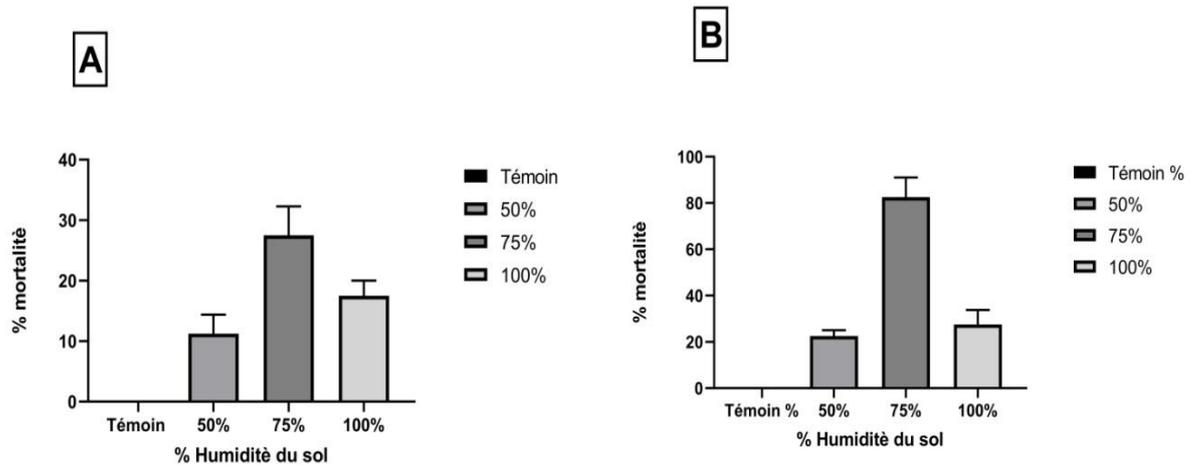


Figure 55. Pourcentage de mortalité cumulée en fonction du taux d'humidité du sol. (A) : Pupes, (B) : larves.

2. Essai de lutte biologique par *B. bassiana*

2.1 Pathogénicité vis-à-vis des larves du 3^{ème} stade

Les larves du 3^{ème} stade de *C. capitata* sont sensibles au traitement fongique. La mortalité moyenne des larves varie de 55,03% dans le traitement effectué sur papier filtre à 43,33% dans le traitement effectué dans le sol (Figure 56A). Aucune mortalité n'a été enregistrée dans le témoin.

Le test T révèle ne révèle pas de différence significative entre les traitements aussi bien sur papier filtre que sur le sol. ($T = 1.41$; $DF = 15$; $P > 0.05$). Autrement dit, Le traitement fongique est efficace sur les deux supports (Papier filtre et sol).

Le suivi des larves traitées ayant survécu au traitement montre que les pupes obtenues à partir de celles-ci présentent un faible taux d'émergence comparé au témoin (Figure 56 B). Il y a une différence significative entre le pourcentage d'émergence des adultes obtenus des larves témoins et ceux issus de larves traitées ($F=494.3$, $DDL=11$, $P < 0,0001$).

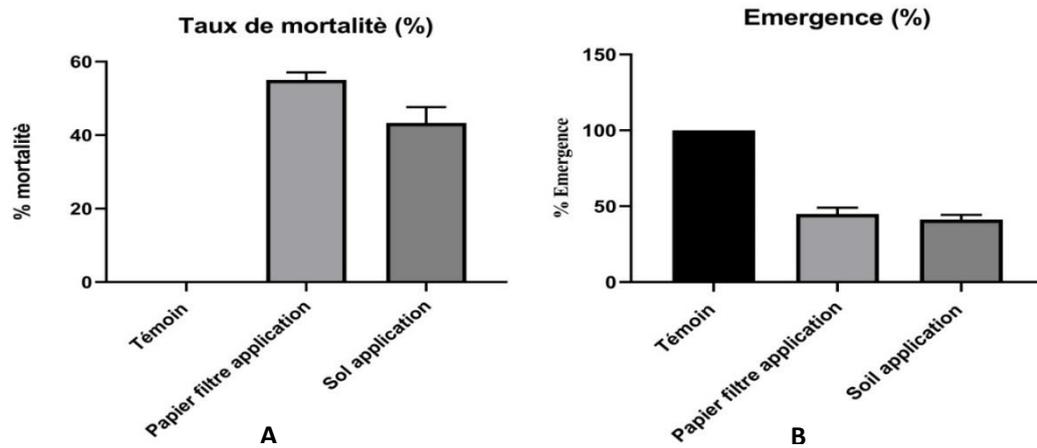


Figure 56. Pourcentage de mortalité de larves traitées de *C. capitata* avec la suspension de *B. bassiana* BMAUM M6-4 à 10^7 conidia /ml et émergence des adultes.

A : Pourcentage de mortalité des larves, **B** : Emergence des adultes après traitement.

2.2. Pathogénicité contre les pupes

L'infection par *B. bassiana* BAUM M6-4 contre les pupes de *C. capitata* entraîne une réduction significative du taux d'émergence des adultes, 56,66% et 57,33% d'émergence respectivement sur le papier filtre et sur l'application au sol, contre 100% d'émergence dans les deux groupes témoin (Figure 57 A, B). Entre les deux modes de traitement, l'application au sol et l'application sur papier filtrer, il n'y pas de différence significative ($T = 0.9135$; $DF = 7$; $P > 0.05$)

Les pupes âgées de 6 jours et les pupes jeunes ne répondent pas de la même manière au traitement (Figure 57A). En effet, les pupes nouvellement formées (âgées de 1 jour) sont plus sensibles à l'infection par le champignon entomopathogène que les pupes âgées de 6 jours (Figure 58A). Selon le test, il existe une différence significative entre les jeunes pupes et âgées traitées sur papier filtre ($T = 3.576$; $DF = 3$; $P < 0.05$). La différence est également significative dans le traitement appliqué sur le sol ($T = 7.565$; $DF = 3$; $P < 0.05$).

Dans le traitement sur le sol, il y a 46,67% d'émergence chez les larves âgées de 1 jour et 48,33% dans le traitement sur papier filtre tandis que chez les pupes âgées de 6 jours, l'émergence est de 65 et 68% dans le traitement sur le sol et papier filtre,

respectivement : Nous rappelons que nous avons obtenu un taux de 100% d'émergence dans les groupes témoins, dans les deux traitements (Figure 57B).

La mortalité des adultes issus de pupes traitées semble être plus élevée par rapport à ceux du groupe témoin. Elle est de 14,29 chez les adultes pour le traitement dans le sol et de 22,22% pour le traitement sur papier filtre.

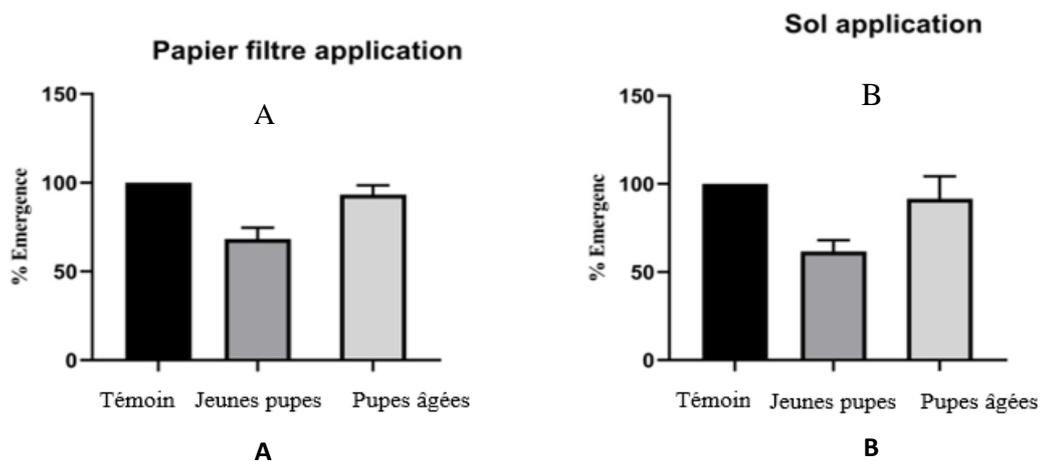


Figure 57. Pourcentage d'émergence après traitement des pupes de *C. capitata* avec une suspension de *B. bassiana* à 10^7 conidies/ml.

A : Application sur papier filtre, **B** : Application au sol.

2.4 Pathogénicité contre les adultes

La virulence de *B. bassiana* contre les adultes de *C. capitata* a été estimée 4 fois après le traitement au 3, 7, 12 et 15^{ème} jour. Aucune mortalité n'est observée pour les témoins dans les deux modes de traitement et pour les deux sexes. La figure 58 A et B montre l'effet du traitement par ingestion et par contact sur la mortalité des adultes mâles et femelles. Le traitement par ingestion a donné une mortalité moyenne des adultes de *C. capitata* plus élevée chez les mâles (86,33%) que chez les femelles (68,33%), après une nutrition d'un mélange de suspension de conidies et d'aliments artificiels pendant 48 heures (Figure 59A). Là encore, la différence est significative entre la mortalité des mâles et des femelles ($T = 2.637$; $DF = 30$; $P < 0.05$). La mortalité induite par ingestion est de 73,33% et 86,33% respectivement chez les mâles et les femelles. Ces dernières sont plus sensibles à l'infection (68,33%) que celles traitées par contact (51,67%), au 15^{ème} jour

après le traitement. De même, les mâles traités par ingestion sont plus sensibles à l'infection (68,33%) que ceux traités par contact (73,33%) (Figure 58A, B). La différence est très hautement significative entre les deux modes de traitement ($T = 2,137$; $DF = 30$; $P < 0,05$).

Au 3^{ème} jour du traitement, la mortalité est de 10,33% pour les femelles et de 26,67% pour les mâles. Au 7^{ème} jour, le champignon a causé une mortalité de 35% et 53,33% respectivement chez les femelles et les mâles. Au 12^e jour, le taux est passé à 61,67% chez les femelles et à 83,33% chez les mâles. Au 15^e jour après traitement, les taux maximums enregistrés sont de 86,33% et 68,33% pour les mâles et les femelles (Figure 58A).

Le taux de mortalité est de 1,67% pour les femelles et de 6,67% pour les mâles au 3^{ème} jour après le traitement par contact. Au 7^{ème} jour, la mortalité est passée à 10% pour les femelles et 33,33% pour les mâles. Au 12^{ème} jour, la mortalité des femelles croit à 28,33% et 58,33% pour les mâles. Au 15^{ème} jour de traitement, la mortalité des femelles 51,67% et 73,33% pour les mâles. La mortalité moyenne des adultes de *C. capitata*, a atteint 51,67% pour les femelles et 71,67% pour les mâles (Figure 58B). La différence est très significative entre la mortalité moyenne des mâles et des femelles de *C. capitata* traités par contact avec suspension conidienne de *B. bassiana* BAUM M6-4 à 107conidies/ml ($T = 2,132$; $DF = 30$; $P < 0,05$).

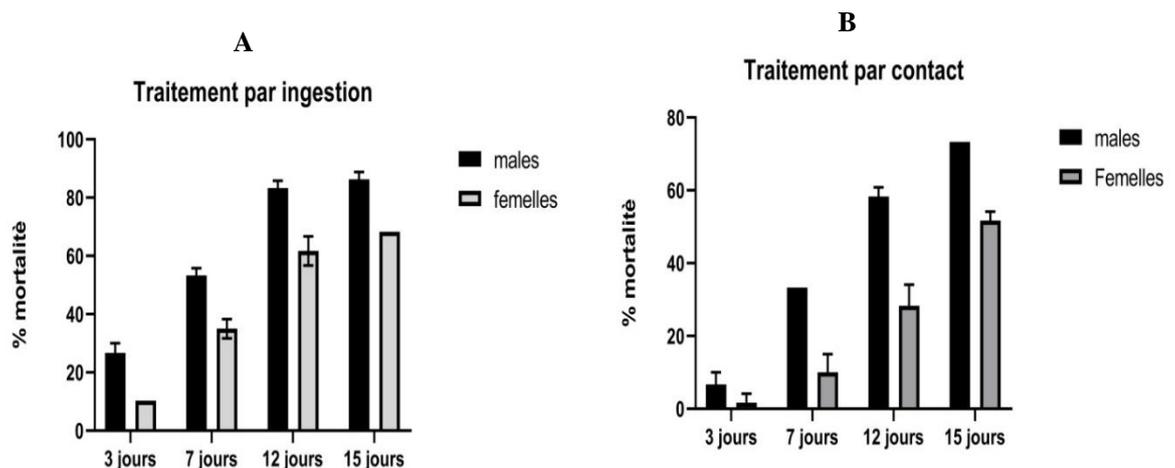


Figure 58. Taux de mortalité des adultes de *C. capitata* en fonction du temps
A : Traitement par ingestion, **B** : Traitement par contact.

L'analyse de Probit indique que le TL_{50} est plus courte chez les mâles que chez les femelles pour les deux modes de traitements. En effet, dans le traitement par ingestion, le TL_{50} est de 10,87 pour les femelles et de 6,54 jours pour les mâles. Dans le traitement par contact, la TL_{50} pour les femelles était de 14,68 jours et de 10,54 jours pour les mâles

Les individus morts de *C. capitata* sont recouverts d'un mycélium blanc caractéristique du champignon *B. bassiana*. Le pourcentage moyen d'adultes morts ayant développé un mycélium était de 100% (Figure 59).



Figure 59. Symptômes d'infection chez les adultes de *C. capitata* induits par *B. bassiana* BMAUM M6-4.

Discussion

1. Étude de la bio-écologie de *C. capitata*

La mouche méditerranéenne des fruits *C. capitata* est le ravageur clé en arboriculture fruitière et constitue le principal obstacle à la production et à l'exportation des fruits (Oukil et al. 2002). Plus connue par les agriculteurs sous le nom de « Mouche des agrumes » de par ses dégâts spectaculaires sur les agrumes que sur les autres espèces fruitières. En effet, une multitude variétale du genre citrus s'étale dans le temps sur une période de huit à neuf mois, de la fin septembre à janvier ou février pour les variétés précoces de *Citrus clementina* et *Citrus sinensis* tel que Thomson navel et Washington navel. Les variétés les plus tardives de *Citrus sinensis* comme la Portugaise et la Valenciate qui s'échelonnent entre avril à mai, assurent le développement de l'insecte sur cette culture.

Les insectes, en tant qu'animaux poïkilothermies modifient leur activité en fonction de la température du milieu environnant (Bale et al. 2002 ; Menéndez, 2007). Ces insectes ont une plage de température optimale dans laquelle ils se développent rapidement. Il existe aussi une température maximale (appelée seuil supérieur), et une température minimale (seuil minimale) au-dessus et en-dessous de laquelle le développement s'arrête. Ces valeurs sont utilisées pour prédire l'activité des insectes et l'apparition des symptômes pendant la saison de croissance. En effet, les unités thermiques accumulées (DJ) ont été utilisées pour prédire le développement saisonnier et l'émergence de divers insectes (Sevacherian et al. 1977 ; Farag et al. 2009 ; Salama et al. 2019) et fournissent un outil précieux pour la lutte contre les insectes ravageurs, en prévision des infestations, des surveillances et du calendrier des applications d'insecticides (Zalom et al. 1983). Selon Zalom et al. (1983) le taux de développement des insectes est basé sur l'accumulation de chaleur mesurée en temps physiologique plutôt que chronologique, le nombre de générations par an est principalement déterminé par la température. C'est ainsi que plusieurs générations peuvent se succéder au cours de l'année. Le changement climatique affecte l'état d'abondance des insectes et les températures élevées à l'avenir (réchauffement climatique) peuvent ainsi augmenter les dégâts sur les cultures en augmentant le nombre de générations et en accélérant leur développement. Les données obtenues dans la présente étude peuvent aider à prédire les générations annuelles de *C.*

capitata et les périodes prévues de l'apparition des générations annuelles sur le terrain sous le climat actuel en fonction des besoins thermiques accumulés.

Selon nos données, la durée moyenne du cycle de vie pendant une année de janvier à décembre 2016 est de 37,6 jours et le nombre de générations annuelles est de neuf avec une moyenne de 0,76 génération par mois lorsque la température annuelle moyenne est de 18,9°C. Pendant la saison 2017, la durée moyenne du cycle de vie a été de 36,3 jours et le nombre de générations annuelles a été de neuf avec une moyenne de 0,73 génération/mois lorsque la température annuelle moyenne est de 18,3°C. Par contre Oukil (1995) signale que la cératite développe jusqu'à 6 générations par an en Algérie. Le développement complet de la cératite est très variable pour une même région et dépend de facteurs climatiques, notamment la température, ainsi que des espèces fruitières sur lesquelles les œufs sont pondus (Khoury, 1998 ; Ramade, 2003). Le nombre de générations annuelles varie considérablement en fonction de la disponibilité des fruits hôtes. Dans le même ordre d'idées Ali ahmed Saadoudi (2011) affirme que la densité de la population de la cératite dépend de la présence, la diversité des plantes hôtes, les conditions climatiques ainsi que la situation géographique des vergers par rapport aux vergers mitoyens. En effet, nous avons pu observer l'apparition d'une génération au cours de l'hiver qui coïncide avec la maturation de différentes variétés d'agrumes. Cette génération est la plus longue mais elle se compose d'une densité de population de mâles plus faible en nombre. Deux générations ont eu lieu au printemps avec une durée moyenne de 35 jours et un nombre moyen hebdomadaire de 46,5 et 61,9 mâles/génération respectivement en 2016 et 2017. Ces deux générations coïncident avec la maturation des nèfles, des variétés tardives d'agrumes et des pêches. Les quatre générations qui se sont produites en été sont les plus courtes (22 jours) mais avec un nombre moyen de mâles de 242 et 271 en 2016 et 2017 où plusieurs fruits hôtes sont disponibles aux mouches. Il s'agit des pêches tardives, prunes, poires, cerises, figues ...etc.). Deux générations se sont produites en automne, elles ont une durée moyenne de 45 jours et se compose d'une densité de population de mâles faible de 35 et 37,3 respectivement en 2016 et 2017. Elles coïncident avec la maturation des figues, des figues de Barbarie, des coings et des variétés précoces d'agrumes.

La prédiction de l'apparition des générations annuelles de la cératite sur le terrain a été réalisé en déterminant la relation entre les unités de chaleur thermique accumulées

exprimées en degré-jours (DJ) d'une part, et d'autres part les fluctuations de la population des mâles de l'insecte au cours de la période de début janvier à fin décembre 2016 et 2017. En effet la comparaison entre les dates attendues et estimées, par la méthode d'accumulation de chaleur requise calculée et celles observées sur le terrain, est réalisée sur deux saisons successives de 2016 et 2017, pour chaque génération. Comme démontré auparavant les prévisions donnent un total d'environ 9 générations où les dates d'apparition et la durée de celles-ci ont été mises en parallèle avec les résultats obtenus par l'application du degré/jour. Il ressort que d'une façon générale, la date, le nombre et la durée des générations de la mouche concordent avec les résultats obtenus par la théorie des degrés/jours. Cependant, il convient de noter qu'il est préférable pour une bonne prédiction que la période entre les dates prévues et les dates réelles observées soit aussi courte que possible et que le pic prospectif ait lieu avant le pic réel.

L'utilisation des piégeages permet d'estimer la présence, l'abondance saisonnière et la répartition spatiale des adultes de la mouche méditerranéenne des fruits et de faire des prédictions sur les niveaux d'infestation sur le fruit des plantes hôtes (Diaz-Fleischer et al. 2014). Selon les captures réalisées sur trois années successives de 2016 à 2018, le vol des adultes de la cératite est observé au cours de toute l'année sur les différentes cultures fruitières avec des densités de populations différentes qui dépendent de la présence et de la diversité des plantes hôtes. En effet, les captures les plus importantes ont eu lieu en Juillet (1200) et Aout (1102 mouches) du fait de la présence et de la coïncidence avec la récolte des Pêches et des Figues. Cette forte pullulation du ravageur est accentuée non seulement par les conditions climatiques favorables à la reproduction, mais aussi aux températures relativement élevées et la rareté de précipitations pendant la période qui coïncide avec la maturation de ces fruits.

Sur agrumes, il existe deux périodes de grande activité de la cératite à savoir novembre et décembre sur les Citrus précoces tel que la Thomson navel et la clémentine et en Janvier sur les oranges de saison. Dans ces conditions optimales associées à la présence des hôtes, la mouche du fruit se reproduit d'une manière continue enchainant ainsi génération après génération. Nos résultats sont conformes avec ceux d'Ali Ahmed-Sadoudi (2007) et Settaoui (2017) qui souligne un maximum de captures durant le mois de novembre sur agrumes. Ils sont par contre, différents de ceux d'Ali Ahmed-Sadoudi et al. (2011) en Kabylie où ils ont eu des captures totales de 4590 sur oranges (Thomson), 1933 sur

figuiers et 1044 sur abricot (Hatif colomber). Contrairement à nos résultats le plus petit nombre de capture (136 individus) a été observé sur les pêches en 2003 et ont enregistré le plus grand nombre de captures totales de mouches de 4590 sur les oranges (Thomson), 1933 mouches sur les figuiers et 1044 mouches sur abricot (Hatif colomber). En 2003, le plus petit nombre de mouches capturées sur les pêches est de 136. Dans les vergers d'étude, il y a une différence dans la densité des populations de la mouche. Le nombre maximal de captures a eu lieu sur Pêches et Figs. La Thomson navel occupe la 3^{ème} place. Les captures les plus faibles ont été dénombrées sur les agrumes tardifs tels que la Valencia late. Cette variation dans les captures de la cératite est due aussi bien aux facteurs abiotiques (température, humidité relative, précipitations) et qu'aux facteurs biotiques (Plantes hôtes, ennemis naturels) ainsi que de l'intervention de l'homme (Traitements phytosanitaires et entretien de cultures) (Israely et al. 1997 ; De Villiers et al. 2013). De ce fait, les facteurs climatiques notamment la température et les précipitations peuvent être à l'origine de la différence des niveaux de populations observées. En effet, les baisses de températures associées aux grandes pluies, augmentent considérablement la mortalité des adultes. D'après Bodenheimer (1951), les limites supérieures et inférieures au développement de la Cératite se situent en 9°C et 35°C. Même les œufs deviennent infertiles à des températures minimales allant de 4 à 7°C, réduisant ainsi la prolifération du ravageur (Delrio, 1985).

La surveillance des mouches des fruits est un élément clé pour contrôler les insectes dans tout système de gestion de ravageurs (Malavasi et Zucchi, 2000). La détection précoce au moyen de pièges nous renseigne sur l'évolution du cycle biologique des ravageurs et permet d'intervenir au moment opportun et ainsi, de limiter le recours aux pesticides. C'est pourquoi le choix et la performance du pièges est essentielle car l'efficacité et la réussite de la surveillance et le contrôle des mouches des fruits dépendent de l'efficacité des pièges. Trois types de pièges à savoir le piège à phéromone et le piège englué jaune et bleu ont été utilisés pour la capture des adultes de la Cératite. Ils sont placés dans 5 vergers de néflier, d'abricotier, de pêcher, de poirier et de Figuiers et dans 8 vergers d'agrumes (Thomson navel, Clémentine, New hall navel, Navelina, Washington navel, Valencia-late, Navelate, Double fine améliorée). Il est connu que l'utilisation des pièges à phéromone permet la capture des mâles adultes de la mouche, ce qui nous renseigne sur la cinétique, les attaques du ravageur, la date d'émergence où d'apparition d'une nouvelle génération. Par rapport aux pièges englués, le piège à phéromone est le

plus efficace quant au nombre d'individus capturés. En effet le cumul des captures sans tenir de la spéculation s'élève à 11.777 captures. Par contre, la captures à l'aide des plaques engluées jaunes s'élèvent à 3093 individus tout comme d'ailleurs les plaques engluées bleues où les captures sont de 2048 individus. En résumé, il apparait clairement que les plaques engluées jaunes, bien qu'ils ne soient pas aussi efficaces que les pièges à phéromone, restent cependant, plus performants que les plaques engluées bleues. Les pièges englués colorés sont Scoz et al. (2006) généralement utilisés pour la surveillance des parasitoïdes et prédateurs. obtenu d'excellents résultats dans l'utilisation de pièges collants jaunes sur *Anastrepha fraterculus* Wiedemann (Diptera : Tephritidae).

La mouche méditerranéenne des fruits s'attaque à un grand nombre d'espèces fruitière (Mazih, 1992) et cause ainsi des dégâts considérables qui peuvent engendrer, dans le cas de fortes attaques, l'anéantissement de la quasi-totalité de la récolte. Les dommages causés par la cératite se caractérisent par les piqûres de pontes et les galeries dans les fruits qui constituent une voie de pénétration des champignons et des bactéries responsables de la décomposition et de la chute prématurée des fruits. Ce sont les femelles et les larves qui engendrent ce genre de dégâts aux fruits. Ces derniers sont considérés comme impropres à la consommation et à la commercialisation. De ce fait, les fruits contenant les larves de la cératite doivent être détruits de telle sorte à briser le cycle de reproduction du ravageur.

L'estimation de l'infestation selon le taux de piqûres sur le fruit piqué, révèle que celui des pêches est plus élevé que celui des figes. La pêche est un fruit sucré par rapport à certains fruits sachant que la variété Redhaven est la plus riche en sucres réducteurs (13,20 g/100 ml de jus). Elle se caractérise par une faible épaisseur de sa peau que la femelle perce facilement à l'aide de son ovipositeur lors de la ponte (Fahad et al. 2013). Selon Ali Ahmed (2007), elle est extrêmement appréciée par la cératite en raison de sa richesse en sucre qui jouerait un rôle déterminant dans la reproduction. Toujours selon Ali-Ahmed Sadoudi (2007), les sucres et les protéines jouent un rôle prépondérant dans l'infestation des fruits par la cératite. La pêche semble, donc, être l'hôte préférentiel de cette dernière. Elle est classée parmi les plus attaquée en Méditerranée. Dans le même ordre d'idées, la goyave et la papaye du fait de leur richesse en sucre, sont fortement infestées (Bautista & Harris, 1996). Au Maroc la cératite est considérée comme un ravageur majeur des pêches (Fahad et al. 2013). Elle est l'hôte préférentiel de la cératite au printemps (Fahad et al.

2013). D'après Ali Ahmed Sadoudi (2007), les variétés les plus infestées sont celles dont les fruits ont des couleurs vives. En Tunisie, les plantes hôtes cultivées, essentiellement les arbres fruitiers et les conditions climatiques optimales offrent à la mouche méditerranéenne un milieu favorable à son développement pendant la période estivale (Lachiheb, 2008). L'attractivité de la cératite à l'égard de certaines variétés serait également due aux composés volatils qui constituent des stimuli olfactifs (Quillici, 1993) qui sont émis, par la variété d'orange Thomson avant la maturation des fruits. Les paramètres chimiques tels que la teneur en huiles essentielles de l'écorce et la nature des substances volatiles pourraient jouer un rôle non négligeable dans l'attraction ou la répulsion du ravageur (Dhouibi et al. 1995), C'est ce qui expliquerait, en partie, la faible infestation observée sur le citron qui se distingue par son acidité, sa richesse en huiles essentielles et son écorce épaisse (Sampaio et al. 1984). Nous avons observé lors de notre travail, les attaques sur agrumes se caractérisent par plusieurs piqûres sur le même fruit, c'est ce qui va à l'encontre des résultats de Descoins (2007) qui signale qu'un fruit préalablement piqué par une femelle ne peut pas être attaqué par une autre femelle à cause de la présence de phéromone anti-ovipositeur déposée à la surface du fruit. Ainsi la première femelle empêche les autres femelles à pondre sur le même fruit. Une telle situation pourrait s'expliquer par une population importante de la mouche méditerranéenne dans les vergers qui induit une forte compétition des femelles sur les sites de ponte. À un certain seuil de densité, la compétition se manifeste par des attaques de plusieurs femelles à la fois sur un même fruit. Sur agrumes on trouve moins de larves dans le fruit comparativement aux nombres de piqûres. La majorité des piqûres sur les agrumes ne sont pas destinées à la ponte mais plutôt à nourrir les adultes. Selon Gilmour (1968) ce comportement, permet à l'adulte d'emmagasiner de l'acide citrique pour être utilisé en hiver par le métabolisme de l'insecte. De plus, Sampaio et al. (1984) rapportent que l'acidité des fruits d'orange peut agir sur le taux d'infestation d'une manière non significative. Selon Delrio (1985) les œufs et les larves présentent une très forte mortalité à cause de la toxicité des essences de l'écorce de la peau des agrumes, ce qui peut expliquer le nombre faible de larves par fruit. Selon Soria (1963) et Dhouibi et al. (1995), la mortalité larvaire chez les Citrus, en particulier l'oranger, pourrait être due à la composition chimique de l'écorce des fruits. En effet, une faible teneur en jus et en huiles essentielles de la peau entraîne une forte mortalité des œufs et des jeunes larves (Bertin et al. 1998). De même les sécrétions gommeuses des fruits entraînent également la mort des larves, c'est pourquoi, les variétés tardives d'agrumes sont plus résistantes aux attaques

de la cératite (Ortu, 1982). Au sein d'une même espèce d'agrumes, la cératite manifeste une préférence pour les fruits dont la maturité est avancée (Ali Ahmed-Sadoudi, 2007), et en particulier pour les cultivars ayant une texture huileuse de l'écorce du fruit (Delanoue et Soria, 1962). Selon Settaoui et al. (2017), les dégâts commencent au début de novembre sur les variétés précoces des agrumes et se poursuivent jusqu'à la fin d'avril.

Les Nèfles ont été décrites comme hôte de *C. capitata* en tropiques (Eskafi & Kolbe 1990 ; Liquido et al. 1990), l'île de Madère (Pereira et al. 2000), le nord-ouest de l'Argentine (Ovruski et al. 2003), aux Açores (Medeiros et al. 2007). Cependant, dans les régions méditerranéennes comme l'Algarve au sud du Portugal (Entrudo-Fernandes et al. 2000) et Thessalonique (nord de la Grèce) (Papadopoulos et al. 2001a), aucune infestation par la mouche méditerranéenne n'a été observée chez ce fruit. Dans notre étude, les nèfles sont faiblement infestées. Papadopoulos et al. (2001a) ont suggéré que les différences d'infestation des nèfles pourraient être dues à la faible densité de la population adulte de la cératite au moment de la maturation des nèfles ou à la présence d'autres fruits hôtes préférés. Dans le nord-ouest de l'Argentine le néfler joue un rôle critique en tant qu'hôte alternatif entre mai et septembre, qui est la période de l'année où les hôtes préférés ne sont pas disponibles comme cela se produit aux Açores entre Mars et juin (Ovruski et al. 2003). Pareillement en Mitidja, le Néfler joue un rôle important dans la survie de la cératite, et constitue un hôte alternatif permettant à la génération hivernante de débiter une nouvelle génération sur celui-ci. En effet la période de maturation du néfler coïncide avec la fin des dernières récoltes des variétés tardives d'agrumes.

