

THÈSE

Pour obtenir le grade de
Docteur

Délivré par **MONTPELLIER SupAgro**

Préparée au sein de l'école doctorale **SIBAGHE**
Et de l'Unité de Recherche **HORTSYS, Cirad**

Spécialité: **Ecosystèmes et Sciences Agronomiques (ESA)**

Présentée par **Ginette Yèyinou AZANDEME HOUNMALON**

**Comportement de *Tetranychus evansi* sur tomate
et interaction avec son prédateur *Phytoseiulus
longipes*. Application pour une stratégie de lutte
intégrée en condition tropicale**

Soutenance le 17/06/2015 devant le jury composé de

Francisco FERRAGUT PEREZ, Professeur, Univ. Politècnica de Valencia	Rapporteur
Eric WAJNBERG, Directeur de recherche, INRA, Sophia Antipolis	Rapporteur
Frédéric MARION-POLL, Professeur, AgroParisTech	Examineur
Bertrand SCHATZ, Directeur de recherche, CNRS, Montpellier	Examineur
Serge KREITER, Professeur, Montpellier SupAgro	Directeur de thèse
Thibaud MARTIN, Chercheur, CIRAD, Kenya	Co-Directeur de thèse

RESUME

Tetranychus evansi est un ravageur invasif, observé en Afrique de l'Est et de l'Ouest vers les années 2000 qui provoque des dégâts à fort impact économique sur les Solanaceae. Ses pullulations entraînent généralement une lutte chimique intensive avec des produits pas toujours efficaces. L'acarien *Phytoseiulus longipes* s'est révélé être le meilleur prédateur pour contrôler *T. evansi* mais l'utilisation intensive des pesticides chimiques peut rendre difficile son efficacité en plein champ. L'efficacité de *Metarhizium anisopliae* ICIPÉ-78 a été démontrée récemment. Mais la qualité des spores préconisée en pulvérisation foliaire est affectée par l'effet de la température et de l'hygrométrie. Ce sont là autant de paramètres qui affectent l'efficacité des méthodes de lutte recommandées pour contrôler *T. evansi*. Une meilleure connaissance du comportement de *T. evansi* et de ses interactions avec *P. longipes* devrait nous permettre d'optimiser le contrôle de ce nouveau ravageur. L'objectif principal de ma thèse a été d'étudier le comportement de dispersion de *T. evansi* sur tomate ainsi que ses interactions avec *P. longipes* afin de mettre en place une méthode de lutte intégrée en condition tropicale. J'ai étudié le comportement de dispersion de *T. evansi* sur une feuille et un plant de tomate comparé à celui de *T. urticae*. Mes études ont montré un comportement grégaire de *T. evansi* à faible densité et une dispersion à forte densité. J'ai également mis en évidence sa migration circadienne avec un flux important de migrants en début d'après-midi et un autre plus faible dans la nuit. Par ailleurs, le nombre d'individus ascendants a été similaire au nombre d'individus descendants. Mes études d'interactions entre *T. evansi* et *P. longipes* ont montré un comportement de fuite de *T. evansi* en présence de *P. longipes* à travers des signaux visuels, vibratoires et olfactifs et un comportement attractif de *P. longipes* pour *T. evansi* à travers des signaux vibratoires et olfactifs. Les composés volatiles émis par *T. evansi* et attractifs de *P. longipes* ont été le linalool et le méthyl salicylate (MeSA). Pour améliorer l'efficacité des champignons entomopathogènes contre *T. evansi*, j'ai étudié l'efficacité d'une mousse imprégnée de *M. anisopliae*. J'ai montré que cette mousse imprégnée placée autour de la tige d'un plant de tomate réduisait significativement une population de *T. evansi* avec une rémanence de 36 jours à condition que la mousse soit placée au-dessus de l'infestation. Cette technique peut d'ailleurs être complétée par un lâcher de *P. longipes* qui semblent insensibles à *M. anisopliae*. Enfin, à travers une étude de cas, j'ai confirmé le caractère invasif de *T. evansi* au Bénin avec des dégâts de 65 % de perte de

production en moyenne sur la tomate, 56 % pour le gboma (ou aubergine africaine) et 25 % pour l'amaranthe. Les producteurs ont tous utilisé des pesticides chimiques à base de pyréthrinoides et d'organophosphorés mais aucun à leur dire ne semble avoir été efficace. D'où leur recours à de fréquentes pulvérisations de l'ordre de 3, 6 et 12 traitements par mois en moyenne sur l'amaranthe, le gboma et la tomate respectivement. Une méthode de lutte adaptée au comportement grégaire de *T. evansi* pourrait être l'utilisation de filet imprégné d'acaricide ou de *M. anisopliae* déposé sur le spot de plantes infestées ou bien combiné avec les prédateurs à une plus grande échelle. Une autre stratégie consisterait à associer aux cultures des plantes productrices de linalool et/ou de MeSA comme attractifs d'acariens prédateurs. Sous abris, les plantes cultivées de façon intensive, pourraient être protégées par des mousses imprégnées de *M. anisopila*e et des prédateurs. L'ensemble de ces méthodes respectueuses de l'environnement devrait permettre le contrôle efficace de ce nouveau ravageur des Solanaceae en Afrique sub-Saharienne.

MOTS CLEFS: Ethologie, écologie chimique, lutte intégrée, *Tetranychus evansi*, *Phytoseiulus longipes*, *Metarhizium anisopila*e, tomate.

ABSTRACT

Tetranychus evansi is an invasive pest in East and West Africa first observed in the early 2000- 2007's responsible of huge damages on Solanaceae with strong economic losses. The outbreaks pushed the growers to spray a lot of chemical pesticides that were not often very effective. The predatory mite *Phytoseiulus longipes* has proved to be effective in controlling *T. evansi* but the high use of chemical pesticides by farmers made it difficult to introduce then to release it in open field to expect a natural regulation. The effectiveness of *Metarhizium anisopliae* has been recently demonstrated against *T. evansi*. However the quality of spores used by spraying can be affected by the effect of temperature and humidity. These factors can affect the effectiveness of control methods recommended for the control of *T. evansi*. The simultaneous use of predatory mites and insect pathogenic fungus alone or combined with chemical control could promote the development of IPM strategies against this pest. The main objective of my thesis was to study *T. evansi* dispersal behavior on tomato and its interactions with its predator *P. longipes* to develop an IPM strategy. I studied *T. evansi* dispersal behavior on a leaf and on a tomato plant compared with *T. urticae*. My results showed a gregarious

behavior at low density followed by a dispersing behavior at high density. A circadian migration behavior has also been showed for *T. evansi* with a large flow of migrants early in the afternoon and another weaker at the night. Furthermore, the number of individual ascendants and descendants were quite similar. Study on interactions between *T. evansi* and *P. longipes* showed an avoiding behavior of *T. evansi* in the presence of *P. longipes* through visual, vibration and olfactory signals and attractive behavior of *P. longipes* to *T. evansi* through vibration and olfactory signals. The volatile compounds emitted by *T. evansi* and attractive to *P. longipes* were linalool and methyl salicylate (MeSA). In the third part, I presented the results obtained with synthetic foam impregnated by *M. anisopliae* and placed around the stem of a tomato plant. I have shown that this impregnated foam was still effective over 36 days reducing significantly a *T. evansi* population if placed above the infestation. Also, I have shown that this technique could be combined with the predatory mite *P. longipes* as they appeared not susceptible to *M. anisopliae*. Finally, through a case study, I confirmed the invasive status of *T. evansi* in Benin with significant losses on tomatoes, gboma (African eggplant) and amaranthus. All farmers sprayed chemical pesticides containing mainly pyrethroids and organophosphates but none seemed to be effective. In average farmer sprayed 3, 6 and 12 times per month on amaranthus, gboma and tomato, respectively. The gregarious behavior of *T. evansi* could help locating the first infestation and eliminate using an impregnated acaricide net or *M. anisopliae* placed on the spot of infested plants or combined with predators to a larger scale. Another strategy would be to combine with the Solanaceae crops some companion plants producing linalool and/or MeSA attractive for predatory mites. In greenhouses, tomato crops could be protected by foam impregnated with *M. anisopiliae* in association with predator releases. All these methods environmentally friendly and adapted to the behavior of the mite should allow effective control of this new pest of Solanaceae in sub-Saharan Africa.

KEYS WORDS: Ethology, chemical ecology, IPM, *Tetranychus evansi*, *Phytoseiulus longipes*, *Metarhizium anisopiliae*, tomato.

DEDICACE

Je dédie ce travail de thèse à :

- **Dieu Tout Puissant**, dont l'amour constant demeure inamovible pour ceux qui ont confiance en lui. Tu as été mon **Rocher** et tu as su me conduire dans ta **Lumière** depuis le commencement jusqu'à ce jour malgré les difficultés. Du plus profond de mon cœur, je viens te dire merci parce que tu as été très **Fidèle**.

- A toi mon cher époux **Barthélémy Hounmalon**, mes enfants **Lumière, Rocher et Fidèle**: vous avez su être à mes côtés à tout moment même à des milliers de kilomètres, à m'encourager, me soutenir spirituellement et avoir cru en moi quoi qu'il arrive. Je vous remercie infiniment pour votre amour, vos sacrifices, et votre patience.

- Vous, mes parents **Christine et Dieu-donné**, à mes frères **Hervé et Olivier** : je vous remercie du plus profond de mon cœur pour votre soutien inconditionnel.

REMERCIEMENTS

Tous mes profonds remerciements vont d'abord à mes directeurs de thèse: **Serge Kreiter et Thibaud Martin**. Je vous remercie très sincèrement pour l'aide continue que vous m'avez apportée et pour votre encouragement à mener à terme ma thèse. Merci pour vos critiques constructives et surtout pour votre rigueur scientifique qui ont été précieux dans l'aboutissement de ce travail.

Je tiens à remercier vivement **Maxime Ferrero, Simon Fellous, Marie-Stéphane Tixier, Alain Migeon, Philippe Auger, Sabine Guichou et Martial Douin** pour leurs aides, discussions, commentaires et remarques qui ont contribué au développement et à l'amélioration de ce travail.

Mes remerciements vont évidemment aux personnes qui me font l'honneur de constituer mon jury de thèse. Je tiens à remercier **Eric Wajnberg et Francisco José Ferragut Pérez** d'avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse ainsi que **Frédéric Marion-Poll, Bertrand Schatz, Serge Kreiter et Thibaud Martin**.

Je voudrais remercier également **Alain Ratnadass et Cica Urbino** pour leur assistance dans l'amélioration de ce travail.

Mes remerciements vont également à **Komi Fiaboe, Sevgan Subramanian, Torto Baldwin et Jean Maniania** qui, dès le départ, ont cru en moi et m'ont permis de travailler dans leurs laboratoires d'étude du comportement des insectes, d'écologie chimique et de pathologie à l'ICIPE.

Merci également à **Hyppolite Affognon** grâce à qui j'ai pu conduire les enquêtes socio-économiques au Bénin.

Je remercie très sincèrement **Simon Fellous et Saliou Niassy** pour leur grand appui dans les analyses statistiques.

Je tiens à remercier vivement toute l'équipe "**Leaf Miner**" de l'ICIPE qui m'a aidée de multiples façons au cours de mes séjours au Kenya.

Je remercie du fond du cœur toute l'équipe de l'IITA Bénin: **Manuele Tamo, Muaka Toko, Désiré Gnanvossou, Alexis Onzo, Koffi Negloh**. Merci pour avoir cru en moi et pour m'avoir soutenu depuis le début jusqu'à maintenant.

Mes sincères remerciements à l'équipe de l'INRAB CRA-Agonkanmey à travers **Françoise Assogba-Komlan** pour son grand appui et pour son implication lors des travaux d'enquêtes au Bénin.

Je remercie très sincèrement **Miriam Kungu** du laboratoire "Red Spider Mite" pour son assistance et son implication dans ce travail.

Merci également à **Levi Odhiambo** du laboratoire de pathologie qui m'a soutenu et assisté dans les expérimentations sur les entomopathogènes.

Mes sincères remerciements vont également à l'endroit d'Ayuka **Fombong, Lucy Kananu et Vincent Nyasembe** pour les fructueuses discussions menées avec eux en écologie chimique.

Je tiens à remercier **Xavier Cheseto et Hillary Kirwa** grâce à qui j'ai passé des moments agréables dans le laboratoire d'écologie chimique.

Je remercie aussi mes collègues doctorants **Emilie Deletré, Andnet Abteu et Anicet Dassou** pour leur franche collaboration.

Je voudrais adresser mes sincères remerciements à tous mes amis au Bénin, au Kenya, en France et ailleurs. Leur amitié sincère et leur soutien spirituel m'ont aidée à surmonter beaucoup d'épreuves au cours de mes séjours en France. Je remercie particulièrement **Christine Boutavin, Noëlle et Maxime Mantsouaka, Flavy et Christian Lapenna, Odette Beauregard, Caroline Mwongera, Caroline Foba, Faustin Akushe, Constance et Bertin Déguénon, Célestin Agboadan et Mireille Assogba**.

PUBLICATIONS

1- PUBLICATIONS INCLUSES DANS LA THESE

A1 – Azandémè-Hounmalon, G.Y., Affognon, H.D., Assogba-Komlan, F., Tamò M., Fiaboe, K.K.M., Kreiter, S., & Martin, T. Farmer's practices to fight against the invasive red spider mite *Tetranychus evansi* Baker & Pritchard in Southern Benin. *Sous presse dans "Crop Protection"*.

A2 – Azandémè-Hounmalon, G.Y., Fellous, S., Kreiter, S., Fiaboe, K.K., Subramanian, S., Kungu, M., & Martin, T. (2014). Dispersal Behavior of *Tetranychus evansi* and *T. urticae* on Tomato at Several Spatial Scales and Densities: Implications for Integrated Pest Management. *PloS one*, 9(4), e95071.

A3 – Azandémè-Hounmalon, G.Y., Torto, B., Fiaboe, K.K.M., Subramanian, S., Kreiter S., & Martin T. Visual, vibratory and olfactory cues affect interactions between the red spider mite *Tetranychus evansi* and its predator *Phytoseiulus longipes* (Acari: Tetranychidae, Phytoseidae). *Accepté dans "Journal of Pest Science"*.

2- PUBLICATIONS NON INCLUSES DANS LA THÈSE

A4 – Azandémè-Hounmalon, G.Y., Niassy, S., Maniania, N.K., Kreiter, S., Fiaboe, K.K.M., & Martin, T. Association of *Metarhizium anisopliae* ICIPE-78 with predatory mite *Phytoseiulus longipes* Evans in the control of *Tetranychus evansi* on tomato. *En préparation...*

A5 – Kungu, M., Subramanian, S., Salifu, D., Fiaboe, K.K.M., Gitonga, L., Lagat, Z.O., Azandémè-Hounmalon, G.Y. & Martin T. (1) Within-plant distribution and diurnal migration of *Tetranychus evansi* Baker and Pritchard on African nightshade, *Solanum scabrum*. (2) Effectiveness of acaricide treated net combined with the predators *Phytoseiulus longipes* Evans in controlling *Tetranychus evansi* on *S. scabrum* in greenhouse. *En préparation...*

3- COMMUNICATION ORALE

A6 – Azandémè-Hounmalon, G.Y., Kreiter, S., Torto, B., Fiaboe, K.K.M., Martin, T. Mise en évidence des signaux visuels et olfactifs émis et perçus par *Tetranychus evansi* et son prédateur *Phytoseiulus longipes*. AFJCEC – 1ère Rencontre Nationale des Jeunes Chercheurs en Ecologie Chimique, Montpellier – 05 au 07 Juin 2013.

A7 – S. Niassy*; S. Subramanian; K. Fiaboe; T. Martin; K. Akutse; A. Muvea; J. Nyasani; B. Mutune; K. Mfuti, W. Hundessa; **G.Y. Azandémè-Hounmalon**; N. K. Maniania and S. Ekesi. Improved biopesticide application strategies for insect pest management in Africa. International Plant Protection Congress (IPPC).

4- COMMUNICATION AFFICHÉE

A8 – Azandémè-Hounmalon, G.Y., Affognon, H.D., Assogba-Komlan, F., Tamò M., Fiaboe, K.K.M., Kreiter, S., Martin, T. Comportement des maraîchers face à l'invasion de *Tetranychus evansi* Baker & Pritchard au sud du Bénin. AFPP – Dixième Conférence Internationale sur les Ravageurs en Agriculture (CIRA), Montpellier – 22 et 23 Octobre 2014.

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 1: Femelle de *Tetranychus evansi*

Figure 2: Distribution mondiale de *Tetranychus evansi*

Figure 3: Cycle de développement des Tetranychoida. Les chiffres entre parenthèses indiquent la durée en jours de ces stades chez *Tetranychus urticae* élevé à une température de 25 °C et à une hygrométrie de 50 % (Gutierrez, 1993)

Figure 4: Dégâts de *Tetranychus evansi* sur la tomate (Photos: G. Azandémè-Hounmalon; A. Migeon)

Figure 5: Application de pesticide

Figure 6: Filet imprégné d'acaricide pour la protection du gboma

Figure 7: Evolution des dégâts de *T. evansi* après application des différents traitements (Abam: Abamectine; Ma + Pre: *M. anisopliae* + Prédateur; Ma: *M. anisopliae*; Pre: Prédateur; Con: Contrôle)

Figure 8: *P. longipes* et sa proie *T. evansi* (Photo G. Azandémè-Hounmalon)

Figure 9: Localisation et distribution des périmètres maraîchers

Figure 10: Echantillonnage d'acariens

Figure 11: Dispositif expérimental sur la dispersion de *T. evansi* sur une feuille

Figure 12: Dispositif de mise en évidence du mouvement circadien

Figure 13: Dispositif expérimental du video tracking

Figure 14: Différents tests montrant le comportement de (a) *P. longipes* en présence de *T. evansi* et (b) *T. evansi* en présence de *P. longipes*.

Figure 15: Collecte et identification des volatiles sur *T. evansi*

Figure 16: Collecte des composés volatiles sur plante de tomate

Figure 17: Traitement des disques de feuilles tomate

Figure 18: Cube de mousse synthétique

Figure 19: Dispositif expérimental

Figure 20: Evolution du pourcentage de foliole infesté par *T. evansi*, par plant et par date d'observation. **C1:** *T. evansi* sur L2 située juste en-dessous de la mousse non imprégnée; **C2:** *T. evansi* sur L3 située juste au-dessus de la mousse non imprégnée; **T1:** *T. evansi* sur L2 située juste en-dessous de la mousse imprégnée; **T2:** *T. evansi* sur L3 située juste au-dessus de la mousse imprégnée

Figure 21: Acariens dans les pores de la mousse imprégnée

Figure 22: Nombre de spores de *M. anisopliae* transporté par un seul acarien échantillonné à différents niveaux sur le plant de tomate au 15^{ème} jour d'observation après infestation. **T1:** *T. evansi* sur L2 située juste en-dessous de la mousse imprégnée; **T2:** *T. evansi* sur L3 située juste au-dessus de la mousse imprégnée

Figure 23: Durée d'efficacité de la mousse imprégnée

Figure 24: Evolution du pourcentage de foliole infesté par *T. evansi*, par plant et par date d'observation. **C1:** *T. evansi* sur L2 située juste en-dessous de la mousse non imprégnée + *P. longipes* sur L1; **C2:** *T. evansi* sur L2 située juste en-dessous de la mousse non imprégnée; **T1:** *T. evansi* sur L2 située juste en-dessous de la mousse imprégnée + *P. longipes* sur L1; **T2:** *T. evansi* sur L2 située juste en-dessous de la mousse imprégnée

Figure 25: *Phytoseiulus longipes* dans les pores de la mousse imprégnée de *M. anisopliae*

Tableau 1: Position taxonomique de *T. evansi*

Tableau 2: Position taxonomique de *Phytoseiulus longipes*

Table des matières

RESUME.....	i
ABSTRACT	ii
DEDICACE.....	iv
REMERCIEMENTS	v
PUBLICATIONS	vii
LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX.....	ix
INTRODUCTION GENERALE.....	3

CHAPITRE 1: SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

1. L'acarien rouge de la tomate, <i>Tetranychus evansi</i>	9
1.1. Origine et distribution	10
1.2. Traits d'histoire de vie	10
1.3. Plantes hôtes et dégâts	12
1.4. Méthodes de lutte contre <i>Tetranychus evansi</i>	13
2. Conclusion.....	20

CHAPITRE 2: IMPACT DE TETRANYCHUS EVANSI SUR LES SOLANACEES AU SUD BENIN ET PRATIQUES PHYTOSANITAIRES DES MARAICHERS

1. Introduction	21
2. Méthode.....	22
3. ARTICLE A1	24
4. Conclusion.....	43

CHAPITRE 3: ETUDE DU COMPORTEMENT DE TETRANYCHUS EVANSI SUR TOMATE

1. Introduction	45
2. Matériel et Méthodes.....	46
2.1. Dispersion sur une feuille de tomate.....	46
2.2. Dispersion sur un jeune plant de tomate	46
2.3. Mise en évidence de la migration circadienne chez <i>T. evansi</i>	47
3. ARTICLE A2	48

4. Conclusion.....	57
--------------------	----

CHAPITRE 4: ETUDE DES INTERACTIONS ENTRE *TETRANYCHUS EVANSI* ET
PHYTOSEIULUS LONGIPES

1. Introduction	59
2. Matériel et Méthodes.....	60
2.1. Comportement de <i>Tetranychus evansi</i> et de <i>Phytoseiulus longipes</i>	60
2.2. Collecte et analyse des composés volatiles.....	64
2.3. Olfactomètre en Y.....	65
3. ARTICLE A3	66
4. Conclusion.....	100

CHAPITRE 5: MOUSSE IMPREGNEE DE *METHARHYZIUM ANISOPLIAE* FIXEE SUR
UN PLANT DE TOMATE POUR CONTROLER *TETRANYCHUS EVANSI*

1. Introduction	101
2. Méthode.....	102
2.1. Test de germination.....	102
2.2. Test de pathogénicité des spores.....	102
2.3. Effet de la mousse imprégnée sur l'infestation et les dégâts de <i>T. evansi</i>	103
2.4. Association de la mousse imprégnée et de <i>P. longipes</i>	104
2.5. Observations	106
3. Résultats et discussion.....	107
4. Conclusion.....	112
DISCUSSION GENERALE	113
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	123
REFERENCES.....	125
ANNEXES	149

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Tetranychus evansi (Baker & Pritchard) ou acarien rouge de la tomate, appartenant à la famille des Tetranychidae et originaire du Brésil, est un ravageur invasif (Ferragut & Escudero, 1999; Migeon, 2005; Navajas *et al.*, 2013). Depuis son premier signalement au Nord-Est du Brésil en 1952 (Silva, 1954), cet acarien d'origine tropicale n'a cessé d'étendre son aire de répartition à d'autres régions tropicales, sub-tropicales et tempérées. Il a actuellement une vaste répartition géographique englobant tous les continents à l'exception de l'antarctique (Migeon & Dorkeld, 2006, 2015). *Tetranychus evansi* se disperse certainement sans son cortège de prédateurs et partout où il s'est installé, des dégâts importants ont été constatés sur un grand nombre de plantes de la famille des Solanaceae et plus précisément la tomate (Ferragut & Escudero, 1999; Saunyama & Knapp, 2003; Migeon *et al.*, 2008). Les études conduites en Afrique sub-Saharienne au Bénin et au Zimbabwe ont montré que ces acariens pouvaient causer des pertes de production évaluées à plus de 90 % sur l'aubergine (*Solanum macrocarpum* Linné) et la tomate (*S. lycopersicum* Linné) cultivées en plein champ (Saunyama & Knapp, 2003; Martin *et al.*, 2010). Dans cette région, le contrôle de ces acariens se fait principalement par la lutte chimique avec application de pesticides chimiques de synthèse. Certains acaricides spécifiques tels que la propargite, le cyenopyrafène, le bifénazate, la milbémectine, le spiroadiclofène, le tébufenpyrad et l'abamectine ont été récemment développés avec des modes d'action différents permettant de contrôler les pullulations de *T. evansi* (Saunyama & Knapp, 2003; Gotoh *et al.*, 2010; Toroitich *et al.*, 2014). La lutte chimique n'est cependant pas toujours efficace à court ou moyen terme du fait de l'utilisation d'un produit inadapté, ou mal dosé ou sur-utilisé, qui peut entraîner la sélection d'individus résistants, l'élimination de l'entomofaune utile, en particulier d'acariens prédateurs, sans parler du risque de résidus toxiques pouvant nuire à la santé humaine et à l'environnement (Maniania *et al.*, 2008; Azandémè, 2010; Ahouangninou *et al.*, 2011, 2012). Une forme originale de lutte chimique contre les acariens est basée sur l'utilisation des filets imprégnés d'acaricide (Martin *et al.*, 2010). Elle vise à piéger les acariens phytophages lors de leur migration ou de leur dispersion, avec un risque de contamination minimale de l'homme, de la plante et de l'environnement. L'efficacité de cette technique a été récemment démontrée au Bénin pour les acariens phytophages *Polyphagotarsonemus latus* (Banks) et *T. urticae* (Koch) sur l'aubergine africaine *S. macrocarpum*, en utilisant le dicofol comme acaricide. Cette technique particulièrement efficace contre *P. latus* permet d'effectuer des traitements par

taches sur des zones infestées mais elle ne permet pas de protéger de grandes surfaces. L'avantage par rapport à un traitement foliaire est de réduire considérablement le risque de résidus sur les plantes et le sol mais aussi de pouvoir réutiliser le même traitement un grand nombre de fois du fait de la stabilité du dicofol pour lequel la toxicité pour l'homme est faible.

Dans les cultures maraîchères sous abris, les acariens phytophages sont généralement bien contrôlés par les programmes de lutte biologique (Furtado *et al.*, 2007b; Britto *et al.*, 2009). La lutte contre *T. evansi* avec les acariens prédateurs tels que *Phytoseiulus persimilis* (Athias-Henriot) et *Cydnodromus californicus* (McGregor) n'est toutefois pas très efficace car *P. persimilis* ne semble pas pouvoir se nourrir et se développer correctement sur tous les stades de *T. evansi* (Moraes & McMurtry, 1985a et b; Escudero & Ferragut, 2005). De nombreuses prospections conduites au Brésil et en Argentine dans la zone d'origine supposée de *T. evansi* ont abouti à la découverte d'une espèce prédatrice, *P. longipes* (Evans), appartenant à la famille des Phytoseiidae trouvée en association avec *T. evansi* sur *Lycopersicon esculentum* (Miller), *Salpichroa organifolia* (Lamarck) et *S. americanum* (Miller) (Rosa *et al.*, 2005; Fiaboe *et al.*, 2006, 2007b; Furtado *et al.*, 2006, 2007a). A ce jour, quatre populations de *P. longipes* ont été collectées et caractérisées. Elles sont d'origine Argentine (A), Brésilienne (B), Chilienne (C) et Sud-Africaine (SA). La préférence de *P. longipes* (A) et (B) pour la tomate (ou les Solanaceae) a pu conduire ce prédateur à se développer et à se reproduire sur tous les stades de *T. evansi*, alors que d'autres populations (C) et (SA), découvertes sur d'autres plantes dans d'autres zones géographiques, ne le pouvaient pas. Les études préliminaires concernant le potentiel de ce prédateur (population B) ont montré qu'il pouvait non seulement contrôler *T. evansi* mais aussi *T. urticae* sur tomate au laboratoire (Ferrero *et al.*, 2007; Furtado *et al.*, 2007b). Un projet de lutte biologique contre *T. evansi* en Afrique de l'Est, a permis d'introduire une population de *P. longipes* (B) à l'ICIPE fin 2005 afin de pouvoir effectuer des lâchers inondatifs au Kenya (Fiaboe *et al.*, 2006; Furtado *et al.*, 2006; Ferrero *et al.*, 2007; Wekesa *et al.*, 2007). L'utilisation d'autres ennemis naturels comme les champignons entomopathogènes constitue également une piste prometteuse. En effet, une espèce de champignon *Neozygites floridana* (Weiser & Muma) s'est révélée efficace pour contrôler *T. evansi* au Brésil (Wekesa *et al.*, 2007, 2010; Maniania *et al.*, 2008) et en Argentine (Guanilo *et al.*, 2010; Wekesa *et al.*, 2010). Les travaux conduits par Wekesa *et al.* (2007) sur les interactions entre *N. floridana* et *P. longipes*, ont montré une bonne

compatibilité de ces deux agents naturels. Pour l'instant, aucune des souches d'Amérique du Sud de *N. floridana* n'a été encore introduite en Afrique. Une étude conduite récemment au Kenya a également montré des résultats très prometteurs de l'utilisation de *Metharhyzium anisopliae* (Metschnikoff) et de *Beauveria bassiana* (Balsamo) pour contrôler *T. evansi* et *T. urticae* sur tomate (Wekesa *et al.*, 2005). Des travaux conduits au Kenya par Bugueme *et al.* (2008) sur l'effet de la température sur la virulence des isolats de *M. anisopliae* et *B. bassiana* ont montré un plus faible taux de germination de *B. bassiana* à 35 °C par rapport à *M. anisopliae*. Par ailleurs, *M. anisopliae* s'est montré compatible avec *P. longipes* (Maniania & Kungu, 2011).

L'utilisation de champignons entomopathogènes s'opère toutefois uniquement par pulvérisation foliaire et cela nécessite une forte quantité de spores. De plus, la germination et la virulence des spores sont affectées par l'effet de forte température et surtout de faible hygrométrie, avec une faible durée d'action comprise entre 3 et 4 jours sur les feuilles de niébé ce qui généralement entraîne de fréquentes applications avec des coûts élevés de traitement (Ekesi *et al.*, 1999, 2000; Dimbi *et al.*, 2004; Kiewnick, 2006; Jaronski, 2010). Cependant, une durée d'action plus longue, comprise entre 10 et 15 jours a été aussi rapportée au laboratoire et en plein champ sur les sauteriaux *Rhammatocerus schistocercoides* (Rehn) et le criquet sénégalais *Oedaleus senegalensis* (Krauss) (Magalhães *et al.*, 2002; Paraíso *et al.*, 2004). Les champignons entomopathogènes et les acariens prédateurs jouent un rôle majeur dans la régulation naturelle des populations d'acariens phytophages. Ils pourraient donc être utilisés conjointement dans des programmes de lutte intégrée. Le recours aux acariens prédateurs n'est en revanche pas compatible avec la lutte chimique car ceux-ci y sont généralement plus sensibles (Adango *et al.*, 2007).