La cératite manifeste une préférence pour certaines variétés, en particulier, les variétés précoces et tardives à peau mince (Chouibani et al. 2003) ainsi que les fruits les plus volumineux (Katsoyanos, 1986 ; Katsoyannos et al. 1997 ; Papadopoulos et al. 2001b) qui présentent une surface sèche et une couleur jaunâtre (Féron. 1962). En effet, l'épaisseur de l'épiderme a un rôle déterminant dans l'infestation des fruits et nos observations se recoupent avec celles de Papadopoulos (2001) qui suggère que les adultes de la cératite s'attaquent aux fruits les plus volumineux. Au Monténégro, Les figues sont les premiers fruits infestés de la saison (juillet et août) (Radonjić, 2012) et qu'elles sont avec les kakis, très importants dans la reproduction de la mouche en particulier au début de l'été et au début de l'automne. Alors qu'en Irak, la densité numérique la plus élevée de la mouche dans les vergers de figues a été observé en août 2009 (Khalaf et al. 2012).

Par ailleurs l'étude de l'influence de la variété sur quelques paramètres biologiques de *C. capitata* a été étudié. Il ressort que la durée de pupaison diffère selon la variété et les conditions climatiques. La plus longue, dure $21 \pm 2,83$ jours chez la variété Thomson alors que la durée la plus courte est observée chez les pupes issues de la Pêche ($8 \pm 0,5$ jours). Nous avons constaté que les pupes issues des fruits d'été ont une durée de pupaison plus courte du fait des températures estivales que celles issues des fruits d'hiver, ce qui est conforme avec les résultats de Ali-Ahmed Sadoudi (2007). Toujours selon ce dernier auteur, la durée de pupaison est sous l'influence des facteurs climatiques, en particulier la température et l'humidité. A une température de 15°C et une humidité relative de 72,9%, la durée de pupaison chez la variété d'orange Thomson est de 18 jours (Ali Ahmed Sadoudi et al. 2007). Celle-ci s'accélère, lorsque la température augmente et la pupaison passe de 23 ± 3 jours à $18 \pm 4^{\circ}\text{C}$ à 7 jours à $33 \pm 1^{\circ}\text{C}$. D'après Shoukry & Hafez (1979) l'humidité n'a pas d'influence sur la durée de pupaison. Ils ont obtenu une durée moyenne de pupaison de 7 jours à 30°C , celle-ci est de 11 jours à 25°C et de 9 jours à 27°C .

Selon Debouzie (1977), le taux d'émergence de la cératite varie également, en fonction des conditions climatiques. En effet, les pupes sont très sensibles à la température ambiante car celle-ci influence leur durée et la vitesse de leur développement ainsi que leur taux de mortalité (Crovetti et al. 1984). Le taux d'émergence dépend aussi de la qualité nutritive des fruits (Honek et al. 2002 ; Ali Ahmed Sadoudi et al. 2011). Il est inférieur à 50% chez les agrumes selon les auteurs ci-dessus. L'acidité des agrumes ainsi que la présence des huiles essentielles dans leur écorce entraîne une forte mortalité larvaire qui se traduit par des émergences incomplètes (Soria, 1963 ; Delrio, 1985 ; Loussert, 1987). En outre les agrumes arrivent à maturité en période froide (Novembre) où la température maximale ne dépasse pas $16,2^{\circ}\text{C}$. Le taux d'émergence est de 23% à une température de 17°C et une humidité relative de 72% sur la variété d'orange Thomson (Haliche et al. 2007). Les température moyenne optimales coïncident avec les mois de juin et juillet, période de la récolte des pêches où la teneur en protéines est élevée qui favorise le développement larvaire à l'intérieur du fruit.

Par ailleurs, le sex-ratio est un bon indicateur de l'évolution d'une population, il est compris entre 0,44 et 0,63 et il est en faveur des femelles issues de la pêche Redhaven (0,61) et de la figue (0,63). Sur agrumes, le sex-ratio est inférieur à (< 50) et la proportion des sexes tend en faveur des femelles lorsque la température est élevée (Ali Ahmed

Sadoudi, 2007), ce qui est en accord avec nos résultats dans la mesure où le sex-ratio est en faveur des femelles sur les deux variétés d'été, la figue et la pêche Redhaven). Le sex-ratio va vers les femelles sur les variétés fruitières où les taux d'émergence sont les plus élevées c'est le cas de la pêche Redhaven (Ali Ahmed Sadoudi, 2007). Selon Albajes et al. (1980), la compétition larvaire augmente la proportion des femelles. Le sex-ratio en faveur des femelles est avantageuse pour l'espèce car elle entraîne un maximum d'accouplements dans une population et crée une très forte motivation sexuelle chez les mâles (Causse, 1974).

2- Pathogénicité de *S. feltiae*

La souche Turque de *S. feltiae* révèle une grande pathogénicité vis-à-vis de différents stades de *C. capitata*. Elle a, en effet, provoqué un effet choc au bout de 24 h à la dose 2 et 3 sur les larves. Il est connu que ce sont le 3^{ème} stade larvaire qui sont le plus susceptibles à l'infection par les nématodes (Yee et Lacey, 2003 ; Barbosa - Negrisoli et al. 2009 ; Kamali et al. 2013 ; Nouh & Hussein, 2014 ; Langford et al. 2014 ; Shaurub et al. 2015). Les premiers signes de l'infection se reconnaissent au changement de couleur chez les larves qui apparaissent dès les premières heures qui suivent le traitement et la mortalité des premiers individus a lieu au bout de 6h après le traitement. La forte sensibilité à l'infection des larves par rapport aux pupes et aux adultes est due à la durée de leur développement, à leur activité dans le sol, et à leurs multiples voies d'ouverture naturelles (Kamali et al. 2013). En effet, ces nématodes Steinernematides ont une relation mutualiste avec les bactéries des genres *Xenorhabdus* (Kaya & Gaugler, 1993). Les stades juvéniles infectieux (IJ) pénètrent dans l'hôte par des orifices naturels ou par la cuticule d'insecte (Peters & Ehlers, 1994) et libèrent leurs bactéries symbiotiques dans l'hémocoèle. L'hôte est rapidement tué par septicémie.

Ces ouvertures naturelles du corps des larves et leur tégument faiblement sclérotinisé par rapport au tégument nymphal, facilitent l'infection par le nématode. Mais, la plus grande susceptibilité des larves aux nématodes peut être liée à une plus grande locomotion de celles-ci et une grande libération de CO₂ qui joue un rôle important dans l'attrait des nématodes entomopathogènes (Yee & Lacey, 2003). En outre *S. feltiae* peut migrer, rechercher et infecter les larves d'insectes au sein même du fruit infesté en pénétrant par les trous de ponte causés par les femelles ayant pondu (Mahmoud et al. 2016). L'infection des larves se produit en un temps très court et la mortalité enregistrée, est de 82%, 24

heures après le traitement à la dose 3. Les larves ayant survécu continuent leur transformation, mais meurent après avoir atteint le stade pupé (Yee et Lacey, 2003 ; Sirjani et al. 2009). La pathogénicité de la souche turque de *S. feltiae* (09-31) a provoqué la mortalité de toutes larves avant qu'elles n'atteignent le stade pupé, ce qui met en évidence sa grande virulence contre les larves et son adaptation aux larves de Diptères (Lewis et al. 2006 ; Karagoz et al. 2009).

Les pupes jeunes de *C. capitata* sont plus sensibles à l'infection que les pupes âgées. Selon Mahmoud et Osman (2007) la pathogénicité de *S. feltiae* contre *Bactrocera zonata* (Diptera : Tephritidae) cause une mortalité forte de 32% chez les pupes âgées de 4 jours et 20% chez les pupes âgées de 6 jours. Malgré la mortalité faible chez les pupes âgées de 6 jours de *C. capitata* celle des émergentes est, par contre, élevée. En revanche, Langfort et al. (2014) signalent que les pupes de *Bactrocera tryoni* n'ont montré aucune sensibilité vis-à-vis des nématodes entomopathogènes. Par conséquent, la sensibilité est fonction de l'espèce et de son stade de développement à l'égard des nématodes entomopathogènes. Les adultes morts portant des nématodes juvéniles, ont des ailes qui ne sont pas complètement déployées. Le gros charançon du pin, *Hylobius abietis* meurt après son émergence lorsqu'il est infecté par *Heterorhabditis downesi* ou *Steinernema carpocapsae* (Williams et al. 2015). Plusieurs hypothèses sont émises pour expliquer les différences de sensibilité des différents stades de développement des insectes. En effet, la faible susceptibilité des pupes vis-à-vis des nématodes, peut s'expliquer par le fait qu'il y a peu d'accès naturels, une cuticule plus dure et un système immunitaire ou des barrières physiques qui empêchent la pénétration des nématodes (Langford et al 2014 ; Hübner et al. 2017 ; Garriga et al. 2018 ; Labaude & Griffin, 2018). Malgré cela, le stade pupal de *Anastrepha fraterculus* s'avère très sensible aux entomopathogènes notamment à l'égard de *H. bacteriophora* et *S. riobrave* dont les mortalités respectives sont de 62,5% et 40% (Patterson et al. 1999 ; Barbosa-Negrisoni et al. 2009). Chez les pupes de *Rhagoletis indifferens* l'entomopathogène a probablement pu pénétrer par les membranes inter segmentales avant la dernière sclérotinisation des téguments. Les nématodes axéniques, en particulier le genre *Steinernema*, sont également capables de causer la mort de leurs hôtes en libérant un genre de venin qui contient un taux élevé de protéines protéases (serine carboxypeptidases, trypsins, eukaryotic aspartyl proteases, zinc carboxypeptidases) et protéases inhibiteurs (Lu et al. 2017). Quand les pupes ou les larves sont infectées, il apparait des différences dans leurs apparences. Les larves prennent une

couleur jaunâtre tandis que les pupes maintiennent une coloration claire. Les pupes infectées par *S. feltiae* maintiennent leur coloration brun clair. Par contre selon Singh et al. (2012), les pupes infectées ont une coloration rouge typique en raison du pigment produit par la bactérie entérique elle-même.

Les paramètres environnementaux tels que la température, l'humidité, les types de végétation et les propriétés du sol peuvent aussi bien affecter la survie que la virulence des nématodes (Shaurub et al. 2015). Cette dernière est d'autant plus élevée que la température est forte. A 15°C et 25°C, il y a une différence significative entre la mortalité sept jours après traitement des larves âgées. 15 et 20 ° C, la différence est également significative entre la concentration de nématodes et la mortalité des jeunes larves.

L'humidité ou la teneur en eau du sol joue également un rôle primordial dans la mobilité des larves et elle est essentielle à leur survie des II et à leur mouvement (Baimey et al. 2015 ; Filgueiras et al. 2016). Quand l'humidité est extrême, basse ou élevée (près de la saturation), la virulence du nématode diminue (Molyneux & Bedding 1984 ; Köppenhöfer et al. 1995). Nos résultats montrent que l'efficacité de *S. feltiae* est similaire à 50% et à 100% d'humidité relative. A 75%, l'infection est plus efficace contre les larves du 3^{ème} stade et les pupes où la mortalité respective est de 82% et 38%. Si dans les sols sableux, la virulence augmente, celle-ci diminue dans les sols limoneux et argileux (El-Sadawy 2001 ; Grant & Nillani 2003 (a, b) ; Alekseev et al. 2006). Plusieurs hypothèses ont été émises pour expliquer la faible virulence du nématode aux humidités élevées : - la saturation en eau du sol a une concentration en oxygène faible et restreint, donc, la mobilité nécessaire aux nématodes pour infecter l'hôte. Le peu d'humidité dans le sol constitue également un facteur limitant pour la locomotion des nématodes (Glazer, 2002). Dans ce cas, le nématode développe une adaptation physique et comportementale qui lui permet de réduire son métabolisme, en entrant dans un état d'anhydrobiose (Grewal, 2000 ; Glazer, 2002). Pour éviter cet état d'anhydrobiose, il suffit d'humidifier le sable pour provoquer de nouveau la virulence de l'entomopathogène qui entre dans cet état d'anhydrobiose quand elles sont exposées à de faibles taux d'humidité (Köppenhöfer et al. 1995).

3- Pathogénicité de *B. bassiana*

Les résultats obtenus lors du traitement des larves du 3^{ème} stade sont en accord avec plusieurs auteurs qui rapportent que le stade larvaire de la mouche méditerranéenne des fruits est vulnérable à l'infection par des champignons entomopathogènes (Ekesi et al. (2005), Quesada - Moraga et al. 2006) ont reporté que le stade larvaire de la mouche méditerranéenne des fruits est le plus. Contrairement à Dimbi et al. (2003) qui n'ont observé aucun effet du *M. anisopliae* et de *B. bassiana* sur les larves de *C. capitata*, *C. rosa* et *C. cosyra*, bien qu'ils soient hautement virulents contre le stade adulte de ces mouches.

Dans nos essais, quelques larves traitées ont survécu à l'infection et ont continué à se nymphoser, mais la mortalité a eu lieu au stade pupal. Cette infection par le champignon *B. bassiana* BAUM M6-4 en phase de pupes entraîne une réduction significative d'émergence des adultes de *C. capitata*. Des résultats similaires ont été signalés par Mochi et al. (2006) lorsque la surface du sol est traitée par une suspension conidiale de *M. anisopliae*, ce qui a contribué à réduire la taille de la population d'une génération à l'autre. L'isolat de *B. bassiana* BMAUM M6-4 a produit une conidiation dense sur les pupes traitées. Le même phénomène a été observée dans le test biologique établi par Ekesi et al. (2002, 2005). En effet, ces champignons affectent les insectes par une pénétration directe à travers leur cuticule (Butt et al. 2016 ; Sabbahi, 2008 ; Vega et al. 2009). Au contact de la cuticule, l'unité infectieuse du champignon, la spore, germe et exerce des pressions enzymatiques et mécaniques pour pénétrer via les téguments (Mondal et al. 2016). Certaines souches produisent des toxines non enzymatiques telles que la beauvericine, les beauverolides, les bassianolides, les isarolides qui accentuent et accélèrent le processus d'infection (Robert, 1981). Le champignon colonise ensuite l'hémocoel et les organes internes de l'insecte et cause sa mort pour pouvoir sporuler à l'extérieur de celui-ci (Ferron, 1978 ; Sabbahi, 2008).

Les traitements de pupes montrent nettement que celles-ci présentent un taux d'émergence faible comparé au témoin. La sensibilité des pupes de la mouche méditerranéenne des fruits aux isolats de *B. bassiana* est avéré et leur taux de mortalité varie de 14 à 95,5% (Quesada-Moraga et al. 2006). Cette même sensibilité se retrouve chez *Bactrocera zonata* (Diptera : Tephritidae) (Mahmoud, 2009). Selon Lezama-Gutierrez et al. (2000), *M. anisopliae* réduit l'émergence des adultes de 33 à 49% en

fonction du type de sol et provoque une mortalité de 37,9 à 98,75 chez les larves et les nymphes d'*Anastrepha ludens* (Diptera : Tephritidae). De même une concentration plus élevée de conidies (1×10^8 conidies/ml) de *B. bassiana* et de *M. anisopliae* est nécessaire pour prévenir l'émergence de *C. capitata* (Alves et al. 2004). La pathogénicité de *M. anisopliae* contre les pupes de 3 espèces de Tephritidae, y compris *C. capitata*, est fonction de l'âge des pupes et la sensibilité de celles-ci diminuent avec l'augmentation de leur l'âge. Par ailleurs, Dans une étude récente, Oreste et al. (2015) ont étudié l'interaction entre l'âge des pupes de 2, 4 et 6 jours et les souches fongiques d'une part et d'autre part l'émergence des adultes de *C. capitata* et la mortalité des pupes. En effet, les traitements fongiques avec des souches de ATCC 74040 et AL1 de *B. bassiana* ont donné 49,16 et 51,33% des pupes mycosées chez les pupes de 2 jours tandis que le taux de mycoses chez les pupes âgées de 4 et 6 jours varie de 27,16 à 39%, (Oreste et al. 2015). Selon Beris et al. (2013), la sensibilité plus élevée des jeunes pupes peut être attribuée à leur cuticule plus molle contrairement aux pupes âgées de 6 jours en raison de leur cuticule épaisse et complètement sclérotinisée. Il est vraisemblable que la méthode d'application des champignons entomopathogènes, le stade biologique et la composition biochimique de la cuticule des insectes soient des facteurs qui influent sur la virulence des champignons contre les insectes nuisibles. (Ferron, 1981).

La mortalité des adultes issus de pupes traitées en post-émergence due à l'infection par *B. bassiana* s'explique par le contact avec l'agent pathogène lors de l'émergence des adultes dans le sol traité qui constitue une source d'inoculation. Quant à l'infection fongique post-adulte, elle est associée à la pénétration de l'hyphe à travers le tégument du puparia dans le corps de l'adulte avant l'émergence (Ekesi et al. 2002).

Le traitement fongique à base de *B. bassiana* BMAUM M6-4 contre les adultes de *C. capitata* a provoqué une forte mortalité chez les deux sexes. Cependant, cette mortalité est plus élevée chez les mâles que celle chez les femelles et ce, pour les deux traitements (essai biologique par ingestion et par contact). Par conséquent, les mâles adultes sont plus sensibles que les femelles comme dans notre cas (El-Akhdar et al. 2009 ; Mahmoud 2009 ; Boudjelida et Soltani, 2011). De plus, la TL_{50} est également plus court chez les mâles que les chez les femelles aussi bien dans le traitement par ingestion que celui par contact, ce qui confirme, une fois de plus, la sensibilité des mâles à l'infection par les champignons entomopathogènes par rapport aux femelles.

La mortalité induite par le traitement par ingestion est plus forte que le traitement par contact, pour les deux sexes. La plupart des études antérieures utilisent les champignons entomopathogènes via la cuticule. A cet effet, plusieurs études ont démontré que la toxicité est due à l'action sélective des enzymes sécrétées par le champignon qui agissent sur les composants chimiques de la cuticule de l'insecte (Ekesi et al. 2003 ; Yee & Lacey, 2005). En effet, la voie d'invasion de l'hôte la plus courante est l'infection externe, bien qu'une infection par le tube digestif soit possible (Goettel and Inglis 1997). Konstantopoulou & Mazomenos (2005) ont constaté que *B. bassiana* a un effet toxique lors d'essais biologiques par ingestion sur les adultes de *Bactrocera oleae*. Ortiz-Urquiza et al. (2010), explique que l'ingestion des enzymes sécrétées par le champignon provoque des lésions graves dans l'épithélium de l'intestin moyen.

La mortalité des mouches évolue en fonction du temps ; c'est à partir du troisième jour après inoculation que les premières mortalités ont été enregistrées pour l'ensemble des traitements réalisés. Dans une étude similaire, l'effet de *M. anisopliae* contre le quatrième stade larvaire et les adultes de *C. capitata* ont montré une toxicité élevée qui survient entre le 3^{ème} et le 6^{ème} (Yee & Lacey, 2005 ; Boudjelida & Soltani, 2011). Dans notre essai, il y a une mortalité cumulative très élevée qui peut être expliquée par la sporulation et la multiplication du champignon sur les cadavres. Quand l'hôte meurt, le champignon émerge des cadavres et produit des conidies aériennes à la surface lorsque les conditions environnementales sont favorables, en particulier l'humidité. Les conidies peuvent être disséminées par le vent, les éclaboussures de pluie et d'autres facteurs abiotiques et biotiques. La sporulation d'isolats sur des cadavres constituera un avantage important pour la lutte biologique contre les parasites, car les cadavres constitueraient une source d'inoculum pour une infection plus poussée des larves de la mouche méditerranéenne et des pupes. De plus ils assurent le cycle de vie et la persistance des agents pathogènes dans le sol (inoculum) et contribuent à la dissémination dans l'environnement par la pluie, le vent, des insectes ou à la transmission horizontale (Dowd & Vega 2003 ; Meyling et al. 2006 ; Quesada-Moraga et al. 2006 ; Toledo et al. 2007).

***CONCLUSION GENERALE ET
PERSPECTIVES.***

Conclusion générale et perspectives.

Le présent travail concerne l'étude d'un ravageur important en arboriculture fruitière, qui ne cesse de causer des dégâts spectaculaires et préoccupe les producteurs et exportateurs des fruits. Les travaux de recherche entrepris dans le cadre de cette thèse, constituent une contribution à la connaissance de la bio-écologie en particulier la dynamique des populations et de la lutte contre la cératite appelé communément mouche méditerranéenne des fruits.

Les objectifs visés consistent, d'une part, à estimer le nombre de générations annuelles de l'insecte et de prédire ses périodes d'apparition dans le but de sélectionner le moment opportun d'intervention contre ce nuisible. D'autre part, à l'élaboration, dans le cadre de la lutte biologique, des moyens de lutte à base de micro-organisme entomopathogènes capable d'infecter les différents stades de la Cératite, pour cela nous avons testé une suspension conidienne du champignon *Beauveria bassiana*. Et suspension du nématodes entomopathogène *Steinernema feltiae*.

Le vol des adultes de la mouche méditerranéenne des fruits est observé tout au long de l'année et présente des effectifs importants durant la période estivale, à cause de la présence des conditions écologiques et nutritionnelles favorables au développement de cet insecte nuisible ainsi qu'une diversification de fruits hôtes. La Mitidja est une zone à vocation arboricole par excellence, On y trouve une diversification des cultures fruitières et des conditions climatiques idéales qui assurent un développement continu de la mouche méditerranéenne des fruits. Les résultats obtenus sur la base de deux méthodes de calcul du nombre de générations ont mis en exergue 9 générations sur les spéculations fruitières étudiées dont la première apparait entre le premier janvier et le mois d'avril. Les prédictions de l'apparition des générations annuelles de la cératite sur le terrain ont donné également 9 générations. Ces prévisions fournissent un outil précieux pour la lutte contre cet insecte.

L'étude conduite dans les vergers de la région de la Mitidja a révélé une infestation de grande ampleur par la mouche méditerranéenne des fruits. En effet, il en ressort une forte charge de cératite dans les vergers visités, qu'il soit traité chimiquement ou non, ce qui est reflété par le taux global d'infestation des fruits considérable (>50%). La pullulation de ce ravageur est certainement accentuée par les conditions climatiques ; températures relativement élevées et la rareté de précipitations dans cette région. D'autre part, elles seraient

dues à l'absence d'une stratégie de lutte intégrée et adéquate pour contenir l'expansion de l'insecte. En effet, le fruit hôte le plus apprécié par la cératite en Mitidja est la pêche, elle est suivie par les figues et des agrumes principalement la Thomson et la clémentine. Les nèfles et l'abricot sont les moins touchés par les attaques mais ils semblent avoir un rôle important en tant qu'hôtes alternatifs entre février et juin.

Le piège à phéromone est le plus efficace quant aux captures par rapport au piège englué jaune qui lui-même est plus performant que celui de couleur bleue. Les captures les plus importantes ont eu lieu entre juillet et août, c'est-à-dire au moment de la récolte des Pêches et des Figs. Vraisemblablement la durée de pupaison diffère selon la variété. En effet chez la variété d'orange Thomson la durée de pupaison est longue et dure $21 \pm 2,83$ jours alors que la durée chez la Pêche est beaucoup plus courte, elle est de $8 \pm 0,5$ jours. Nous avons constaté également que les pupes issues des fruits d'été ont une durée de pupaison plus courte du fait des températures estivales, que celles issues des fruits d'hiver.

Le taux d'émergence varie selon la spéculation et la pêche (Redhaven) se distingue par un taux très important qui varie de 73,3 à 78%. Ensuite viennent les figues (Azenjer) avec 71,4 et 76% en fonction de l'année. Les abricots ont un taux d'émergence plus élevé que celui des nèfles qui vient en dernière position. D'après les résultats la sex-ratio varie selon la spéculation. Elle penche du côté des femelles issues de la pêche (Redhaven) et des figues tandis que le sex ratio respectives des mouches issues des abricots et des nèfles se situe entre 0,59 et 0,55. Le sex ratio des agrumes est le plus faible, il est égal 0,5.

Les données obtenues dans la présente étude peuvent aider à prédire les générations annuelles de *C. capitata* et les périodes prévues de l'apparition des générations annuelles sur le terrain sous le climat actuel en fonction des besoins thermiques accumulés dans le but de sélectionner les moments opportuns de lutte contre ce nuisible.

Dans le but de proposer des alternatives basées sur l'utilisation de produits bio-insecticides pour lutter contre la mouche Méditerranéenne des fruits, nous avons testé l'efficacité du nématode entomopathogène *S. feltiae*. Ce dernier appartient à la microfaune du sol, il agit en symbiose avec des bactéries pour réussir leur activité insecticide. La souche Turque de *S. feltiae* a révélé une grande pathogénicité vis-à-vis de différents stades de *C. capitata*. Cependant, il existe une différence de sensibilité de différents stades à l'égard de ce nématode entomopathogène.

En effet, les stades immatures de *C. capitata* manifestent une sensibilité variable à l'infection par le nématode *S. feltiae* ; les larves de *C. capitata* se sont révélées plus sensibles à l'infection par l'entomopathogène de par les multiples ouvertures naturelles de leurs corps et le tégument larvaire faiblement sclérotinisé par rapport au tégument nymphal, facilitent l'infection. Cette grande susceptibilité des larves peut être dû à une plus grande locomotion de celles-ci et une grande libération de CO₂ qui joue un rôle important dans l'attrait du nématode entomopathogène.

L'infection de ces larves se produit en un temps très court et la mortalité enregistrée, est de 82% en 24 heures après le traitement à la 3^{ème} dose. Les larves ayant survécu continuent leur transformation, mais meurent après avoir atteint le stade pupe.

De même, les pupes jeunes sont plus sensibles à l'infection que les pupes âgées. Cette différence de sensibilité peut être attribuée à leur cuticule plus molle chez les pupes de 2 jours contrairement aux pupes âgées de 6 jours en raison de leur cuticule épaisse et complètement sclérotinisée.

Les paramètres environnementaux tels que l'humidité du sol peuvent affecter la survie ainsi que la virulence du nématode qui diminue quand l'humidité est extrême, basse ou élevée (près de la saturation). En effet, nos résultats montrent que l'humidité du sol joue un rôle déterminant sur l'efficacité de *S. feltiae* qui est similaire à 50% et à 100% d'humidité relative et donne un taux de mortalité faible. À 75% d'humidité du sol, l'infection est plus efficace contre les larves du 3^{ème} stade et les pupes où la mortalité respective est de 82% et 38%.

Le succès d'un programme de lutte contre les insectes utilisant les nématodes entomopathogènes dépend en grande partie des conditions environnementales dans lesquelles les nématodes sont appliqués. Bien qu'il soit souvent difficile de contrôler l'humidité sur le terrain, une solution réside dans l'addition des adjuvants ou l'utilisation d'un surfactant dans la suspension de nématodes qui sont utilisés comme agents de lutte biologique. L'isolat Turque de *S. feltiae* pourrait donc, constituer un début de solution pour un programme de lutte intégrée contre les ravageurs de certains diptères y compris *C. capitata*.

Les champignons entomopathogènes appartenant au genre *Beauveria* occupent une place privilégiée parmi les agents microbiens de lutte biologique. L'étude en laboratoire montre nettement que la souche BMAUM M6-4 de *B. bassiana* a une efficacité notable contre les différents stades de développement de la mouche méditerranéenne et met en exergue l'utilité de celle-ci comme agents de lutte biologique pour la protection des cultures.

Nous avons rapporté dans cette étude la sensibilité des larves, des pupes et des adultes à la souche turque de *B. bassiana* strain BMAUM M6-4 dans les conditions de laboratoire où les résultats ont montré une réduction considérable du nombre d'adultes nouvellement émergés et des taux de mortalité significatifs au stade larvaire et adulte. De plus, leur mode d'action par ingestion ou par contact contre les adultes leur confère un avantage puisqu'ils pourraient être utilisés pour lutter contre des populations de différents stades de développement d'un ravageur.

Cette souche de champignon est prometteuse et pourrait être éventuellement utilisée en tant qu'agent de lutte biologique sous différents modes d'application : en effet, l'application de conidies par pulvérisation à la surface du sol ou par pulvérisation d'appâts contre les pupes, les larves L₃ et les adultes contribuerait à réduire l'émergence des adultes, ce qui a pour effet de réduire la taille de la population d'une génération à l'autre.

Partant de cela, la mise en place d'un programme de lutte intégrée basé sur la combinaison du champignon avec d'autres bio-pesticides serait souhaitable en faisant des études plus approfondies sur l'efficacité de cet isolat dans les conditions de terrain comme nous l'avons déjà préconisé et d'évaluer leur contribution réelle en tant qu'agent de lutte biologique contre la mouche Méditerranéenne des fruits. Il serait également recommandé de relancer ces tests sur l'insecte avec des concentrations supérieures différentes que celle testées dans notre expérimentation afin de choisir la dose optimale qui contrôle ce ravageur.

Comme perspective, il serait intéressant de poursuivre l'acquisition de connaissances sur la mouche Méditerranéenne des fruits, afin d'obtenir les informations nécessaires pour créer dans le futur un modèle bioclimatique permettant de simuler la dynamique des populations de ce ravageur. Ce modèle pourra servir d'outil d'interventions dans le cadre d'un programme de lutte et dans l'évaluation de l'impact des changements climatiques sur la dynamique du ravageur. Il pourra également servir à mieux comprendre, voire prédire, la dynamique de l'insecte en fonction de la variabilité climatique.

Les travaux futurs devraient aussi, mettre l'accent sur la sélection de plus d'espèces ou de souches de nématodes entomopathogènes afin de sélectionner les plus virulentes pour les essais sur le terrain. De plus leur biologie (persistance, reproduction, survie) en post-application devrait être étudiée, de même que leurs performances en combinaison avec d'autres agents biologiques et produits agrochimiques.

1. **Abbott W.S., 1925** - A method of computing the effectiveness of an insecticide. J. Econ. Entomol. 18 : 265-267.
2. **Aboussaid H., El Messoussi S., & Oufdou K., 2007** - Activité insecticide d'une souche marocaine de *Bacillus thuringiensis* sur la mouche méditerranéenne : *Ceratitis capitata* (Wied.) (Diptera : Tephritidae). Afrique Science : Revue Internationale des Sciences et Technologie, 5(1), 160-172.
3. **Ahmed S.I., & Leather S.R., 1994** - Suitability and potential of entomopathogenic microorganisms for forest pest management—some points for consideration. *International Journal of Pest Management*, 40(4), 287-292.
4. **Albajes R., & Alvarez S., 1980** - Efectos de la densidad larvaria y de la alimentación en la proporción de sexos de *Ceratitis capitata* (Diptera : Trypetidae). AN. INIA/ Ser. Agric. / N° 13/pp 175– 182.
5. **Albajes R., & Alvarez S., 1980** - Influencia de la temperatura en el desarrollo de *Ceratitis capitata* (Diptera : Trypetidae). AN. INIA/Ser Agric. (13) : 184-19.
6. **Alekseev E., Glazer I., Michael S., 2006** - Effects of soil texture and moisture on the activity of entomopathogenic nematodes against female *Boophilus annulatus* ticks. BioControl 51: 507-518.
7. **Alfaro C., Vacas S., Zarzo M., Navarro-Llopis V., & Primo J., 2011** - Solid phase microextraction of volatile emissions of *Ceratitis capitata* (Wiedemann) (Diptera: Tephritidae): influence of fly sex, age, and mating status. *Journal of agricultural and food chemistry*, 59(1), 298-306.
8. **Ali Ahmed- Sadoudi D., 2007** - *Bioecologie de la mouche méditerranéenne des fruits Ceratitis capitata Wiedemann, 1824 (Diptera: Trypetidae) dans quelques vergers de la Kabylie*. Thèse de Doctorat. Uni. Mouloud Mammeri. Tizi Ouzou. 197p.
9. **Ali ahmed Sadoudi D., Rezoug N., Saiki F., Soltani N., 2012** - Effect of the Variety of Fig Tree on some Biological Parameters of *Ceratitis capitata* Wied. 1824 (Diptera: Trypetidae) in Some Orchards in the Kabylie. *Journal of Life Sciences* 6 : 312-319.