La dispersion des tétranyques a été l'objet de plusieurs études conduites ces vingt dernières années (Hussey & Parr, 1963; Suski & Naegele, 1966; McEnroe & Dronka, 1971; Main, 1976; Binns, 1982; Smiley & Kennedy, 1985; Dunning *et al.*, 1995; Hanski, 1998, 1999; Bell *et al.*, 2005; Bowler & Benton, 2005; Clotuche *et al.*, 2011, 2013). Le mode de dispersion varie en fonction des espèces, du sexe, du cycle biologique, des conditions environnementales et climatiques. Chez *T. urticae* par exemple, les individus se dispersent en marchant (McGregor, 1913; Hussey & Parr, 1963), par phorésie, c'est-à-dire par le biais d'un autre organisme (Boykin & Campbell, 1984; Yano, 2004) ou encore par le vent (Li & Margolies, 1993; Bell *et al.*, 2005). Ce dernier mode de dispersion encore appelé dispersion collective, se

produit, lorsque la population grossit avec une diminution des ressources alimentaires qui amène les individus à former des boules de soie au sommet de la plante hôte et à se laisser emporter par des courants d'air vers une autre plante hôte par le phénomène de "ballooning" (Clotuche *et al.*, 2011). La taille de ces boules de soie augmente en cours de journée et diminue au cours de la nuit, confirmant la migration circadienne observée chez *T. urticae* sur plante de haricot et plante de tomate (Pralavorio *et al.*, 1989; Delétré *et al.*, 2014). Cependant, le mode de dispersion et de migration intra-plant de *T. evansi* ne semble pas avoir été étudié à ce jour ce qui justifia l'objectif principal de ma thèse et constitue le second chapitre de mon manuscrit. Les travaux antérieurs conduits par Ferrero *et al.* (2014a et b) sur les comportements alimentaires de *P. longipes* face à différentes espèces de proies (*T. urticae* et *T. evansi*) avaient montré un comportement attractif de *P. longipes* pour *T. evansi* par rapport à *T. urticae*. Aucune explication n'a toutefois été fournie sur les signaux ou les composés volatiles pouvant être responsables de cette attractivité. L'étude des interactions entre *T. evansi* et *P. longipes* à travers des signaux visuels, vibratoires, olfactifs et l'identification des composés impliqués dans l'attractivité de *P. longipes* pour *T. evansi* constitue donc le troisième chapitre de ma thèse. Le quatrième chapitre porte sur la mise au point d'une nouvelle technique d'utilisation de l'entomopathogène *M. anisopliae* ICIPE-78 imprégné sur des mousses synthétiques. Pour cette étude, je me suis basée d'une part sur les récents travaux de Wekesa *et al.* (2005), Bugeme *et al.* (2009) montrant la toxicité de cette souche de *M. anisopliae* sur *T. evansi*, et d'autre part, sur ceux de Martin *et al.* (2010) et Delétré *et al.* (2014) qui ont travaillé sur le concept de matériau imprégné pour lutter contre les acariens phytophages. Le cinquième chapitre sera consacré à une enquête réalisée sur le terrain au Bénin pour évaluer l'impact de *T. evansi* dans les cultures maraîchères et identifier les pratiques phytosanitaires des maraîchers pour contrôler ses pullulations.

Ce manuscrit de thèse, s'articulera donc en cinq chapitres dont le premier est une synthèse bibliographique générale, reprenant et détaillant les points importants cités en introduction générale et qui serviront à mieux comprendre les objectifs des travaux réalisés au cours de la thèse. Les quatre chapitres suivants ont fait chacun l'objet d'un article scientifique déjà publié ou soumis dans une revue scientifique à comité de lecture. Ils seront constitués d'une brève introduction et d'une discussion des résultats obtenus. Une discussion générale fera la synthèse de mes travaux de recherche et proposera des perspectives en terme de nouvelles

questions de recherche mais aussi en terme de stratégies de lutte intégrée destinées à contrôler les infestations de *T. evansi* en Afrique sub-Saharienne.

Objectif

L'objectif principal de ma thèse est de mieux comprendre le comportement migratoire et de dispersion de *T. evansi* sur tomate et d'identifier les interactions avec son prédateur *P. longipes*. Ces connaissances doivent me permettre, d'une part de mettre au point une nouvelle technique de lutte contre ce ravageur et d'autre part, de proposer une stratégie de lutte intégrée en Afrique sub-Saharienne qui prenne en compte les pratiques actuelles des producteurs et soit adaptée à leur technicité et à leur environnement. Pour une question de durabilité, cette stratégie à plus ou moins long terme devra prendre en compte les équilibres et déséquilibres écologiques et être respectueuse de l'environnement.

Questions de recherche :

- Quel est le statut actuel de *T. evansi* au Bénin ? Quel est l'impact de ce ravageur invasif sur la production de solanacées ? Quelles sont les pratiques phytosanitaires des producteurs pour protéger leurs cultures contre ce fléau ?
- Quel est le mode de dispersion de *T. evansi* sur une feuille et un plant de tomate en comparaison à celui de *T. urticae* ? Quel est son comportement migratoire ? Sur la base de ces résultats, quelles stratégies pourrait-on proposer pour contrôler les infestations de *T. evansi* ?
- Quelles sont les interactions qui existent entre *T. evansi* et son prédateur *P. longipes* ? Sont-elles basées sur des signaux visuels, vibratoires ou olfactifs ?
- Compte tenu du comportement migratoire de *T. evansi* et de son mode de dispersion comment pourrait-on combiner efficacement l'utilisation du champignon entomopathogène *M. anisopliae* avec le lâcher d'acariens prédateurs pour un meilleur contrôle de *T. evansi* sur la tomate ?

Synthèse bibliographique

CHAPITRE 1

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1. L'acarien rouge de la tomate, *Tetranychus evansi*

Tetranychus evansi Baker & Pritchard (Figure 1) est un ravageur de la tomate appartenant à la famille des Tetranychidae et dont la position taxonomique est indiquée dans le tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1: Position taxonomique de *T. evansi*

Phylum	Arthropoda
Classe	Arachnida
Sous-classe	Acari
Ordre	Thrombidiforma
Super-famille	Tetranychoida
Famille	Tetranychidae
Sous-famille	Tetranychinae
Tribu	Tetranychini
Genre	<i>Tetranychus</i>
Espèce	<i>evansi</i>



Figure 1: Femelle de *Tetranychus evansi* (Photo: G. Azandémè-Hounmalon)

1.1. Origine et distribution

L'acarien rouge de la tomate, *T. evansi*, est devenu depuis une trentaine d'années un redoutable ravageur pour les cultures de solanacées dans de nombreuses régions du monde surtout dans le bassin méditerranéen, en Afrique comme en Europe. Depuis son premier signalement au Nord-Est du Brésil en 1952 (Silva, 1954), cet acarien d'origine tropicale n'a cessé d'étendre son aire de répartition à d'autres régions tropicales, sub-tropicales et tempérées. Il a actuellement une vaste répartition géographique englobant tous les continents (Migeon & Dorkeld, 2006, 2015) (Figure 2).

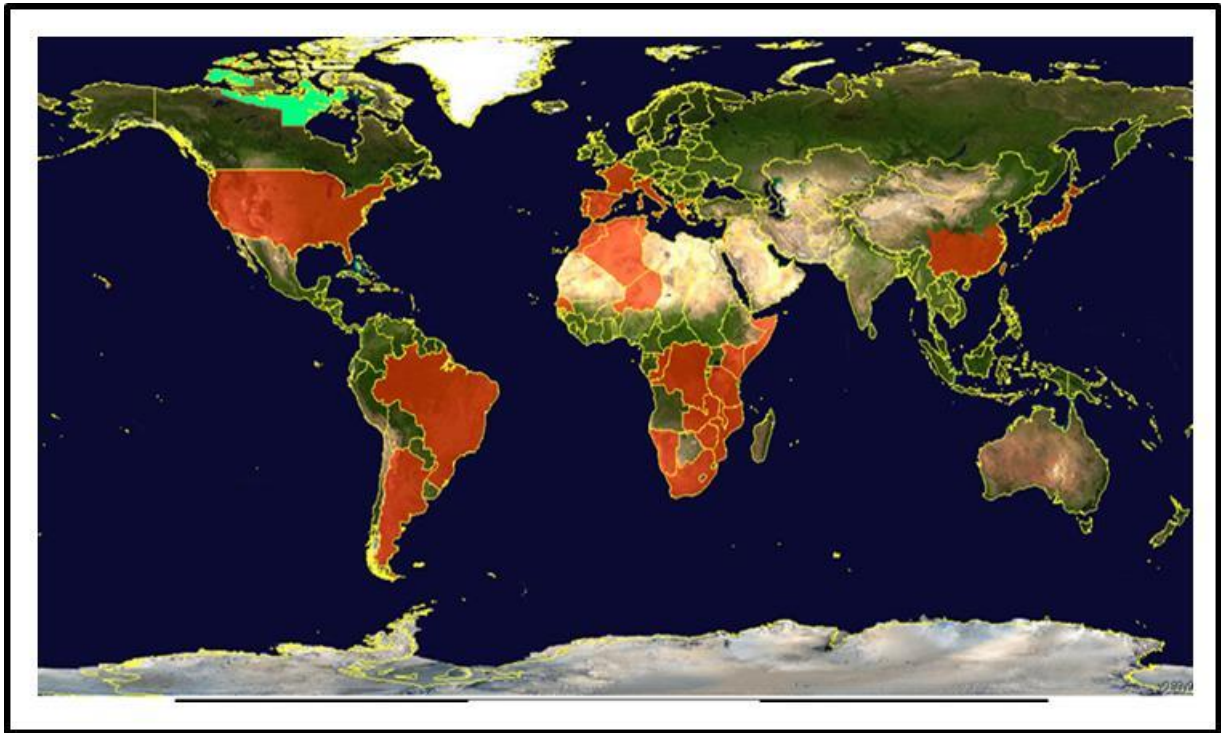


Figure 2: Distribution mondiale de *Tetranychus evansi* (Migeon & Dorkeld, 2006, 2015)

1.2. Traits d'histoire de vie

Compte tenu de l'importance de *T. evansi* pour les solanacées, les paramètres biologiques et démographiques ont été amplement étudiés (Silva, 1954; Moutia, 1958; Qureshi *et al.*, 1969; Moraes & McMurtry, 1987; Bonato, 1999). *Tetranychus evansi* se développe dans une large

gamme de températures comprise entre 10 °C et 38 °C avec un optimum à 34 °C et son taux intrinsèque d'accroissement potentiel (r_m) varie de 0,179 à 0,398 femelle/femelle/jour à 21 °C et 34 °C respectivement. La durée totale de développement de l'œuf à l'adulte (Figure 3) varie en fonction des conditions environnementales (température, humidité et plante hôte) allant d'environ 13,6 jours à 22 °C à 6 jours à 36 °C sur la tomate avec 75±10 % d'humidité relative (Bonato, 1999). Sur la morelle blanche, *Solanum douglasii* (Dunal), *T. evansi* passe du stade œuf au stade adulte en 13 jours à 25 °C et en 6,5 jours à 35 °C pour une humidité relative (HR) variant de 30 à 60 % (Moraes & McMurtry, 1987). La durée moyenne d'une génération est de 22 jours à 21 °C, de 17 jours à 26 °C et de 12 jours à 31 °C, (Bonato, 1999). Oatman *et al.* (1967) ont montré que le temps d'une génération était de 8 jours sur la pomme de terre *S. tuberosum* (Linné) à 28 °C et 50 % HR. La fécondité de cet acarien est relativement élevée puisqu'à 26 °C, une femelle pond en moyenne 111 œufs sur une période de deux semaines pour atteindre 123 œufs sur une période de 10 jours à 31 °C (Bonato, 1999).

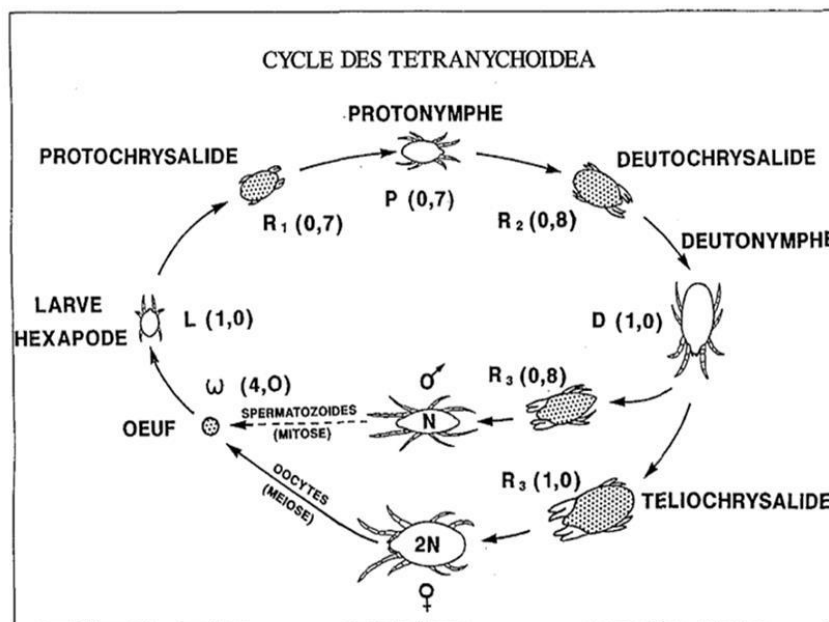


Figure 3: Cycle de développement des Tetranychidae. Les chiffres entre parenthèses indiquent la durée en jours de ces stades chez *Tetranychus urticae* élevé à une température de 25 °C et à une hygrométrie de 50 % (Gutierrez, 1993)

1.3. Plantes hôtes et dégâts

Tetranychus evansi est une espèce oligophage. Bien qu'ayant été signalé sur 94 plantes appartenant à 30 familles botaniques différentes (Migeon & Dorkeld, 2006, 2015), les solanacées sont des hôtes préférentiels pour cet acarien. Cette espèce a toujours été signalée comme un ravageur très nuisible pour les solanacées cultivées, notamment celles à feuilles pileuses telles que la tomate, la pomme de terre, l'aubergine et le tabac et moins sur les plantes à feuilles lisses comme le poivron. La morelle noire *S. nigrum* (Linné), le datura *Datura stramonium* (Linné), et d'autres solanacées sauvages et adventices constituent des hôtes réservoirs et des sources de contamination pour les solanacées cultivées. Outre les cultures de solanacées, des observations récentes ont rapporté la présence de cette espèce sur d'autres plantes cultivées comme le haricot *Phaseolus vulgaris* (Linné) au Kenya (Knapp, com. pers.) et à la Réunion (Caplong, com. pers.), ou la pastèque *Citrullus lanatus* (Thunb) en Espagne (Ferragut, com. pers.). Le spectre le plus diversifié de plantes hôtes a été observé dans le bassin méditerranéen (Figure 4) et particulièrement en Espagne (Ferragut & Escudero, 1999; Migeon & Dorkeld, 2006, 2015). En France, *T. evansi* a uniquement été observé sur les solanacées comme *S. chenopodioides* (Lamarck), *S. aethiopicum* (Linné), *S. quitoense* (Lamarck), *S. nigrum*, *S. americanum* et *S. lycopersicum* (Migeon, 2007; Toroitich *et al.*, 2008; Boubou *et al.*, 2010; Guanilo *et al.*, 2010; Ferreira & Souza, 2011; Zriki *et al.*, 2014). C'est en Afrique de l'Est et de l'Ouest que les problèmes dus à *T. evansi* sont les plus aigus, avec des pertes de rendement qui peuvent atteindre 90 % sur tomate au Zimbabwe (Saunyama & Knapp, 2003).



Figure 4: Dégâts de *Tetranychus evansi* sur la tomate (Photos: G. Azandémè-Hounmalon; A. Migeon)

Tetranychus evansi peut non seulement s'alimenter sur les feuilles mais aussi sur les fleurs et les fruits, réduisant ainsi leur valeur esthétique (Ferragut & Escudero, 1999). Mais, les dégâts causés par *T. evansi* sont essentiellement sur les feuilles et les fruits (Figure 4). Les premières attaques passent souvent inaperçues, car matérialisées uniquement par quelques taches blanches, provoquées par des piqûres nutritionnelles qui détruisent les cellules du parenchyme foliaire. Lors d'attaques sévères, ces piqûres provoquent l'asphyxie puis la chute des feuilles et consécutivement une réduction de la productivité (Flechtmann & Knihinicki, 2002).

1.4. Méthodes de lutte contre *Tetranychus evansi*

1.4.1. Lutte chimique

La lutte chimique par pulvérisation d'acaricide de synthèse (Figure 5) est la méthode de lutte la plus utilisée aujourd'hui pour le contrôle de *T. evansi* (Herron *et al.*, 2004). Récemment, certains acaricides spécifiques tels que l'abamectine et la propargite se sont révélés efficaces pour le contrôle de *T. evansi* en Afrique de l'Est et plus précisément au Kenya (Toroitich, 2006) et d'autres en Europe comme le bifénazate, le cyenopyrafène, le milbemectine, le spirodiclofène et le tébufenpyrad (Gotoh *et al.*, 2010). Les molécules utilisées se sont cependant révélées dans certains cas peu efficaces car les tétranyques développent rapidement des résistances (Cranham & Helle, 1985; Blair, 1989; Tsagkarakou *et al.*, 2002; van Leuween *et al.*, 2008; Nyoni *et al.*, 2011). En effet, Blair (1989) a testé 62 formulations acaricides en laboratoire contre *T. evansi* sur le tabac et a montré que cette espèce pouvait développer des résistances aux organophosphorés en général et au diméthoate en particulier. D'autres formulations acaricides tels que la biféthrine, la lambda-cyhalothrine, le diméthoate et le profénofos+cyperméthrine ont également été testées en laboratoire de l'ICIPE contre *T. evansi*; seuls la biféthrine et le profénofos+cyperméthrine se sont révélés efficaces pour contrôler *T. evansi* (Toroitich, 2006). Des cas de résistance aux organophosphorés (chlorpyrifos-éthyl) ont été rapportés sur *T. evansi* au Zimbabwe, au Malawi et au sud de la France (Blair, 1989 ; Nyoni *et al.*, 2011; Carvalho *et al.*, 2012). Aujourd'hui, suite aux problèmes de faible efficacité et de résistance, les usages s'orientent vers des mélanges de ces molécules avec des insecticides (Khajehali *et al.*, 2009), une solution temporaire qui ne fait que ralentir le développement inexorable des résistances. La lutte chimique ne reste qu'une solution à court terme pour lutter contre les tétranyques tisserands. Une autre forme de lutte

chimique est basée sur l'utilisation des filets imprégnés d'acaricide (Figure 6). Ils ont permis de contrôler efficacement et rapidement des infestations d'acariens phytophages comme *P. latus* et *T. urticae* dans les cultures de *S. macrocarpum* ou gboma (Martin *et al.*, 2010).



Figure 5: Application de pesticide (Photo: C. Atcha)

Le filet acaricide fonctionne comme un piège pour ces acariens phytophages qui vivent au sommet des plants comme *P. latus* ou migrent périodiquement au sommet des plantes comme *T. urticae* (Pralavorio *et al.*, 1989; Clotuche *et al.*, 2011). L'intérêt principal de cette technique est d'être efficace rapidement pour traiter un spot d'infestation, tout en évitant la présence de résidus d'acaricide sur la plante et la contamination de l'environnement. Cette technique est réutilisable un grand nombre de fois sans ré-imprégnation mais elle ne permet pas de protéger les grandes surfaces. Une autre technique, basée sur des fils imprégnés d'acaricide a également été testée pour la protection des roses cultivées sous serres contre *T. urticae* mais sans grand succès (Delétré *et al.*, 2014).



Figure 6: Filet imprégné d'acaricide pour la protection du gboma (Photo: T. Martin)

1.4.2. Techniques culturales

Plusieurs techniques culturales de contrôle comme la rotation des cultures, l'assainissement des terrains, l'élagage et le palissage, le déracinement et le brûlage des vieilles feuilles ont été utilisées pour la gestion des tétranyques. Ces techniques visent à perturber le cycle de vie et à réduire les populations d'acariens déjà présents sur le terrain (Tindal, 1983). Par exemple, la taille et le palissage des plants de tomate associés avec des acaricides auraient eu un effet positif sur les rendements et la qualité des fruits de tomate ainsi que sur la rentabilité de la production de tomates au Zimbabwe (Saunyama & Knapp, 2003). L'irrigation par aspersion peut également freiner le développement des populations d'acariens dans les champs. C'est le cas des jets d'eau programmés sous forme de brouillard. De plus, une humidité relative élevée réduirait la durée de vie des femelles qui pondraient des œufs à un rythme beaucoup plus lent (Tulisalo, 1974). D'ailleurs les pullulations de *T. evansi* sur les solanacées au Bénin s'observent généralement pendant la saison sèche (Martin *et al.*, 2010).

1.4.3. Les variétés résistantes

Le progrès le plus important visant à faciliter les stratégies de lutte IPM a été la production de cultivars résistants aux ravageurs (Panda & Khush, 1995; Maluf *et al.*, 2007). Des plantes sauvages appartenant au genre *Lycopersicon* telles que *L. pennellii* (Correll) et *L. esculentum*

(Miller) ont été signalées comme résistantes aux ravageurs de la tomate dont les tétranyques (Gentile *et al.*, 1969). Rasmy (1985) a signalé que deux espèces de solanacées à savoir *L. hirsutum* (Miller) et *S. sarrachoides* (Sendtn) étaient résistantes à *T. urticae*. Murungi, *et al.* (2009) et Wosula *et al.* (2009) ont observé le comportement alimentaire de *T. evansi* sur plusieurs plantes du genre *Lycopersicon*. Ils ont montré que les types sauvages possédaient un caractère résistant qui pourrait être utilisé en sélection pour la résistance contre cette espèce d'acariens. Le mécanisme de résistance serait lié à plusieurs caractéristiques telles que la présence des trichomes qui sont connus pour conférer une résistance, soit par piégeage (Duffey, 1986), soit par sécrétion de composés toxiques (Patterson *et al.*, 1975; Goffreda *et al.*, 1989; Chatzivasileiadis & Sabelis, 1997). Une particularité des solanacées, et plus spécifiquement des plantes du genre *Lycopersicon*, est de sécréter des substances répulsives ou toxiques pour la plupart des ravageurs, mais également pour les prédateurs (Kennedy, 2003). C'est la raison pour laquelle des travaux sont conduits depuis plusieurs années pour développer des variétés de tomates résistantes aux tétranyques. Resende *et al.* (2002, 2008) ont montré le pouvoir répulsif des acyl-glycérols vis-à-vis de *T. evansi*. Plusieurs travaux ont également révélé que l'excrétion de la zingibérène (sesquiterpène) par certains types de trichomes glandulaires de plants de tomates sélectionnés ont un effet répulsif sur *T. evansi* (Maluf *et al.*, 2007; Gonçalves *et al.*, 2006). Les espèces sauvages cultivées ou les répulsifs peuvent donc être utilisés pour la gestion des tétranyques dans une stratégie de lutte intégrée.

1.4.4. La lutte biologique

Les ennemis naturels tels que les acariens prédateurs, les insectes prédateurs et les entomopathogènes sont très utiles pour la régulation des populations d'acariens (Helle & Sabelis, 1985; Smith-Meyer, 1996).

1.4.4.1. Les champignons entomopathogènes

Les champignons entomopathogènes sont également connus pour provoquer une épizootie chez des populations d'acariens (van der Geest *et al.*, 2000). *Neozygites floridana* est un agent pathogène des tétranyques qui a été observé sur plusieurs espèces d'acariens présents sur diverses cultures. Il a été signalé sur *T. evansi* sur la tomate au Brésil (Humber *et al.*, 1981), sur *T. ludeni* (Zacher) sur les haricots en Inde (Rameseshiah, 1971), sur

Oligonychus hondoens (Ehara) sur cèdre au Japon (Nemoto & Aoki, 1975), sur *T. urticae* dans les champs de maïs en Caroline du Nord, aux USA (Brandebourg & Kennedy, 1982), et sur l'acarien vert du manioc, *Mononychellus tanajoa* (Bondar), au Venezuela (Agudella-Silva, 1986) et au Brésil (Delalibera *et al.*, 1992). D'autres champignons pathogènes comme *M. anisopliae* et *B. bassiana* ont été également montrés comme efficaces pour contrôler *T. evansi* et *T. urticae* sur tomate au Kenya (Wekesa *et al.*, 2005). Des études plus récentes conduites par Wekesa *et al.* (2007) au Brésil ont révélé que *N. floridana* était compatible avec l'acarien prédateur *P. longipes*. Par ailleurs, Maniania & Kungu (2011) ont testé différents traitements pour le contrôle de *T. evansi* en plein champ. Les résultats ont montré l'efficacité de l'abamectine, de *M. anisopliae* seul et de la combinaison de *M. anisopliae* et de *P. longipes* réduisant significativement la densité de la population, le nombre d'œufs pondus et les dégâts de *T. evansi* (Figure 7). Ils ont également montré, la compatibilité de *M. anisopliae* avec *P. longipes* qui pourrait être utilisée conjointement dans les programmes de lutte biologique combinés ou non avec d'autres méthodes pour le contrôle de *T. evansi* en Afrique. L'utilisation de ces entomopathogènes est très prometteuse pour une bonne gestion des tétranyques en culture protégée de tomate.

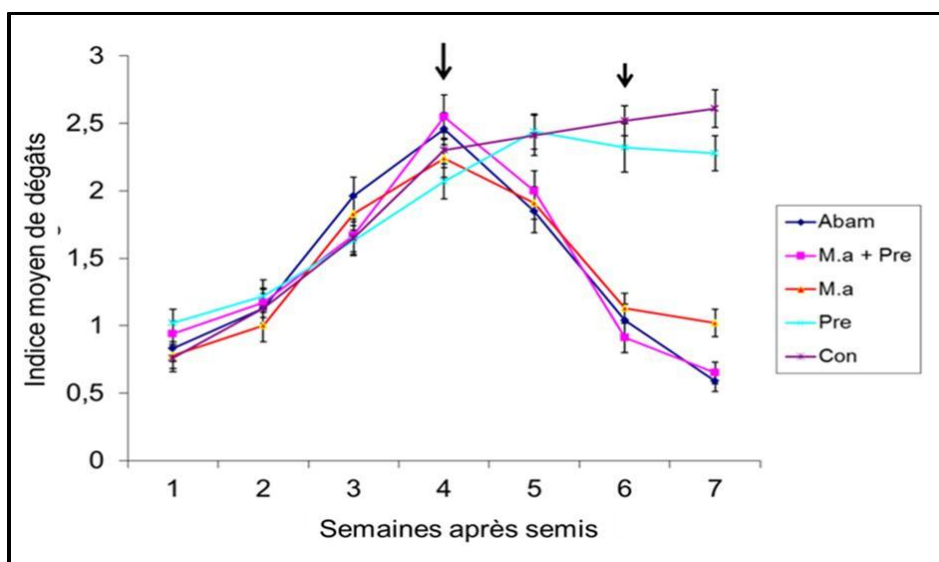


Figure 7: Evolution des dégâts de *T. evansi* après application des différents traitements (Abam: Abamectine; Ma + Pre: *M. anisopliae* + Prédateur; Ma: *M. anisopliae*; Pre: Prédateur; Con: Contrôle (Maniania & Kungu, 2011))

1.4.4.2. Les insectes prédateurs

L'efficacité de nombreux insectes prédateurs appartenant notamment à la famille des Coccinellidae a été étudiée vis-à-vis des acariens ravageurs (Biddinger *et al.*, 2009). Plusieurs études conduites récemment ont montré l'efficacité de *Stethorus tridens* (Gordon) pour contrôler les pullulations de *T. evansi* (Chazeau, 1985; Rott & Ponsonby, 2000; Ullah, 2000; Fiaboe *et al.*, 2007a; Britto *et al.*, 2009) mais les travaux réalisés en laboratoire et sur plante glabre *S. americanum* ne permettent pas de conclure totalement sur l'efficacité réelle de ce prédateur.

1.4.4.3. Les acariens prédateurs

Les acariens prédateurs, et plus précisément ceux de la famille des Phytoseiidae sont généralement les plus efficaces dans la lutte biologique contre les tétranyques (Moraes *et al.*, 2004). *Phytoseiulus persimilis*, l'espèce de Phytoseiidae la plus commercialisée au monde pour la protection de nombreuses cultures, s'est montrée particulièrement efficace pour le contrôle de *T. urticae* (Gerson *et al.*, 2003). En culture de tomate toutefois, *P. persimilis* est, comme les autres prédateurs, gêné par les molécules libérées par les trichomes glandulaires et son efficacité sur cette culture n'est pas satisfaisante (Kennedy, 2003). Les tentatives pour contrôler *T. evansi* avec *P. persimilis* en Zambie et au Zimbabwe ont toutes échoué (Jensen & Mingoichi, 1988; Sibanda, 1995). Les travaux antérieurs conduits par Moraes & McMurtry (1986) avaient montré que les œufs de *T. evansi* contenaient un dépresseur, ce qui fait que les acariens prédateurs consommaient rarement ou très lentement un œuf entier. Plus récemment, Escudero & Ferragut (2005) ont testé la performance de *T. evansi* en tant que proie pour *P. persimilis* et *C. californicus* en Espagne. Ils ont constaté qu'aucun des prédateurs testés ne pouvaient se nourrir et se développer correctement sur *T. evansi*. Avec les dégâts importants causés en Afrique (Saunyama & Knapp, 2003) et l'invasion de ce ravageur dans la zone méditerranéenne (Migeon *et al.*, 2009), de nouvelles recherches ont été entreprises dans les années 2000. Des prospections au Brésil et en Argentine (dans la zone supposée d'origine de *T. evansi*) ont été menées afin de découvrir un prédateur naturel (Rosa *et al.*, 2005; Fiaboe *et al.*, 2006, 2007b; Furtado *et al.*, 2006, 2007a). Ces recherches intensives ont abouti à la découverte de l'espèce prédatrice *P. longipes* (Figure 8). C'est un acarien prédateur de la famille des Phytoseiidae dont la position taxonomique est décrite dans le tableau 2. Il a été

observé dans des colonies de *T. evansi* sur *L. esculentum*, *Salpichroa organifolia* (Lamarck) et *S. americanum*. Compte tenu de l'efficacité de *P. longipes* pour réduire une population de *T. evansi*, il a été importé au Kenya en 2006 pour des lâchers inondatifs sur le terrain réalisés en 2007 (Fiaboe *et al.*, 2006; Wekesa *et al.*, 2007) mais les temps de suivi planifiés dans le projet n'ont pas été suffisamment longs pour s'assurer de son réel établissement.

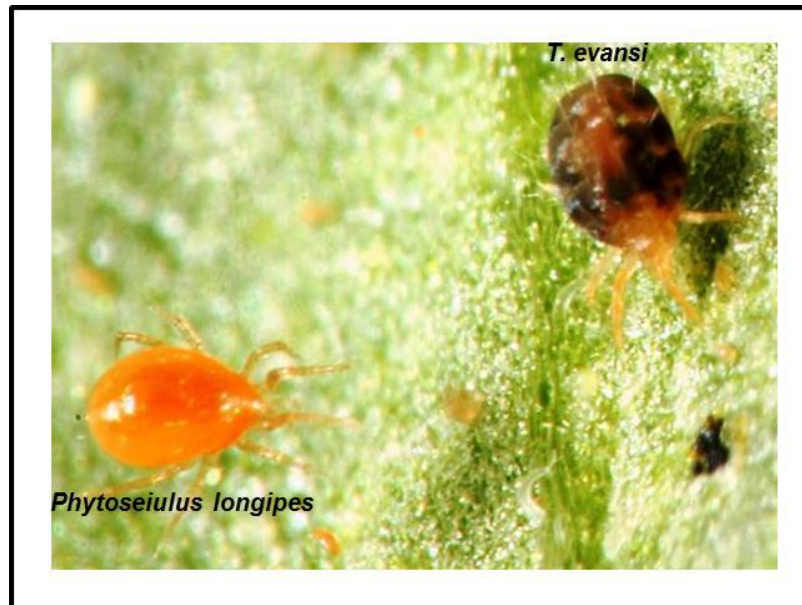


Figure 8: *P. longipes* et sa proie *T. evansi* (Photo: G. Azandémè-Hounmalon)

Tableau 2 : Position taxonomique de *Phytoseiulus longipes*

Phylum	Arthropoda
Classe	Arachnida
Sous-classe	Acari
Super ordre	Anactinotrichida
Ordre	Mesostigmata
Super-Famille	Phytoseioidea
Famille	Phytoseiidae
Sous-famille	Amblyseiinae
Tribu	Phytoseiulini
Genre	<i>Phytoseiulus</i>
Espèce	<i>longipes</i>

2. Conclusion

Les éléments de bibliographie présentés dans cette première partie ont montré le caractère invasif et prolifique de *T. evansi*, en particulier dans les cultures de solanacées. La lutte chimique n'est pas durable, d'une part car elle pourrait à terme sélectionner des populations résistantes de *T. evansi* mais aussi, d'autre part, pour son impact sur la santé humaine et l'environnement. Par ailleurs, les acaricides sont au moins aussi toxiques sur les acariens phytophages que sur les acariens prédateurs et généralement plus. La lutte chimique ne peut donc être une solution qu'à court terme encore faut-il qu'elle soit réalisée avec des molécules efficaces et peu nocives pour la santé humaine, utilisée de façon raisonnée et ponctuelle en cas de pullulation. Les méthodes de lutte les plus prometteuses semblent être le recours aux ennemis naturels tels que les acariens prédateurs *P. longipes* et l'entomopathogène *M. anisopliae*. Ces ennemis naturels, utilisés en traitements préventifs ou curatifs sur des spots d'infestation, pourraient aider à établir un équilibre entre ce ravageur et ses ennemis naturels. Mais encore faut-il qu'ils soient présents ou disponibles.