10. **Ali Ahmed- Sadoudi D., Soltani N., Kellouche A., & Sadoudi R., 2011** - Fluctuating populations of *Ceratitis capitata* Wied. 1824 (Diptera; Trypetidae) in Kabylia orchards using various traps. *International Journal of AgriScience*, 1(2), 75-84.
11. **Allwood A. J., Vueti E. T., Leblanc L., & Bull R., 2002** - Eradication of introduced *Bactrocera* species (Diptera: Tephritidae) in Nauru using male annihilation and protein bait application techniques. *Turning the tide: the eradication of invasive species*, 19-25.
12. **Alonso M., & García M., 2009** - Factors which influence the efficacy of mass-trapping to control the medfly *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae). *Boletín de Sanidad Vegetal, Plagas*, 35(3), 401-418.
13. **Alphey L., 2014** - Genetic control of mosquitoes. *Annual review of entomology*, 59, 24–205.
14. **Aluja M., & Mangan R.L., 2008** - Fruit fly (Diptera: Tephritidae) host status determination: critical conceptual, methodological, and regulatory considerations. *Annu. Rev. Entomol.*, 53, 473-502.
15. **Alves S. B., Rossi L. S., Walder J. M. M., & Vieira S. A., 2004** - Avaliação de fungos entomopatogênicos para *Ceratitis capitata*. *Manejo Integrado de Plagas y Agroecología (CATIE) (no. 72) p. 31-38*.
16. **Atiama-Nurbel T., 2014** - Réponse des femelles de *Bactrocera cucurbitae* (Diptera, Tephritidae) aux composés volatiles des fruits hôtes (Doctoral dissertation, Université de la Réunion).
17. **Audemard H., & Millaire G., 1975** - Le piégeage du carpocapce sexual de syntheses: premiers results utilisables pour L. estimation des populations conduite de la lutte. *Ann. Zool. Ecol. Anim*, 7(1), 61-80.
18. **Bachi K., 2018** - Bioécologie de la mouche méditerranéenne des fruits, *Ceratitis capitata* Wied. 1824 (Diptera; Tephritidae) sur quelques variétés fruitières en Kabylie. *Essai de lutte biologique au laboratoire (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri)*.

19. **Bachrouch O., 2003** - Lutte biologique contre la mouche Méditerranéenne des fruits *Ceratitis capitata* Wiedmann (Diptera : Tephritidae) par le biais de bio-pesticides. *Mémoire de Mastère. Institut National Agronomique de Tunisie, Tunisia.*
20. **Back E. A., & Pemberton C. E., 1918** - *The Mediterranean fruit fly in Hawaii* . US Department of Agriculture. USDA Bulletin.640 p.
21. **Baimey H., Zadji L., Afouda L., Moens M., & Decraemer W., 2015** - Influence of pesticides, soil temperature and moisture on entomopathogenic nematodes from southern Benin and control of underground termite nest populations. *Nematology, 17(9)*, 1057-1069.
22. **Balachowsky A., & Mesnil L., 1935** - Les insectes nuisibles aux plantes cultivées. Ed. Busson, tome 1, Paris: 242-253.
23. **Bale J. S., Masters G. J., Hodkinson I. D., Awmack C., Bezemer T. M., Brown V. K., & Good J. E. 2002** - Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores. *Global change biology, 8(1)*, 1-16.
24. **Barbosa P., & Wagner M., 1989** - Symbiotic Associations of Forest Insects, Microorganisms, and Trees. Capítulo 5.
25. **Barbosa-Negrisoni C.R.C., Garcia M.S., Dolinski C., Negrisoni Jr. A.S., Bernardi D., Nava D.E., 2009** - Efficacy of indigenous entomopathogenic nematodes (Rhabditida: Heterorhabditidae, Steinernematidae), from Rio Grande do Sul Brazil, against *Anastrepha fraterculus* (Wied.) (Diptera: Tephritidae) in peach orchards. *Journal of Invertebrate Pathology 102 (1)*: 6–13.
26. **Barry J. D., Vargas R. I., Miller N. W., & Morse J. G., 2003** - Feeding and foraging of wild and sterile Mediterranean fruit flies (Diptera: Tephritidae) in the presence of spinosad bait. *Journal of economic entomology, 96(5)*, 1405-1411.
27. **Bates S. L., Zhao J. Z., Roush R. T., & Shelton A. M., 2005** - Insect resistance management in GM crops: past, present and future. *Nature biotechnology, 23(1)*, 57-62.

- 28. Bautista R. C., & Harris E. J., 1996** - Effect of fruit substrates on parasitization of tephritid fruit flies (Diptera) by the parasitoid *Biosteres arisanus* (Hymenoptera: Braconidae). *Environmental Entomology*, 25(2), 470-475.
- 29. Bawin T., 2016** - Insect pathogenic *Aspergillus* species in mosquito (Diptera: Culicidae) control compared to *Metarhizium anisopliae* (Doctoral dissertation, Université de Liège, Liège, Belgique).
- 30. Baydar R., Güven Ö., Karaca I., 2016** - Occurrence of entomopathogenic fungi in agricultural soils from Isparta Province in Turkey and Their Pathogenicity to *Galleria mellonella* (L.) (Lepidoptera: Pyralidae) Larvae. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 26 (2), 323-327.
- 31. Bedding R. A., 1981** - "Low cost in vitro mass production of *Neoplectana* and *Heterorhabditis* species (Nematoda) for field control of insect pests." *Nematologica* 27: 109-114.
- 32. Bennai M., & Hamadache A., 2012** - Protection phytosanitaire des arbres fruitiers et de la vigne. Ecole National Supérieur d'Agronomie, El Harrach, Alger, 152 p.
- 33. Benziada M., 2003** - Hydrogéologie de la plaine de la Mitidja Orientale (Algérie). *Bulletin des sciences géographiques*, (11), 43-52.
- 34. Beris E. I., Papachristos D. P., Fytrou A., Antonatos S. A., Kontodimas D. C., 2013** - Pathogenicity of three entomopathogenic fungi on pupae and adults of the Mediterranean fruit fly, *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae). *Journal of Pest Science*, 86(2), 275-284.
- 35. Berlioz J., 1950** - Oiseaux de la Réunion. In Lépidoptère Rhopalocères. Ed. L'Océanie Française. Paris : Pierre Viette, 84 p.
- 36. Bertin Y., Didier C., Ducelier D., 1998** - Protection phytosanitaire des agrumes. CIRO-FLHOR., pp. 73 - 76. *biodiversit*. Ed. Dunod. Paris, 689 p.
- 37. Bodenheimer F. S. 1951** - Citrus entomology. Ed. Dio. Junk Denhang, 663 p.
- 38. Boller E. F., 1983** - Biotechnical methods for the management of fruit fly populations. *Fruit flies of economic importance*, 82, 342-351.

39. Bouagga S., Hassan N., Kamel Ben Halima M., Jammazi A., Djelouah K., Al-Zaidi S., 2014 - Evaluation of an " Attract and Kill" system to combat *Ceratitis capitata* on peach trees in Tunisia. *J Agr Sci Tech* 4:612–619.
40. Boudjelida H., & Soltani N., 2011 - Pathogenicity of *Metarhizium anisopliae* (Metsch) on *Ceratitis capitata* L. (Diptera: Tephritidae). *Annals of Biological Research*, 2(2), 104-110.
41. Boulahia-Kheder S., Jerraya A., Fezzani M., Jrad F., 2010 - Premiers résultats en Tunisie sur la capture de masse, moyen alternatif de lutte contre la mouche méditerranéenne des fruits *Ceratitis capitata* (Diptera, Tephritidae). In *Annales de l'INRAT*. 82,168-180.
42. Bradfisch G. A., & Harmer S. L., 1990 - Ω -conotoxin GVIA and nifedipine inhibit the depolarizing action of the fungal metabolite, destruxin B on muscle from the tobacco budworm (*Heliothis virescens*). *Toxicon*, 28(11), 1249-1254.
43. Bravo A., Likitvivatanavong S., Gill S.S. Soberón M., 2011 - *Bacillus thuringiensis*: A story of a successful bioinsecticide. *Insect Biochem. Mol. Biol.* 41, 423–431.
44. Bruce T. J., Wadhams L. J., Woodcock C. M., 2005 - Insect host location : a volatile situation. *Trends in plant science*, 10(6), 269-274.
45. Brunel et Fournet S., 2002 - Protection biologique et intégrée contre la mouche du chou (*Delia radicum* L.) : de la recherche fondamentale à l'expérimentation de pleins champs. 2ème conférence internationale sur les moyens alternatifs de lutte contre les organismes nuisibles aux végétaux. Lille, 4-7 mars 2002, 276-282.
46. Bues R., Poitout S., Anglade P., Robin J. C. 1986 - Cycle évolutif et hibernation de *Mythimna* (Syn. *Pseudaletia*) *unipuncta* Haw.(Lep. Noctuidae) dans le sud de la France. *Acta oecologica. Oecologia applicata*, 7(2), 151-166.
47. Butt T. M., & Beckett A., 1994 - Structural studies on the infection processes of entomogenous fungi. In *International Colloquium for Invertebr. Pathol., August 28th-Sept. 2nd, 1994., montpelier, France. Proceedings*, p 311-314.

- 48. Butt T. M., Coates C. J., Dubovskiy I. M., Ratcliffe N. A. 2016** - Entomopathogenic Fungi: New Insights into Host-Pathogen Interactions. *Advances in Genetics*, 94, 307– 364.
- 49. Butt T.M., 1990** - Fungal infection processus. A mini review “Vth Int. Colloq. Invertebr. Pathol. Adelaide. Soc. for Invertebr. Pathol. Pp 212-214.
- 50. Buyckx E. J., 1994** - Unfecundated dates, host of the mediterranean fruit fly (Diptera: Tephritidae) in the oases of Tozeur, Tunisia. *Bulletin OILB SROP (France)*.
- 51. Carrière Y., & Roitberg D., 1995** - Evolution of host-selection behaviour in insect herbivores: genetic variation and covariation in host acceptance within and between populations of *Choristoneura rosaceana* (Family: Tortricidae), the obliquebanded leafroller. *Heredity*, 74(4), 357-368.
- 52. Castillo M. A., Moya P., Hernández E., Primo-Yufera E., 2000** - Susceptibility of *Ceratitis capitata* Wiedemann (Diptera: Tephritidae) to entomopathogenic fungi and their extracts. *Biological control*, 19(3), 274-282.
- 53. Causse R., 1974** - Etude d'un rythme circadien du comportement de prenymphe chez *Ceratitis capitata* Wiedemann (Diptere Trypetidae). *Ann. Zool. Ecol. Entomol.*, 68 :237-243.
- 54. Chang C. L., Cho I. K., Li Q. X., 2012** - Laboratory evaluation of the chemosterilant lufenuron against the fruit flies *Ceratitis capitata*, *Bactrocera dorsalis*, *B. cucurbitae*, and *B. latifrons*. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 15(1), 13-16.
- 55. Chaufaux J., Marchal M., Gilois N., Jehanno I., Buisson C. 1997** - Investigation of natural strains of *Bacillus thuringiensis* in different biotopes throughout the world. *Can J Microbiol*, 43, 337-343.
- 56. Chikhi R., 2001** - Les oiseaux de verger de néfliers de Maamria (Rouiba): Biologie, disponibilités alimentaires et dégâts. *Mém. Ing. Agro., Inst. Nat. Agro., El Harrach*, 140p.

- 57. Choudhary D. K., Kasotia A., Jain S., Vaishnav A., Kumari S., Sharma K. P., & Varma A., 2016** - Bacterial-mediated tolerance and resistance to plants under abiotic and biotic stresses. *Journal of plant growth regulation*, 35(1), 276-300.
- 58. Chouibani M., Ouizbouben A., et Kaach H., 2003** - Protection intégrée des agrumes. Ed. Ouvrage réalisé par la Direction de la Protection des Végétaux, des Contrôles Technique et de la Répression des Faudes en coopération avec la GTZ (Projet Contrôle Phytosanitaire).13p.
- 59. Chouibani M., Ouizbouben A., et Kaack H., 2015** - Protection intégrée des agrumes. Direction de la Protection des Végétaux-des Contrôles Techniques et de la Répression des Fraudes, Maroc, 77p.
- 60. Chueca P., Montón H., Ripollés J. L., Castañera P., Moltó E., & Urbaneja A., 2007** - Spinosad bait treatments as alternative to malathion to control the Mediterranean fruit fly, *Ceratitis capitata*, (Diptera: Tephritidae) in the Mediterranean Basin. *Journal of Pesticide Science*, 32:407-411.
- 61. Clarkson J. M., & Charnley A. K., 1996** - New insights into the mechanisms of fungal pathogenesis in insects. *Trends in microbiology*, 4(5), 197-203.
- 62. Clausen C. P., Clancy D. W., & Chock Q. C., 1965** - Biological control of the oriental fruit fly (*Dacus dorsalis* Hendel) and other fruit flies in Hawaii. US Government Print Office, Washington. 102pp.
- 63. Cloutier C., & Cloutier C., 1992** - Les solutions biologiques de lutte pour la répression des insectes et acariens ravageurs des cultures. *La lutte biologique, sous la direction de C. Vincent et D. Coderre*, 19-88.
- 64. Constontino C., 1950** - contributo alla conoscenza della mosco della. *Ceratitis capitata* (Diptera, Trypetidae). Arch. Zool. Exp. Gén., T.118, Fac sc.3, pp: 316-334.
- 65. Correia A. A., Wanderley–Teixeira V., Teixeira Á. A., Oliveira J. V., Gonçalves G. G., Cavalcanti M. G., ... & Alves L. C., 2013** - Microscopic analysis of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) embryonic development before and after treatment with azadirachtin, lufenuron, and deltamethrin. *Journal of economic entomology*, 106(2), 747-755.

- 66. Croveti A., Conti B., & Delrio G., 1984** - Effect of abiotic factors on *Ceratitidis capitata* (Wied.) (Diptera, Tephritidae)- II. Pupal developpement under constant temperatures, fruit fly of economic importance. pp: 141-147.
- 67. Dajoz R., 1971** - Précis d'écologie.Ed.Dunod, Paris. 434p.
- 68. Dajoz R., 1985** - Précis d'écologie. Ed. Bordas, Paris, 505 p.
- 69. Dajoz R., 2006** -Précis d'écologie. Ed. Dunod, Paris 551p.
- 70. De Kouassi M., 2001** - Les possibilités de la lutte microbiologique. Emphase sur le champignon entomopathogène *B. bassiana*. Vertigo : vol 2 ; n° 2.
- 71. De Meyer M., 2013** - Use of attract and kill devices for fruits fly control TEAM newsletter, vol. 13, p14.
- 72. De Villiers M., Manrakhan A., Addison P., & Hattingh V., 2013** -The distribution, relative abundance, and seasonal phenology of *Ceratitidis capitata*, *Ceratitidis rosa*, and *Ceratitidis cosyra* (Diptera: Tephritidae) in South Africa. *Environmental Entomology*, 42(5), 831-840.
- 73. Debouzie D., 1977** - Etude de la compétition larvaire chez *Ceratitidis capitata* (diptère, trypetidae). Arch. Zool. Exp Gen. T. 118, Fac 3: 316-334.
- 74. Debouzie D., 1980** - Analyse au laboratoire d'un microsysteme isolé. Etude d'un fruit colonisé par la mouche méditerranéenne des fruits. *Ceratitidis capitata* (Doctoral dissertation).
- 75. Deguine J. P., Ferron P., & Russell D., 2008** - *Protection des cultures : de l'agrochimie à l'agroécologie*. Editions Quae. Paris. 187pp.
- 76. Delanoue P., & Soria F., 1954** - Contribution à l'étude biologique de la mouche mediterraneenne des fruits *Ceratitidis capitata* Wied. Fruit et primeurs n°159, pp : 353 – 354.
- 77. Delanoue P., & Soria F., 1962** - Au sujet de l'avorle- ment de l'evolution de *Ceratitidis capitata* Wied. dans certains agrumcs en Tunisie. *Ann. Inst. Nat. Rech. Agron. Tunis*, 35, 73-96.
- 78. Delassus M., Bricchet J., Balachowsky A., Lepignea L., 1931** - Les ennemis des cultures fruitières en Algérie et les moyens pratiques de la combattre. Ed. Recher. Agro.Algérie: 53-62.

- 79. Delrio G., 1985** - Biotechnical methods for olive pest control. Integrated pest control in olive groves. Rotterdam: Balkema, 394-410.
- 80. Demirel N., 2007** - Behavior paradigms in the Mediterranean fruit fly, *Ceratitidis capitata* (Wiedemann). Journal of Entomology 4(2) : 129-135.
- 81. Descoins C., 2007** - Introduction à l'écologie. DAA Protection des Plantes et Environnement : 42p.
- 82. Dhouibi M. H., Gahbiche H., & Saaidia B., 1995** - Evolution de l'attaque des fruits par *Ceratitidis capitata*, en fonction de la position sur l'arbre et du degré de maturité des oranges. *Fruits* (1978), 50(1), 39-49.
- 83. Díaz-Fleischer F., Pinero J. C., & Shelly T. E., 2014** - Interactions between tephritid fruit fly physiological state and stimuli from baits and traps: looking for the pied piper of Hamelin to lure pestiferous fruit flies. In *Trapping and the detection, control, and regulation of tephritid fruit flies* (pp. 145-172). Springer, Dordrecht.
- 84. Dicke M., & van Loon J. J., 2000** - Multitrophic effects of herbivore-induced plant volatiles in an evolutionary context. *Entomologia experimentalis et applicata*, 97(3), 237-249.
- 85. Diez JM., 2007** - Mediterranean fruit fly *Ceratitidis capitata* (Wiedmann). Depar. Of Entom. Honolulu, Hawaii.4 p.
- 86. Dillon A. B., Downes M. J., Ward D., & Griffin C. T. J., 2007** - Optimizing application of entomopathogenic nematodes to manage large pine weevil, *Hylobius abietis* L. (Coleoptera: Curculionidae) populations developing in pine stumps, *Pinus sylvestris*. Biological Control 40: 253-263.
- 87. Dillon A.B., 2003** - Biological control of the large pine weevil, *Hylobius abietis* L., (Coleoptera: Curculionidae) using entomopathogenic nematodes. PhD thesis submitted at NUI Maynooth, Ireland.
- 88. Dimbi S., Maniania N. K., Lux S. A., Ekesi S., & Mueke J. K., 2003** - Pathogenicity of *Metarhizium anisopliae* (Metsch.) Sorokin and *Beauveria bassiana* (Balsamo) Vuillemin, to three adult fruit fly species: *Ceratitidis capitata* (Wiedemann), *C. rosa* var. *fasciventris* Karsch and *C. cosyra* (Walker) (Diptera: Tephritidae). *Mycopathologia*, 156(4), 375-382.

- 89. Doberski J. W., 1981** - Comparative laboratory studies on three fungal pathogens of the elm bark beetle *Scolytus scolytus*: effect of temperature and humidity on infection by *Beauveria bassiana*, *Metarhizium anisopliae*, and *Paecilomyces farinosus*. *Journal of Invertebrate Pathology*, 37(2), 195-200.
- 90. Doumandji S., & Doumandji-Mitiche B., 1991** - Les dégâts dus au bulbul des jardins *Pycnonotus barbatus* (Desfontaines, 1787) en arboriculture fruitière en Mitidja (Alger). *Med. Fac. Landbouww. Rijksuniv*, 1083-1087.
- 91. Dowd P. F., & Vega F. E., 2003** - Autodissemination of *Beauveria bassiana* by sap beetles (Coleoptera: Nitidulidae) to overwintering sites. *Biocontrol Science and Technology*, 13(1), 65-75.
- 92. Dreux D. H., 1980** - Précis d'écologie. Ed. Presse Univ. de France, Paris, 229p.
- 93. Dridi B., 1990** - Etude de quelques aspects de la biologie de la mouche méditerranéenne des fruits *Ceratitis capitata* Wiedemann (Diptera: Trypetidae). Différenciation entre souche d'élevage et population provenant d'Algérie, Thèse 3^{ème} cycle. Univ. Aix. Marseille II. Fac. Sci. Tec. St Jerome. 113p.
- 94. Duyck P. F., & Quilici S., 2002** - Etude comparée de la biologie du développement chez trois espèces de mouches des fruits (*ceratitis spp.*) (Diptera : Tephritidae), nuisibles aux cultures fruitières à la réunion. In *Fifth Annual Meeting of Agricultural Scientists* (p. 105).
- 95. Duyck P. F., & Quilici S., 2001** - Survival and development of different life stages of three *Ceratitis spp.* (Diptera: Tephritidae) reared at five constant temperatures. *Bulletin of Entomological research*, 92(6) :461.
- 96. Duyck P. R., 2005** - Compétition interspécifique et capacités invasives. Le cas des Tephritidae de l'île de La Réunion (Doctoral dissertation). Université de la Réunion. 93p.
- 97. Ehlers R.-U., & Hokkanen H. M. T., 1996** - Insect biocontrol with non-endemic entomopathogenic nematodes (*Steinernema* and *Heterorhabditis spp.*): Conclusions and recommendations of a combined OECD and COST Workshop on Scientific and Regulatory Policy Issues. *Biocontrol Science and Technology* 6: 295 - 302.
- 98. Ehlers R.-U., 2001** - Mass production of entomopathogenic nematodes for plant protection. *Applied Microbiology and Biotechnology* 56: 623-633.

- 99. Ekesi S., Maniania N. K., & Lux S. A., 2002** - Mortality in three African tephritid fruit fly puparia and adults caused by the entomopathogenic fungi, *Metarhizium anisopliae* and *Beauveria bassiana*. *Biocontrol Science and Technology*, 12(1), 7-17.
- 100. Ekesi S., Maniania N. K., & Lux S. A., 2003** - Effect of soil temperature and moisture on survival and infectivity of *Metarhizium anisopliae* to four tephritid fruit fly puparia. *Journal of Invertebrate Pathology*, 83(2), 157-167.
- 101. Ekesi S., Maniania N. K., Mohamed S. A., & Lux S. A., 2005** - Effect of soil application of different formulations of *Metarhizium anisopliae* on African tephritid fruit flies and their associated endoparasitoids. *Biological Control*, 35(1), 83-91.
- 102. Ekessi S., Mohamed S., 2010** - Edito. Fighting Fruit Flies Regionally in Sub-Saharan Africa. *COLEACP/CIRAD Information Letter* 9, 1.
- 103. Elaini R., 2003** - Contribution au developpement des techniques de lutte contre la mouche mediterraneenne des fruits *Ceratitis capitata* Wiedemann (Diptera, Tephritidae) en verger d'agrumes et en post-recolte. These. Ing. en Agronomie, I.A.V. HASSAN II. pp: 4 - 17.
- 104. El-Akhdar E. A., & Ouda S. M., 2009** - Pathogenicity of Different Fungal Isolates to the Adult Stage of the Mediterranean Fruit Fly, *Ceratitis capitata* (Wiedmann). *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 19(1), 5-10.
- 105. El-Sadawy H. A., 2001** - Effect of temperature and soil moisture on the infectivity of some entomopathogenic nematodes against larvae of the rice moth and the flesh fly. *International Journal of Nematology*, 11(1), 58-62.
- 106. El-Sayed A. M., Suckling D. M., Wearing C. H., & Byers J. A., 2006** - Potential of mass trapping for long-term pest management and eradication of invasive species. *Journal of economic entomology*, 99(5), 1550-1564.
- 107. Elsayed G., 2011** - Plant secondary substances and insects behaviour. Archives of phytopathology and plant protection, 44(16), 1534-1549.

- 108. Entrudo-Fernandes J., Soares C., Coelho M., Elisário P., Rocha R., Viegas V., Ribeiro S., Marques M., Pacheco S., & Brito M., 2000** - Algarve- Med “A monitorização da mosca do Mediterrâneo (*Ceratitis capitata* Wied) na Região do Algarve. Resultados obtidos no ano 2000”. Pp. 131-140 in: Direcção Regional de Agricultura do Algarve (Eds). *Actas do Congresso Nacional de Citricultura*. Faro 16-18 de Novembro de 2000, Faro, Portugal. 639 pp.
- 109. EPPO 2009** - Data Sheets on Quarantine Pests: *Ceratitis capitata*. Available : http://www.eppo.int/Quarantine/insects/Ceratitis_capitata/CERTCA_ds.pdf.
- 110. Epsky N. D., & Heath R. R., 1998** - Exploiting the interactions of chemical and visual cues in behavioral control measures for pest tephritid fruit flies. *Florida Entomologist*, Vol.81.Nº3: 273-282.
- 111. Eskafi F. M., & Kolbe M. E., 1990** - Infestation Patterns of Commonly Cultivated., Edible Fruit Species by *Ceratitis capitata* and *Anastrepha spp.* (Diptera: Tephritidae) in Guatemala and Their Relationship to Environmental Factors. *Environmental entomology*, 19(5), 1371-1380.
- 112. Fahad K., Gmira N., Benziane T., & Sekkat A., 2013** - Etude de la bio-écologie de la mouche méditerranéenne des fruits *Ceratitis capitata* Wiedemann (1824) sur rosacées dans la région de Sefrou (Maroc). *Entomologie faunistique-Faunistic Entomology*. (67): 85 -95.
- 113. Farag M. M. A., Shehata N. F., & Mahmoud Y. A., 2009** - Predicting the annual generation peaks of peach fruit fly. *Bactrocera zonata* (Diptera : Tephritidae) using heat units accumulation at Giza governoate, Egypt. The 4th conference on recent technologies in agriculture, Cairo university, Egypt.
- 114. Faraone N., De Cristofaro A., Maltese M., Vitagliano S., & Caleca V., 2012** - First data on the repellent activity of essential oils of Citrus limon towards medfly (*Ceratitis capitata*). *New Medit*, 11(4), 31-34.
- 115. Fast P. G., 1981** - The crystal toxin of *Bacillus thuringiensis*. *Microbial Control of Insects and Mites*, 223-244.
- 116. Faurie C., Ferra C., Medori P., 1984** - Écologie.Ed. Baillièere J.-B, Paris, 147 p.

- 117. Faurie C., Ferra C., Medori P., Devaux J., Hemptinne J-L., 2012** - Ecologie, approche scientifique et pratique. Ed. Lavoisier, Paris, 488 p.
- 118. Faurie C., Ferra Ch., Medori P., Devaux J., 1998** - Ecologie – Approche scientifique et pratique. Ed. J-B. Bailliere. Paris, 339 p.
- 119. Feaster M. A., & Steinkraus D. C., 1996** - Inundative Biological Control of *Helicoverpa zea* (Lepidoptera: Noctuidae) with the Entomopathogenic Nematode *Steinernema riobravis* (Rhabditida: Steinernematidae). *Biological Control* 7: 38-43.
- 120. Fellah H., 1996** - Contribution à l'étude de la bioécologie de la mouche Méditerranéenne des fruits *Ceratitis capitata* Wiedmann 1829 (Diptera : Tephritidae) sur fruits d'été. *Mémoire de Fin d'Etudes de Cycle de Spécialisation. Institut National Agronomique de Tunisie, Tunisia.*
- 121. Feron M., 1957** - Le comportement de ponte de *Ceratitis capitata* Wied., influence de la lumière. *Rev. Path. Veg. et d'Antom. Agric. de France*, 36, 127-143.
- 122. Feron M., 1962** - L'instinct de reproduction chez la mouche méditerranéenne des fruits *Ceratitis capitata* Wied. (Dipt. Trypetidae). Comportement sexuel. Comportement de ponte. *Revue de Pathologie Végétale et d'Entomologie Agricole de France*, 41(1-2), 3-129.
- 123. Ferreira J. F., Marques E. J., Marques I. M. R., de Oliveira J. V., & dos Santos Júnior H. J. G., 2005** - Effect of *Metarhizium anisopliae* (Metsch.) Sorokin on eggs of *Alabama argillacea* (Huebner.) (Lepidoptera: Noctuidae). *Magistra (Brazil)*.
- 124. Ferron P., 1977** - Influence of relative humidity on the development of fungal infection caused by *Beauveria bassiana* [Fungi Imperfecti, Moniliales] in imagines of *Acanthoscelides obtectus* [Col.: Bruchidae]. *Entomophaga*, 22(4), 393-396.
- 125. Ferron P., 1978** - Biological control of insect pests by Entomogenous Fungi. *Annual Review of Entomology*, 23, 409–420.
- 126. Ferron P., 1981** - Pest control by the fungi *Beauveria* and *Metarhizium*. *Microbial control of pests and plant diseases, 1970-1980*.
- 127. Ferron P., Fargues J., & Riba G., 1991** - Fungi as microbial insecticides against pests. In “Handbook of Applied Mycology” (DK Arora, L. Ajelio, and KG Mukerji, Eds.), Vol. 2.

- 128. Ferry A., 2007** - *Écologie chimique appliquée à la lutte contre Delia radicum, la mouche du chou* (Doctoral dissertation, Rennes 1). 149p.
- 129. Filgueiras C.C., Willett D.S., Junior A.M., Pareja M., El-Borai F.E., Dickson D.W., Stelinski L.L., Duncan L.W., Moino A., Pareja M., et al. 2016** - Stimulation of the salicylic acid pathway aboveground recruits entomopathogenic nematodes belowground. *PLoS ONE*, 11.
- 130. Filippi J. B., 2003** - Une architecture logicielle pour la multi-modélisation et la simulation à évènements discrets de systèmes naturels complexes (Doctoral dissertation). Uni. Corse PASQUALE PAOLI. 162 p.
- 131. Funasaki G. Y., Lai P. Y., Nakahara L. M., Beardsley J. W., & Ota A. K., 1988** - A review of biological control introductions in Hawaii: 1890 to 1985. *Proceedings, Hawaiian Entomological Society* 28:105- 160.
- 132. Gahbiche H., 1993** - Contribution à l'étude de la mouche méditerranéenne des fruits *Ceratitis capitata* Wiedmann (Diptères, Tephritidae) dans deux biotopes du Nord de la Tunisie. Mémoire de fin d'étude du cycle de spécialisation de l'INAT, pp. 5-107.
- 133. Gardner W. A., Sutton R. M., & Noblet R., 1977** - Persistence of *Beauveria bassiana*, *Nomuraea rileyi*, and *Nosema necatrix* on Soybean Foliage. *Environmental entomology*, 6(5), 616-618.
- 134. Garriga A., Morton A., Garcia-del-Pino F., 2018** - Is *Drosophila suzukii* as susceptible to entomopathogenic nematodes as *Drosophila melanogaster*? *Journal of Pest Science*, 91(2), 789-798.
- 135. Gasparich G. E., Silva J. G., Han H. Y., Mcpheron B. A. Steck G. J., & Sheppard, W. S., 1997** - Population genetic structure of Mediterranean fruit fly (Diptera: Tephritidae) and implications for worldwide colonization patterns. *Annals of the Entomological Society of America*, 90(6), 790-797.
- 136. Gaugler R., 1981** -Biological control potential of neoaplectanid nematodes. *J Nematol* 13: 241-9.

- 137. Gerson U., & Cohen E., 1989** - Resurgences of spider mites (Acari: Tetranychidae) induced by synthetic pyrethroids. *Experimental & Applied Acarology*, 6(1), 29-46.
- 138. Georgis R., and Hange N. G. M., 1991** - Nematodes as biological insecticides. *Pestic.2* :29-32.
- 139. Gilmour O., 1968** - Metabolismo de los insectos. Version espagnola de Polar Alonso Sanjum. Editorial Alhambra S.A.Madrid.
- 140. Glazer I., 2002** -Survival Biology. Published in *Entomopathogenic Nematology*, pp. 169-189, R. Gaugler (ed.), CABI publishing, Wallingford, England.
- 141. Godfray H. C. J., & Godfray H. C. J., 1994** - *Parasitoids: behavioral and evolutionary ecology* (Vol. 67). Princeton University Press.Chichester.
- 142. Goettel M. S., & Inglis G. D., 1997** - Fungi: hyphomycetes. In *Manual of techniques in insect pathology* (pp. 213-249). Academic Press.
- 143. Goureau C., 1861** - Les insectes nuisibles aux arbres fruitiers : aux plantes potagères, aux céréales & aux plantes fourragères (Vol. 17). Masson.
- 144. Grant J.A., Nillani M.G., 2003a** - Soil moisture effects on ntomopathogenic nematodes. *Environ. Entomol* 32: 80-87.
- 145. Grant J.A., Nillani M.G., 2003b** - Effects of soil rehydration on the virulence of entomopathogenic nematodes. *Environ. Entomol* 32: 983-991.
- 146. Greathead D. J., 1992** - La lutte biologique, arme prometteuse pour les acridiens. *la lutte biologique contre les acridiens, sous la direction de CJ Lomer et C. Prior*, 4-7. Ibadan, Nigeria: CAB International/IITA.
- 147. Greathead D. J., Kooyman C., Popov G. B., & Launois-Luong M. H., 1994** - Les ennemis naturels des criquets du Sahel. Collection acridologie opérationnelle N CILSS/DFPV, Niamey, Bp 12625. Niger.
- 148. Grewal P. S., 2000** - Enhanced ambient storage stability of an entomopathogenic nematode through anhydrobiosis.” *Pest Management Science* 56: 401-406.

- 149. Grewal P. S., Wang X., & Taylor R. A. J., 2002** - Dauer juvenile longevity and stress tolerance in natural populations of entomopathogenic nematodes: is there a relationship? *International Journal for Parasitology* 32: 717-725.
- 150. Grewal P.S., Ehlers R.U., Shapiro-Ilan D.I., 2005** - Nematodes as Biocontrol Agents. CABI Publishing, Cambridge.
- 151. Griffin C., Boemare N. E., & Lewis E. E., 2005** - Biology and behaviour. *Nematodes as biocontrol agents*, 47-64.
- 152. Hafsi A., Abbes K., Harbi A., Rahmouni R., & Chermiti B., 2015** - Comparative efficacy of Malathion and spinosad bait sprays against *Ceratitidis capitata* Wiedmann (Diptera: Tephritidae) in Tunisian citrus orchards. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 3(6), 246-49.
- 153. Hagen K. S., & Finney G. L., 1950** - A food supplement for effectively increasing the fecundity of certain tephritid species. *Journal of Economic Entomology*, 43(5).
- 154. Hajek A. E., & St. Leger R. J., 1994** - Interactions between fungal pathogens and insect hosts. *Annual review of entomology*, 39(1), 293-322.
- 155. Haliche K., Nehlil N., Zerrouki N., 2007** - Influence de la variété et de l'exposition sur le taux d'infestation des fruits par *Ceratitidis capitata* Wied., 1824 (Diptera ; Trypetidae) dans la région de Tizi-ouzou, These Ing. Uni. Tizi-Ouzou, 76p.
- 156. Hance T., 2001** - Principes et méthodes de lutte biologique et intégrée. Centre de recherche sur la biodiversité, unité d'écologie et de biogéographie : 63p.
- 157. Heath R. R., Epsky N. D., Guzman A., Dueben B. D., Manukian A., Meyer W. L., 1995** - Development of a dry plastic insect trap with food-based synthetic attractant for the Mediterranean and Mexican fruit flies (Diptera: Tephritidae). *Journal of Economic Entomology*, 88(5), 1307-1315.
- 158. Heath R. R., Epsky N. D., Midgarden D., & Katsoyannos B. I., 2004** - Efficacy of 1, 4-diaminobutane (putrescine) in a food-based synthetic attractant for capture of Mediterranean and Mexican fruit flies (Diptera: Tephritidae). *Journal of economic entomology*, 97(3), 1126-1131.

159. **Heimpel A. M., 1967** - A critical review of *Bacillus thuringiensis* var. thuringiensis Berliner and other crystalliferous bacteria. *Ann. Rev. Entomol.*, 12, 287.
160. **Heimpel A. M., & Angus T. A., 1963** - Diseases caused by certain sporeforming bacteria. In *Insect pathology* (pp. 21-73). Academic Press.
161. **Hendel F., 1927** - Trypetidae. *Die Fliegen der palaarktischen Region*, 5, 1-221.
162. **Hendrichs J., Robinson A. S., Cayol J. P., Enkerlin W., 2002** - Medfly areawide sterile insect technique programmes for prevention, suppression or eradication: the importance of mating behavior studies. *Florida Entomologist*, 85(1), 1-13.
163. **Holder D. J., & Keyhani, N. O., 2005** -Adhesion of the entomopathogenic fungus *Beauveria* (Cordyceps) *bassiana* to substrata. *Appl. Environ. Microbiol.*, 71(9), 5260-5266.
164. **Honěk A. L. O. I. S., Jarosik V., Martinkova Z., & Novak I., 2002** - Food induced variation of thermal constants of development and growth of *Autographa gamma* (Lepidoptera: Noctuidae) larvae. *European Journal of Entomology*, 99(2), 241-252.
165. **Hübner A., Englert C., & Herz A., 2017** - Effect of entomopathogenic nematodes on different developmental stages of *Drosophila suzukii* in and outside fruits. *BioControl*, 62(5), 669-680.
166. **İlker C., Güven Ö., & Karaca İ., 2017** - Effects of entomopathogenic fungi on *Spodoptera littoralis* (Boisd.) (Lep: Noctuidae) larvae. *Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 34(3), 159-165.
167. **Imache A., Kuper M., Bouarfa S., Hartani T., Dionnet M., 2011** -Les marchés de l'eau et de la terre dans la plaine de la Mitidja en Algérie : opportunités et fragilités.
168. **Inglis G. D., Goettel M. S., Butt T. M., Strasser, H., 2001** - Use of hyphomycetous fungi for managing insect pests. *Fungi as biocontrol agents*, 23-69.

- 169. Ishii M., Takeshita J., Ishiyama M., Tani M., Koike M., Aiuchi D., 2015** - Evaluation of the pathogenicity and infectivity of entomopathogenic hypocrealean fungi, isolated from wild mosquitoes in Japan and Burkina Faso, against female adult *Anopheles stephensi* mosquitoes. *Fungal ecology*, 15, 39-50.
- 170. Israely N., & Oman S. D., 2005** - Effect of combined insecticide sprays and sanitation techniques on population dynamics of *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae) in the central mountains of Israel. *Journal of economic entomology*, 98(3), 739-748.
- 171. Israely N., Yuval B., Kitron U., Nestel D., 1997** - Population fluctuations of adult Mediterranean fruit flies (Diptera: Tephritidae) in a Mediterranean heterogeneous agricultural region. *Environmental Entomology*, 26(6), 1263-1269.
- 172. Jacas J. A., Karamaouna F., Vercher R., Zappalà L., 2010** - Citrus pest management in the Northern Mediterranean basin (Spain, Italy and Greece). In: Ciancio A, Mukerji KG (eds) Integrated management of arthropod pests and insect borne diseases. Springer, New York, pp 3-27.
- 173. Jackson G. J. & Moore G., 1969** -Infectivity of nematodes, *Neoaplectana* species, for the larvae of the weevil *Hylobius pales*, after rearing in species isolation. *Journal of Invertebrate Pathology* 14: 194-198.
- 174. Jacob N., 1977** - Un model matematic pentru stabilirea. Limitelor economice de toleranta a atacului molilor. Fructelor in Iupte integrate. Analele ICPP. *Romania*, 15, 179.
- 175. Jacquemond C., Curk F., & Heuzet M., 2013** - *Les clémentiniers et autres petits agrumes*. Editions Quae. Versailles Cedex. France. 363 p.
- 176. Jasic J., 1975** - On the life cycle of *Perillus bioculatus* (Heteroptera, Pentatomidae) in Slovakia. *Acta entomologica Bohemoslovaca*.
- 177. Jeffrey N. L., 2004** - Stibick. Natural enemies of true fruit flies (Tephritidae). United States Department of Agriculture, 1-61.
- 178. Jerraya A., 2003** - Principaux nuisibles des plantes cultivées et des denrées stockées en Afrique du nord : Leur biologie, leurs ennemis naturels, leurs dégâts et leur contrôle. Climat pub, Tunisie. 415pp.

- 179. Jolivet P., 1992** - Insects and -plants: Parallel evolution and adaptations. Flora and Fauna handbooks, Sanhill crane press, 'Gainesville, Florida. 190 p.
- 180. Jourdheuil P., Grison P., et Fraval A., 1992** -La lutte biologique : un aperçu historique. La lutte biologique. Dossier de la Cellule environnement de l'INRA 5,11-35.
- 181. Kamali S., Karimi J., Hosseini M., Campos-Herrera R., & Duncan L. W., 2013** -Biocontrol potential of the entomopathogenic nematodes *Heterorhabditis bacteriophora* and *Steinernema carpocapsae* on cucurbit fly, *Dacus ciliatus* (Diptera: Tephritidae). *Biocontrol Science and Technology*, 23(11), 1307-1323.
- 182. Kamali S., Karimi J., Hosseini M., Campos-Herrera R., Larry W., 2013** - Biocontrol potential of the entomopathogenic nematodes *Heterorhabditis bacteriophora* and *Steinernema carpocapsae* on cucurbit fly, *Dacus ciliatus* (Diptera: Tephritidae). *Biocontrol Sci Tech* 23:1307–1323.
- 183. Karagoz M., Gulcu B., Hazir C., Kaya HK., Hazir S., 2009** - Biological control potential of Turkish entomopathogenic nematodes against the Mediterranean fruit fly, *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae). *Phytoparasitica* 37: 153–159.
- 184. Katsoyannos B. I., Kouloussis N. A., & Papadopoulos N. T., 1997** - Response of *Ceratitis capitata* to citrus chemicals under semi-natural conditions. *Entomologia experimentalis et applicata*, 82(2), 181-188.
- 185. Katsoyannos B. I., Panagiotidou K., & Kechagia I., 1986** - Effect of color properties on the selection of oviposition site by *Ceratitis capitata*. *Entomologia experimentalis et applicata*, 42(2), 187-193.
- 186. Kaya H. K., & Gaugler R., 1993** - Entomopathogenic Nematodes. *Annual Review of Entomology* 38: 181-206.
- 187. Kaya H. K., Aguilera M. M., Alumai A., Choo H.Y., de la Torre M., Fodor A., Ehlers R. U., 2006** - Status of entomopathogenic nematodes and their symbiotic bacteria from selected countries or regions of the world. *Biological Control*, 38, 134_155.
- 188. Khachatourians G.K., 1987** -Production and use of biological pest control agents. *Trends Bio. Tech.* 4: 120 - 124.

- 189. Khalaf M. Z., Shbar A. K., Naher F. H., Jabo N. F., Abdulhamza B. H., & Abod R., 2012** - Population density of mediterranean fruit fly (*Ceratitis capitata*) on fruit orchards in south Baghdad and Using Tephri Traps and GF- 120 as Control Methods. Regional Symposium on the Management of Fruit Flies in Near East Countries. Hammamet, Tunisia, 6- 8 November 2012.
- 190. Khan Z. R., James D. G., Midega C., Pickett J., 2008** - Chemical ecology and conservation biological control." *Biological Control* 45(2): 210-224.
- 191. Khimoud D.j., Louni A., 2008** - Estimation de l'infestation des différentes variétés d'agrumes par *Ceratitis capitata* Wied, 1824 (Diptera ; Trypetidae) en fonction de l'exposition dans différents vergers de la région de Tizi-Ouzou. Mémoire de master en écologie animal : université de Tizi-Ouzou .90 p.
- 192. Khoury N., 1998** -Etude preliminaire de la repartions et de la dynamique des populations de la mouche mediterraneenne des fruits (*C. capitata* Wied.) dans deferentes biotopes au Liban. Memoire (D.E.A), Insti de recherche agronomique Libanais-Fanar, 153p.
- 193. Knudsen J. T., Eriksson R., Gershenzon J., Stahl B., 2006** - Diversity and distribution of floral scent. *Botanical Review*, 72, 1-120.
- 194. Konstantopoulou M.A., and Mazomenos B.E., 2005** - Evaluation of *Beauveria bassiana* and *B. brongniartii* Strains and Four Wild-Type Fungal Species against Adults of *Bactrocera oleae* and *Ceratitis capitata*. *BioControl*, 50:293- 305.
- 195. Koppenhöfer A. M., Kaya H. K., & Taormino S. P., 1995** - Infectivity of entomopathogenic nematodes (Rhabditida: Steinernematidae) at different soil depths and moistures. *Journal of Invertebrate Pathology* 65: 193-199.
- 196. Koul O., Dhaliwal G. S., Cuperus G. W., 2004** - *Integrated pest management: potential, constraints and challenges*. CABI. London, UK. 343pp.
- 197. Kroschel J., Zegarra O., 2013** - Attract-and-kill as a new strategy for the management of the potato tuber moths *Phthorimaea operculella* (Zeller) and *Symmetrischema tangolias* (Gyen) in potato: Evaluation of its efficacy under potato field and storage conditions. *Pest Manag Sci* 69:1205-1215.

- 198. Kumar S., Chandra A., Pandey K. C., 2008** -*Bacillus thuringiensis* (Bt) transgenic crop: an environment friendly insect-pest management strategy. *J Environ Biol*, 29(5), 641-653.
- 199. Kushner D. J., & Heimpel A. M., 1957** - Lecithinase production by strains of *Bacillus cereus* Fr. and Fr. pathogenic for the larch sawfly, *Pristiphora erichsonii* (Htg.). *Canadian journal of microbiology*, 3(4), 547-551.
- 200. Labaude S., & Griffin C. T., 2018** - Transmission success of entomopathogenic nematodes used in pest control. *Insects*, 9(2), 72.
- 201. Laboulbene A., 1871** - Note sur les dommages causes par la *Ceratitis hispanica* aux fruits des orangers dans nos possessions d'Algerie. *Ann. Soc. Ent. France*, 5, 439-443.
- 202. Lacey L.A., Grzywacz D., Shapiro-Ilan D.I., Frutos R., Brownbridge M., Goettel M.S., 2015** - Insect pathogens as biological control agents: Back to the future. *J. Invertebr. Pathol.* 132, 1–41.
- 203. Lachiheb A., 2008** - Optimization de la dose d'irradiation dans le cadre d'un projet de lutte contre *Ceratitis capitata*. Mémoire d'ing. Ecol sup. d'Agri. De Morgane, Tunisie. 122p.
- 204. Langford E.A., Nielsen U.N., Johnson S.N., Riegler M., 2014** - Susceptibility of Queensland fruit fly, *Bactrocera tryoni* (Froggatt) (Diptera: Tephritidae), to entomopathogenic nematodes. *Biol. Control*: 69, 34–39.
- 205. Lanier G., 1990** - Principles of attraction-annihilation: Mass trapping and other means. Behavior modifying chemicals for insect pest management: Applications of pheromones and other attractants, New York, pp 25-45.
- 206. Latgé J. P., Sampedro L., Brey P., Diaquin M., 1987** - Aggressiveness of *Conidiobolus obscurus* against the pea aphid: influence of cuticular extracts on ballistospore germination of aggressive and non-aggressive strains. *Microbiology*, 133(7).
- 207. Levinson H. Z., Levinson A. R., & Müller K., 1990** - Influence of some olfactory and optical properties of fruits on host location by the Mediterranean fruit fly (*Ceratitis capitata* Wied.). *Journal of Applied Entomology*, 109(1-5), 44-54.

- 208. Levinson H., Levinson A., Osterried E., 2003** - Orange-derived stimuli regulating oviposition in the Mediterranean fruit fly. *Journal of applied entomology*, 127(5), 269-275.
- 209. Lewis E. E., Campbell J., Griffin C., Kaya H., Peters A. J., 2006** - Behavioral ecology of entomopathogenic nematodes." *Biological Control* 38: 66-79.
- 210. Lezama-Gutiérrez R., la Luz A. T. D., Molina-Ochoa J., Rebolledo-Dominguez O., Pescador A. R., López-Edwards M., & Aluja M., 2000** - Virulence of *Metarhizium anisopliae* (Deuteromycotina: Hyphomycetes) on *Anastrepha ludens* (Diptera: Tephritidae): laboratory and field trials. *Journal of Economic Entomology*, 93(4), 1080-1084.
- 211. Light D. M., & Jang E. B., 1996** - Plant volatiles evoke and modulate tephritid behavior. In *Fruit Fly Pests: A World Assessment of Their Biology and Management*, ed. BA McPheron, GJ Steck, pp. 123–33. Delray Beach, FL: St. Lucie Press.
- 212. Lindegren JE., Vail PV., 1986** - Susceptibility of Mediterranean fruit fly, melon fly, and oriental fruit fly (Diptera: Tephritidae) to the entomogenous nematode *Steinernema feltiae* in laboratory tests. *Environ Entomol* 15:465-468.
- 213. Liquido N. J., Cunningham R. T., & Nakagawa S., 1990** - Host plants of Mediterranean fruit fly (Diptera: Tephritidae) on the Island of Hawaii (1949-1985 survey). *Journal of Economic Entomology*, 83(5), 1863-1878.
- 214. Liquido N. J., Cunningham R. T., & Shinoda L. A., 1991** - Host plants of the Mediterranean fruit fly, Diptera: Tephritidae, an annotated world review (No. 632.7016/L693).– USDA Misc. Publ. 77: 52p.
- 215. López S. B., López M. L., Aragón L. M., Tereschuk M. L., Slanis A. C., Feresin G. E., ... & Tapia A. A., 2011** - Composition and anti-insect activity of essential oils from *Tagetes L.* species (Asteraceae, Helenieae) on *Ceratitis capitata* Wiedemann and *Triatoma infestans* Klug. *Journal of agricultural and food chemistry*, 59(10), 5286-5292.
- 216. Loussert R., 1987** - Les agrumes, arboricultures. Ed. Mkalles–Mar Roukoz. Liban. Technique scientifique universitaire, 113 p.

217. **Lu D., Sepulveda C., & Dillman A. R., 2017** - Infective juveniles of the entomopathogenic nematode *Steinernema scapterisci* are preferentially activated by cricket tissue. *PloS one*, 12(1).
218. **MacKenzie D. I., Nichols J. D., Royle J. A., Pollock K. H., Bailey L., & Hines, J. E., 2017** - *Occupancy estimation and modeling: inferring patterns and dynamics of species occurrence*. Elsevier.
219. **Magalhaes S.T.V., Jham G.N., Picanco M.C., et Magalhaes G., 1989** - Mortality of second-instar larvae of *Tuta absoluta* produced by the hexane extract of *lycopersicon hirsutum* f. *Glabratum* (pi 134417) leaves, agricultural and forest entomology (3): 297-303.
220. **Magaña C., Hernández-Crespo P., Ortego F., & Castañera P., 2007** - Resistance to malathion in field populations of *Ceratitis capitata*. *Journal of Economic Entomology*, 100(6), 1836-1843.
221. **Mahmoud F. M., 2009** - Pathogenicity of Three Commercial Products of Entomopathogenic Fungi. *Beauveria bassiana*, *Metarhizum anisopilae* and *Lecanicilium lecani* against adults of olive fly, *Bactrocera oleae* (Gmelin) (Diptera; Tephritidae) in the laboratory. *Plant Protect. Sci*,45: 98-102.
222. **Mahmoud M. F., and Osman M.A.M., 2007** - Use of the nematode *Steinernema feltiae* Cross N 33 as a biological control agent against the Peach Fruit Fly *Bactrocera zonata*. *Tunisian Journal of Plant Protection*, 2: 109-115.
223. **Mahmoud Y.A., Ebadah I. A., Hala M. S., Metwally Saleh M.E., 2016** - Controlling of Larvae, Pupae and Adults of the Peach fruit fly, *Bactrocera zonata* (Saund.) (Diptera: Tephritidae) with the Entomopathogenic Nematode, *Steinernema feltiae*. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 26(3), 615-617.
224. **Malacrida A. R., Gomulski L. M., Bonizzoni M., Bertin S., Gasperi G., Guglielmino C., 2007** - Globalization and fruit fly invasion and expansion: the medfly paradigm. *Genetica* 131(1): 19.
225. **Malavasi A, Zucchi R.A., 2000** - Moscas-das-frutas de importância econômica no Brasil: conhecimento básico e aplicado. Ribeirão Preto: Holos 327 p.
226. **Mansour M., 2010** - Attract and kill for codling moth *Cydia pomonella* (Linnaeus) (Lepidoptera: Tortricidae) control in Syria. *J App Entomol* 134:234-242.

- 227. Martinez-Ferrer M., Campos J., Fibla J., 2012** - Field efficacy of *Ceratitidis capitata* (Diptera: Tephritidae) mass trapping technique on clementine groves in Spain. *J App Entomol* 136:181-190.
- 228. Mazih A., 1992** - Recherches sur l'écologie de la mouche méditerranéenne du fruit *Ceratitidis capitata* Wiedemann (Diptera, Tephritidae), dans l'arganeraie de la plaine du Souss (Maroc). Rabat, Thèse de Doctorat d'Etat des Sciences Agronomiques : IAV Hassan II. 122p.
- 229. Mcinnis D., Tam S., Grace C., Miyashita D., 1994** - Population suppression and sterility rates induced by variable sex ratio, sterile insect releases of *Ceratitidis capitata* (Diptera: Tephritidae) in Hawaii. *Ann Entomol Soc Am* 87:231-240.
- 230. McPhail M., 1939** - Protein lures for fruitflies. *Journal of Economic Entomology*, 32(6), 758-761.
- 231. McPherson BA., Steck GJ., 1996** - Fruit fly pests: A world assessment of their biology and management. St Lucie Press, Florida, USA. 587pp.
- 232. Medeiros A., Oliveira L., & Garcia P., 2007** - Suitability as Medfly *Ceratitidis capitata* (Diptera, Tephritidae) hosts, of seven fruit species growing on the island of São Miguel, Azores. *Arquipélago. Life and Marine Sciences* 24: 33-40.
- 233. Medouhes D., Kaci G., 1997** - Etude au laboratoire des effets de la texture du sol et de la profondeur d'enfouissement sur le taux d'émergence et la durée de pupaison de *Ceratitidis capitata*. (WIED 1824). Thèse. Ing. Ins. Agronomie : Uni. Tizi-Ouzou. 84 p.
- 234. Meikle W.G., Mercadier G., Girod V., Derouane F., Jones W.A., 2007** - Les microchampignons, nouvel espoir dans la lutte biologique contre *Varroa destructor*. Abeilles & cie. n°118 pp 14-19.
- 235. Meissle M., Romeis J., Bigler F., 2011** - Bt maize and integrated pest management - a European perspective. *Pest Manage Sci* 67: 1049-1058.
- 236. Menéndez R., 2007** - How are insects responding to global warming? *Tijdschrift voor Entomologie*, 150(2), 355.
- 237. Metcalf R. L., & Luckmann W. H., 1994** - Introduction to insect pest management (Vol. 101). John Wiley & Sons. New York. 661pp.

- 238. Meyling N. V., & Eilenberg J., 2006** - Occurrence and distribution of soil borne entomopathogenic fungi within a single organic agroecosystem. *Agriculture, ecosystems & environment*, 113(1-4), 336-341.
- 239. Meyling N. V., Lübeck M., Buckley E. P., Eilenberg J., Rehner S. A., 2009** - Community composition, host range and genetic structure of the fungal entomopathogen *Beauveria* in adjoining agricultural and seminatural habitats. *Molecular Ecology*, 18(6), 1282-1293.
- 240. Michaud J., 2003** - Toxicity of fruit fly baits to beneficial insects in citrus. *J Insect Sci* 3:1-9.
- 241. Michaud J., Grant A., 2003** - IPM compatibility of foliar insecticides for citrus: Indices derived from toxicity to beneficial insects from four orders. *J Insect Sci* 3:1-10.
- 242. Miller L. K., Lingg A. J., Bulla L. A., 1983** - Bacterial, viral, and fungal insecticides. *Science*, 219(4585), 715-721.
- 243. Ministère des Ressources en Eau, 2003** - Synthèse sur la situation de l'assainissement et évaluation des besoins en station de traitement et d'épuration en vue de protéger les ressources en eau. Séminaire sur le secteur de l'eau en Algérie. Ministère des Ressources en eau, Alger, Algérie. 11 p.
- 244. Miranda M., Alonso R., Alemany A., 2001** - Field evaluation of medfly (Dipt., Tephritidae) female attractants in a Mediterranean agrosystem (Balearic Islands, Spain). *J App Entomol* 125:333- 339.
- 245. Mochi D. A., Monteiro A. C., De Bortoli S. A., Dória H. O., & Barbosa J. C., 2006** - Pathogenicity of *Metarhizium anisopliae* for *Ceratitis capitata* (Wied.)(Diptera: Tephritidae) in soil with different pesticides. *Neotropical Entomology*, 35(3), 382-389.
- 246. Mohammedi-Boubekka N., 2007** - Biosystématique des Aphidae et leur place dans l'entomofaune de l'oranger dans la plaine de la Mitidja. Thèse de magistère, Institut national agronomique, El Harrach, 156p.

247. **Molinari K., 1989** - Etude faunistique et comparaison entre trois stations dans le marais de Reghaia. Institut National Agronomique El Harrach, Alger, 171.
248. **Molyneux A. S., & Bedding R. A., 1984** - Influence of soil texture and moisture on the infectivity of *Heterorhabditis* sp. D1 and *Steinernema glaseri* for larvae of the sheep blowfly, *Lucilia Cuprina*. *Nematologica* 30: 358-365.
249. **Mondal S., Baksi S., Koris A., & Vatai G., 2016** - Journey of enzymes in entomopathogenic fungi. *Pacific Science Review A: Natural Science and Engineering*, 18(2), 85–99.
250. **Muñiz M., & Zalom F., 1997** - Developmental rate and number of generation estimates of *Ceratitidis capitata* (Wiedeman) in fruit growing regions of California. *Bulletin OILB/SROP* 20 55-56 USA, California.15 p.
251. **Mutin G., 1977** - *La Mitidja : décolonisation et espace géographique*. Éditions du CNRS.Alger, 607p.
252. **Navarro-Llopis V., Alfaro F., Domínguez J., Sanchis J., Primo J., 2008** - Evaluation of traps and lures for mass trapping of Mediterranean fruit fly in citrus groves. *Journal of economic entomology*, 101(1), 126-131.
253. **Navarro-Llopis V., Primo J., & Vacas S., 2013** - Efficacy of attract-and-kill devices for the control of *Ceratitidis capitata*. *Pest management science*, 69(4), 478-482.
254. **Navarro-Llopis V., Primo J., Vacas S., 2015** - Bait station devices can improve mass trapping performance for the control of the Mediterranean fruit fly. *Pest management science*, 71(7), 923-927.
255. **Navarro-Llopis V., Sanchis-Cabanes J., Ayala I., Casaña-Giner V., & Primo-Yúfera E., 2004** - Efficacy of lufenuron as chemosterilant against *Ceratitidis capitata* in field trials. *Pest management science*, 60(9), 914-920.
256. **Niane A., 1979** - *Echange Cationique homovalent Na-K et Hétérovalent Ca-Na dans les sols de la Mitidja*. Mémoire Ingénieur., Inst. nati. Agro., El Harrach. 45 p.
257. **Nunez B. L., 1987** - La moska del mediterreo. *Informa (Enera. Febrero-Maio)*, CA, 9-17.

- 258. Nouh GM., Hussein M., 2014** - The role of entomopathogenic nematodes as biocontrol agents against some tephritid flies. *Adv Biol Res* 8:301–306.
- 259. OMS 2005** - Guidelines for laboratory and field testing of mosquito larvicides. World Health Organization, 1–41. <https://doi.org/Ref:WHO/CDS/WHOPES/GCDPP/2005.11>
- 260. Oreste M., Baser N., Bubici G., Tarasco E., 2015** - Effect of *Beauveria bassiana* strains on the *Ceratitis capitata*-*Psytalia concolor* system. *Bull Insectol*, 68(2), 265-272.
- 261. Ortiz-Urquiza A., & Keyhani O. N., 2013** - Action on the surface: Entomopathogenic fungi versus the insect cuticle. *Insect*, 4, 357-354.
- 262. Ortiz-Urquiza A., Riveiro-Miranda L., Santiago-Alvarez C., & Quesada-Moraga E., 2010** - Insect-toxic secreted proteins and virulence of the entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana*. *Journal of Invertebrate Pathology*, 105(3), 270–278.
- 263. Ortu S., 1982** - Observations on the temporary resistance of fruits of some citrus species to the attacks of *Ceratitis capitata* Wied. in Sardinia. *Annali della Facolta di Agraria, Studi Sassaressi, Sassari (Italy)*.
- 264. Oukil S., 1990** - Effets des insecticides et des radiations ionisantes en relation avec la variabilité génétique chez la Mouche Méditerranéenne des Fruits: *Ceratitis capitata* Wiedemann (Diptère, Trypetidae). These 3eme cycle : Univ. Aix.Marseille III, Fac. Sc. Tech St Jerome. 138p.
- 265. Oukil S., 1995** - Effets des insecticides et des radiations ionisantes en relation avec la variabilité génétique chez la Mouche Méditerranéenne des Fruits: *Ceratitis capitata* Wiedemann (Diptère, Trypetidae). Thèse 3 ème cycle. Univ. Aix.MarseilleIII Fac.Sci.Tech.St. Jerome. 138p.
- 266. Oukil S., Bues R., Toubon J. F., Quilici S., 2002** - Allozyme polymorphism in populations of *Ceratitis capitata* from Algeria, the northwestern Mediterranean coast and Reunion Island. *Fruits*, 57(3), 183-191.