Une enquête socio-économique conduite au sud du Bénin a permis de faire un état des lieux de la présence de *T. evansi*, de l'ampleur des dégâts causés et des méthodes utilisées pour son contrôle. La connaissance du mode de migration et de dispersion de *T. evansi* sur un plant de tomate comparativement au comportement de *T. urticae*, espèce qui est historiquement en Afrique sub-Saharienne un des ravageurs majeur de la tomate, est un préalable indispensable à la mise au point d'une méthode de lutte adaptée à ce ravageur invasif. Par ailleurs la connaissance des interactions entre *T. evansi* et son prédateur *P. longipes* apportera un plus pour optimiser la régulation des infestations. L'efficacité de *M. anisopliae* pour réduire une population de *T. evansi* devra être confirmée, ainsi que sa compatibilité avec le prédateur *P. longipes*. Ces connaissances devraient permettre de concevoir une technique de lutte prenant en compte le comportement de *T. evansi*. Enfin, la connaissance de l'impact des infestations de *T. evansi* sur les cultures de solanacées au Bénin et l'identification des pratiques des producteurs devraient permettre de proposer une stratégie de protection intégrée adaptée et efficace à plus ou moins long terme.

**Impact de *T. evansi*
sur les solanacées au Bénin**

CHAPITRE 2

IMPACT DE *TETRANYCHUS EVANSI* SUR LES SOLANACEES AU SUD BENIN ET PRATIQUES PHYTOSANITAIRES DES MARAICHERS

Ginette Y. AZANDEME-HOUNMALON, Hippolyte D. AFFOIGNON, Françoise ASSOGBA KOMLAN, Manuele TAMÒ, Komi K.M. FIABOE, Serge KREITER and Thibaud MARTIN. Farmer's practices to fight against the invasive red spider mite Tetranychus evansi Baker & Pritchard in Southern Benin. Crop Protection (sous presse)

1. Introduction

Au Bénin, le maraîchage est en pleine croissance du fait de la demande urbaine. Cette activité contribue à améliorer les conditions de vie des producteurs car c'est une source importante de revenus (Amoussougbo, 1993). Les cultures maraîchères sont produites dans toutes les régions du Bénin mais surtout au Sud (Adorgloh-Hessou, 2006). Les légumes feuilles comme l'amarante ou 'fotètè' *Amaranthus cruentus* (Linné) et la morelle *S. macrocarpon* ou 'gboma', sont les plus consommés au Bénin devant la tomate *S. lycopersicum* et les autres légumes exotiques (Assogba-Komlan *et al.*, 2007). Cependant, ces cultures et en particulier les tomates sont fréquemment attaquées par des ravageurs comme la noctuelle de la tomate, *Helicoverpa armigera* (Hubner), et l'aleurode *B. tabaci* et de nombreux agents pathogènes comme le Tomato Yellow Leaf Curl Virus transmis par l'aleurode (Schippers, 2004). Jusqu'à très récemment, les principaux acariens phytophages signalés sur ces cultures étaient *T. urticae*, *T. ludeni* et *P. latus* (Adango *et al.*, 2007, Martin *et al.*, 2010). En 2008, des pullulations de *T. evansi* ont été observées sur tomate et aubergine au Bénin sur le périmètre de Sèmè-Kpodji (Martin, com. pers.). Par la suite, des pullulations de plus en plus fréquentes de cet acarien, ont été observées comme étant la cause des dégâts sévères sur la tomate et le 'gboma', en particulier pendant la saison sèche (Martin *et al.*, 2010).

L'objectif de cette enquête a été d'évaluer l'impact de ce nouveau ravageur sur la production des cultures maraîchères, de caractériser les pratiques phytosanitaires des maraîchers pour son contrôle et enfin de proposer des solutions alternatives pour un meilleur contrôle de ce ravageur.

2. Méthode

L'étude a été conduite au sud du Bénin en janvier 2013 sur les trois principaux sites maraîchers: Sèmè-Kpodji, Pahou et Grand-Popo (Figure 9). La commune de Sèmè-Kpodji est située dans le département de l'Ouémé et couvre une superficie de 250 km². La commune de Grand-Popo est située au sud-ouest du département du Mono couvrant une superficie de 289 km². Elle s'étend sur une longueur de 20 km le long de la ligne côtière entre Grand-Popo et Hilacondji. L'arrondissement de Pahou est situé au Sud du Bénin entre la ville de Cotonou et la ville de Ouidah. La région du Sud-Bénin bénéficie d'un climat bimodal à deux saisons des pluies et à deux saisons sèches. Les valeurs maximales des températures dans la zone d'étude varient entre 28 et 33 °C. L'humidité relative mensuelle varie entre 75 et 90 %. Les trois zones enquêtées ont été retenues sur la base du niveau de production en légumes et les recherches documentaires sur les systèmes maraîchers au Sud-Bénin (Assogba-Komlan *et al.*, 2001, 2007; PADAP, 2003). L'enquête a été effectuée auprès de 150 producteurs (une cinquantaine par zone), sélectionnés de façon aléatoire sur les différents sites et qui cultivent prioritairement la tomate, le gboma et l'amaranthe. Après avoir obtenu des informations sur la situation sociale des producteurs, ils ont été interrogés sur la production de ces trois cultures au cours de l'année 2012 à l'aide d'un questionnaire semi-structuré (Annexe). L'enquête a surtout été ciblée sur la connaissance de *T. evansi* par les maraîchers, ses dégâts dans les cultures, les stratégies de lutte et les différents produits utilisés pour son contrôle. Un total de 45 échantillons d'acariens (Figure 10) a été également prélevé sur ces trois cultures et conservés dans de l'alcool à 70 %. L'identification des espèces présentes a été effectuée à Montpellier en collaboration avec Philippe Auger de l'UMR CBGP.

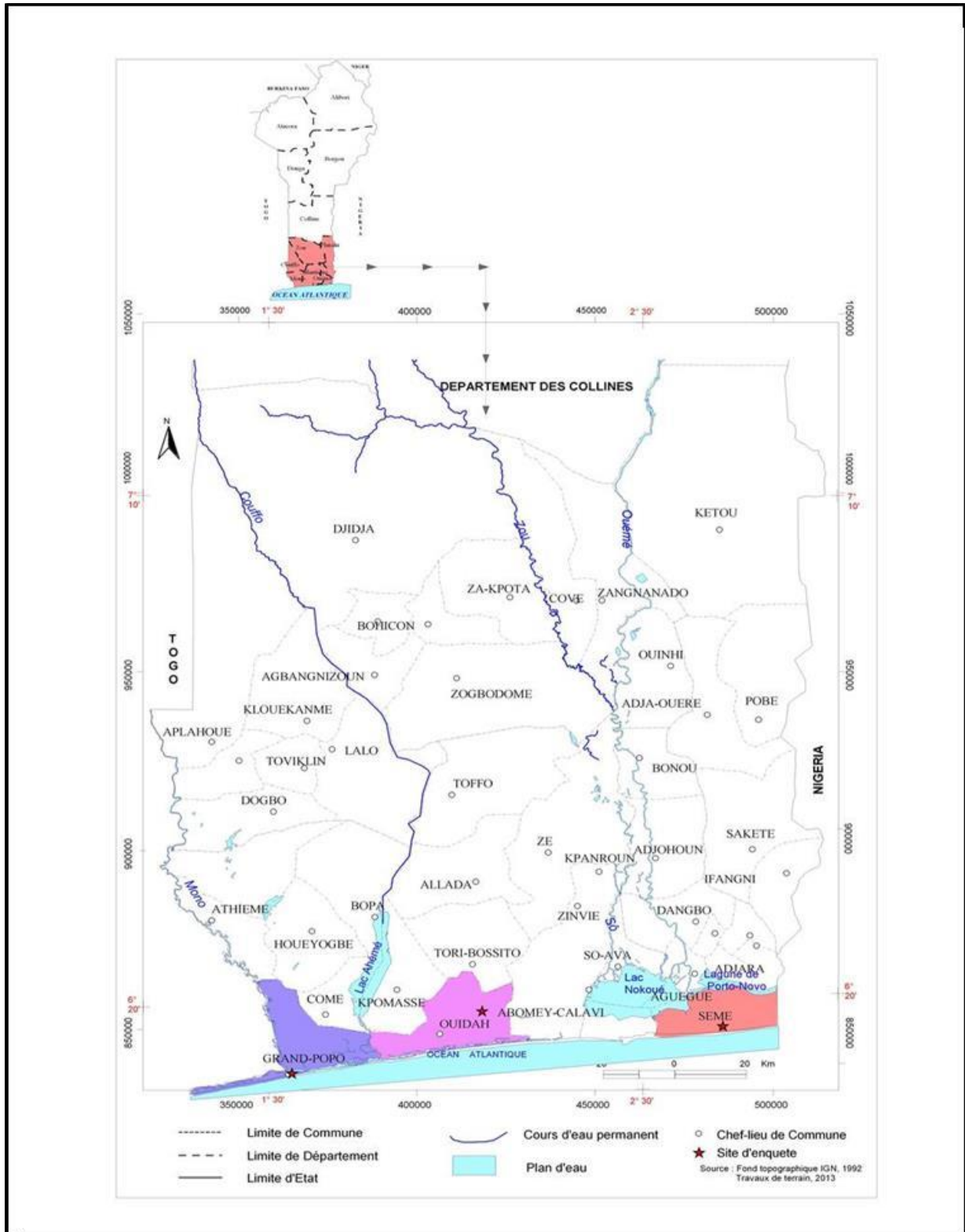


Figure 9: Localisation et distribution des périmètres maraîchers



Figure 10: Echantillonnage d'acariens

Les résultats de ces travaux figurent dans l'article A1 suivant:

3. ARTICLE A1

ARTICLE A1: Sous presse dans Crop Protection

Farmers' control practices against the invasive red spider mite, *Tetranychus evansi* Baker & Pritchard in Benin

Ginette Y. AZANDÉMÈ-HOUNMALON^{1,2}, Hippolyte D. AFFOIGNON², Françoise ASSOGBA KOMLAN³, Manuele TAMÒ⁴, Komi K. M. FIABOË², Serge KREITER⁵ and Thibaud MARTIN^{1,2*}

¹ Cirad UPR Hortsys, Avenue Agropolis, 34398 Montpellier, France

² International Centre of Insect Physiology and Ecology (icipe), P.O. Box 30772 – 00100 Nairobi, Kenya

³ Institut National de Recherche Agronomique du Bénin (INRAB), Cotonou, Bénin

⁴ International Institut of Tropical Agriculture (IITA) BP 08-0932, Cotonou, Bénin

⁵ SupAgro, UMR CBGP, Montpellier, France

* Corresponding author: thibaud.martin@cirad.fr; Tel: +254 208 632 256 ; icipe PO Box 30772-00100 Nairobi, Kenya

Abstract

In 2008, the invasive tomato red spider mite *Tetranychus evansi* (Acari: Tetranychidae), a pest of solanaceous crops, was identified for the first time as the cause of serious damage on tomato (*Solanum lycopersicum* L.; Solanaceae) crops in Benin. Since then, frequent outbreaks have been observed on Solanaceae and other leafy vegetables such as purple amaranth (*Amaranthus cruentus* L.; Amaranthaceae) and bitter leaf (*Vernonia amygdalina* D.; Asteraceae) in all growing areas in southern Benin. The objective of this study was to evaluate the intensity of damage by this invasive pest and the impact of farmers' control practices on purple amaranth, African eggplant (*Solanum macrocarpon* L.; Solanaceae) and tomato crops. A survey was carried out in January 2013 among 150 farmers in the three major growing areas in southern Benin: Sèmè-Kpodji, Grand-Popo and Pahou. *Tetranychus evansi* was the only mite observed, causing production losses estimated at 65% for African eggplant, 56% for tomato and 25% for purple amaranth. Previously encountered species such as *T. urticae* Koch, *T. ludeni* Zacher (Acari: Tetranychidae) and *Polyphagotarsonemus latus* Banks (Acari: Tarsonemidae) were not observed in any of the 45 samples. To protect the infested

crops, growers sprayed various synthetic pesticides at high frequencies according to crop phenology 3, 6 and 12 times per month, respectively, on purple amaranth, African eggplant and on tomato, on average. The most frequently used pesticides were pyrethroids and organophosphate compounds. Farmers reported that these compounds were largely ineffective against *T. evansi*. The risks posed to human and environmental healths, as well as existing alternatives to chemical pesticide use, are discussed.

Keys words: Tomato, African eggplant, purple amaranth, smallholder grower, IPM, chemical pesticide

1. Introduction

In Benin, vegetable production is increasing due to demand and consumption of vegetables by urban populations. Vegetable production helps to improve the living conditions of producers because it is an important source of income (Sounkoura et al., 2011). Vegetable crops are produced in all regions of Benin but especially in the South (Adorgloh-Hessou, 2006). Tomato is one of the most important vegetable crops produced in Benin, both in terms of area (27,800 ha) and production volume (154,600 tonnes) in 2010 (FAO, 2012). It is the vegetable most consumed and used daily as an ingredient in food (Naika et al., 2005).

The two indigenous leafy vegetables, purple amaranth and African eggplant or “gboma” in the local language, are also the most cultivated and the most consumed in Benin (Assogba-Komlan et al., 2007). However, these vegetable crops, and particularly tomato, are often attacked by many pests and pathogens (Schipper, 2004). Until recently, the main phytophagous mites reported on these crops were *Tetranychus urticae* Koch, *T. ludeni* Zacher and the broad mite *Polyphagotarsonemus latus* Banks (Adango et al., 2007; Martin et al., 2010). However, in 2008, outbreaks of *T. evansi* were observed on tomato and eggplant in the vegetable growing area of Sèmè-Podji (Martin, personal communication). Since then, frequent outbreaks have been observed during the dry season in all growing areas of southern Benin causing severe damage to tomato and African eggplant crops. *Tetranychus evansi* is an important invasive pest species of solanaceous plants in East Africa (Knapp et al., 2003), in Europe (Tsagkarakou et al., 2007) as well as in Asia (Gotoh et al., 2009). It originated from South America (Moutia, 1958) and was first reported in continental Africa in 1979 on tobacco in Zimbabwe (Blair, 1983) from where it spread to other parts of the continent. It has been

reported as more prolific pest on tomato compared to *T. urticae*. This species is characterized by a high reproductive capacity and a gregarious behavior compared to *T. urticae* (Azandémè-Hounmalon et al., 2014). Besides its invasive nature, recent reports have indicated that *T. evansi* has replaced native spider mite species, hence presenting new pest management challenges (Ferragut et al., 2013).

The objective of this study was to evaluate the impact of this new pest on the production of the African eggplant, purple amaranth and tomato. We also investigated farmer practices to control *T. evansi* outbreaks.