- 267. Ovruski S., Schliserman P., Aluja M., 2003** - Native and introduced host plants of *Anastrepha fraterculus* and *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae) in Northwestern Argentina. *Journal of Economic Entomology*, 96(4), 1108-1118.
- 268. PAC 2006** - Programme d'aménagement côtier (PAC) "Zone côtière algéroise": Rapport final intégré, Split : PAP/RAC. 189P.
- 269. Padrini F., & Lucheroni M. T., 1996** - *Le grand livre des huiles essentielles*. Éditions de Vecchi. 15 p.
- 270. Palma L., Muñoz D., Berry C., Murillo J., and Caballero P., 2014** - *Bacillus thuringiensis* Toxins: An Overview of Their Biocidal Activity. *Toxins (Basel)*. 6, 3296–3325.
- 271. Papadopoulos N. T., Katsoyannos B. I., Carey J. R., & Kouloussis N. A., 2001a** - Seasonal and annual occurrence of the Mediterranean fruit fly (Diptera: Tephritidae) in northern Greece. *Annals of the Entomological Society of America*, 94(1), 41-50.
- 272. Papadopoulos N. T., Katsoyannos B. I., Kouloussis N. A., Hendrich J., Carey J. R., Heath R. R., 2001** - Early detection and population monitoring of *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae) in a mixed-fruit orchard in northern Greece. *Journal of Economic Entomology*, 94(4), 971-978.
- 273. Patterson Stark J., & Lacey L. A., 1999** - Susceptibility of western cherry fruit fly (Diptera: Tephritidae) to five species of entomopathogenic nematodes in laboratory studies. *Journal of invertebrate pathology*, 74(2), 206-208.
- 274. Pedrini N., Crespo R., & Juárez M. P., 2007** - Biochemistry of insect epicuticle degradation by entomopathogenic fungi. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 146(1-2), 124-137.
- 275. Pereira R., Barbosa A., Silva N., Caldeira J., Rodrigues A., Dantas L., Costa R., 2000** - Madeira- Med, "Projecto de luta autocida contra a mosca do Mediterrâneo (*Ceratitis capitata* Wied)". Pp. 123- 130 in: Direcção Regional de Agricultura do Algarve (Eds). *Actas do Congresso Nacional de Citricultura*. Faro 16-18 de Novembro de 2000, Faro, Portugal. 639 pp.

- 276. Peters A., & Ehlers R. U., 1994** - Susceptibility of leatherjackets (*Tipula paludosa* and *Tipula oleracea*; Tipulidae; Nematocera) to the entomopathogenic nematode *Steinernema feltiae*. *Journal of Invertebrate Pathology*, 63(2), 163-171.
- 277. Pichersky E., & Gershenzon J., 2002** - The formation and function of plant volatiles: perfumes for pollinator attraction and defense. *Current opinion in plant biology*, 5(3), 237-243.
- 278. Pryor S. C., Scavia D., Downer C., Gaden M., Iverson L., Nordstrom R., Robertson G. P., 2014** - Midwest. Climate change impacts in the United States: The third national climate assessment. In: Melillo, JM; Richmond, TC; Yohe, GW, eds. National Climate Assessment Report. Washington, DC: US Global Change Research Program: 418-440.
- 279. Pye A. E., & Burman M., 1977** - Pathogenicity of the nematode *Neoplectana carpocapsae* (Rhabditida, Steinernematidae) and vertain microorganisms towards the large pine weevil, *Hylobius abietis* (Coleoptera, Curculionidae). *Annales Entomologici Fennici* 43 : 115-119.
- 280. Quesada-Moraga E., Ruiz-García A., & Santiago-Alvarez C., 2006** - Laboratory evaluation of entomopathogenic fungi *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* against puparia and adults of *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae). *Journal of Economic Entomology*, 99(6), 1955-1966.
- 281. Quilici S., 1993** - Programme de recherche et d'action sur la mouche méditerranéenne des fruits à l'île de la Réunion. *Fruits*, 49, 28-41.
- 282. Radonjić S., Čizmović, M., Pereira R., (2012)**. Population Dynamics of the Mediterranean Fruit Fly in Montenegro. *International Journal of Insect Science*. 2013. 5-35.
- 283. Ramade F., 1984** - Elément d'écologie. Ecologie fondamentale. Ed. Mc Graw-Hill, Paris, 379 p.
- 284. Ramade F., 2003** - Eléments d'écologie fondamentale. Ed. Dunod, Paris, 690 p.

- 285. Rampelotti F. T., Ferreira A., Prando H. F., Grützmacher A. D., Martins J. D. S., Tcacenco F. A., Mattos M. L. T., 2007** - Patogenicidade de *Metarhizium anisopliae* (Metsch.) Sorokin sobre as fases do desenvolvimento de *Tibraca limbativentris* Stal (Hemiptera: Pentatomidae) em condições de laboratório. *Arq. Inst. Biol.*, 74(2), 141-148.
- 286. Regnault-Roger C., Fabres G., & Philogène B. J. R., 2005** - *Enjeux phytosanitaires pour l'agriculture et l'environnement.*
- 287. Remund U., Boller E., 1983** - Pièges visuels pour la lutte biotechnique et prévision négative de la mouche de la cerise, *Rhagoletis cerasi* L Fruit Flies of Economic Importance, pp 490-494.
- 288. Riba G., Marcandier S., Goussard J., 1984** - Influence de l'humidité relative sur l'agressivité et la viabilité des souches de *Beauveria bassiana* (Bals.) Vuillemin et de *Metarhizium anisopliae* (Metsch.) Sorokin, hyphomycètes pathogènes de la pyrale du maïs, *Ostrinia nubilalis* Hübn. *Agronomie* 4 :189-194.
- 289. Richmond J. A., Thomas H. A., Bhattacharyya H., 1983** - Predicting spring flight of Nantucket pine tip moth (Lepidoptera: Olethreutidae) by heat unit accumulation. *Journal of Economic Entomology*, 76(2), 269-271.
- 290. Robert P.C., 1986** - Les relations plantes-insectes phytophages chez les femelles pondeuses : le rôle des stimulus chimiques et physiques. Une mise au point bibliographique. *Agronomie* 6 (2) : 127-142.
- 291. Roberts D. W., 1981** - Toxins of entomopathogenic fungi. *Microbial control of pests and plant diseases, 1970-1980.*
- 292. Roberts D. W., et Campbell A. S., 1977** - Stability of entomopathogenic fungi. *Misc Publ. Entomol Soc. Am.* 10: 19-76.
- 293. Roessler Y., et Chen C., 1994** -The Mediterranean fruit fly, *Ceratitis capitata*, a major pest of citrus in Israel, its regulation and control. *Bulletin OEPP/EPPO* Bulletin 24, 813-816.
- 294. Ronald F.L., et Jayma L., 1992** - Mediterranean Fruit Fly, *Ceratitis capitata* 1(Wiedemann). Department of Entomology. Honolulu, Hawaii. 5p.

- 295. Roy P. J., Stuart J. M., Lund J., Kim S. K., 2002** - Chromosomal clustering of muscle-expressed genes in *Caenorhabditis elegans*. *Nature*, 418(6901), 975-979.
- 296. Sabbahi R., 2008** - Utilisation du champignon entomopathogène *Beauveria bassiana* dans une stratégie de gestion phytosanitaire des principaux insectes ravageurs en fraiseraies. Thèse de doctorat (Ph. D.). Institut nationale de la recherche scientifique, Université du Québec. 181 p.
- 297. Sacantanis K., 1951** - Influence de l'humidité sur l'incubation des œufs de la Mouche des fruits, *Ceratitis capitata* WIED. *CR IX e Congr. Int. Ent. Amsterdam, 1*, 460-464.
- 298. Salama H. S., Shehata I. E. S., Ebada I. M., Fouda M., & Ismail I. A. E. K., 2019** - Prediction of annual generations of the tomato leaf miner *Tuta absoluta* on tomato cultivations in Egypt. *Bulletin of the National Research Centre*, 43(1), 93.
- 299. Sampaio A. S., Myazaki I., Suplicy F. N., Oliveira D. A., Bitran E. A., Teofilo S. J., 1984** - Possible factors determining the degree of susceptibility of certain citrus varieties to attack by 'fruit flies' (*Ceratitis capitata* Wied., 1824 and *Anastrepha spp.*). *Biologico*, 50, 273-284.
- 300. Samuels R. I., Coracini D. L. A., dos Santos C. M., Gava C. A. T., 2002** - Infection of *Blissus antillus* (Hemiptera: Lygaeidae) eggs by the entomopathogenic fungi *Metarhizium anisopliae* and *Beauveria bassiana*. *Biological control*, 23(3), 269-273.
- 301. Saranraj P., & Jayaparakash A., 2017** - Agrobenevolent entomopathogenic fungi– *Beauveria bassiana*: a review. *Asian Journal of Multidisciplinary Research (IAJMR)*, 3(2), 1051– 1087.
- 302. Schmutterer H., 1990** - Properties and potentials of natural pesticides from neem tree. *Annu Rev Entomol* 35 : 271-298.
- 303. Scoz PL., Botton M., Garcia MS., Pastori PL. 2006** - Avaliação de atrativos alimentares e armadilhas para o monitoramento de *Anastrepha fraterculus* (Wiedemann, 1830) (Diptera: Tephritidae) na cultura do pessegueiro (*Prunus persica* L. Batsh). *Idesia* 24(2) :1-9.

- 304. Seguy E., 1934** - Notes Scientifiques : Contribution a la connaissance des Insectes Diptères du Maroc. La Terre et la vie.
- 305. Settaoui S., S Taibi A., Hammadi F., Doumandji S., 2017** - Infestation Des Agrumes Par La Mouche Mediterraneenne Des Fruits *Ceratitis capitata* (Wiedemann, 1824) (Diptera, Trypetidae) A Tlemcen-Algerie. *Algerian Journal of Arid Environment "Ajae"*, 7(1).
- 306. Sevacherian V., Toscano N. C., Van Steenwyk R. A., Sharma R. K., & Sanders R. R., 1977** - Forecasting pink bollworm emergence by thermal summation. *Environmental Entomology*, 6(4), 545-546.
- 307. Sezer G. Ö. K., Güven Ö., et Karaca İ., 2018** - Entomopatojen Fungus *Beauveria bassiana*'nın Çam Keseböceği (*Thaumetopoea wilkinsoni* Tams)'nin Farklı Dönemlerine Etkileri. *Türkiye Biyolojik Mücadele Dergisi*, 9(1), 7-18.
- 308. Shapiro-Ilan D. I., Gouge D. H., Piggott S. J., Fife J. P., 2006** - Application technology and environmental considerations for use of entomopathogenic nematodes in biological control." *Biological Control* 38: 124-133.
- 309. Shaurub E.H., Soliman N.A., Hashem A.G., Abdel-Rahman A.M., 2015** - Infectivity of four entomopathogenic nematodes in relation to environmental factors and their effects on the biochemistry of the Medfly *Ceratitis capitata* (Wied.) (Diptera: Tephritidae). *Neotropical Entomology* 44 (6): 610–618. DOI: 10.1007/s13744-015-0332-3.
- 310. Shelly T., Epsky N., Jang E. B., Reyes-Flores J., Vargas R., 2014** -Trapping and the detection, control, and regulation of Tephritid fruit flies: lures, area-wide programs, and trade implications. Springer Netherlands, USA. 638pp.
- 311. Shelton A. M., Zhao J. Z., & Roush R. T., 2002** - Economic, ecological, food safety, and social consequences of the deployment of Bt transgenic plants. *Annual review of entomology*, 47(1), 845-881.
- 312. Sherwood L., Klandorf H., Yancey P., 2016** - *Physiologie animale*. De Boeck Supérieur. Belgique, 754p.

- 313. Shimazu M., 2004** - A novel technique to inoculate conidia of entomopathogenic fungi and its application for investigation of susceptibility of the Japanese pine sawyer, *Monochamus alternatus*, to *Beauveria bassiana*. *Applied Entomology and Zoology*, 39(3), 485–490.
- 314. Shoukry A., & Hafez M., 1979** - Studies on the biology of the Mediterranean fruit fly *Ceratitidis capitata*. *Entomologia Experimentalis et applicata*, 26(1), 33-39.
- 315. Siderhurst MS., Jang EB., 2010** - Cucumber volatile blend attractive to female melon fly, *Bactrocera cucurbitae* (Coquillett). *J Chem Ecol* 36:699-708.
- 316. Simmonds M. S. J., Evans H. C., & Blaney W. M., 1992** - Pesticides for the year 2000: mycochemicals and botanicals. In: Abdul Aziz SA, Kadir S, Henry S, Barlow, eds. *Pest management and the environment in 2000*. Wellingford: CAB International.
- 317. Singh S., Eric M., Floyd I., Leonard H.D., 2012** - Characterization of *Photorhabdus luminescens* growth for the rearing of the beneficial nematode *Heterorhabditis bacteriophora*. *Indian Journal of Microbiology* 52 (3): 325–331. DOI: 10.1007/ s12088-011-0238-7
- 318. Sinha K. K., Choudhary A. K., & Kumari P., 2016** - Entomopathogenic Fungi. In Omkar (Ed.), *Ecofriendly pest management for food security* (pp. 475-505). Academic Press: London, UK.
- 319. Sirjani S., 2009** - demonstrated that *S. feltiae* was the most efficacious against third-instar larvae of the olive fruit fly, *Bactrocera oleae* (Rossi), compared to *S. carpocapsae*, *S. riobrave*, *S. glaseri* (Steiner), *H. bacteriophora*, and *H. marelatus*.
- 320. Smart G. C., 1995** - Entomopathogenic nematodes for the biological control of insects. *Journal of Nematology* 27: 529-34.
- 321. Socolsky C., M. L., Fascio N. B., D'Accorso A., Salvatore E., Willink Y., Asakawa and Bardon A., 2008** - Effects of p-vinylphenyl glycosides and other related compounds on the oviposition behavior of *Ceratitidis capitata*. *Journal of Chemical Ecology* 34(4): 539-548.

- 322. Sookar P., Bhagwant S., Awuor Ouna E., 2008** - Isolation of entomopathogenic fungi from the soil and their pathogenicity to two fruit fly species (Diptera: Tephritidae). *J App Entomol* 132 :778-788.
- 323. Soria F., 1962** - Plantes hôtes secondaires de *Ceratitis capitata* wied en Tunisie Ann. De l'INRAT, vol 35 : 51-72.
- 324. Soria F., 1963** - Etude des populations et de dispersion de *Ceratitis capitata* Wied.(Diptera:-isotopes. *Int. Atomic. Energy. Agency IAEA I Vienne*, 357-363.
- 325. Srivastava M., Raizada R., 2007** - Lack of toxic effect of technical azadirachtin during postnatal development of rats. *Food Chem Toxicol* 45: 465-471.
- 326. Starnes R. L., Liu C. L., & Marrone P. G., 1993** - History, use, and future of microbial insecticides. *American Entomologist*, 39(2), 83-91.
- 327. Steiner LF., 1952** - Fruit fly control in Hawaii with poison-bait sprays containing protein hydrolysates. *J Econ Entomol* 45 :838-843.
- 328. Stewart A. D. G., & Thompson M. W., 1969** - Microtopography of surfaces eroded by ion-bombardment. *Journal of Materials Science*, 4(1), 56-60.
- 329. Temerak S., Lysandrou M., Moussa A., Chloridis A., Nagy P. 2012** - Spinosad bait an organic green bioinsecticide for the control of the Cucurbit fly *Dacus ciliatus* and the Peach fly *Bactrocera zonata* in Egypt. *TJPP* 92.
- 330. Thomas M.C., Heppner J.B., Aspérule R.E., Weems H.V., Steck G.J. & Thomas M.C., Heppner J.B., Woodruff R.E., Weems H.V., Steck G.J. Fasulo T.R. 2001** - Mediterranean fruit fly, *Ceratitis capitata* (Wiedmann) (Diptera: Tephritidae) *Entomology section Circulars*, 4: 230, 273.
- 331. Todorova S. I., Côté J. C., Martel P., & Coderre D., 1994** - Heterogeneity of two *Beauveria bassiana* strains revealed by biochemical tests, protein profiles and bio-assays of *Leptinotarsa decemlineata* (Col.: Chrysomelidae) and *Coleomegilla macultata lengi* (Col.: Coccinellidae) larvae. *Entomophaga*, 39(2), 159-169.
- 332. Toledo J., Campos S. E., Flores S., Liedo P., Barrera J. F., Villaseñor A., & Montoya P., 2007** - Horizontal transmission of *Beauveria bassiana* in *Anastrepha ludens* (Diptera: Tephritidae) under laboratory and field cage conditions. *Journal of economic entomology*, 100(2), 291-297.

- 333. Toledo J., Rojas R., Ibarra J.E., 2006** - Efficiency of *Heterorhabditis bacteriophora* (Nematoda: Heterorhabditidae) on *Anastrepha serpentina* (Diptera: Tephritidae) larvae under laboratory conditions. *Fla Entomol* 89:524-526.
- 334. Tourmanoff C., 1953** - Description de quelques souches entomophytes de *Bacillus cereus* Frank. avec remarques sur leur action et celle d'autres bacilles sur le jaune d'oeuf, *Ann. Inst. Pasteur*, 85, 90.
- 335. Urbaneja A., Chueca P., Montón H., Pascual-Ruiz S., Dembilio O., Vanaclocha P., ... & Castañera P., 2009** - Chemical alternatives to malathion for controlling *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae), and their side effects on natural enemies in Spanish citrus orchards. *Journal of economic Entomology*, 102(1), 144-151.
- 336. Vayssieres J.F., Sinzogan A., & Bokonon-Ganta A., 2008** - les mouches des fruits du genre *Ceratitis* (Diptera : Tephritidae) en Afrique de l'Ouest., IITA-CIRAD. UPR Production fruitière, Montpellier., 4p.
- 337. Vey A., Fargues J., & Robert P., 1982** - Histological and ultrastructural studies of factors determining the specificity of pathotypes of the fungus *Metarhizium anisopliae* for scarabeid larvae. *Entomophaga*, 27(4), 387-397.
- 338. Visser J.H., 1986** - Host odor perception in phytophagous insects. *Annual Review of Entomology*, 31: 121-144.
- 339. Weaver D. K., & Subramanyam B., 2000** - Botanicals. In Alternatives to pesticides in stored-product IPM (pp. 303-320). Springer, Boston, MA.
- 340. Weems H., 1981** - Mediterranean fruit *Ceratitis capitata* Wied. (Diptera: Trypetidae). *Pep. Agric.Cumer, Dir. Plant. Industry. Entomol. Circ. Florida*, 230: 12p.
- 341. White I. M., & Elson-Harris M. M., 1992** - *Fruit flies of economic significance: their identification and bionomics*. CAB international. ACIAR. pp: 12-601.
- 342. White I. M., & Elson-Harris M., 1994** - *Fruit Flies of Economic Significance: Their Identification and Bionomics*. CAB International. Oxon, UK. 601 p.

- 343. Williams C.D., Dillon A.B., Ennis D.E., Hennessy R., Griffin C.T., 2015** - Differential susceptibility of pine weevil, *Hylobius abietis* (Coleoptera: Curculionidae), larvae and pupae to entomopathogenic nematodes and death of adults infected as pupae. *BioControl* . 60, 537–546.
- 344. Williams T., Valle J., Viñuela E., 2003** - Is the naturally derived insecticide Spinosad® compatible with insect natural enemies? *Biocontrol Sci Tech* 13:459-475.
- 345. Wirth M.C., Park H., Walton W.E., and Federici B.A. 2005** - Cyt1A of *Bacillus thuringiensis* Delays Evolution of Resistance to Cry11A in the Mosquito *Culex quinquefasciatus*. 71, 185–189.
- 346. Wojterski T., 1985** - Guide de l'excursion internationale de phytosociologie : Algérie du Nord. Institut national agronomique. Harrach. 274 p.
- 347. Wong T. T., Ramadan M. M., Herr J. C., & Mcinnis, D. O., 1992** - Suppression of a Mediterranean fruit fly (Diptera: Tephritidae) population with concurrent parasitoid and sterile fly releases in Kula, Maui, Hawaii. *Journal of Economic Entomology*, 85(5), 1671-1681.
- 348. Wraight S. P., Filotas M. J., & Sanderson J. P., 2016** - Comparative efficacy of emulsifiable-oil, wettable-powder, and unformulated-powder preparations of *Beauveria bassiana* against the melon aphid *Aphis gossypii*. *Biocontrol Science and Technology*, 26(7), 894-914.
- 349. Yana A., & Stancic J., 1967** - Essais de lutte chimique contre *Ceratitidis capitata* Wied. En Tunisie et Perspectives d'avenir. Rapport d'activité, INRAT.
- 350. Yang Y., Zhang Y., Wang M., Li S. S., Ma X. Y., & Xu Z. H., 2015** - Bioefficacy of entomopathogenic *Aspergillus* strains against the melon fly, *Bactrocera cucurbitae* (Diptera: Tephritidae). *Applied entomology and zoology*, 50(4), 443-449.
- 351. Yee W. L., & Lacey L. A., 2005** - Mortality of different life stages of *Rhagoletis indifferens* (Diptera: Tephritidae) exposed to the entomopathogenic fungus *Metarhizium anisopliae*. *Journal of Entomological Science*, 40(2), 167-177.

- 352. Yee W.L., Lacey L.A., 2003** - Stage-specific mortality of *Rhagoletis indifferens* (Diptera: Tephritidae) exposed to three species of *Steinernema* nematodes. *Biological Control*, v.27, n.3, p.349-356, 2003.
- 353. Zalom F. G., Goodell P. B., Wilson L. T., Barnett W. W., & Bentley W. J., 1983** - Degree-Days, the Calculation and Use of Heat Units in Pest Management: University of California Division of Agriculture and Natural Resources Leaflet 21373. *University of California, Berkeley, CA*.
- 354. Zimmermann G., 2007** - Review on safety of the entomopathogenic fungus *Metarhizium anisopliae*. *Biocontr.Sci. Technol* .17 :879-920.
- 355. Zucoloto F. S., Maria P. S.& Bravo I., 2005** - Influence of protein on feeding behaviour of *Ceratitis capitata*: Comparaison between immature males and females. *Neotropical Entomology*, 34 (4): 539-545.

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

RESEARCH

Open Access



Efficacy of Turkish isolate of *Steinernema feltiae* (Rhabditida: Steinernematidae) in controlling the Mediterranean fruit fly, *Ceratitis capitata* (Wiedemann) (Diptera: Tephritidae), under laboratory conditions

Sabrina Chergui^{1*} , Abdelmdjid Benzehra¹, Khadidja Boudjema¹, Hadjer Barkou¹ and Ismail Karaca²

Abstract: The Mediterranean fruit fly, *Ceratitis capitata* (Wiedemann) (Diptera: Tephritidae), is one of the most destructive pests in fruit growings. It pupates in the soil. The pupae are target of many organisms sheltering the soil such as the entomopathogenic nematodes (EPN). Pathogenicity of the Turkish strain of the EPN, *Steinernema feltiae*, was evaluated against late instar larvae, pupae, and adults of *C. capitata* under laboratory conditions. Suspensions of the nematode were applied at four increasing concentrations of (0 (for control) 50, 100, and 200 IJs/ml) in 1 ml of distilled water. The infectivity of *S. feltiae* against soil stages of *C. capitata* under different soil moisture levels of 100, 75, and 50% of field capacity was evaluated. Mortality rates were recorded after 5 days of treatment. In order to confirm the nematode infection, the dead larvae and pupae were collected and incubated until the appearance of the infectious juvenile (IJs) or dissected under a stereomicroscope to check for nematodes. The last instar larvae and newly formed pupae were more susceptible to EPN infection than old pupae. The infectivity was directly proportional to the increase of soil moisture. The highest mortality (75%) was obtained. *S. feltiae* was able to infect adults easily because of the multiple ways of entrance for the nematodes (mouth, anus, and spiracles) than the larvae and/or pupae. Therefore, the Turkish isolate of *S. feltiae* could be useful for an integrated pest management program of *C. capitata*.

Keywords: *Ceratitis capitata*, *Steinernema feltiae*, Nematode density, Soil moisture

Background

The Mediterranean fruit fly, *Ceratitis capitata* (Wiedemann) (Diptera: Tephritidae), is one of the most dangerous pests of fruit crops in the Mediterranean region. The use of insecticides as the sole way of combating this pest has caused environmental pollution and represents a risk for humans and animals in addition to the resistance that has appeared in the insect. The difficulty of controlling this pest's larvae, especially by beneficial insects, comes from the hiding of the larvae inside the infested fruits far from the parasitoids and/or the predators. However, after going through two molts,

these larvae leave the fruit by a characteristic jump, sink a few centimeters deep into the soil, and pupate to become the target of entomopathogenic nematodes (EPN). After locating a host, infectious juvenile stages (IJs) penetrate into the host through natural orifices or the cuticle of the insect (Peters and Ehlers 1994) and release their symbiotic bacteria into the hemocoel. The host is quickly killed by sepsis.

EPNs of the genera *Steinernema* and *Heterorhabditis* are widely studied, so far about 90 species of Steinernematidae and 20 species of Heterorhabditidae have been described (Labaude and Griffin 2018); however, only few species are commercially produced for use in biological control (Lacey et al. 2015) mainly *Steinernema carpocapsae*, *S. feltiae*, and *Heterorhabditis bacteriophora*. These EPNs are widely used to control insect pests with life

* Correspondence: chergui.sabrina92@gmail.com

¹Département de Zoologie Agricole et Forestière, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie, El-Harrach, Algeria

Full list of author information is available at the end of the article

stages in the soil (Grewal et al. 2005). Several entomopathogens have shown great efficacy in controlling the populations of the first and second larval instars than the third instar of different scarab grub species. The combination of EPN with entomopathogenic fungi optimizes their efficacy against these stages (Laznik and Trdan 2015).

Susceptibility varies with EPN species and the stage of the host development. Indeed, insect larvae are often more susceptible to EPN infection than adults (Odendaal et al. 2016). Trdan et al. (2009) indicated that both the temperature and the developmental stage of the pest have an important influence on the efficacy of EPN as pest-control agent. The mortality of *Bactrocera dorsalis* induced by *Heterorhabditis taysearae* ranged from 51.2 to 96.1% depending on isolates, despite the fact that all isolates were from Benin (Godjo et al. 2018).

Laboratory bioassays are important and allow selecting the most virulent species and isolates of EPN. *Steinernema feltiae* was tested against several pests of different orders including Coleoptera, Diptera, and Hemiptera. Previous research on the biology and the ecology of EPNs made better forecasts of their performance in the field. Indeed, environmental parameters such as temperature, moisture, vegetation types, and soil properties can affect the survival and virulence of nematodes, while infection depends on interactions between IJs, their symbiotic bacteria and the host (Labaude and Griffin 2018). In this regard, several researches are carried out to increase the efficiency thanks to the selection of the strains and the improvement of production methods (Testa and Shields 2017), formulation (Kim et al. 2015) and application (Bai et al. 2016).

It is in this context, the present study aimed at evaluate the pathogenicity of the Turkish isolate of *S. feltiae* against immature stages of *C. capitata* under laboratory conditions.

Materials and methods

Target pest

C. capitata larvae and pupae were obtained from the mass-rearing unit of the Plant Protection Department, Suleyman Demirel University, Turkey. The colony was maintained under controlled conditions at 25 ± 1 °C, 65% RH, under 14:10 (L:D) photoperiod. Larvae were reared in sterile Petri dishes containing artificial diet of: water (56 ml), sugar (12 g), Hcl (0.3ml), wheat germ (4 g), yeast (3 g), Benzoic acid (0.3 g), and bran (23 g). Adults were provided by water and a solid diet consisting of sucrose and yeast.

Entomopathogenic nematode

Bioassays were carried out with Turkish commercial strain of *S. feltiae* (Nematac 10 million) obtained from BioGlobal Company (Antalya). Aqueous suspensions of nematodes were prepared at different concentrations of 0, 50, 100, or 200 IJs/ml.

Susceptibility of *Ceratitis capitata* soil stages to entomopathogenic nematodes

The bioassays took place in a controlled environment room at 25 ± 1 °C, $62 \pm 5\%$ RH and 16:8 (L:D) photoperiod. Pupae and third instar larvae used for these experiments were collected from the artificial rearing. Effectiveness of the Turkish strain of *S. feltiae* in controlling soil stages of *C. capitata* was evaluated by exposing individuals to different concentrations of nematode suspensions (0 (C0), 50 (C1), 100 (C2), or 200 (C3) IJs/ml). These concentrations were chosen starting from the recommended commercial application of EPNs ($2.5 - 5 \times 10^9$ IJs/ha = 25–50 IJs/cm²) (Georgis and Hague 1991). Four replicates with 25 individuals were tested for each treatment. In the control treatment, 1 ml of distilled water without nematodes (D0) was applied. The dead individuals were dissected under a stereomicroscope to determine if the nematodes were present.

Contact method

Appropriate amounts of nematode concentrations (0, 50, 100, or 200 IJs/ml) were counted under a stereomicroscope and added to a filter paper with 1 ml of distilled water in a 9-cm Petri dish (Mahmoud 2007). All concentrations were tested on filter paper against the third instar *C. capitata* larvae and pupae in four replicates. Twenty-five individuals of each were exposed for 24 h to each concentration. Controls were treated with 1 ml of distilled water without nematodes. Mortality percentages were recorded for larvae at 24 h after treatment and after 15 days post-treatment for pupae to record emergence rate and pupal mortality.

Soil method

Infection took place in plastic cups (9 cm diameter and 5 cm deep) containing 50 g of natural sieved soil at 10% of moisture. EPNs were applied on the soil surface at the concentrations of 0, 50, 100, and 200 IJs in 1 ml of distilled water. Controls were sprayed by 1 ml of distilled water without nematodes. One hour after treatment, 25 newly formed pupae (0.0–24 h old) and 25 6-day-old ones of *C. capitata* were placed on the treated soil surface, where 25 third instar medfly larvae were placed on the soil surface in each cup and were left to move into the soil. These cups were covered by a lid and placed in a closed plastic container. Pupation of full-grown larvae took place within 6–10 h; 48 h after nematode treatment, the soil in each cup was sieved to obtain *C. capitata* larvae and pupae. Pupae were monitored daily for a period of 15 days for the emergence of adults. Dead pupae and larvae were dissected under a stereomicroscope to confirm the presence of EPN inside.

Susceptibility of *C. capitata* adults to entomopathogenic nematodes

One millimeter suspension of *S. feltiae* at different concentrations of 50, 100, or 200 IJs was mixed with 1 ml of 10% sugar solution for adults provided with a piece of cotton. Flies consumed the processed diet within 2–3 days of treatment. At the same time, a nematode-free diet was provided to adults used as controls. The adults were placed in (10 × 20 × 15 cm) cages under rearing conditions. Each treatment was repeated four times. Adult mortality was recorded 5 days after treatment.

Influence of soil moisture on *Steinernema feltiae* infectivity to *C. capitata* soil stages

The efficiency of *S. feltiae* against *C. capitata* larvae and pupae was investigated under three levels of relative soil moisture (100, 75, and 50% of soil field capacity). First, a soil sample was sent to the Laboratory of Soil Sciences, Suleyman Demirel University, in order to determine the soil field capacity and moisture. The field capacity in the soil samples used in the experiment was determined as 28.96% soil moisture. Therefore, in the treatment at 100% of field capacity, soil moisture was standardized at 28.96% in the 75% treatment, moisture was standardized at 21.72%; and in the 50% treatment, moisture was standardized at 14.48%. The bioassay was carried out according to the experimental procedure and was maintained in an incubator at 25 ± 1 °C, 70 ± 10% RH, and a 12-h photophase. A completely randomized experimental design was used with four replicates.