2. Materials and methods

2.1. Survey design and data description

The study was conducted in southern Benin in January 2013 in three coastal vegetable growing areas (Assogba-Komlan et al., 2001, 2007; PADAP/MAEP, 2003): Sèmè-Kpodji, Pahou and Grand-Popo. Sèmè-Kpodji is located in the department of Ouémé and covers an area of 250 km². The city of Grand-Popo is located in the southwest of the department of Mono covering an area of 289 km², extending over 20 km along the shoreline towards the Togo border. Pahou is located in the district of Ouidah, one of Benin city. Southern Benin is subject to a bimodal climate pattern with two rainy and two dry seasons, with maximum temperatures ranging between 30 and 39 °C, and minimum around 23 °C (Simon et al., 2014). The monthly relative humidity ranges from a minimum of 44 to 76% to a maximum of 99%. The survey was conducted among 150 subjects. The choice of farmers was mainly based on the production of tomato, African eggplant and purple amaranth. A total of 21 questions were asked and the interviews took on average 30 min per farmer. After obtaining information on the social situation, each farmer was asked about the production of the three crops and the main pests causing damage on them. They were also asked the local name of *T. evansi*, how they distinguish it from other pest, its damage on crop production, the first time they observed *T. evansi*'s damage in the field, the main crops affected, the main season in which damages are abundant and the control practices of farmers. Other questions about the severity and evolution of damage were also asked. Farmers were asked also to classify the level of damage using the leaf mean damage index (LMD) classification of Hussey and Scopes (1985), ranking on a scale from 0 (no damage) to 5 (the leaf begins to shrivel). In the mite

sampling, we targeted both prey and predators which were collected in each vegetable growing area presenting mite damage. Three leaves of each crop were randomly selected per bed and removed from the plant. Mites were brushed directly in polypropylene plastic tubes containing 70 % alcohol using a fine brush. A total of 45 samples were collected from various host crops in the three areas. Mites were thereafter identified at UMR CBGP (Centre Biologique de Gestion des populations) in Montpellier, France with assistance of Philippe Auger.

2.2. Data treatment and analysis of the results

Analysis of variance followed by Bonferroni test was used to discriminate the crops according to the losses in production estimated by the farmers. Analysis of variance was done using STATA version 12 (StataCorp, 2011) to compare means at 5% level.

3. Results

3.1. Socio-economic characteristics of farmers

Horticultural production was the main activity for the majority of farmers (99%) in all three areas. On average farmers were older than 37 years: the youngest was 18 years and the oldest was 71 years. (Table 1). Horticultural production was more a male activity (84%) than a female one (16%); only 10% were old farmers (> 65) and retired people. Youthful farmers interviewed (17%) were mostly secondary school students and casual laborers. The majority of farmers (84%) had at least primary education. Among them, 48% had a secondary school level of education (9–13 years of study), 33% had a primary school level of education (1–6 years of study), only 3% had reached the university level (14 to 17 years of study) and 16% of farmers had not received any formal education (Table 2).

3.2. Vegetable production

Tomato, African eggplant and purple amaranth were most commonly grown leafy vegetables in the targeted zones. These crops were produced, respectively, by 95%, 100% and 94% of farmers surveyed. Considering all growers surveyed, the mean area cultivated per farmer was, respectively, 4128, 724 and 406 m² for tomato, African eggplant and purple amaranth.

3.3. Mite species

Practically all the mites in our samples were identified as *T. evansi*, with only one individual collected on purple amaranth identified as *Tetranychus lombardini* (Meyer). No mites belonging to the *T. urticae*, *T. ludeni* or *P. latus* species and no predatory mites were found in our samples.

3.4. Farmers' perception about *Tetranychus evansi*

According to 91% of farmers, *T. evansi* (commonly called red spider mite in the area) did not have a local name. The majority of farmers (95%) were able to identify *T. evansi* and recognize its damage. Over 90% said they had observed *T. evansi* damage symptoms on their crops. All farmers (100%) characterized the damage as very serious (100%) in Sèmè-Kpodji, 97% in Pahou and 78% in Grand-Popo (Table 3).

They reported that *T. evansi* damage could reach level 5 in one week (classification of Hussey and Scopes, (1985)). Almost all farmers (91%) said that *T. evansi* damage had increased each year up to 2012, and was more important during the dry season (Table 3). Farmers also said that *T. evansi* could destroy the entire field in less than a week if no treatment was applied on the first day of its appearance. Thus, production losses, according to the farmers, could be assessed, respectively at 65, 56 and 25% on African eggplant, tomato and purple amaranth in 2012 (Table 4).

3.5. Control of *Tetranychus evansi*

Based on the invasive and destructive nature of *T. evansi*, farmers had no other choice than using chemical control. All farmers (100%) reported spraying chemical insecticides to control *T. evansi*. Sixteen synthetic formulations were identified (Table 5). The frequently used pesticides belonged to the synthetic pyrethroid (SP) family (54%) alone or associated with an organophosphate (OP) (25%). The result showed that a significant number of farmers (65%) used Cotalm P (lambdacyhalothrin + profenofos) at different doses. Some used high doses to get a better efficacy to control the mites. Other farmers combined several formulations such as Cotalm P and Decis (deltamethrin) without any respect to recommended doses. The number of treatments performed also varied according to grower and crop. Thus, purple amaranth, African eggplant and tomato, respectively, received an average 3, 9 and 12 treatments per month to control *T. evansi*.

4. Discussion

Almost all of the mites in our samples belonged to *T. evansi*, while those reported as major horticultural pests in Benin (Adango et al., 2007; Martin et al., 2010), i.e. *T. urticae*, *T. ludeni* and *P. latus*, were not found in any of the samples. It thus appears that in just a few years, *T. evansi* had outcompeted and replaced the native phytophagous mites on the host plants investigated. Adango et al. (2006) reported predatory mites including *Typhlodromalus saltus* (Denmark and Matthysse), *Iphiseius degenerans* (Berlese) and *Amblyseius tamatavensis* (Blommers) on *S. macrocarpum* L. and *A. cruentus* L. in Benin. However, during the present survey no predatory mites were recorded. This could be due to the heavy reliance of synthetic pesticides for the control of *T. evansi*, thus completely wiping out the more vulnerable predators. These results confirm those of Adango et al. (2006) who did not find any predatory mites during their collections of mites on *Solanum* spp. and *Amaranthus* spp. in the horticultural production areas of southern Benin, but reported several species in untreated vegetable plots of the International Institute of Tropical Agriculture (IITA) in Abomey Calavi, Benin.

Farmers have reported that the red spider mite is a pest causing serious damage to their crops. According to them, the severity and extent of damage have increased since 2008. The outbreaks seem more important in the dry season than in the rainy season. *Tetranychus evansi* damage level can reach level 5 in one week according to the classification of Hussey and Scopes (1985). Indeed, the initial *T. evansi*-infested plants exhibit a few white spots. Level 5 damage is when the mites destroy the leaf parenchyma cells causing leaf drop and subsequently a reduction in productivity (Flechtmann and Knihinicki, 2002). The rapid multiplication of *T. evansi* could explain the high losses (65, 56 and 25%, respectively, observed on African eggplant, tomato and purple amaranth). Similar results were found in the study carried out in Zimbabwe by Saunyama and Knapp (2003). In our case, the heaviest infestations were recorded on African eggplant and tomato, illustrating the real challenge of this pest for growers. Indeed, we found that the African eggplant and purple amaranth were the two most grown leafy vegetables in southern Benin. These crops were produced, respectively by 100 and 94% of farmers surveyed. This is mainly because tomatoes and leafy vegetables are used in the traditional sauce eaten at each meal with cereal grains by Beninese, and thus are an important source of income for households (Gerstl, 2001).

Based on the invasive and destructive nature of *T. evansi*, farmers seemed to have no other option than using chemical control. All farmers (100%) reported spraying synthetic insecticides to control *T. evansi*. The most frequently used pesticides belonged to the synthetic pyrethroid class and were used individually or mixed with an organophosphate. These binary formulations are registered against cotton pests and should not have been to be used against vegetable pests. The number of treatments performed varied according to grower and crop. Thus, purple amaranth, African eggplant and tomato, respectively received an average of 3, 9 and 12 treatments per month to control *T. evansi*. Among these synthetics products, profenofos is known to have acaricidal properties, but mainly against *P. latus* (Vaissayre et al., 1986). According to farmers this synthetic pesticide (OP) was not really effective against *T. evansi*. This could be due to frequent pesticide use that favors the resistance of mites as suggested by Nyoni et al. (2011) or by the poor quality of products. Recent studies conducted in southern Benin by James et al. (2006), showed that 90 % of the production of African eggplant was destroyed by *P. latus* despite spraying on average 7 insecticide applications of deltamethrin or bifenthrin. Such insecticide overuse could be explained by the ineffectiveness of pyrethroids to control broad mites (Vaissayre, 1986) whilst adversely affecting their predators (Phytoseiidae) and maybe the lack of efficient acaricidal products available in the country. Our results corroborate numerous studies in Africa showing that pesticides are used incorrectly with inappropriate products, incorrect dosage, timing and targeting of application, non-calibrated that impact negatively the environment (Ngowi et al., 2007; Gomgnimbou et al., 2009; Fianko et al., 2011; Ahouangninou et al., 2011, 2012; De Bon et al., 2014). Moreover, the arrival of this new pest has increased the bad use of synthetic pesticide dramatically. Inappropriate use has consequences not only for the effectiveness of the intended pest control but also for operator and consumer health, farm livestock, soil organisms, wildlife and vegetation, and contamination of soil, water and air (Conway and Pretty, 1991; Kishi, 2005; Pretty and Hine, 2005; Williamson et al., 2008; Tomenson and Matthews, 2009; Fianko et al., 2011). In their study, among smallholder farmers in Benin, Ethiopia, Ghana and Senegal, growing cotton, vegetables, pineapple, cowpea, and mixed cereals and legumes, Williamson et al. (2008) described the hospitalization cases and health problems due to incorrect and inappropriate use of pesticides by smallholder farmers. Pesticide residues were already found in apple and locally produced fruit in the Accra Metropolis (Bempah and Donkor, 2011); different species of fish were found to be contaminated with pesticides in the Ouémé River in Benin and the Densu River in Ghana

(Pazou et al., 2006; Fianko et al., 2011). Recent study carried out by Ippolito et al. (2015) on insecticide runoff through modelling showed that 40% of water bodies in global land surface may be at risk due to the adverse effects of insecticides. Ahouangninou et al. (2012), in their study of plant protection practices of farmers in southern Benin, showed high Index Risk of Environment (IRE) and Health (IRH) with the frequent use of carbofuran, chlorpyrifos ethyl and endosulfan. To overcome serious public health and environmental pollution problems, urgency is needed to bring an effective solution to these small-scale growers to help fight this pest. Previous studies have shown the effectiveness of some agricultural acaricides such as dicofol, propargite, abamectin, milbemectin and cyenopyrafen that could be recommended to farmers (Gotoh et al., 2010; Toroitich et al., 2014; Bugeme et al., 2014). However, farmers need to be aware of strategies such as rotation and alternation of these miticides to reduce the risk of selecting resistant populations. The use of a biopesticide based on isolates of the entomopathogenic fungus *Metarhizium anisopliae* (Metsch) could also be an alternative method of control (Bugeme et al., 2008). In the long term, in collaboration with the International Institute of Tropical Agriculture (IITA), the predator *Phytoseiulus longipes* Evans could be introduced as a biological control agent against *T. evansi* (Ferrero et al., 2011). Multiple natural enemy releases have been employed as a way to improve pest suppression (Yaninek et al., 1998; Hanna and Toko, 2001; Onzo et al., 2003; Yaninek and Hanna, 2003; Rhodes et al., 2006; Cakmak et al., 2009; Rahman et al., 2011; Azandémè-Hounmalon, pers. com.). For example, the simultaneous use of *P. longipes* and *M. anisopliae* could enhance the biological control against *T. evansi*. Recently, the entomopathogenic fungi *M. anisopliae* and the predatory mites *P. longipes* have shown successful control in both laboratory, greenhouse and field conditions against *T. evansi* (Wekesa et al., 2005; Ferrero et al., 2007, 2011; Furtado et al., 2007a, b; Bugeme et al., 2009, 2014). Moreover, *P. longipes* and *M. anisopliae* were compatibles (Maniania and Kungu, 2011). The combination of acaricide-treated nets with the release of the predator *P. longipes* (Martin et al., 2010; Kungu, pers. com.) could also help farmers to protect their vegetable crops against the red spider mite. The development of these approaches held much promise in the controlling of *T. evansi*.

5. Conclusions

In conclusion, the study showed the extent of damage caused by *T. evansi* infestation in southern Benin. For some years now outbreaks of *T. evansi* have spread to all growing areas. This situation has left farmers with no other recourse than to use synthetic pesticides that they

can find on the local market, even if these are ineffective against this pest. Further, farmers often increase the dosage and the frequency of applications. Given the toxicity of the chemicals sprayed, the household consumption of tomato and leafy vegetables, and the unsafe phytosanitary practices used by growers to fight the pest, red spider mite outbreaks are a very serious threat to public health and environmental safety in Benin.

Acknowledgements

Cirad, *icipe* and IITA-Benin provided financial support for this research. The study was made possible by the generous support of the American people through the United States Agency for International Development (USAID) under Award No. EPP-A-00-09-00004. The contents are the responsibility of Horticulture CRSP project BioNetAgro investigators and do not necessarily reflect the views of USAID or the United States Government. The authors are also grateful to Philippe Auger from UMR CBGP INRA for his assistance in mite identification and Dolorosa Osogo of *icipe* for copyediting this paper.

References

- Adango, E., Onzo, A., Hanna, R., Atachi, P., Braima, J., 2006. Inventaire de la faune des acariens sur *Amaranthus cruentus* (Amaranthaceae), *Solanum macrocarpon* et *Solanum aethiopicum* (Solanaceae) dans le Sud Bénin. *Int. J. Trop. Insect Sci.* 26, 155–165, doi: 10.1079/IJT2006115.
- Adango, E., Onzo, A., Hanna, R., Atachi, P., James, B., 2007. Mite pests of major importance on indigenous leafy vegetables in Benin: the search for appropriate control strategies. *Acta Hort. (ISHS)* 752, 311–317, http://www.actahort.org/books/752/752_53.htm.
- Adorgloh-Hessou, R., 2006. Guide pour le développement de l'entreprise de production et de commercialisation de légumes de qualité dans les régions urbaines et périurbaines du Sud-Bénin. Rapport de consultation, IITA - Bénin, 86p.
- Ahouangninou, C., Fayomi, B.E., Martin, T., 2011. Évaluation des risques sanitaires et environnementaux des pratiques phytosanitaires des producteurs maraîchers dans la commune rurale de Tori-Bossito (Sud-Bénin), *Cah. Agric.* 20, 216–222.
- Ahouangninou, C.A., Martin, T., Edorh, P., Siddick, I.A., Bio-Bangana, S., Dion, S., Onil, S., St-Laurent, L., Boko, M., Simon, S., Fayomi, B.E., 2012. Characterization of health

- and environmental risks of pesticide use in market-gardening in the rural city of Tori-Bossito in Benin, West Africa. *J. Env. Prot.* 3, 241–248. doi:10.4236/jep.2012.33030.
- Assogba-Komlan, F., Anihouvi, P., Achigan, E., Sikirou, R., Boko, A., Adjé, C., Ahlé, V., Vodouhe, R.S., Assa, A., 2007. Pratiques culturelles et teneur en éléments anti nutritionnels (nitrates et pesticides) du *Solanum macrocarpum* au sud du Bénin. *Afr. J. Food, Agric. Nutr. Develop.* 7, 1–21.
- Assogba-Komlan, F., Singbo, A., Ahlé, V., Azagba, J., 2001. Résultats préliminaires sur la valorisation de quelques déchets agroindustriels en maraîchage, Cas de la ville de Cotonou, pp. 16–26. In: Actes de l'Atelier Scientifique 2, Programme Régional Sud-Centre du Bénin.
- Azandémè-Hounmalon, G.Y., Fellous, S., Kreiter, S., Fiaboe, K.K.M., Subramanian, S., Kungu, M., Martin, T., 2014. Dispersal behavior of *Tetranychus evansi* and *T. urticae* on tomato at several spatial scales and densities: implications for integrated pest management. *PLoS ONE* 9 (4), e95071, doi:10.1371/journal.pone.0095071.
- Blair, B.W., 1983. *Tetranychus evansi* Baker & Pritchard (Acari; Tetranychidae), a new pest of tobacco in Zimbabwe. CORESTA. -Phytopathology and Agronomy Study Group, Bergerac, France: pp. 1–6.
- Bempah, C.K., Donkor, A.K., 2011. Pesticide residues in fruits at the market level in Accra Metropolis, Ghana, a preliminary study. *Env. Monit. Assess.* 175(1-4): 551–561.
- Bugeme, D.M., Knapp, M., Ekesi, S., Chabi-Olaye, A., Boga, H.I., Maniania, N.K., 2014. Efficacy of *Metarhizium anisopliae* in controlling the two-spotted spider mite *Tetranychus urticae* on common bean in greenhouse and field experiments. *Ins. Sci.* 1–8, doi: 10.1111/1744-7917.12111.
- Bugeme, D.M., Knapp, M., Boga, H.I., Wanjoya, A.K., Maniania, N.K., 2009. Influence of temperature on virulence of fungal isolates of *Metarhizium anisopliae* and *Beauveria bassiana* to the two-spotted spider mite *Tetranychus urticae*. *Mycopathol.* 167(4), 221–227.
- Bugeme, D.M., Knapp, M., Ekesi, S., Chabi-Olaye, A., Boga, H.I., Maniania, N.K., 2014. Efficacy of *Metarhizium anisopliae* in controlling the two-spotted spider mite *Tetranychus urticae* on common bean in greenhouse and field experiments. *Ins. Sci.* 00, 1–8, doi 10.1111/1744-7917.12111.