Influence of soil moisture on *Steinernema feltiae* infectivity to *C. capitata* larvae and pupae

The efficiency of *S. feltiae* against larvae and pupae of *C. capitata* was studied under three different soil moistures in a completely randomized design with four replicates each. Ten larvae and pupae of *C. capitata* were transferred to plastic pots (12 cm × 6 cm) containing 100 g of soil treated with an aqueous suspension of 100 IJs/ml. The control treatment received 2 ml of distilled water without nematodes. The plastic pots were covered and maintained in incubators at 25 ± 1 °C, 70 ± 10% RH, and a 12-h photophase. Mortality rates were recorded after 5 days of treatment.

Statistical analysis

Mortality rates were corrected according to Abbott's formula (Abbott 1925). One-way ANOVA was used to compare the mortality of *C. capitata*. Means were compared at the $P = 0.05$ level, and Tukey's test was used to separate means (Prism 7).

Results and discussion

Pathogenicity of the Turkish strain of the EPN, *S. feltiae* against last instar larvae, pupae, and adults of *C. capitata*

at 4 different concentrations of 0, 50, 100, or 200 IJs/ml was evaluated under laboratory conditions.

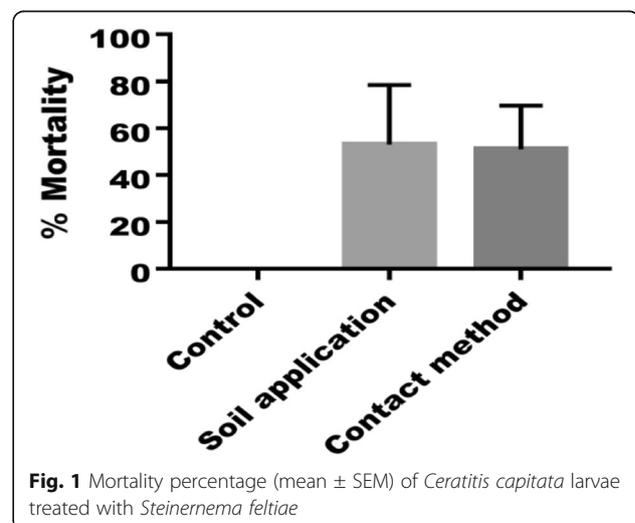
Susceptibility of *C. capitata* larvae

Results indicated that in both treatments, soil application and contact method, all concentrations caused higher cumulative mortality than the control treated with C0, where no infection was observed ($F = 32.53$, $DF = 2$, $P < 0.0001$). However, the Tukey test revealed no difference between the two treatment methods (Fig. 1).

Infection of *C. capitata* larvae by *S. feltiae* occurred in a very short time. Eighty-two percent of mortality in 24 h post-nematode treatment in larvae treated with the highest concentration C3 for the treatment in the soil against 69% of mortality recorded in larvae treated at the same concentration in contact method.

Results in Fig. 2 show that mortality rates increased with the increase of nematode concentration with a shock effect obtained in 24 h post treatment with C2 and C3 causing respectively 54 and 82% mortality in the treatment carried out in the soil and 56 and 69% mortality in the contact treatment carried out on a filter paper. In fact, the first signs of nematode infection appeared in the first hour after treatment, when a color change in the larvae was noticed. The first dead individuals were recorded 6 hrs post treatment. Dead larvae were dissected under a stereomicroscope in order to confirm the infection by the EPN (Fig. 3).

Larvae escaped from infection developed to pupae but some of them died as pupae. The monitoring of these pupae until emergence revealed a very significant difference in the emergence rate in treated larvae than the control ($F = 43.91$, $DF = 2$, $P < 0.0001$). Obtained observation is consistent with other reports that most EPN-infected larvae of *C. capitata* and other tephritids died after forming puparia (Sirjani et al. 2009). In



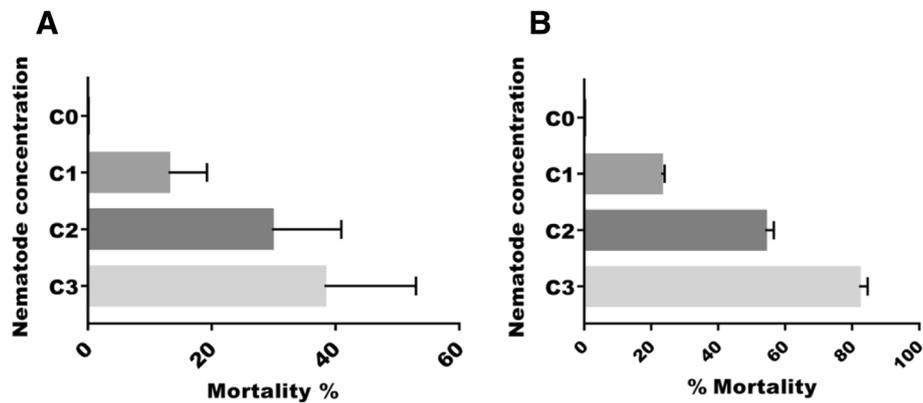


Fig. 2 Mortality percentage (mean \pm SEM) of *Ceratitis capitata* larvae treated with different concentration of *Steinernema feltiae*. **a** Soil application. **b** Filter paper application

another study, the pathogenicity of a Turkish strain of *S. feltiae* (09–31) showed that the majority of medfly larvae were killed before they could form puparia. These data suggested that *S. feltiae* (09–31) Aydın isolate was highly virulent to medfly larvae (Karagoz et al. 2009) and may support the conclusion that this species is adapted to dipterous larvae (Lewis et al. 2006). In an additional treatment, *S. feltiae* had an effect on the emerged flies of *C. capitata*. We recorded 11.76 and 11.23% of adult mortality from larvae treated in soil and filter paper, respectively.

Susceptibility of *C. capitata* pupae

Treatment with EPNs led to the mortality of pupae of *C. capitata* and resulted in a decrease in pupal emergence rate than the untreated ones ($F = 21.17$, $DF = 2$, $P < 0.0001$). However, older pupae and newly formed ones did not respond in the same way to treatment. Indeed, the statistical analysis revealed significant differences between the mortality rate for young and older pupae ($F = 94.11$, $DF = 2$, $P < 0.0001$). The Tukey test showed that the sensitivity of young pupae to nematodes was greater

than that of older ones. In fact, mortality was high in newly formed pupae than older pupae and with a response concentration-related mortality increased as inoculation rate of nematodes increased ($F = 187.2$, $FD = 3$, $P < 0.0001$). According to Mahmoud and Osman (2007), the pathogenicity of *S. feltiae* against *Bactrocera zonata* (Diptera: Tephritidae) caused a high mortality reaching a rate of 32% for pupae of 4 days old and 20% for pupae of 6 days old. In a study on *Ragoletis indifferens* pupae, Yee and Lacey (2003) justified that the EPNs had probably penetrated inter-segmental membranes before the last sclerotization of the integuments.

Despite low percentages of mortality occurred in old pupae of *C. capitata* (6 days); mortality in emerged flies from survived pupae however was high. A mortality rate of 10.19% in adults from young treated pupae for nematode suspensions and 37.04% mortality in adults from older pupae. These adults are probably infected from the soil during the emergence from the pupae. Uncompleted emergences and dead adults showed wings that were not fully spread and juvenile nematodes in the entire body.



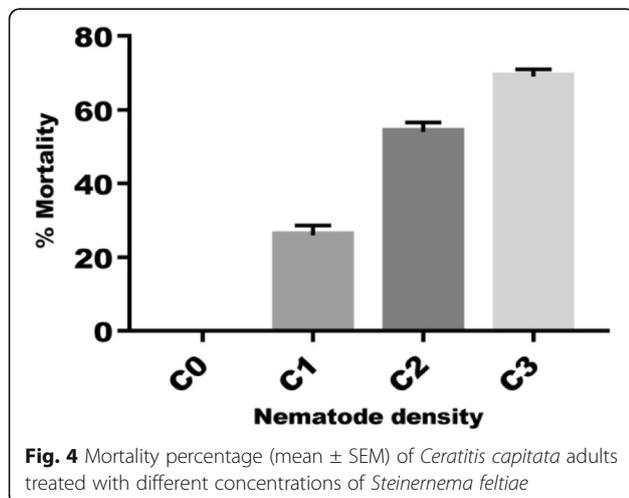
Fig. 3 Last instar larvae of *Ceratitis capitata* parasitized by *Steinernema feltiae* seen under a stereomicroscope

Williams et al. (2015) stated that *Heterorhabditis downesi* or *S. carpocapsae* infected pine weevils (*Hylobius abietis*), the insects died from emergence into adulthood, suggesting that nematode juveniles can infect pupae and survive metamorphosis of their host and adults.

Susceptibility of *C. capitata* adults

S. feltiae was effective and very virulent on *C. capitata* adults (Fig. 4). The application of nematode suspension caused higher cumulative mortality than the control treated with concentration C0, where no infection was observed ($F = 219.8$, $DF = 3$, $P < 0.0001$). The treatment with nematode suspension at concentration C2 and C3 caused (54 and 69%), respectively. The mean mortality percentage increased in a parallel manner with the increase in EPN concentrations.

The results revealed the great pathogenicity of the Turkish strain of *S. feltiae* against *C. capitata*. However, susceptibility of different stages of *C. capitata* was different; larvae and newly formed pupae were more susceptible to nematode infection than old pupae (> 48 h). Obtained results are consistent with several studies conducted on Tephritid flies and indicated that larvae are the most susceptible stage to EPNs infection (Yee and Lacey 2003; Kamali et al. 2013; Nouh and Hussein 2014 and Shaurub et al. 2015). Kamali et al. (2013) explained reasons for high incidence of infection of larvae compared to pupae and adults are due to their developmental duration, activity in soil, output of cues related to host finding by EPNs and larger natural openings. For example, the low susceptibility of pupae, which is highly observed in other studies (Hübner et al. 2017) can be attributed to lack of natural pathway entry for nematodes, as well as a more tough cuticle (Garriga et al. 2018). In fact, the large natural openings of the body of the larvae and the weakly sclerotized larval integument (relative to the nymphal integument) facilitate infection by the



nematode. Labaude and Griffin (2018) justified these differences in susceptibility by various mechanisms, such as differences in behavior, especially high activity levels and avoidance behaviors in adults, as well as more potent immune system or physical barriers to penetration of nematodes. Thus, the highest susceptibility of larvae to EPNs may be related to a greater locomotion at this stage, with greater release of CO₂, a chemical compound that plays a role in the attraction of the EPNs (Yee and Lacey 2003).

Influence of soil moisture on *S. feltiae* infectivity to *C. capitata* soil stages

The infectivity of *S. feltiae* to larvae and pupae of *C. capitata* was determined, under laboratory conditions for different soil moisture levels of 100, 75, and 50% of field capacity. According to the results illustrated in Fig. 5, the soil moisture level had an effect on the infectivity of *S. feltiae* to *C. capitata* soil stages. A highly significant difference was recorded between the control and the batch of larvae treated at different moisture levels ($F = 41.32$, $DF = 3$, $P < 0.0001$) and ($F = 19.1$, $DF = 3$, $P < 0.0001$) for pupae.

The efficiency of nematodes was similar at 100 and 50% of field capacity, but at 75% of field capacity, nematodes were more effective against the two soil stages of *C. capitata*. In fact, *S. feltiae* induced a great host mortality when soil moisture was at 75% of field capacity, causing respectively (82 and 38%) of mortality in larvae and pupae, with low efficiency in the other treatments (100 and 50%). No mortality was observed in the control.

Environmental parameters such as temperature, humidity, vegetation types, and soil properties can affect the survival and virulence of nematodes. Shaurub et al. (2015) indicated that nematode infectivity decreased with increase in exposure time to UV light, whereas it increased with increase in temperature. Infectivity increased in sandy soil, whereas it decreased in silt and clay soils. Soil moisture plays a key role in the mobility of nematode infective juveniles and thus their ability to search for and infect a host. Several studies indicated that soil moisture influence infectivity of EPNs, demonstrating, in general, a decrease in infectivity as soil moisture decreases (Grant and Villani 2003 and Alekseev et al. 2006) and many studies reported low nematode infectivity in extreme, low, and high soil moistures (near the saturation point) (Koppenhöfer et al. 1995).

Glazer (2002) demonstrated that the low infectivity at the highest moisture can be explained by the fact that soil saturation with water reduces oxygen concentration and restricts nematode mobility, which is required to infect the host; however, the low infectivity of nematodes at the lowest moisture content is probably related to the lack of water between the pores, which is also limiting for nematode locomotion. Another possibility for the

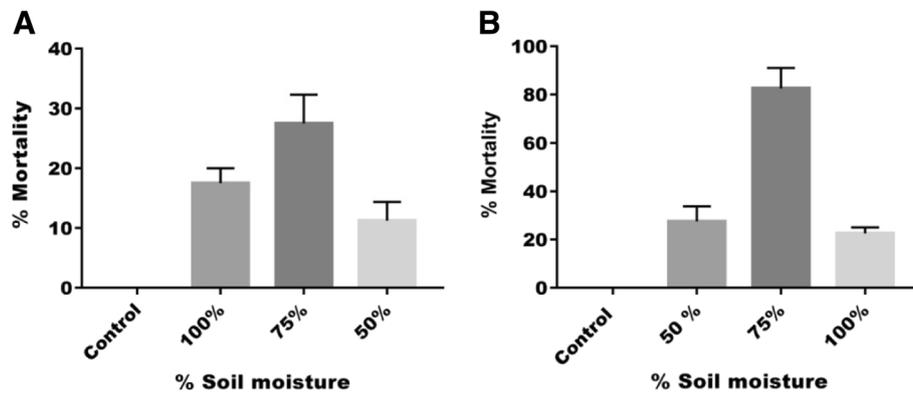


Fig. 5 Mean mortality (\pm SEM) of *Ceratitis capitata* pupae (a) and larvae (b) inoculated with *Steinernema feltiae* at a rate of 100 IJs/ml and maintained under different levels of soil moisture

lowest infectivity at the lowest moisture content is that these nematodes have developed physiological and behavioral adaptations that allow them to reduce their metabolism, in case of dehydration entering a state of anhydrobiosis (Glazer 2002). Anhydrobiosis can be reversed by wetting the soil, causing a recovery of nematode infectivity and virulence. Studies have demonstrated that some species of the *Steinernema* have the ability to enter a state of anhydrobiosis, when exposed to low moisture contents (Koppenhöfer et al. 1995), but nothing is clear on this issue regarding *Heterorhabditis* spp. Since adequate humidity is essential for the survival and movement of this nematode species (Baimey et al. 2015 and Filgueiras et al. 2016).

Conclusion

Future work should focus on selecting more EPN species/strains to select the most virulent for field trials. In addition, their biology (persistence, reproduction, survival) post-application of EPNs should be studied, as well as their performance in combination with other biological agents and agrochemicals. Although it is often difficult to control moisture in the field, one solution is the addition of adjuvants or the use of a surfactant in the suspension of nematodes that are used as a biocontrol agent. The Turkish isolate of *S. feltiae* may be an early solution for an integrated pest management program for certain dipteran including *C. capitata*.

Abbreviations

C. capitata: *Ceratitis capitata*; EPN: Entomopathogenic nematodes; *S. feltiae*: *Steinernema feltiae*

Acknowledgements

Not applicable

Authors' contributions

SC carried out the experiment and was a major contributor in writing the manuscript. AB conceived and planned the experiments. KB carried out the experiment. HB corrected and revised the manuscript, corrected language

mistakes and translation, and corrected references. IK supervised the work. All authors read and approved the final manuscript

Authors' information

IK is a professor Dr at Faculty of Agriculture Department of Plant Protection, Süleyman Demirel University. AB is a professor Dr at Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie, El-Harrach, Algeria. SC is Phd student at Zoologie Agricole et Forestière, ENSA, Algeria

Funding

Not applicable

Availability of data and materials

Not applicable

Ethics approval and consent to participate

Not applicable

Consent for publication

Not applicable

Competing interests

The authors declare that they have no competing interests

Author details

¹Département de Zoologie Agricole et Forestière, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie, El-Harrach, Algeria. ²Plant Protection Department, Isparta Applied Sciences University, Isparta, Turkey.

Received: 1 May 2019 Accepted: 20 August 2019

Published online: 30 August 2019

References

- Abbott WS (1925) A method of computing the effectiveness of an insecticide. *J Econ Entomol* 18(2):265–267
- Alekseev E, Glazer I, Samish M (2006) Effect of soil texture and moisture on the activity of entomopathogenic nematodes against female *Boophilus annulatus* ticks. *BioControl* 51(4):507–518
- Bai GY, Xu H, Fu YQ, Wang XY, Shen GS, Ma HK, Ruan WB (2016) A comparison of novel entomopathogenic nematode application methods for control of the chive gnat, *Bradysia odoriphaga* (Diptera: Sciaridae). *J Econ Entomol* 109(5): 2006–2013
- Baimey H, Zadjil L, Afouda L, Moens M, Decraemer W (2015) Influence of pesticides, soil temperature and moisture on entomopathogenic nematodes from southern Benin and control of underground termite nest populations. *Nematology* 17:1057–1069
- Filgueiras CC, Willett DS, Junior AM, Pareja M, El Borai F, Dickson DW, Duncan LW (2016) Stimulation of the salicylic acid pathway aboveground recruits entomopathogenic nematodes belowground. *PLoS One* 11(5):e0154712

- Garriga A, Morton A, Garcia-del-Pino F (2018) Is *Drosophila suzukii* as susceptible to entomopathogenic nematodes as *Drosophila melanogaster*? *J Pest Sci* 91(2):789–798
- Georgis R, Hague NGM (1991) Nematodes as biological insecticides. *Pestic Outlook* 2(3):29–32
- Glazer I (2002) Survival biology 205–220. In: Gaugler R (ed) *Entomopathogenic nematology*. Wallingford CABI Publishing UK, p 400
- Godjo A, Zadji L, Decraemer W, Willems A, Afouda L (2018) Pathogenicity of indigenous entomopathogenic nematodes from Benin against mango fruit fly (*Bactrocera dorsalis*) under laboratory conditions. *Biol Control* 117:68–77
- Grant JA, Villani MG (2003) Soil moisture effects on entomopathogenic nematodes. *Environ Entomol* 32(1):80–87
- Grewal PS, Ehlers RU, Shapiro-Ilan DI (2005) *Nematodes as Biocontrol Agents*. CABI Pub. pp. 505
- Hübner A, Englert C, Herz A (2017) Effect of entomopathogenic nematodes on different developmental stages of *Drosophila suzukii* in and outside fruits. *BioControl* 62(5):669–680
- Kamali S, Karimi J, Hosseini M, Campos-Herrera R, Duncan LW (2013) Biocontrol potential of the entomopathogenic nematodes *Heterorhabditis bacteriophora* and *Steinernema carpocapsae* on cucurbit fly, *Dacus ciliatus* (Diptera: Tephritidae). *Biocontrol Sci Technol* 23(11):1307–1323
- Karagoz M, Gulcu B, Hazir C, Kaya HK, Hazir S (2009) Biological control potential of Turkish entomopathogenic nematodes against the Mediterranean fruit fly *Ceratitis capitata*. *Phytoparasitica* 37(2):153
- Kim J, Jaffuel G, Turlings TC (2015) Enhanced alginate capsule properties as a formulation of entomopathogenic nematodes. *BioControl* 60(4):527–535
- Koppenhöfer AM, Kaya HK, Taormino SP (1995) Infectivity of entomopathogenic nematodes (Rhabditida: Steinernematidae) at different soil depths and moistures. *J Invertebr Pathol* 65(2):193–199
- Labaude S, Griffin C (2018) Transmission success of entomopathogenic nematodes used in pest control. *Insects* 9(2):72
- Lacey LA, Grzywacz D, Shapiro-Ilan DI, Frutos R, Brownbridge M, Goettel MS (2015) Insect pathogens as biological control agents: back to the future. *J Invertebr Pathol* 132:1–41
- Laznik Ž, Trdan S (2015) Failure of entomopathogens to control white grubs (Coleoptera: Scarabaeidae). *Acta Agric Scand B* 65(2):95–108
- Lewis EE, Campbell J, Griffin C, Kaya H, Peters A (2006) Behavioral ecology of entomopathogenic nematodes. *Biological control* 38(1):66–79
- Mahmoud MF (2007) Combining the botanical insecticides NSK extract, NeemAzal T 5%, Neemix 4.5% and the entomopathogenic nematode *Steinernema feltiae* Cross N. 33 to control the peach fruit fly, *Bactrocera zonata* (Saunders). *Plant Prot Sci. Institute of Agricultural and Food Information, Prague, Czech Republic* 43(1):19–25
- Mahmoud MF, Osman MAM (2007) Use of the nematode *Steinernema feltiae* Cross N 33 as a biological control agent against the Peach Fruit Fly *Bactrocera zonata*. *Tunis J Plant Prot* 2:109–115
- Nouh GM, Hussein MA (2014) The role of entomopathogenic nematodes as biocontrol agents against some tephritid flies. *Adv Biol Res* 8(6):301–306
- Ondendaal D, Addison MF, Malan AP (2016) Control of diapausing codling moth, *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae) in wooden fruit bins, using entomopathogenic nematodes (Heterorhabditidae and Steinernematidae). *Biocontrol Sci Technol* 26(11):1504–1515
- Peters A, Ehlers RU (1994) Susceptibility of leatherjackets (*Tipula paludosa* and *Tipula oleracea*; Tipulidae; Nematocera) to the entomopathogenic nematode *Steinernema feltiae*. *J Invertebr Pathol* 63(2):163–171
- Shaurub EH, Soliman NA, Hashem AG, Abdel-Rahman AM (2015) Infectivity of Four Entomopathogenic Nematodes in Relation to Environmental Factors and Their Effects on the Biochemistry of the Medfly *Ceratitis capitata* (Wied.) (Diptera: Tephritidae). *Neotrop Entomol* 44:610–618
- Sirjani FO, Lewis EE, Kaya HK (2009) Evaluation of entomopathogenic nematodes against the olive fruit fly, *Bactrocera oleae* (Diptera: Tephritidae). *Biol Control* 48(3):274–280
- Testa AM, Shields EJ (2017) Low labor “in vivo” mass rearing method for entomopathogenic nematodes. *Biol control* 106:77–82
- Trdan S, Vidrih M, Andjus L, Laznik Ž (2009) Activity of four entomopathogenic nematode species against different developmental stages of Colorado potato beetle, *Leptinotarsa decemlineata* (Coleoptera, Chrysomelidae). *Helminthologia* 46(1):14–20
- Williams CD, Dillon AB, Ennis D, Hennessy R, Griffin CT (2015) Differential susceptibility of pine weevil, *Hyllobius abietis* (Coleoptera: Curculionidae), larvae and pupae to entomopathogenic nematodes and death of adults infected as pupae. *Biocontrol* 60(4):537–546
- Yee WL, Lacey LA (2003) Stage-specific mortality of *Rhagoletis indifferens* (Diptera: Tephritidae) exposed to three species of *Steinernema* nematodes. *Biological Control* 27(3):349–356

Publisher's Note

Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Submit your manuscript to a SpringerOpen® journal and benefit from:

- Convenient online submission
- Rigorous peer review
- Open access: articles freely available online
- High visibility within the field
- Retaining the copyright to your article

Submit your next manuscript at ► [springeropen.com](https://www.springeropen.com)

RESEARCH

Open Access



Pathogenicity of indigenous *Beauveria bassiana* (Balsamo) against *Ceratitis capitata* Wiedemann (Diptera: Tephritidae) under laboratory conditions

Sabrina Chergui^{1*} , Khadidja Boudjemaa¹ , Abdelmadjid Benzehra¹ and Ismail Karaca² 

Abstract

Background: The Mediterranean fruit fly, *Ceratitis capitata* (Wiedemann) (Diptera: Tephritidae), is the major insect pest of fruit production worldwide. Chemical control of this pest has induced the selection of resistant medflies populations and negative environmental impact. In addition, the use of pesticides has become an obstacle to the fresh agricultural products exported to many countries that restrict pesticides residues. The aim of this study was to propose alternatives based on the use of microbiological products for the control of *C. capitata*.

Main body: The pathogenicity of the Turkish isolate *Beauveria bassiana* BMAUM M6-4 was evaluated against immature stages and adult of *C. capitata* under laboratory conditions at a concentration of 10^7 conidia/ml via different routes of exposure. Conidial treatment was applied by spraying soil and filter paper against 3rd instar larvae and pupae. In contrast, the treatment was administered to adult males and females by contact and ingestion. The percentage of mortality was recorded on the 3rd, 7th, 12th and 15th day after inoculation. Obtained results showed that *B. bassiana* was very effective against the adult's fly, where males were more susceptible than females in both treatments (contact and ingestion). This isolate was tested against 3rd instar larvae. It achieved an infection rate of 33.33 and 43.5% of the larvae treated on filter paper and in the soil, respectively. Application of conidial preparations to soil reduced insect emergence and CAN represent a promising strategy for fruit fly integrated management (57.33 and 56.66% emergence from the treatments in soil and filter paper).

Conclusion: Entomopathogenic fungi are promising as a biocontrol agent that can be used under different modes of ground application against larvae, prepupae and pupae, and/or as a bait spraying or contact against adults.

Keywords: Entomopathogenic fungi, *Ceratitis capitata*, Pathogenicity, Bioassay, Native isolate

Background

The Mediterranean fruit fly, *Ceratitis capitata* Wiedemann (Diptera: Tephritidae), is the main pest in the Mediterranean region attacking more than 300 hosts. It presents the greatest threat to the production and marketing of many fruit crops, mainly fruit crops. The pest overwinters as a pupa in the soil where it is a target for

many soil-dwelling organisms, including entomopathogenic fungi (EPF), particularly Ascomycetes, *Beauveria* spp. (Hypocreales: Cordycipitaceae), and *Metarhizium* spp. (Hypocreales: Clavicipitaceae) (Vega et al. 2009; Rudeen et al. 2013). EPF can be isolated from plant tissues and soil. They use the soil as a habitat for long-term persistence when crops are not present in the field (Rudeen et al. 2013). Some of EPF species have a limited number of hosts, while the others have a wide range of hosts, for example, *Beauveria bassiana* (Bals.) Vuill. (Hypocreales: Cordycipitaceae) is an EPF that can infect

* Correspondence: chergui.sabrina92@gmail.com

¹Department of Agricultural and Forest Zoology, High National School of Agronomy, Avenue Hassen Badi, El-Harrach, 16200 Algiers, Algeria
Full list of author information is available at the end of the article

a wide host range of over 700 insect species (De Faria and Wraight 2007).

EPF have received a considerable interest from scientists for their efficacy against crop pests and their biological control potential. The laboratory work serves as an initial indicator for the selection of fungal isolates as effective biocontrol agents in terms of their pathogenicity, specialization and ease of production and adaptation to environmental conditions (El-Husseini et al. 2018; Sayed et al. 2019).

The efficacy of EPF such as *Metarhizium anisopliae* and *Beauveria bassiana* on pupae and adults of *C. capitata* has been reported by several authors (Ekesi et al. 2005; Konstantopoulou and Mazomenos 2005). Despite the demonstrated virulence of these fungi against *C. capitata*, significant intraspecific variations in pathogen capacity among various strains and isolates of the same species have been observed, depending on the origin and initial host of the isolates (Castillo et al. 2000; Quesada-Moraga et al. 2006). Thus, selection of EPF isolates is one of the most important steps in a microbial control program, as the process determines which isolates are most virulent for the pest as well as their behavior with respect to relates to mortality, sporulation and the production of harmful organisms on an artificial culture medium (Rohde et al. 2006).

The indigenous Turkish isolate of *B. bassiana* BMAUM M6-4 was determined to cause infection to early and late instar larvae of the pine processionary *Thaumetopoea wilkinsoni*, (Lepidoptera: Notodontidae) (Gök et al. 2018) and larvae of *Spodoptera littoralis* (Lepidoptera : Noctuidae) (Cırbin et al. 2017). Therefore, this study aimed to evaluate the virulence of this isolate against larvae, pupae (newly formed and older) and adults of *Ceratitis capitata* in the laboratory via different routes of exposure.

Materials and methods

Insect rearing

The rearing of *C. capitata* was carried out at the Department of Plant Protection, Suleyman Demirel University, at 25 ± 1 °C, 65% RH, under 14:10 (L:D) photoperiod. Larvae were reared in sterile Petri dishes containing artificial diet: water (56 ml), sugar (12 g), Hcl (0.3 ml), wheat germ (4 g), yeast (3 g), benzoic acid (0.3 g), bran (23 g). Adults were provided by water and a solid diet consisting of sucrose and yeast.

Fungal isolate

The EPF *Beauveria bassiana* BAUM M6-4, used in the following bioassays, was previously isolated from a soil sample obtained from an agricultural land in Isparta Province, Turkey (Baydar et al. 2016).

Pathogenicity bioassays

The experiments were conducted under the controlled conditions of 25 ± 1 °C, $62 \pm 5\%$ RH and a photoperiod of 16:8 (L:D). Adults of *C. capitata* were maintained in cages and provided with diet for 5 days before using them for bioassays. The pupae and prepupae (3rd instar larvae) used in the experiments were obtained from the artificial rearing. One- and 6-day-old pupae were used for the bioassay. Fungal suspension at a concentration of 10^7 conidia/ml was tested and mortality rates were assessed at 3, 7, 12, and 15 days after treatment. Each treatment was performed in 4 replicates (15 individuals each), with a total of 60 individuals.

The soil tested, was obtained from a peach orchard in Isparta. The soil was sieved and sterilized before use. Soil's choice was close to the natural control conditions of this pest in agricultural areas. The soil was used as an incubation substrate or as a self-inoculation device of prepupae and pupae.

Exposure of 3rd larval instar to conidial suspension

Essay on filter paper

A group of 15 3rd instar larvae was placed on a filter paper in a sterile Petri dish (9 cm in diameter) after spraying it with a volume of 3 ml of conidial suspension at concentration of 10^7 conidia/ml. The filter paper of the control group was sprayed with 3 ml of distilled water and 0.1% Tween80.

Soil bioassay

A group of 15 3rd instar larvae were placed in a plastic container (10 × 6 × 3) containing 50 g of natural soil and sieved after spraying this soil with 3 ml of conidial suspension. For the control treatments, the same volume with 0.1% Tween 80 used distilled in water. There were four replicates of 15 larvae ($N = 60/\text{treatment}$).

In both tests, the number of dead larvae was counted and the pupae formed from the treated larvae were monitored until the emergence of the adult.

Exposure of pupae to conidial suspension

Essay on filter paper

A group of 15 new formed pupae of *C. capitata*, aged 1 day old and old pupae (6 days old), was deposited on a filter paper in a Petri dish after spraying it with a volume of 3 ml of the suspension of conidia. Filter paper at the control group was sprayed with the same volume of 0.1% Tween80 was used in distilled water.

Soil bioassay

A group of 15 *C. capitata* pupae, aged 1 and 6 days, was placed in a box (10 × 6 × 3) containing 50 g of natural soil and sieved after spraying this soil with 3 ml of

suspension of conidia. For control treatments, 0.1% Tween 80 was used in distilled water.