- Bugeme, D.M., Maniania, N.K., Knapp, M., Boga, H.I., 2008. Effect of temperature on virulence of *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* isolates to *Tetranychus evansi*. *Exp. Appl. Acarol.* 46, 275–285, doi: 10.1007/s10493-008-9179-1.
- Cakmak, I., Janssen, A., Sabelis, M.W., Baspinar, H., 2009. Biological control of an acarine pest by single and multiple natural enemies. *Biol. Cont.* 50(1), 60–65.
- Conway, G.R., Pretty, J.N., 1991. *Unwelcome Harvest: Agriculture and Pollution*. Earthscan, London.
- De Bon, H., Huat, J., Parrot, L., Sinzogan, A., Martin, T., Malézieux, E., Vayssières, J.-F., 2014. Pesticide risks from fruit and vegetable pest management by small farmers in sub-Saharan Africa. A review, *Agro. Sustain. Dev.* 34, 723–736. doi:10.1007/s13593-014-0216-7.
- FAO [Food and Agriculture Organization of the United Nations]. 2012. FAOSTAT Database on Agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. FAOSTAT is available online at: <http://faostat3.fao.org/>.
- Ferragut, F., Garzón-Luque, E., Pekas, A., 2013. The invasive spider mite *Tetranychus evansi* (Acari: Tetranychidae) alters community composition and host-plant use of native relatives. *Exp. Appl. Acarol.* 60, 321–341, doi: 10.1007/s10493-012-9645-7.
- Ferrero, M., Calvo, F.J., Atuahiva, T., Tixier, M.-S., Kreiter, S., 2011. Biological control of *Tetranychus evansi* Baker & Pritchard and *Tetranychus urticae* Koch by *Phytoseiulus longipes* Evans in tomato greenhouses in Spain [Acari: Tetranychidae, Phytoseiidae]. *Biol. Cont.* 58, 30–35.
- Ferrero, M., de Moraes, G.J., Kreiter, S., Tixier, M.-S., Knapp, M., 2007. Life tables of the predatory mite *Phytoseiulus longipes* feeding on *Tetranychus evansi* at four temperatures (Acari: Phytoseiidae, Tetranychidae). *Exp. Appl. Acarol.* 41, 45–53.
- Fianko, J.R., Donkor, A., Lowor, S.T., Yeboah, P.O., Glover, E.T., Adom, T., Faanu, A., 2011. Health risk associated with pesticide contamination of fish from the Densu River Basin in Ghana. *J. Env. Prot.* 2(02), 115.
- Flechtmann, C.H.W., Knihinicki, D.K., 2002. New species and new record of *Tetranychus* Dufour from Australia, with a key to the major groups in this genus based on females (Acari: Prostigmata: Tetranychidae). *Aust. J. Entomol.* 41, 118–127, doi: 10.1046/j.1440-6055.2002.00289.x.
- Furtado, I.P., de Moraes, G.J., Kreiter, S., Tixier, M.-S., Knapp, M., 2007a. Potential of a Brazilian population of the predatory mite *Phytoseiulus longipes* as a biological

- control agent of *Tetranychus evansi* (Acari: Phytoseiidae, Tetranychidae). Biol. Cont. 42, 139–147.
- Furtado, I.P., Toledo, S., de Moraes, G.J., Kreiter, S., Knapp, M., 2007b. Search for effective natural enemies of *Tetranychus evansi* (Acari: Tetranychidae) in northwest Argentina. Exp. Appl. Acarol. 43, 121–127.
- Gerstl, S., 2001. The economic costs and impact of home gardening in Ouagadougou, Burkina Faso. PhD Thesis, University of Basel, Germany, doi: 10.5451/unibas-002393646.
- Gomgnimbou, A.P., Savadogo, P.W., Nianogo, A.J., Millogo-Rasolodimby, J., 2009. Usage des intrants chimiques dans un agrosystème tropical: diagnostic du risque de pollution environnementale dans la région cotonnière de l'est du Burkina Faso. Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 13(4), 499–507.
- Gotoh, T., Araki, R., Boubou, A., Migeon, A., Ferragut, F., Navajas, M., 2009. Evidence of co-specificity between *Tetranychus evansi* and *Tetranychus takafujii* (Acari: Prostigmata, Tetranychidae): comments on taxonomic and agricultural aspects. Int. J. Acarol. 35: 485–501, doi:10.1080/01647950903431156.
- Gotoh, T., Fujiwara, S., Kitashima, Y., 2011. Susceptibility to acaricides in nine strains of the tomato red spider mite *Tetranychus evansi* (Acari: Tetranychidae). Int. J. Acarol. 37(2): 93–102.
- Hanna, R., Toko, M., 2001. Cassava green mite biological control in Africa: project overview and summary of progress, in Proceedings of the Regional Meeting of the Cassava Green Mite Biocontrol Project , Dar es Salaam, Tanzania, 15 _/17 November 2000 (Hanna, R. & Toko, M., Eds.). IITA, Cotonou, pp. 4–22.
- Hussey, N.W., Scopes N.E.A., 1985 Greenhouse vegetables (Britain), pp. 285–297. In: Helle, M. and Sabelis, M.W., Eds. Spider mites. Their biology, natural enemies and control. Vol. 1B. Elsevier, Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo.
- Ippolito, A., Kattwinkel, M., Rasmussen, J. J., Schäfer, R. B., Fornaroli, R., & Liess, M. (2015). Modeling global distribution of agricultural insecticides in surface waters. Env. Poll. 198: 54–60.
- James, B., Godonou, I., Atcha, C., Baimey, H., Adango, E., Boulga, J., Goudegnon, E., 2006. Healthy Vegetables Through Participatory IPM in Peri-urban Areas of Benin. Technical Report. IITA, Cotonou. 49 p.

- Kishi, M., 2005. The health impacts of pesticides: what do we now know? J. Pretty (Ed.), *The Pesticide Detox. Towards a More Sustainable Agriculture*, Earthscan, London (2005), pp. 23–38.
- Knapp, M., Wagener, B., Navajas, M., 2003. Molecular discrimination between the spider mite *Tetranychus evansi* Baker & Prichard, an important pest of tomatoes in southern Africa, and the closely related species *T. urticae* Koch (Acarina: Tetranychidae). *Afr. Entomol.* 11, 300–304.
- Maniania, N.K., Kungu, M., 2011. Evaluation of *Metarhizium anisopliae* and predatory mite *Phytoseiulus longipes* for the control of *Tetranychus evansi*. Power point presentation, 40 years Science for Africa.
- Martin, T., Assogba-Komlan, F., Sidick, I., Ahle, V., Chandre, F., 2010. An acaricide-treated net to control phytophagous mites. *Crop Prot.* 29, 470–475.
- Moutia, L.A., 1958. Contribution to the study of some phytophagous Acarina and their predators in Mauritius. *Bull. Entomol. Res.* 49, 59–75,
- Naika, S., van Lidt de Jeude, J., de Goffau, M., Hilmi, M., van Dam, B., 2005. *Agrodok 17—Cultivation of tomato: Production, processing and marketing*. Agromisa Foundation and CTA, Wageningen, Netherlands.
- Ngowi, A.V.F., Mbise, T.J., Ijani, A.S.M., London, L., Ajayi, O.C., 2007. Smallholder vegetable farmers in Northern Tanzania: Pesticides use practices, perceptions, cost and health effects. *Crop Prot.* 26(11), 1617–1624.
- Nyoni, B.N., Gorman, K., Mzilahowa, T., Williamson, M.S., Navajas, M., Field, L.M., Bass, C. 2011. Pyrethroid resistance in the tomato red spider mite, *Tetranychus evansi*, is associated with mutation of the para-type sodium channel. *Pest Manag. Sci.* 67(8): 891–897.
- Onzo, A., Hanna, R., Zannou, I., Sabelis, M.W., Yaninek, J.S., 2003. Dynamics of refuge use: Diurnal, vertical migration by predatory and herbivorous mites within cassava plants. *Oikos* 101, 59–69. PELS, B. (2001) Evolutionary dynamics of dispersal in predatory mites. PhD thesis, University of Amsterdam, pp. 146.
- PADAP/MAEP, 2003. Diagnostic, Demande, Offre et Marchés. Systèmes de production. In: *Rapport définitif Etude de faisabilité*. Ministère de l’Agriculture, de l’Elevage et de la Pêche (MAEP), Bénin, Tome 2. 158 p.
- Pazou, E.Y., Laléyé, P., Boko, M., van Gestel, C.A., Ahissou, H., Akpona, S., van Hattum, B., Swart, K., van Straalen, N.M., 2006. Contamination of fish by organochlorine

- pesticide residues in the Ouémé River catchment in the Republic of Bénin. *Environ. Int.* 32, 594–599.
- Pretty, J., Waibel, H., 2005. Paying the price: the full cost of pesticides J. Pretty (Ed.), *The Pesticide Detox. Towards a More Sustainable Agriculture*, Earthscan, London, pp. 39–54.
- Rahman, T., Spafford, H., Broughton, S., 2011. Single versus multiple releases of predatory mites combined with spinosad for the management of western flower thrips in strawberry. *Crop Prot.* 30(4), 468–475.
- Rhodes, E.M., Liburd, O.E., Kelts, C., Rondon, S.I., Francis R.R., 2006. Comparison of single and combination treatments of *Phytoseiulus persimilis*, *Neoseiulus californicus* and Acramite (bifenazate) for control of two spotted spider mites in strawberries *Exp. Appl. Acarol.* 39, 213–225.
- Saunyama, I.G.M., Knapp, M., 2003. Effect of pruning and trellising of tomatoes on red spider mite incidence and crop yield in Zimbabwe. *Afr. Crop Sci. J.* 11, 269–277.
- Schippers, R.R., 2004. *Légumes Africains Indigènes: présentation des espèces cultivées*. Margraf Publishers, Weikersheim, Germany & CTA, Wageningen, The Netherlands.
- Simon, S., Assogba Komlan, F., Adjaïto, L., Mensah, A., Coffi, H.K., Ngouajio, M., Martin, T., 2014. Efficacy of insect nets for cabbage production and pest management depending on the net removal frequency and microclimate. *Int. J. Pest Manage.* 60, 208–216, doi: 10.1080/09670874.2014.956844.
- Soukoura, A., Ousmane, C., Eric, S., Urbain, D., Soule, A., Sonia, P., Huat J., 2011. Contribution of Rice and Vegetable Value Chains to Food Security and Incomes in the Inland Valleys of Southern Benin and Mali: Farmers' Perceptions, pp. 51–56. In: *Agricultural innovations for sustainable development: Contributions from the finalists of the 2009/2010 Africa-wide women and young professionals in science competitions*. FARA, Accra.
- StataCorp, 2011. *Stata Statistical Software: Release 12*. College Station, TX: StataCorp LP.
- Tomenson, J.A., Matthews, G.A., 2009. Causes and types of health effects during the use of crop protection chemicals: data from a survey of over 6,300 smallholder applicators in 24 different countries. *Int. Arch. Occ. Env. Hea.* 82, 935–49.
- Torotich, F.J., Knapp, M., Nderitu, J.H., Olubayo, F.M., Obonyo, M., 2014. Susceptibility of geographically isolated populations of the tomato red spider mite (*Tetranychus evansi*

- Baker & Pritchard) to commonly used acaricides on tomato crops in Kenya. J. Entomol. Acarol. Res., 46, 18–23, doi: <http://dx.doi.org/10.4081/jear.2014.1469>.
- Tsagkarakou, A., Cross-Ateíl, S., Navarro, M.N., 2007. First record of the invasive mite *Tetranychus evansi* (Acari: Tetranychidae) Baker and Pritchard in Greece. *Phytoparasitica* 35, 519–522.
- Vaissayre, M., Crétenet, M., 1986. Modèle de décision appliqué à l'interaction entre fertilisation minérale et protection phytosanitaire en culture cotonnière. *Coton Fibres Trop*, 41(2), 89–96.
- Wekesa, V.W., Maniania, N.K., Knapp, M., Boga, H.I., 2005. Pathogenicity of *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* to the tobacco spider mite *Tetranychus evansi*. *Exp. Appl. Acarol.* 36, 41–50.
- Williamson, S., Ball, A., Pretty, J., 2008. Trends in pesticide use and drivers for safer pest management in four African countries. *Crop Prot.* 27(10), 1327–1334.
- Yaninek, J.S., Me´ Gevand, B., Ojo, B., Cudjoe, A.R., Abole, E., Onzo, A., Zannou, I., 1998. Establishment and spread of *Typhlodromalus manihoti* (Acari; Phytoseiidae), an introduced phytoseiid predator of *Mononychellus tanajoa* (Acari: Tetranychidae) in Africa. *Env. Entomol.* 27, 1496–1505.
- Yaninek, J.S., Hanna, R., 2003. Cassava green mite in Africa: a unique example of successful classical biological control of a mite pest on a continental scale, in *Biological Control in IPM Systems in Africa* (Neuenschwander, P., Borgemeister, C. & Langewald, L., Eds.). CABI Publishing, pp. 61–75.

Impact of *Tetranychus evansi* on vegetable production in Benin
Questionnaire

Questionnaire Number: / _____ /

Date : _____

Name of the enumerator:

Place :

Name of the respondent:

1. Age :
2. Gender : / _____ / (Male = 1 Female = 2)
3. Schooling level : / _____ / (Primary school = 1, Secondary school = 2, University degree = 3, None = 0)
4. Number of years of schooling
5. What is your main occupation: / _____ / (Agriculture = 1, Rearing = 2, Commerce = 3, Handicraft = 4, Other = 5 (to be specified)
6. Which vegetable crops did you grow the last twelve (12) months ? (List in decreasing order of importance)

Vegetable crops	Rang

7. What are the most important pests of your vegetable production (List in decreasing order of importance)

Pests	Rang

8. What is the local name of the red dust mite "*Tetranychus evansi*" ?.....
9. Could you be able to recognize the red dust mite *Tetranychus evansi* ? /_____/ (YES = 1
NO = 0)
10. If YES, Could you show it on the following photos : /_____/ (Mention the letter that corresponds to the picture shown by the interviewee)
11. Do you know the damages caused by the red dust mite *Tetranychus evansi*? /_____/ (YES = 1 ; NO = 0)
12. If YES, Could you please, identify on these photos the types of damages caused by *Tetranychus evansi*: /_____/ (Mention the letter that corresponds to the picture of damage shown by the interviewee?)
13. Have you ever experienced the damages caused by the red dust mite *Tetranychus evansi*? /_____/ (YES = 1 ; NO = 0)
14. Since when did you begin experiencing the damages of the red dust mite *Tetranychus evansi*? (Specify the year).....
15. Which are the main vegetable crops affected by the red dust mite *Tetranychus evansi* ? (List them in decreasing order of importance)

Vegetable crops	Rang

16. In which period of the year do you experience the damage caused by the red dust mite *Tetranychus evansi*? /_____/ (Rainy season = 1 Dry season = 2 Rainy and dry season = 3)

17. Please, specify the corresponding months: Rainy season; Dry season.....

18. Did you abandon some vegetable crops due to the red dust mite ? /_____/ (Yes = 1 ; No = 0). If Yes, which crops and in which year ?