Each treatment was replicated 4 times, i.e., 4 replicate groups of 15 pupae (total = 60). In both tests, pupae were monitored until adult emergence.

Exposure of adults to conidial suspension

Contact bioassay

In this bioassay, 15 5-day-old male and female adults of *C. capitata* were placed in a box (11 × 11 × 6). A filter paper was placed on the base of the box and sprayed with 3 ml of the conidia suspension before transferring *C. capitata* adults into the box. While walking on the treated filter paper, the flies were contacted to the spores. Each box received soaked cotton and a small amount of food. For control treatments, 0.1% Tween 80 was used in the water.

Dead adults were removed and transferred to another sterile Petri dish filled with wet filter paper. After sealing with Parafilm, the Petri dishes were stored at 25 °C and monitored daily for fungal symptoms.

Oral bioassay

One milliliter of *B. bassiana* suspension at a concentration of 10^7 conidia/ml was mixed with 1 ml of nutrient preparation for adults and placed on a piece of cotton. Flies consume this diet within 2–3 days. A diet without conidia was provided to adults and used as controls.

Statistical analysis

Mortalities were corrected, using Abbott formula (Abbott 1925). LT_{50} values were calculated using Probit analysis (Finney 1971). All statistical analyses were performed using GraphPad Prism version 8.0.0 at the 0.05 level of significance.

Results and discussion

Pathogenicity against 3rd larval instar

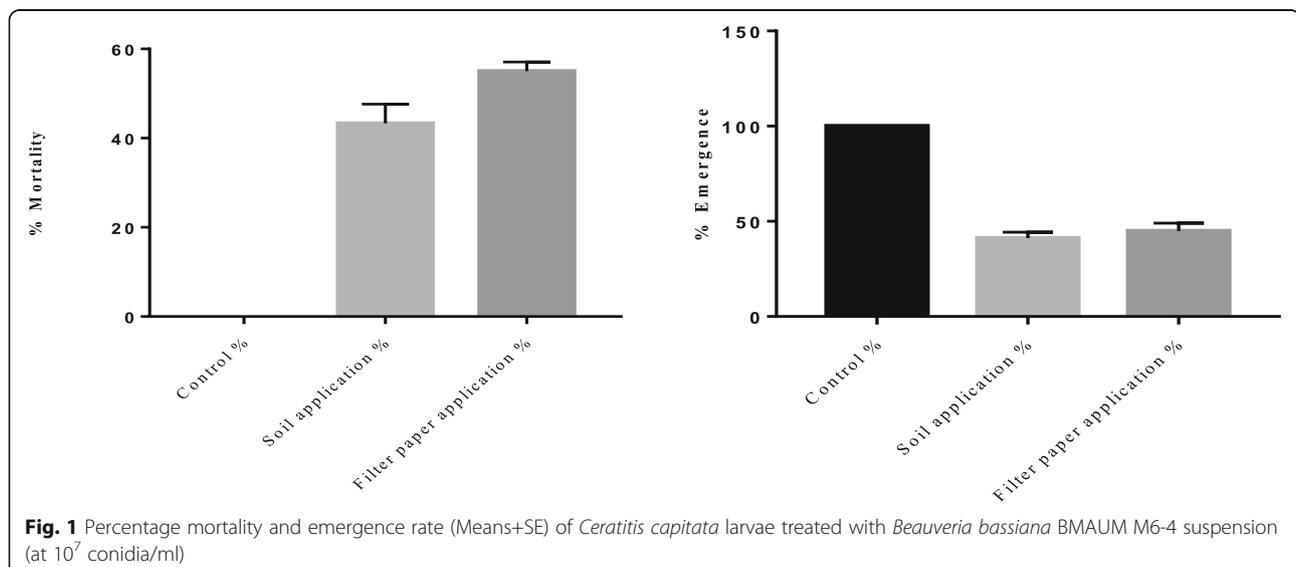
Data presented in Fig. 1 show the susceptibility of 3rd instar *C. capitata* larvae to conidial treatment. Mean mortality rate of larvae was 55.03% in filter paper treatment and 43.33% in the soil treatment. No mortality was recorded in the control. Non-significant difference was observed between the treatment of filter paper and that of the soil ($T = 1.406$; $DF = 15$; $P > 0.05$). Treatment with *B. bassiana* was effective on both treatments.

Some treated larvae continued to pupate but a mortality rate occurred in the pupal stage. 41.20 and 44.97% emergence rates were recorded at the treatments in soil and filter paper, respectively, compared with 100% emergence in the control groups. The results revealed a significant difference between the emergence percentages of adults obtained in the control and in the treated larvae ($F = 494.3$, $DF = 11$, $P < 0.0001$).

Obtained results are in contradiction with the results reported by Dimbi et al. (2003) who reported no effect for *Metarhizium anisopliae* and *B. bassiana* on larvae of *C. capitata*, *C. rosa* and *C. cosyra*, although they are highly virulent against the adult stage of these species. The results are in agreement with several studies reporting that the larval stage of the *C. capitata* was the most vulnerable to EPF (Ekesi et al. 2005; Quesada-Moraga et al. 2006).

Pathogenicity against pupae

Treatment of *B. bassiana* BAUM M6-4 caused mortality in *C. capitata* pupae, resulting in a decrease in the emergence rate of treated pupae than the untreated pupae ($F = 41.33$, $DF = 11$, $P < 0.0001$). Figure 2 clearly shows that the treated pupae had a low emergence rate than the control. Obtained results revealed non-significant difference



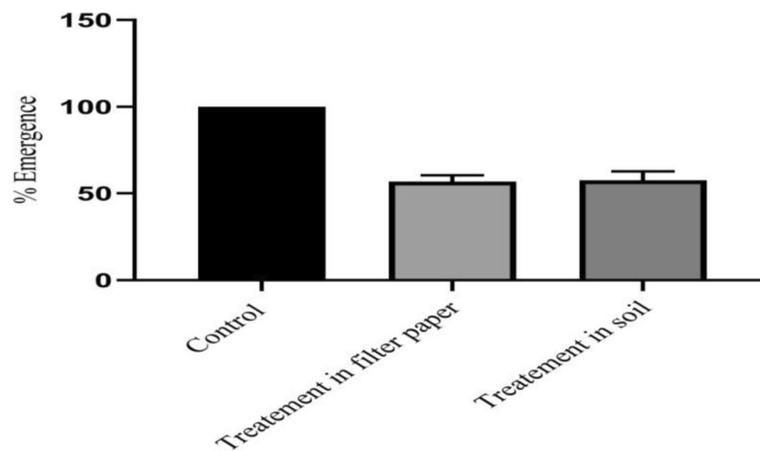


Fig. 2 Emergence rates (means + SE) of *Ceratitis capitata* pupae treated with *Beauveria bassiana* suspension at 10^7 conidia/ml. **a** Soil application. **b** Filter paper application

between the two techniques of treatment (soil application and paper filter applications) ($T = 0.9135$; $DF = 7$; $P > 0.05$).

Infection with the *B. bassiana* BAUM M6-4 against *C. capitata* pupae caused a significant reduction in emergence rate and number of adults (56.66 and 57.33% emergence in filter paper and soil application, respectively, compared with 100% emergence in the control groups). This treatment contributed in reducing the population from one generation to the next. The *B. bassiana* BMAUM M6-4 isolate produced a dense condition on the treated pupae. A similar trend was reported by (Ekesi et al. 2005).

The results obtained in this study are consistent with those found by Mahmoud (2009) who tested *Bactrocera zonata* (Diptera: Tephritidae) but did not differ from those found by Quesada-Moraga et al. (2006) who reported mortality rates of *C. capitata* pupae to *B. bassiana* isolates ranging from 14 to 95.5%. Previously, Lezama-Gutiérrez et al. (2000) reported that *M.*

anisopliae reduced adult emergence by 33 and 49% depending on soil type and about 37.9 to 98.75% mortality in *Anastrepha ludens* (Diptera: Tephritidae) larvae and pupae, respectively. In another work, Alves et al. (2004) found that a high concentration of conidia (1×10^8 conidia/ml) of *B. bassiana* and *M. anisopliae* was necessary to prevent the emergence of *C. capitata*.

Obtained results clearly showed that newly formed pupae (1 day old) were more susceptible to infection with EPF than the 6-day-old pupae in both the filter paper ($T = 3.576$; $DF = 3$; $P < 0.05$) and soil tests ($T = 7.565$; $DF = 3$; $P < 0.05$) (Fig. 3). 46.67% emergence in larvae aged 1 day old was recorded in the soil treatment and 48.33% in the filter paper treatment against 65 and 68% emergence in the 6-day-old pupae in the 2 treatments, respectively.

Ekesi et al. (2002) evaluated the pathogenicity of *M. anisopliae* against pupae of 3 Tephritid species, including *C. capitata*, and found that pupal susceptibility

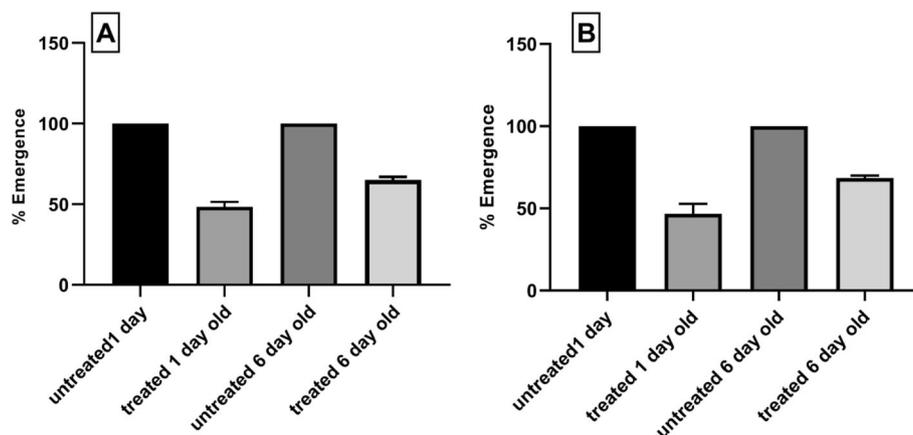


Fig. 3 Mortality percentage (means + SE) of *Ceratitis capitata* pupae treated with *Beauveria bassiana* suspension at 10^7 conidia/ml

decreased with increasing pupal age. In a recent study, Oreste et al. (2015) studied the interaction between age of puparia (at 2, 4, and 6 days old) and fungal strains. They addressed both the emergence of *C. capitata* adults and the mortality of pupae. They found that the fungal treatments of different *B. bassiana* strains were high on 2-day-old puparia (49.16 and 51.33% of mycosed puparia for ATCC 74040 and AL1 strain, respectively), while the rate of mycoses was low and ranged between 39 and 27.16%, when fungal treatments were performed on 4- and 6-day-old puparia. According to Beris et al. (2013), the highest susceptibility of young pupae can be attributed to their softer cuticle.

It was recorded that adults obtained from treated pupae had a high mortality than the control. Adult mortality in the treatments was 14.29% in the soil treatment and 22.22% in the filter paper treatment, in addition un-completed emergence was also observed. Ekesi et al. (2002) cleared that the post-adult fungal infection was associated with the penetration of the hypha through the puparia integument in the body of the adult before emergence.

Pathogenicity against adults

The virulence of *B. bassiana* BMAUM M6-4 against adults of *C. capitata* was estimated 4 times after treatment. The results presented in Fig. 4 show the effect of oral and contact treatment on male and female adult mortality. No mortality was observed at the control for both sexes.

The average adult mortality of *C. capitata* after contact treatment with conidial suspension of *B. bassiana* strain BMAUM M6-4 reached 51.67% of adult females and 71.67% of adult males. A highly significant difference in mean mortality between males and females of *C. capitata* treated as contact method with conidial suspension of *B. bassiana* BAUM M6-4 at 10^7 conidia/ml was

found ($T = 2.132$; $DF = 30$; $P < 0.05$). As well, similar results were estimated between males and females of *C. capitata* treated with oral method ($T = 2.637$; $DF = 30$; $P < 0.05$). The average adult mortality of *C. capitata* after feeding a mixture of conidial suspension and artificial food for 48 h was higher in males (86.33%) than in females (68.33%). Obtained data revealed a significant difference between the two modes of application ($T = 2.158$; $DF = 30$; $P < 0.05$). The mortality induced by ingestion was significantly higher than that caused by contact. 73.33% and 86.33% of mortality were recorded toward adult males and females, respectively. Indeed, treated females by ingestion were more susceptible to infection (68.33% mortality 15 days post-treatment) than those treated by contact (51.67%) ($T = 2.853$; $DF = 30$; $P < 0.05$). Similarly, males treated by ingestion were more susceptible to infection (86.33% mortality) than those treated by contact (73.33%) ($T = 2.137$; $DF = 30$; $P < 0.05$).

Dead individuals of *C. capitata*, covered with a white mycelium characteristic of the fungus *B. bassiana* (Fig. 5). The average percentage of dead treated adults, which developed mycelium was 100%.

In contact bioassay, on the 3rd day of treatment, mortality rate was 1.67% for females and 6.67% for males ($T = 1.567$; $DF = 6$; $P > 0.05$). On the 7th day, mortality became 10% for females and 33.33% for males ($T = 7.00$; $DF = 6$; $P < 0.05$). On 12th day, mortality of females was 28.33% and 58.33% of males ($T = 6.646$; $DF = 6$; $P < 0.05$). A maximum of 51.67 and 73.33% was recorded on the 15th day of treatment for males and females, respectively ($T = 13.01$; $DF = 6$; $P < 0.05$).

In oral bioassay, on the 3th day of treatment mortality was 10.33% for females and 26.67% for males ($T = 8.671$; $DF = 3$; $P < 0.05$). On 7th day, the fungus caused 35 and 53.33% mortality in females and males, respectively ($T = 5.745$; $DF = 6$; $P < 0.05$). On 12th day, the rate became 61.67% in females and 83.33% in males ($T = 5.811$; $DF = 6$;

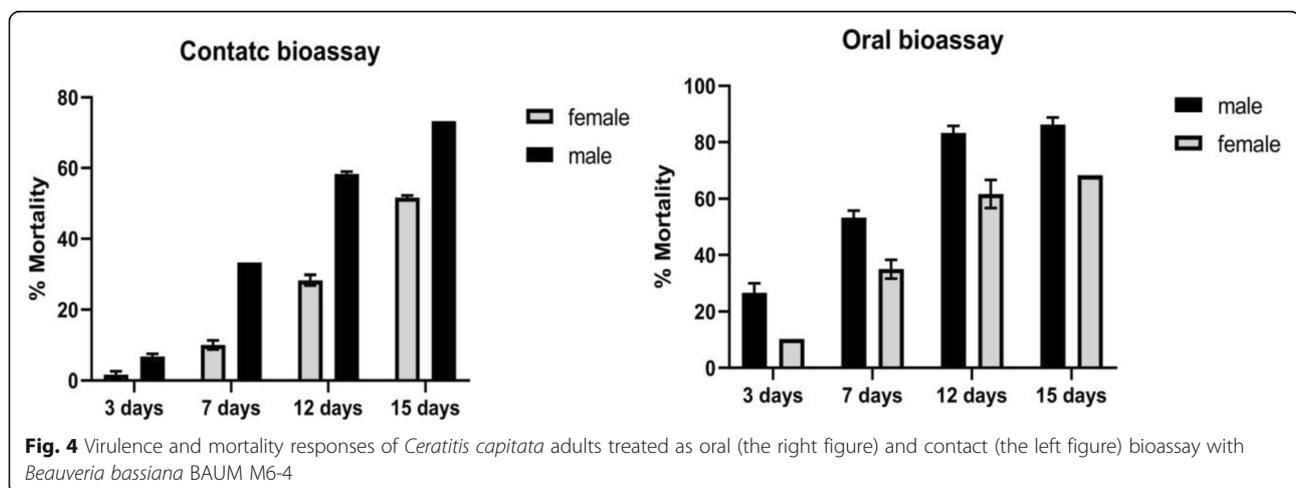




Fig. 5 Infection symptoms on adults of *Ceratitis capitata* induced by *Beauveria bassiana* isolate BMAUM M6-4

$P < 0.05$). The maximum 86.33 and 68.33% were recorded on the 15th day of treatment for males and females of *C. capitata*, respectively ($T = 11.01$; $DF = 6$; $P < 0.05$).

In oral treatment, Probit analysis of the time mortality response (LT_{50}) for adult females was 10.87 days. Whereas, chi square was 37.61. However, LT_{50} for male was 6.54 days. Whereas, chi-square was 45.59. In contact treatment, the LT_{50} for adult females was 14.68 days. Whereas, chi-square was 27.28. For adult males LT_{50} for male was 10.54 days. Whereas, Chi square was 47.45. The slope values of EPF toward adults are presented in Table 1. The slopes of 5.13 and 4.95 were observed in oral bioassays, while they were 3.61 and 4.04 in contact bioassays. The LT_{50} values were significantly higher in contact bioassay than in contact bioassay ($F = 8.569$, $P < 0.0001$). The differences were non-significant in slopes ($F = 1.598$; $P = 0.26$). However, the differences between intercepts were significant ($F = 34.34$; $P < 0.0001$).

Obtained results agree with the findings Konstantopoulou and Mazomenos (2005) who reported a moderate pathogenicity of *B. bassiana* when tested as oral bioassay against *Bactrocera oleae* (Diptera: Tephritidae) adults (causing 62.6% mortality) and obtained LT_{50} values of 17 days. In the same publication, authors obtained LT_{50} values of 13.4 days for adults *C. capitata* inoculated as oral bioassay with *B. bassiana*.

The fungal treatment of *B. bassiana* BMAUM M6-4 against adults of *C. capitata* caused a cumulated mortality for both sexes, whereas the male mortality was higher than of the female in both treatments (oral and contact bioassay). This result suggests that the male adults were

more susceptible than females which agree with (El-Akhdar and Ouda 2009 and Boudjelida and Soltani 2011). In addition, LT_{50} was shorter in adult males (6.54 and 10.54 days in oral and contact bioassay, respectively) than in adult females (10.87 and 14.68 days, for the same bioassays, respectively). For both tests (10.54 and 14.68 days in oral and contact bioassay, respectively), that confirms the susceptibility of males to infection with EPF than females. Mahmoud (2009) reported LT_{50} of 14.67 days for *B. oleae* treated with *B. bassiana* as oral treatment, while it was 16.6 days in contact treatment.

Fly mortality changes with time, starting 3rd day after inoculation. The effect of the fungus *M. anisopliae* against the 4th larvae and the adults of *C. capitata* showed a high toxicity with a concentration-response manner with a mortality started from day 3 to day 6 confirmed the results of Yee and Lacey (2005) and Boudjelida and Soltani (2011).

Conclusions

The present study reported that the BMAUM M6-4 strain of *B. bassiana* had a notable efficacy against different stages of *C. capitata*. The fungus could be a promising biological control agent under different modes of applications as conidial application to the soil against pupae and 3rd instar larvae. Further research is needed to determine the efficacy of this isolate in the field to assess its actual contribution as a biological control agent against the fruit flies.

Table 1 LT_{50} of adult males and females of *Ceratitis capitata* treated as oral and contact bioassay with *Beauveria bassiana* BAUM M6-4

Mode of treatment		$TL50 \pm SE$ (day)	Intercept	Slope $\pm SE$	χ^2 (DF = 9)
Contact bioassay	Female	14.68 \pm 0.27	4.354	3.614 \pm 0.42	37.61
	Male	10.54 \pm 0.24	5.547	4.041 \pm 0.53	45.59
Oral bioassay	Male	6.54 \pm 0.20	5.770	4.959 \pm 0.55	47.45
	Female	10.87 \pm 0.19	7.636	5.130 \pm 0.7	27.28

Abbreviations

EPF: Entomopathogenic fungi; LT₅₀: Median lethal time

Acknowledgements

Not applicable.

Authors' contributions

CS: carried out the experiment and wrote the manuscript. BK: revised the manuscript, corrected language. BA: conceived and planned the experiments. KI: Analyzed data and supervised the work. All authors read and approved the final manuscript.

Funding

Not applicable. This work was not supported by any funding body.

Availability of data and materials

Not applicable

Ethics approval and consent to participate

Not applicable

Consent for publication

Not applicable.

Competing interests

The authors declare that they have no competing interests.

Author details

¹Department of Agricultural and Forest Zoology, High National School of Agronomy, Avenue Hassen Badi, El-Harrach, 16200 Algiers, Algeria. ²Plant Protection Department, Suleyman Demirel University, Isparta, Turkey.

Received: 30 June 2020 Accepted: 7 October 2020

Published online: 14 October 2020

References

- Abbott WS (1925) A method of computing the effectiveness of an insecticide. *J Econ Entomol* 18:265–267
- Alves SB, Rossi LS, Walder JM, Vieira SA (2004) Avaliação de fungos entomopatogênicos para *Ceratitis capitata*. *Manejo Integrado de Plagas y Agroecología (CATIE)*(no. 72) p. 31–38
- Baydar R, Güven Ö, Karaca I (2016) Occurrence of entomopathogenic fungi in agricultural soils from Isparta province in Turkey and their pathogenicity to *Galleria mellonella* (L.) (Lepidoptera: Pyralidae) larvae. *Egypt J Biol Pest Control* 26:323
- Beris E, Papachristos D, Fytrou N, Antonatos S, Kontodimas D (2013) Pathogenicity of three entomopathogenic fungi on pupae and adults of the Mediterranean fruit fly, *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae). *J Pest Sci* 86: 275–284
- Boudjelida H, Soltani N (2011) Pathogenicity of *Metarhizium anisopliae* (Metsch) on *Ceratitis capitata* L. (Diptera: Tephritidae). *Ann Biol Res* 2:104–110
- Castillo M-A, Moya P, Hernández E, Primo-Yufera E (2000) Susceptibility of *Ceratitis capitata* Wiedemann (Diptera: Tephritidae) to entomopathogenic fungi and their extracts. *Biol Control* 19:274–282
- Cirbin İ, Güven Ö, Karaca I (2017) Effects of entomopathogenic fungi on *Spodoptera littoralis* (Boisd.) (Lep: Noctuidae) larvae. *Gazi Osman Paşa Ünv Ziraat Fak derg* 34:159–165
- De Faria MR, Wraight SP (2007) Mycoinsecticides and mycoacaricides: a comprehensive list with worldwide coverage and international classification of formulation types. *Biol Control* 43:237–256
- Dimbi S, Maniania NK, Lux SA, Ekisi S, Mueke JK (2003) Pathogenicity of *Metarhizium anisopliae* (Metsch.) Sorokin and *Beauveria bassiana* (Balsamo) Vuillemin, to three adult fruit fly species: *Ceratitis capitata* (Weidemann), *C. rosa* var. *fasciventris* Karsch and *C. cosyra* (Walker) (Diptera: Tephritidae). *Mycopathologia* 156:375–382
- Ekisi S, Maniania NK, Lux SA (2002) Mortality in three African tephritid fruit fly puparia and adults caused by the entomopathogenic fungi, *Metarhizium anisopliae* and *Beauveria bassiana*. *Biocontrol Sci Technol* 12:7–17
- Ekisi S, Maniania NK, Mohamed SA, Lux SA (2005) Effect of soil application of different formulations of *Metarhizium anisopliae* on African tephritid fruit flies and their associated endoparasitoids. *Biol Control* 35:83–91

- El-Akhdar EA, Ouda SM (2009) Pathogenicity of different fungal isolates to the adult stage of the Mediterranean fruit fly, *Ceratitis capitata* (Wiedmann). *Egypt J Biol Pest Control* 19:5–10
- El-Husseini MM, El-Heneidy AH, Awadallah KT (2018) Natural enemies associated with some economic pests in Egyptian agro-ecosystems. *Egypt J Biol Pest Cont.* 28(1):78
- Finney DJ (1971) Probit analysis, 3rd edn. Cambridge University Press, Cambridge
- Gök SG, Güven Ö, Karaca İ (2018) Entomopatogen Fungus *Beauveria bassiana*'nin Çam Keseböceği (*Thaumetopoea wilkinsoni* Tams)'nin Farklı Dönemlerine Etkileri. *Türk Biyo Mücadele Derg* 9:7–18
- Konstantopoulou MA, Mazomenos BE (2005) Evaluation of *Beauveria bassiana* and *B. brongniartii* strains and four wild-type fungal species against adults of *Bactrocera oleae* and *Ceratitis capitata*. *BioControl* 50:293–305
- Lezama-Gutiérrez R, la Luz AT, Molina-Ochoa J, Rebolledo-Dominguez O, Pescador AR, López-Edwards M, Aluja M (2000) Virulence of *Metarhizium anisopliae* (Deuteromycotina: Hyphomycetes) on *Anastrepha ludens* (Diptera: Tephritidae): laboratory and field trials. *J Econ Entomol* 93:1080–1084
- Mahmoud MF (2009) Pathogenicity of three commercial products of entomopathogenic fungi, *Beauveria bassiana*, *Metarhizium anisopliae* and *Lecanicillium lecanii* against adults of olive fly, *Bactrocera oleae* (Gmelin)(Diptera: Tephritidae) in the laboratory. *Plant Protect Sci* 45:98–102
- Oreste M, Baser N, Bubici G, Tarasco E (2015) Effects of *Beauveria bassiana* strains on the *Ceratitis capitata*-*Psytalia concolor* system. *Bull Insectol* 68(2):365–272
- Quesada-Moraga E, Ruiz-García A, Santiago-Álvarez C (2006) Laboratory evaluation of entomopathogenic fungi *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* against puparia and adults of *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae). *J Econ Entomol* 99:1955–1966
- Rohde C, Alves LF, Neves P, Alves SB, Silva E, Almeida J (2006) Seleção de isolados de *Beauveria bassiana* (Bals.) Vuill. *Metarhizium anisopliae* (Metsch.) Sorok. contra o cascudinho *Alphitobius diaperinus* (Panzer)(Coleoptera: Tenebrionidae). *Neotrop Entomol* 35:231–240
- Rudeen ML, Jaronski ST, Petzold-Maxwell JL, Gassmann AJ (2013) Entomopathogenic fungi in cornfields and their potential to manage larval western corn rootworm *Diabrotica virgifera virgifera*. *J Invertebr Pathol* 114: 329–332
- Sayed SM, Ali EF, Al-Otaibi SS (2019) Efficacy of indigenous entomopathogenic fungus, *Beauveria bassiana* (Balsamo) Vuillemin, isolates against the rose aphid, *Macrosiphum rosae* L. (Hemiptera : Aphididae) in rose production. *Egypt J Biol Pest Cont* 29(1):19
- Vega FE, Goettel MS, Blackwell M, Chandler D, Jackson MA, Keller S et al (2009) Fungal entomopathogens: new insights on their ecology. *Fungal Ecol.* 2:149–159
- Yee WL, Lacey LA (2005) Mortality of different life stages of *Rhagoletis indifferens* (Diptera: Tephritidae) exposed to the Entomopathogenic Fungus *Metarhizium anisopliae*. *J Entomol Sci* 40:167–177

Publisher's Note

Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Submit your manuscript to a SpringerOpen® journal and benefit from:

- Convenient online submission
- Rigorous peer review
- Open access: articles freely available online
- High visibility within the field
- Retaining the copyright to your article

Submit your next manuscript at ► [springeropen.com](https://www.springeropen.com)



Available online freely at www.isisn.org

Bioscience Research

Print ISSN: 1811-9506 Online ISSN: 2218-3973

Journal by Innovative Scientific Information & Services Network



RESEARCH ARTICLE

BIOSCIENCE RESEARCH, 2020 17(4): 2750-2759.

OPEN ACCESS

Determination of number, duration and annual generations of *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae) under field condition at Mitidja region, north Algeria

Sabrina Chergui*, Khadidja Boudjemaa and Abdelmadjid Benzehra

National Superior School of Agronomy El-Harrach, Laboratory of Zoology, 16000 Algiers, Algeria

*Correspondence: chergui.sabrina92@gmail.com Received 13-07-2020, Revised: 20-10-2020, Accepted: 25-10-2020 e-Published: 10-11-2020

The current study was conducted out over two successive years at Mitidja region, north Algeria, using sex pheromone traps (Trimedlure) to capture *Ceratitis capitata* male flies throughout 2016 and 2017 seasons. The aim of this study was to estimate number and of field generations and predict its occurrence in Mitidja. The results revealed that this insect had nine annually generations during both seasons in 2016 and 2017. Mean numbers of MFF adults for each generation were recorded, obtained data indicate that the first MFF male generation that occurred in winter seasons was the longest (111 days) but with lowest weakly mean number of population density of males (11.36 - 16.55 male in 2016 and 2017 respectively). Two generations took place in spring with an average duration of 35 days and an average weakly number of population density of 46.5 and 61.9 male in 2016 and 2017 respectively. The four generations that occurred in summer were the shorter (22 days) but with highest weakly mean population (242 and 271 male in 2016 and 2017 respectively). Two generations took place in autumn with an average duration of 45 days and an average weakly number of population density of 35 and 37.28 males in 2016 and 2017 respectively. Predicting of Mediterranean fruit fly *C. capitata* male annual peaks was carried out by studying the relations between the accumulated thermal heat units expressed as degree-days (DD'S) and the population fluctuation of male flies for the successive seasons. Obtained results revealed that number and duration of *C. capitata* generations coincide and agree with obtained results by applying day degree theory.

Keywords: Mediterranean fruit fly, *C. capitata*, annual generation, duration, degrees-day, predicting

INTRODUCTION

The Mediterranean fruit fly, *Ceratitis capitata* Wiedemann (Diptera: Tephritidae) is a highly polyphagous and the most destructive pest on fruits and vegetables worldwide. It infests over 400 plant species in tropical, subtropical and temperate regions (Liquido et al. 1991; Copeland, 2002). Originating from tropical Africa (De Meyer et al. 2002) has been transported extensively through trade (Karsten et al. 2013). Its highly adaptable nature is one of the factors that allowed

it to become established throughout much of the world as an invasive species in many countries (Metcalf, 1995, De Mayer et al. 2008). The first report of this species in Algeria was made in 1858 (Bodenheimer, 1951). This pest found in coastal areas a diversification of fruit species and favorable climatic conditions and become the most injurious pest in fruit growing and the main obstacles to the production of healthy fruits and their export (Oukil et al. 2002).

Among climatic factors, temperature is the

main ecological factor affecting insect growth and development, since it directly affects physiological processes and enzyme activity (Trudgill et al. 2005). Temperature is an important environmental factor affecting survival and developmental rates of fruit flies (Afia, 2007; Amin, 2008; Ghanim, 2009). Insect development depends on thermal requirements. Each insect species has an optimal temperature range for development limited by lower and upper thresholds (base temperature (Tb) and upper limit (Ts)). Below and above these temperature limits, development does not occur (Haddad et al. 1999). In the range between Tb and Ts, insects accumulate degree-days and are able to develop. From the practical aspect, accumulated thermal units have been used to predict the seasonal development and emergence of various insects (Eckenrode et al. 1975, Farag et al. 2009). Accumulated thermal units are used to predict the seasonal development and emergence of various insects (Farag et al. 2009).

The monitoring of *C. capitata* males was via McPhail traps baited with Trimedlure hung about 1.5m above the ground in the trees. The lure most commonly used for monitoring *C. capitata* populations is Trimedlure (TML) (Israely & Oman, 2005). TML is very efficient in detecting the earliest seasonal emergence of *C. capitata* males (Miranda et al. 2001) and has been used in attract-and-kill methods and in chemosterilization

approaches (Navarro-Llopis et al. 2004). In countries where this pest is already established, traps baited with TML are used to monitor *C. capitata* populations and guide insecticide application decisions.

The aim of this study was to estimate number of field generations and predicting its occurrence in Mitidja in order to select the best time for the pest management. As the appearance of *Ceratitis capitata* varies from season to another, it can be predicted by The Thundered degree-days method.

MATERIALS AND METHODS

Mean numbers of the MFF *Ceratitis capitata* male's flies on six host fruit plants (Loquat, Citrus, Apricot, Pear, Peach, fig) during period from January to December of 2016 and 2017 were pooled together and illustrated graphically to determine the duration, number of annual generation by trap in the hosts at Mitidja region through the two successive seasons of 2016 and 2017.

Presentation of the study sites

The trials were conducted during period from Jan. to December of 2016 and 2017 in 7 fruit orchards in Mitidja (North Algeria). The characteristics of the orchards are shown in Table 1.

Table 1: General information on orchards used in this study

Orchards	Coordinates	Altitude	Superficie	Variétés
Loquat	(36.17 N, 3.15 E)	20 m	0.5 ha	NI.
Citrus	(36°55 N, 2°55 E)	50 m	2.71 ha	Clementine, Valencia late Navelate, Washington navel, Thomson navel, Navelina, New hall navel, Navelate.
Lemon	(36°43 N, 36°49 E)	25m	2 ha	Eureka.
Fig	(36°55 N, 2°55 E)	50 m	1.76 ha	Thamourth, Ajenjar.
Apricot	(36°50N, 2°87 E)	188 m	2 ha	Bulida.
Peach	(36°31 N, 2°46 E)	620 m	2 ha	Redhaven.
Pear	(36°31 N, 2°46 E)	620 m	2 ha	Santa maria.

NI : undetermined

Trapping devices for monitoring *C. capitata*.

In order to follow the fluctuation of the population of *C. capitata* in the orchards, we used McPhail type traps baited with trimedlure at the rate of 1 traps suspended in the middle of the orchard. These traps are installed in orchards

from fruit formation to harvest. On the tree, the trap is suspended at the middle layer of the foliage, near the prevailing winds. The catch records have a frequency of 10 days and the attractants are renewed every 28 days.

Data Recording:

Obtained mean numbers of MFF males were recorded from the monitored pheromone traps. On the other hand records of daily means of maximum and minimum temperature as well as relative humidity of the years of study (2016 and 2017) were obtained from El-Metrological Station of Dar el Beida. The mean numbers of the MFF male's flies on tested hosts during period from Jan. to December of 2016, 2017 were pooled together and illustrated graphically to determine the duration, number of annual generation by trap in the three hosts in Mitidja through the two successive seasons of 2016 and 2017.

Estimation Number and Duration of Annual Generations of MFF:

Two different mains of MFF annual generation calculation were concerned during current study as follow:

Estimation of annual generation depending on thermal constant and day degree:

The first main depend on determination of *Ceratitis capitata* accumulated daily thermal units by transforming recorded daily maximum, minimum temperature and threshold of development (zero of development) of MFF to Daily Degree units (DDU) by applying following formula.

$$DDU = (\text{Max. Temp.} + \text{Min. Temp.})/2 - \text{Threshold of Development Temp (t}_0\text{)}$$

Then estimation number and duration of *C. capitata* annual generations could be possible in the field by using calculated value of Thermal constant of *C. capitata* developments (C) and applying following formula according to Jasic (1975).

$$\text{Number of Generations} = \Sigma (\text{D.D.U}) / C$$

Estimated Values of threshold of development (zero of development) (t₀) and Thermal constant (C) of *C. capitata* to develop from egg to adult were 12.4°C (Muñiz & Zalom, 1997) and 260 °D (Duyck and Quilici, 2002).

Estimation of annual generations according to Audemard and Millaire (1975) and Iacob (1977):

The second main suggested by Audemard and Millaire (1975) and emended by Iacob (1977), which depended on weekly mean captured numbers of MFF males by pheromone traps. Those mean numbers of MFF males were accumulated along the tested year and arranged, and then illustrated graphically on semigaussian paper (scale gausses). Whether, the number and

duration of annual field generations could be detected.

RESULTS

Results of using two different mains of calculation for annual generation of *C. capitata* were shown in Tables (2), (3) and graphically illustrated in Figures (1) and (2). Obtained data declared that *C. capitata* has nine generations along year. The longest generation duration observed in winter, while the shortest were in summer seasons.

Predicting of *C. capitata* annual generation peaks using heat unit accumulation:

Under climate conditions of 2016 and 2017 number, duration and approximated dates of annual generations were estimated depending on values of threshold of development (t₀= 12.4°C (Muñiz & Zalom, 1997) and Thermal constant (C) of *C. capitata* to develop from egg to adult (260 thermal units according to and Duyck & Quilici, 2002) and presented in Table (2) and (3).

Data in Table (2) revealed that *C. capitata* has nine field generations on orchards along both two experimental years of 2016 and 2017. These generations and their duration could be detected as follows. The first generation was the longest and occurred in winter season (128 and 129 days in 2016 and 2017, respectively).

In 2016 season, the first one began from January to early May, while the second one started from the 8th of May till the first week of June then the 3rd generation is started until the end of June. The fourth generation took place from the end of June and the last week of July and lasted 23 days. The fifth one was from end of July to early August while the sixth generation was from the first week of to the end of August and lasted 20 days. The seventh generation was the shortest duration (14 days) and occurred from end of August to first week of September. The eighth generation was from the 9th of September to the 18th of October. The last generation that was the ninth was from 19th October to 2nd and December and lasted 45 days.

2017 season

At the second season, 2017, the first generation lasted 129 days and began from February to the 9th of May, while the second one started from early May till the 9th of June and lasted 31 days. The 3rd was from 10th of June to early July and lasted 22 days. The fourth generation was from early July to 19th of July and

lasted 18 days. The fifth one was from the of July to early August while the sixth generation was from the first week of to the end of 20th of July to the 6th of August and lasted 18 days. The sixth generation was the shortest duration (16 days) and occurred from early august to the last week of August. The seventh generation was from end of August to 18th of September and lasted 27 days. The eighth generation lasted 24 days and was from the 19th of September to the 12th of October. The last generation that was the ninth was from 13th October to 23th of November and lasted 42 days.

Estimation annual generation according to Audemard and milaire (1975) and Jacob (1977):

2016 season

Seasonal fluctuation of MFF males in Mitidja was recorded during two consecutive years (2016-2017). The population activity was expected to be consist of several consecutive and overlapping. So, formula suggested by Audemard and Millaire (1975) and Iacob (1977) was applied.

Results in Figure (1) and table (4) revealed that, *C. capitata* had nine seasonal generations during 2016 season, the first generation occurred between early January to late - April and lasted for about 111 days. The 2nd generation was from late April to end May. The 3rd generation occurred between end of May to end of June and lasted 31 days. The 4th generation was from end of June to the 20th of July and lasted 20 days. The 5th generation was from 20th of July to the 10th of

August. Then, from 10th of August to end of August for the 6th generation. The 7th generation occurred between end of August and end of September. The 8th generation was from last September to 10th of November. The last generation occupied the period from 10th of November to end of December.

Mean numbers of MFF adults for each generation were recorded, that highest values (268 251, 218 and 231 adult / trap/ week) observed in fourth ,fifth , sixth and seventh generation in summer season, while lowest numbers (11.36 adults / trap/ week) were recorded during the first generation in winter season (Table 4).

2017 season

Figure (2) and table (5) also indicate 9 generations for *C. capitata* during 2017 season; the first generation was observed from 1st January to mid-April and lasted 107 days. The 2nd generation began from 17th of April to 27 May and lasted 40 days. The 3rd generation started from late May to late of June and lasted 30 days. The 4th generation was from and of June to end of July. The 5th generation was from end of July to early August and lasted 11 days. The sixth one was from early of August to late of the same month and lasted 20 days. The 7th generation was from late of August to late of September. The 8th generation was from late of September to early of November. The last generation was observed from mid-November to late of December.

Table 2: Number and duration of Annual generations of *C. capitata* along 2016 season in Mitidja, estimated depending on thermal constant and day degree according to Richmond (1983).

Month	Average T° (t)	rate of (G)	Generation	Generation period		
				Duration (day)	From	to
January	12,8	0,048	1st	128	01-janv	07-may
February	13,7	0,145	2nd	31	08-may	08-juin
March	14,4	0,238	3rd	21	09-juin	29-juin
April	15,6	0,369	4th	23	30-juin	22-juil
May	19,7	0,87	5th	14	23-juil	05-aug
June	24,4	1,385	6th	20	6-aug	29-aug
July	26,9	1,729	7th	16	30-aug	08-sept
August	28,4	1,908	8th	40	09-sept	18-oct
September	23,5	1,281	9th	45	19-oct	02-dec
October	19,4	0,835	/	/	/	/
November	14,6	0,254	/	/	/	/
December	13,1	0,083	/	/	/	/
Average	18,87	0.76	/	/	/	/

Table 3: Number and duration of Annual generations of *C. capitata* along 2017 season in Mitidja, estimated depending on thermal constant and day degree according to Richmond (1983).

Month	Average T° (t)	Rate of (G)	Generation	Duration (day)	Generation period	
					From	to
January	10,3	0	/			
February	13,7	0,14	1st	129	1-feb	09-may
March	14,4	0,24	2nd	31	10-may	09-juin
April	15,6	0,37	3rd	22	10-juin	01-juil
May	19,7	0,87	4th	18	02-july	19-juil
June	24,4	1,38	5th	18	20-juil	6-aug
July	26,9	1,73	6th	16	7-aug	22-aug
August	28,4	1,91	7th	27	23-aug	18-sept
September	23,5	1,28	8th	24	19-sept	12-oct
October	18,7	0,75	9th	42	13-oct	23-nov
November	13,6	0,14	/	/	/	/
December	10,9	0	/	/	/	/
Average	18,34	0.73	/	/	/	/

Table 4: Estimated numbers and durations of annual generations for *C. capitata* adults and associated average weekly mean numbers of adults Mitidja during 2016 season, according to Audemard and Milaire (1975) and Iacob (1977).

No. Generation	Approximated date of occurrence		Generation duration (days)	Average of weekly numbers in specific generation
	From	to		
1st	January, 1 st	April, 20 th	111	11.36
2nd	April, 20 th	May, 30 th	41	46
3th	May, 30 th	June, 30 th	31	47
4th	June, 30 th	July, 20 th	20	268
5th	July, 20 th	August, 10 th	21	251
6th	August, 10 th	August, 30 th	20	218
7th	August, 30 th	September, 30 th	31	231
8th	September, 30 th	November, 10 th	41	55
9th	November, 10 th	December, 30 th	50	15

Table 5: Estimated numbers and durations of annual generations for *C. capitata* adults and associated average weekly mean numbers of adults Mitidja, according to Audemard and Milaire (1975) and Iacob (1977).

No. Generation	Approximated date of occurrence		Generation duration (day)	Average of weekly numbers in specific generation
	From	to		
1st	January, 1 st	April, 17 th	107	16.55
2nd	April, 17 th	May, 27 th	40	53.8
3th	May, 27 th	June, 27 th	30	70
4th	June, 27 th	July, 27 th	30	185.33
5th	July, 27 th	August, 7 th	11	350.67
6th	August, 7 th	Auguste, 27 th	20	246.67
7th	Auguste, 27 th	September, 27 th	30	304.75
8th	September, 27 th	November, 7 th	40	50.40
9th	November, 7 th	December, 27 th	50	24.17

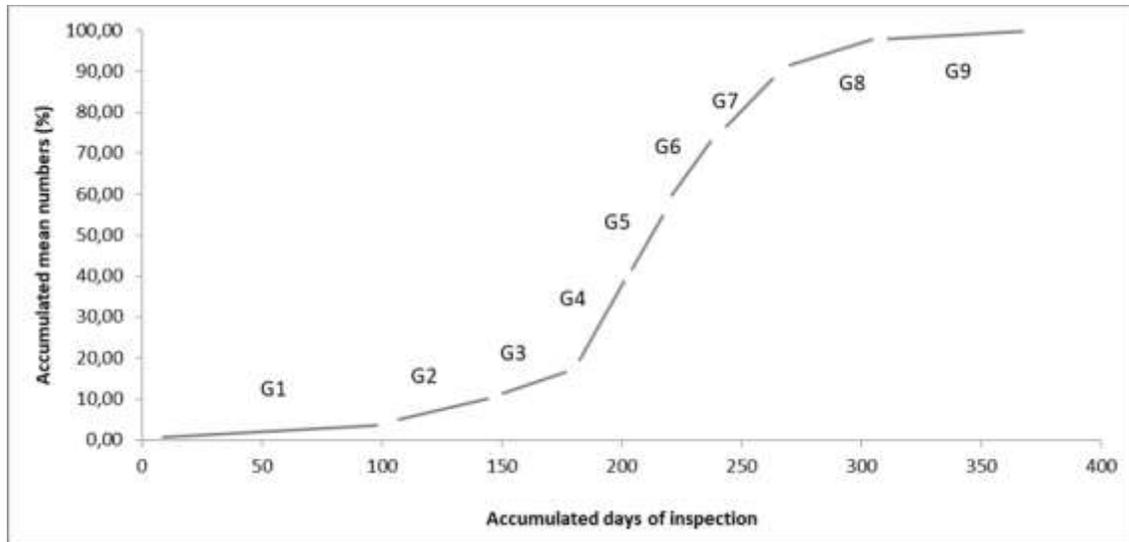


Figure 1: Numbers of *C. capitata* field generations, according to Audemard and milaire (1975) and Iacob (1977) method at fruit orchards in Mitidja region, 2016.

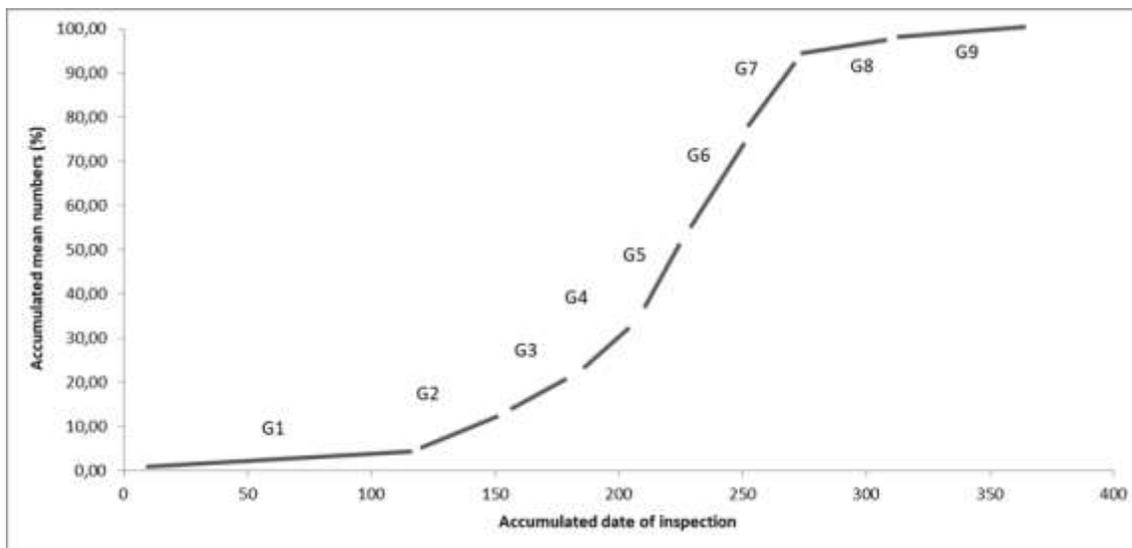


Figure 2: Numbers of *C. capitata* field generations, according to Audemard and milaire (1975) and Iacob (1977) method at Mitidja region, 2017.

Mean numbers of MFF adults for each generation were recorded, that highest values (185.33, 350.67, 246 and 304 adult / trap/ week) observed in fourth, fifth, sixth and seventh generation in summer season, while lowest numbers (16.55 adults / trap/ week) were recorded during the first generation in winter season (Table 5) As presented in figure (1), (2) and table (4) and (5); nine annual generations were observed also along a year in both years of study, male mean numbers in all recorded generation were estimated. All obtained data reflected that the first MFF male generation of

winter seasons was the longest but with lowest mean number of population density of males (11.36 – 16.55 male/ generation in 2016 and 2017 respectively), while the generations occurred in summer was shorter but with more population.

Dates and duration of all estimated generations were paralleled also with obtained results of applying of day degree. Obtained data are presented in Table (2) and (3) and graphically illustrated in Figures (1) and (2). These results revealed that number and duration of *C. capitata* generations coincide and agree with obtained results by applying day degree theory.

DISCUSSION

Insects as poikilothermic animals change their activity visibly depending on the temperature of the surrounding environment (Bale et al. 2002; Menéndez, 2007). There is a threshold temperature for each insect. Insects have an optimum temperature range in which they will grow rapidly. Then, there is maximum temperature (termed upper cutoff) above which development stops. These values are used to predicting insect activity and appearance of symptoms during the growing season. Indeed, accumulated thermal units have been used to predict the seasonal development and emergence of various insects (Sevacherian et al. 1977; Farag et al. 2009; Salama et al. 2015) and provide a valuable tool for insect pest control, in forecasting infestations monitoring and timing of insecticide applications (Zalom et al. 1983).

The climate change certainly affects the status of abundance of insects in the field and high temperature in the future may thus increase the damage on crops; by increasing the number of generations. According to Zalom et al. (1983) the rate of insect development is based on the accumulation of heat measured in physiological rather than chronological time, the number of generations per year is mainly determined by temperature. This is how several generations can succeed each other during the year. Data obtained in the present investigation can help in predicting *C. capitata* annual generations and expected times of frequency of annual generations in the field under current climate depending on the accumulated thermal requirements.

Based on our data, the average life cycle duration during one year from January to December 2016 was 37.55 days and the number of annual generations was nine with an average of 0.76 generation per month when the average annual temperature was 18.88°C. For 2017 season, the average life cycle duration during one year was 36.33 days and the number of annual generations was nine with an average of 0.73 generation per month when the average annual temperature was 18.34°C.

Our results reveal the occurrence of one generation during the winter which coincides with the maturation of different citrus varieties, this generation was the longest but with lowest number of population density of males.

Two generations took place in spring with an average duration of 35 days and an average of weekly number of 46.5 and 61.9 male / generation

in 2016 and 2017 respectively. These two generations coincide with the maturation of Medlars, late varieties of citrus, peaches.

The four generations that occurred in summer were the shorter (22 days) but with highest weekly mean number (242 and 271 male in 2016 and 2017 respectively). A multitude of host fruit is offered to the flies of these generations (Late peaches, plums, pears, cherries, figs ...).

Two generations took place in autumn with an average duration of 45 days and an average weekly number of population densities of 35 and 37.28 males in 2016 and 2017 respectively. These generations coincide with the ripening of fig fruits, prickly pears, quinces, and early varieties of citrus fruits.

The flight of adults of *C. capitata* is observed throughout the year in Mitidja with different densities of *C. capitata* populations which depend on the presence and diversity of host plants. Indeed, tephritid distribution and abundance depend on several abiotic factors (e.g., temperature, relative humidity, rainfall) and several biotic factors (e.g., host plants, natural enemies) (Vayssières et al. 2008). Weather conditions, temporal patterns of host fruit availability, and crop sanitation practices are all factors that can contribute to annual variations in *C. capitata* populations (Israely et al. 1997; De Villiers et al. 2013). The number of annual generations varies greatly depending on the availability of host fruit. According to Ali ahmed Saadoudi (2011), the population density of *C. capitata* depends on the presence and diversity of the host plants, climatic conditions as well as the geographical location of the orchards compared to neighboring orchards.

Oukil (1995) states that *C. capitata* develops up to 6 generations per year in Algeria. However, its complete development is very variable for the same region and depends on climatic factors, particularly temperature, as well as on the fruit species on which the eggs are laid (Khoury, 1998; Ramade, 2003). The development, survival and reproduction of fruit flies are also influenced by the species and quality of hosts, especially at the larval stage. Carey (1984) reported that larval development of *C. capitata* increased from 1 week in favorable hosts such as mango and tomato to more than 3 weeks in quinces. Kamala and Abraham (2002) noticed that the developmental time of *B. dorsalis* varies with the host fruit species. Compared with the artificial diet, the development of larva is slow in natural hosts, because of the quick depletion of food material

due to faster ripening and subsequent spoilage of fruit (Kamala and Abraham, 2002).

Predicting of Mediterranean fruit fly, *C. capitata* annual generation peaks in the field were carried out by studying the relationship between the accumulated thermal heat units expressed as degree-days (DD's) and the population fluctuations of *C. capitata* males flies during the period from early January to late December of 2016 and 2017. When comparison between the expected peaks as calculated (required heat accumulation) and the observed ones (that occurred in the field) for each generation throughout two successive seasons of 2016 and 2017; We expect a total of about 9 generations *C. capitata*. Dates and duration of all estimated generations were paralleled also with obtained results of applying of day degree. These results revealed that number and duration of *C. capitata* generations coincide and agree with obtained results by applying day degree theory. Per previous results, it is worth noting to mention that it is better expected for good prediction that the period between expected dates and actual observed dates should be short as possible and it is preferable that the prospective peak took place before the actual one.

CONCLUSION

The importance of the Mediterranean fruit fly, *Ceratitis capitata* is linked to several factors, it attacks high value-added crops and fruits about to ripen. In Algeria, this pest evolves on different fruit species with a period of maturity which succeeds over time, such as citrus fruits, apricots, peaches and figs. The data obtained during these investigations are important to know more about the biology of *C. capitata* in our region and estimate the expected frequencies of annual generations in our region of study for proper insect management.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declared that present study was performed in absence of any conflict of interest.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors thank the editors and reviewers for their valuable comments on this manuscript.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

SC designed and performed the experiments and also wrote the manuscript. KB corrected language and revised manuscript. AB supervised the work. All authors read and approved the final

version.

Copyrights: © 2020@ author (s).

This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author(s) and source are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms.

REFERENCES

- Afia, Y. E., 2007. Comparative studies on the biology and ecology of the two fruit flies, in Egypt *Bactrocera zonata* (Saunders) and *Ceratitis capitata* (Wiedemann). Ph. D. Thesis, Faculty of Agriculture, Cairo Univ., 301pp.
- Ali-Ahmed Sadoudi, D., Soltani, N., Kellouche, A., Sadoudi, R., 2011. Fluctuating populations of *Ceratitis capitata* Wied. 1824 (Diptera; Trypetidae) in Kabylean orchards using various traps. *International Journal of AgriScience* 1, 75–84.
- Amin, A. A., 2008. Ecological and biological studies on the peach and Mediterranean fruit flies in Fayoum governorate. Ph. D. Thesis, Fac. Agric., Fayoum University. 225 pp.
- Audemard, H., & Millaire, G., 1975. Le piégeage du carpocapse sexual de syntheses: premiers résultats utilisables pour l'estimation des populations conduite de la lutte. In *Annales de Zoologie Ecologie Animale* (Vol. 7, No. 1, pp. 61-80).
- Bale J. S., Masters G. J., Hodkinson I. D., Awmack C., Bezemer T. M., Brown V. K., Butterfield J., Buse A., Coulson J.C., Farrar J., Good J. E. G., Harrington R., Hartley S., Jones T. H., Lindroth R. L., Press M. C., Symioudis I., Waltt A. D., Whittaker J. B. 2002. Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores. *Global Change Biology*, 8 (1): 1–16.
- Bodenheimer, F. S., 1951. Citrus entomology. *Citrus entomology*.
- Carey, J.R., 1984. Host specific demographic studies of the Mediterranean fruit fly *Ceratitis capitata*. *Ecol. Entomol.* 9: 261-270.
- Copeland, R.S., Wharton, R.A., Luke, Q., De Meyer, M., 2002. Indigenous Hosts of

- Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae) in Kenya. *Annals of the Entomological Society of America* 95, 672–694.
- De Meyer, M., Copeland, R.S., Lux, S.A., Mansell, M., Quilici, S., Wharton, R., White, I.M., Zenz, N.J., 2002. Annotated check list of host plants for afrotropical fruit flies (Diptera: Tephritidae) of the genus *Ceratitis*. MRAC.
- De Villiers, M., Manrakhan, A., Addison, P. and Hattingh, V., 2013. The distribution, relative abundance, and seasonal phenology of *Ceratitis capitata*, *Ceratitis rosa*, and *Ceratitis cosyra* (Diptera: Tephritidae) in South Africa. *Environmental Entomology*, 42, 831–840.
- Duyck, P.F., Quilici, S., 2002. Survival and development of different life stages of three *Ceratitis* spp. (Diptera: Tephritidae) reared at five constant temperatures. *Bulletin of Entomological Research* 92, 461–469.
- Eckenrode, S. J., Vea, E.V., and Stone, K.W., 1975. Population trends of onion maggots correlated with air thermal unit accumulations. *Environ. Entomol.* 4:785-789.
- Farag, M. M. A., Shehata, N.F., and Mahmoud, Y.A., 2009. Predicting the annual generation peaks of peach fruit fly, *Bactrocera zonata* (Saunders) (Diptera: Tephritidae) using heat units accumulation at Giza Governorate, Egypt. 4th Conf. on Recent Technologies in Agriculture, Cairo university, Egypt.
- Ghanim, N.M., 2009. Studies on the peach fruit fly, *Bactrocera zonata* (Saunders) (Tephritidae, Diptera). *Mansoura University* 33: 40-121.
- Haddad, M. L., Parra, J. R. P., & Moraes, R. C. B., 1999. Métodos para estimar os limites térmicos inferior e superior de desenvolvimento de insetos.
- Israely, N., and Oman, S.D., 2005. Effect of combined insecticide sprays and sanitation techniques on population dynamics of *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae) in the central mountains of Israel. *Journal of Economic Entomology*, 98, 739–748.
- Israely, N., Yuval, B., Kitron, U. and Nestel, D., 1997. Population fluctuations of adult Mediterranean fruit flies (Diptera: Tephritidae) in a Mediterranean heterogeneous agricultural region. *Environmental Entomology*, 26, 1263–1269.
- Jacob, N., 1977. Un model matamata pentera stabilirea limitelor economic de Iolyrenta a atacaluumolilor fructilorin lupte integrate. *Analele ICPD*, p 15–79.
- Jasic, J., 1975. On the life cycle of *Perillus bioculatus* (Heteroptera: Pentatomidae) in Slovakia. *Acta entomol. Bohemoslov*, 72:383-390.
- Kamala, J., Abraham, V., 2002. A simple and cost-effective mass rearing technique for the tephritid fruit fly, *Bactrocera dorsalis* (Hendel). *Curr. Sci. India*. 82: 266-268.
- Karsten, M., van Vuuren, B. J., Barnaud, A., & Terblanche, J. S., 2013. Population genetics of *Ceratitis capitata* in South Africa: implications for dispersal and pest management. *PLoS one*, 8(1).
- Khoury, N., 1998. Etude préliminaire de la repartitions et de la dynamique des populations de la mouche méditerranéenne des fruits (*Ceratitis capitata* Wied.) dans déférentes biotopes au Liban. Mémoire (D.E.A), Institut de recherche agronomique Libanais-Fanar, 153 pp.
- Liquido, N.J., Shinoda, L.A., and Cunningham, R.T., 1991. Host plants of the Mediterranean fruit fly: an annotated world review. *Miscellaneous Publications of the Entomological Society of America*, 77, 1–52.
- Menéndez, R., 2007. How are insects responding to global warming. *Tijdschrift voor Entomologie*, 150: 355–365.
- Metcalf, R.,L. 1995. Biography of the medfly. In: Morse JG, Metcalf RL, Carey JR, Dowell RV., editors. *The Mediterranean fruit fly in California: defining critical research*. University of California-Riverside. pp. 43–48.
- Meyer, M.D., Robertson, M.P., Peterson, A.T., Mansell, M.W., 2008. Ecological niches and potential geographical distributions of Mediterranean fruit fly (*Ceratitis capitata*) and Natal fruit fly (*Ceratitis rosa*). *Journal of Biogeography* 35, 270–281.
- Miranda, M.A., Alonso, R. and Alemany, A., 2001. Field evaluation of medfly (Dipt., Tephritidae) female attractants in a Mediterranean agrosystem (Balearic Islands, Spain). *Journal of Applied Entomology*, 125, 333–339.
- Muñiz, M., & Zalom, F., 1997. Developmental rate and number of generation estimates of *Ceratitis capitata* (Wiedeman) in fruit growing regions of California.
- Navarro-Llopis, V.N., Sanchis-Cabanes, J., Ayala, I., Casana-Giner, V. and Primo-Yufera, E., 2004. Efficacy of lufenuron as chemosterilant against *Ceratitis capitata* in field trials. *Pest Management Science*, 60, 914–920.
- Oukil, S., 1995. Effets des insecticides et des radiations ionisantes en relation avec la

- variabilité (Diptera: Trypetidae). Thèse 3ème cycle, Univ. Aix. Marseille III, Fac. Sc. Tech-St Jérôme, 138 p.
- Oukil, S., Bues, R., Toubon J. F., and Quilici S., 2002. Allozyme polymorphism in populations of *Ceratitis capitata* from Algeria, the north western Mediterranean coast and Reunion Island. *Fruit*, (57): 183- 191.
- Ramade, F., 2003. *Elément d'écologie fondamentale*. 3 ème édition DUNOD, Paris, 690p.
- Richmond, J.A., Thomas, H.A., Bhattacharya, H.B., 1983. Predicting spring flight of Nantucket pine tip moth (Lepidoptera: Olethreutidae) by heat unit accumulation. *Journal of Economic Entomology* 76: 269-271.
- Salama, H. S., Ismail, A. I., Fouda, M., Ebada, I., & Shehata, I. B., 2015. Thermal requirements and developmental zero of the tomato leaf miner *Tuta absoluta* (Meyrick), (Lepidoptera: Gelechiidae). *Bull. NRC., Egypt*, 40(1), 1-16.
- Sevacherian, V., Toscano, N. C., Van Steenwyk, R. A., Sharma, R. K., & Sanders, R. R., 1977. Forecasting pink bollworm emergence by thermal summation. *Environmental Entomology*, 6(4), 545-546.
- Trudgill, D. L., Honek, A. D. L. I., Li, D., & Van Straalen, N. M., 2005. Thermal time-concepts and utility. *Annals of Applied Biology*, 146(1), 1-14.
- Vayssières, J. F., Y. Carel, M. Coubes, and P. F. Duyck., 2008. Development of immature stages and comparative demography of two cucurbit-attacking fruit flies in Reunion Island: *Bactrocera cucurbitae* and *Dacus ciliatus* (Diptera Tephritidae). *Environmental Entomology* 37: 307–314.
- Zalom, F. G., Goodell, P. B., Wilson, L. T., Barnett, W. W., & Bentley, W.J., 1983. Degree-days: The calculation and use of heat units in pest management. 10 p. *Division of Agriculture and Natural Resources, University of California, Davis, USA*.