Vegetable crops	Year of abandonment

19. How many plots/beds have you got for vegetable cropping?

20. For the grown vegetable crops during these last twelve (12) months, please fill the table below:

Vegetable crops	Number of cultivated plots/beds	Number of plots/beds affected by the red dust mite	Number of pesticide applications realized to control the red dust mite	Name of the pesticides used to control the red dust mite
Tomato				
Gboma				
Purple amaranth				

21. Farmer’s perception and damage estimation

21.1. How do you rate the severity of the damage? /_____/ (Very serious = 4, serious = 3, Moderate = 2, not serious = 1)

21.2. In your opinion, what is the evolution of the damage since their appearance ? /_____/ (Increase in severity = 3, Constant in severity = 2, Decrease in severity = 1)

21.3. Damage estimation due to the red dust mite

Vegetable crop	Number of cultivated plots/beds	Number of plots/beds affected by pests	product loss percentage (%) per plot/bed
Tomato			
Gboma			
Purple amaranth			

4. Conclusion

L'étude a montrée l'impact et l'ampleur des dégâts provoqués par les pullulations de l'acarien *T. evansi* sur le gboma, l'amaranthe et la tomate, qui sont consommés régulièrement par la population locale majoritairement urbaine dans cette région. Ces pullulations récentes se sont généralisées à toutes les zones maraîchères du littoral et sont particulièrement importantes en saison sèche et plus faible en saison des pluies. Face à cette situation, les maraîchers semblent complètement démunis et sont contraints d'utiliser toutes les formulations insecticides qu'ils trouvent sur le marché même si celles-ci se sont avérées inefficaces pour contrôler ce ravageur. Compte tenu de la toxicité des pesticides et des doses utilisées mais aussi des fréquences de traitements, des risques graves d'intoxication humaine sont à craindre, que ce soit directement ou indirectement par la pollution de l'environnement. Par ailleurs, la connaissance du mode de migration et de dispersion de *T. evansi* sur un plant de tomate comparativement au comportement de *T. urticae*, espèce qui est historiquement en Afrique sub-Saharienne un des ravageurs majeur de la tomate, est un préalable indispensable à la mise au point d'une méthode de lutte adaptée à ce ravageur invasif ce qui représente l'objectif du chapitre 3.

Comportement de *T. evansi*

CHAPITRE 3

ETUDE DU COMPORTEMENT DE *TETRANYCHUS EVANSI* SUR TOMATE

Azandémè-Hounmalon, G. Y., Fellous, S., Kreiter, S., Fiaboe, K. K., Subramanian, S., Kungu, M., & Martin, T. (2014). Dispersal Behavior of *Tetranychus evansi* and *T. urticae* on Tomato at Several Spatial Scales and Densities: Implications for Integrated Pest Management. *PloS one*, 9(4), e95071.

1. Introduction

La dispersion est définie comme étant un facteur clé intervenant dans la survie de la plupart des organismes en déterminant l'organisation de la distribution, le groupe, la dynamique des populations et la structure génétique (Turchin, 1998; Bergmann *et al.*, 2000). Le mode de dispersion varie selon les espèces, le stade, le cycle de vie, le sexe, l'environnement social et les conditions climatiques (Dunning *et al.*, 1995; Clobert *et al.*, 2001). Le processus de dispersion est observé lorsque les individus en présence d'un environnement défavorable (manque de nourriture ou contraintes climatiques) se déplacent vers un autre environnement qui leur est favorable (Clobert *et al.*, 2001; Ims & Hjermann, 2001). La dispersion est donc considérée comme un facteur important de survie, car elle détermine la dynamique de la distribution spatiale des organismes (Turchin, 1998; Bergmann *et al.*, 2000).

La dispersion des tétranyques a été l'objet de plusieurs études dont quelques unes ont été réalisées par Hussey & Parr (1963), Suski & Naegele (1966), McEnroe & Dronka (1971), Main (1976), Binns (1982), Smiley & Kennedy (1985), Dunning *et al.* (1995), Hanski (1998, 1999), Bowler & Benton (2004), Bell *et al.* (2005), Clotuche *et al.* (2011, 2013) en particulier sur *T. urticae*. Le mode de dispersion des tétranyques varie en fonction de l'espèce, du sexe, du cycle biologique, des conditions environnementales et climatiques. Chez *T. urticae* par exemple, les individus se dispersent en marchant (McGregor, 1913; Hussey & Parr, 1963), ou par phorésie c'est-à-dire par le biais d'un autre organisme (Boykin & Campbell, 1984; Yano, 2004) ou encore par les courants d'air (Li & Margolies, 1993; Bell *et al.*, 2005). Ce dernier mode de dispersion, encore appelé dispersion collective, se produit lorsque la population grossit avec une diminution de ressource alimentaire (liée à la surpopulation et à la sénescence de la plante) qui amène les individus à former des boules de soie au sommet de la

plante hôte et à se laisser emporter par le vent vers une autre plante hôte par le phénomène de "ballooning" (Clotuche *et al.*, 2011). La taille de ces boules de soie augmente en cours de la journée et diminue au cours de la nuit confirmant la migration circadienne observée chez *T. urticae* (Pralavorio *et al.*, 1989; Delétré *et al.*, 2014). Cependant, aucune information n'existe sur le mode de dispersion et de migration intra-plant de *T. evansi* justifiant ainsi l'objectif de cette étude.

Dans ce chapitre, j'ai étudié dans un premier temps le mode de dispersion de *T. evansi* comparé à celui de *T. urticae* sur une feuille simple et un jeune plant de tomate puis dans un deuxième temps, son comportement migratoire. Enfin, j'ai analysé et interprété les différents modes de dispersion et de migration de *T. evansi* et *T. urticae*.

2. Matériel et Méthodes

2.1. Dispersion sur une feuille de tomate

Le dispositif consiste en trois boîtes en plastique de 5,5 cm de hauteur et 17,7 cm de longueur. Une mince couche de coton humidifié a été étalée au fond des boîtes; une feuille de tomate à cinq folioles a été étalée sur le coton humidifié de manière à avoir la face inférieure au-dessus afin de faciliter le bon développement des acariens. Chacune des folioles a été numérotée à partir de l'apicale vers la base de la feuille (Figure 11). Les femelles de *T. evansi* ont été déposées sur la 1^{ère} foliole. Quatre densités initiales ont été comparées: 1, 10, 30 et 60 femelles. Les boîtes ont été conservées à l'incubateur à une température de 25 °C. L'essai a été répété cinq fois et tous les deux jours, les nombres totaux d'œufs pondus et de stades mobiles ont été comptés sur les différentes folioles pendant 15 jours. Les mêmes expérimentations ont été conduites également sur *T. urticae* et dans les mêmes conditions.

2.2. Dispersion sur un jeune plant de tomate

Cinq plants de tomate de variété 'Money Maker' âgés de 45 jours ayant au moins quatre feuilles bien développées ont été utilisés dans cet essai. Les plants ont été infestés avec 100 ♀

et 10 ♂ de *T. evansi* à partir des feuilles situées au bas du plant. Les plants ont été disposés dans une enceinte climatique réglée à une température de 25±3 °C avec une humidité relative de 70 - 90 % et une photopériode de 12 : 12 [L : D]. Les stades mobiles ont été comptés tous les trois jours jusqu'à la destruction totale du plant. Les dégâts ont été évalués sur chaque feuille en utilisant la clé d'identification de Hussey & Scopes (1985) où la classe 0 correspond à l'absence totale de dégât et la classe 5 correspond à la destruction complète de la feuille.

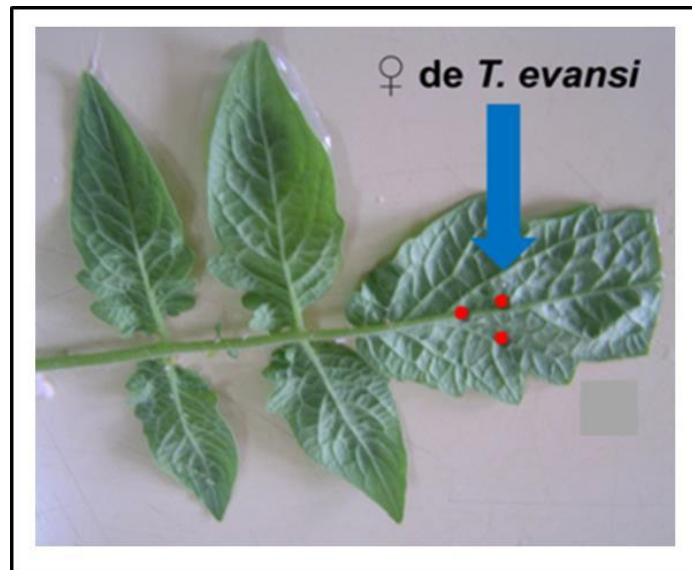


Figure 11: Dispositif expérimental sur la dispersion de *T. evansi* sur une feuille

2.3. Mise en évidence de la migration circadienne chez *T. evansi*

Le dispositif expérimental de la Figure 12 consiste à avoir un plant de tomate de 12 cm de hauteur. Une bande de papier noir de 1 cm de large et de 20 cm de long a été collée et fixée au tuteur à l'aide de colle et de fil de fer fin. Le plant a été infesté avec 100 ♀ de *T. evansi* à un temps T₀ et gardé au laboratoire pendant trois jours, le temps que les acariens s'établissent correctement. A l'aide du logiciel Ethovision, des films de 24 h ont été réalisés sous infrarouges à un temps T₀ + 3 jours et T₀ + 6 jours. A T₀ + 6 jours, le nombre total d'acariens sur le plant a été évalué à 522. Les données enregistrées ont été le nombre d'individus ascendants et descendants (voir article **A2**).

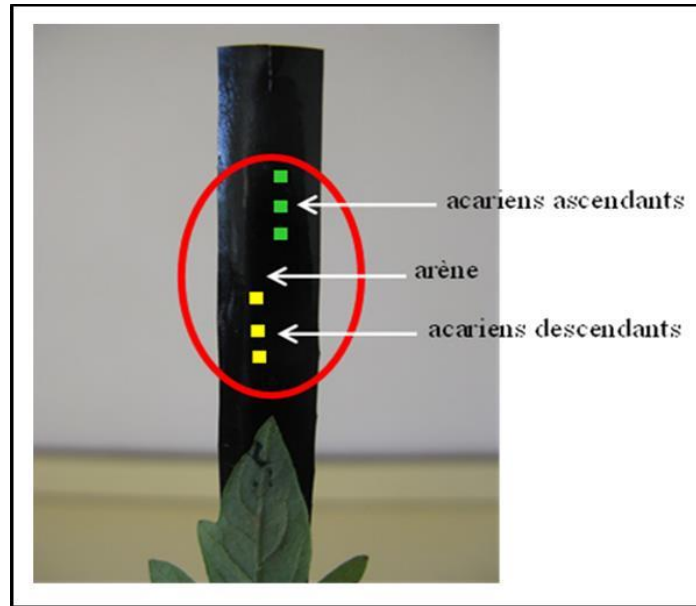


Figure 12: Dispositif de mise en évidence du mouvement circadien (Photo: G. Azandémè-Hounmalon)

Les résultats de ces travaux figurent dans l'article A2 suivant.

3. ARTICLE A2



Dispersal Behavior of *Tetranychus evansi* and *T. urticae* on Tomato at Several Spatial Scales and Densities: Implications for Integrated Pest Management

Ginette Y. Azandémè-Hounmalon^{1,2}, Simon Fellous³, Serge Kreiter⁴, Komi K. M. Fiaboe², Sevgan Subramanian², Miriam Kungu², Thibaud Martin^{1,2*}

1 Cirad, UPR Hortsys, Montpellier, France, **2** icipe— Plant Health Department, Nairobi, Kenya, **3** INRA, UMR CBGP, Montpellier, France, **4** Montpellier SupAgro, UMR CBGP, Montpellier, France

Abstract

Studying distribution is necessary to understand and manage the dynamics of species with spatially structured populations. Here we studied the distribution in *Tetranychus evansi* and *T. urticae*, two mite pests of tomato, in the scope of evaluating factors that can influence the effectiveness of Integrated Pest Management strategies. We found greater positive density-dependent distribution with *T. evansi* than *T. urticae* when assayed on single, detached tomato leaves. Indeed, *T. evansi* distribution among leaflets increased with initial population density while it was high even at low *T. urticae* densities. Intensity and rate of damage to whole plants was higher with *T. evansi* than *T. urticae*. We further studied the circadian migration of *T. evansi* within plant. When *T. evansi* density was high the distribution behavior peaked between 8 am and 3 pm and between 8 pm and 3 am local time of Kenya. Over 24 h the total number of mites ascending and descending was always similar and close to the total population size. The gregarious behavior of *T. evansi* combined with its rapid population growth rate, may explain why few tomato plants can be severely damaged by *T. evansi* and how suddenly all the crop can be highly infested. However the localisation and elimination of the first infested plants damaged by *T. evansi* could reduce the risk of outbreaks in the entire crop. These findings suggest also that an acaricide treated net placed on the first infested plants could be very effective to control *T. evansi*. Moreover circadian migration would therefore accentuate the efficiency of an acaricide treated net covering the infested plants.

Citation: Azandémè-Hounmalon GY, Fellous S, Kreiter S, Fiaboe KKM, Subramanian S, et al. (2014) Dispersal Behavior of *Tetranychus evansi* and *T. urticae* on Tomato at Several Spatial Scales and Densities: Implications for Integrated Pest Management. PLoS ONE 9(4): e95071. doi:10.1371/journal.pone.0095071

Editor: Youjun Zhang, Institute of Vegetables and Flowers, Chinese Academy of Agricultural Science, China

Received: December 4, 2013; **Accepted:** March 23, 2014; **Published:** April 17, 2014

Copyright: © 2014 Azandémè-Hounmalon et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Funding: The study was made possible by the generous support of the American people through the United States Agency for International Development (USAID) under Award No. EPP-A-00-09-00004. The contents are the responsibility of Horticulture CRSP project BioNetAgro investigators and do not necessarily reflect the views of USAID or the United States Government. We wish to acknowledge our project partners, Cirad and icipe for all the support they accorded us in planning and implementation of the project. The funding sources had no involvement at any stage in the preparation of this paper and the funders had no role in study design, data collection and analysis, decision to publish, or preparation of the manuscript.

Competing Interests: The authors have declared that no competing interests exist.

* E-mail: thibaud.martin@cirad.fr

Introduction

When a given environment becomes non-viable (e.g. food shortage or climatic constraints), individuals have to find better opportunities elsewhere and disperse [1,2]. Dispersal is therefore considered a key factor to survival because it determines organism spatial distribution and population dynamics [3,4]. The dispersal of spider mite has been investigated in several studies on tetranychids [5,6,7]. The mode of dispersal varies between species, stage of the life cycle, sex, external/social environments, and time [1,8]. In the specie *Tetranychus urticae*, individuals live in huge groups, exhaust the host plant and must recurrently disperse to new host. Individuals of *T. urticae* can be dispersed by active movement (i.e. by walking) [9,10]; by phoresy (i.e. passive transport by another organism) [11,12]; aerial displacement by air currents [13,14]. The Silk threads produced by spider mites further participate to long-distance, aerial dispersal [15]. In *T. urticae*, a collective displacement occurs in conditions of overcrowding and food depletion: they form silk balls at the apex of their over-exploited hosts plants. These balls are characterized by

phases of growth during the day and nocturnal size decrease. This is likely to be related to *T. urticae* circadian rhythm during which mite population move up in the early afternoon and migrate to the bottom of plants during the night [16]. The within plant distribution of mite may vary widely for different species of host plant and spider mite [17]. Many factors such as leaf surface, food availability and quality, leaf exploitation, predation, mite density, temperature, light and humidity can modify the within plant dispersal of mite. In the case of *Tetranychus evansi*, a species close to *T. urticae*, the behaviors that underlie within plant distribution and circadian migration remain poorly understood. But this information is essential to develop a well-adapted IPM strategy.

Among the pests damaging tomato crops, the spider mites *T. evansi* and *T. urticae* are considered as key pests in sub-Saharan Africa [18]. Indeed *T. evansi* was recently reported as a new invasive species in tomato crop in Africa [19]. It has been shown that tomato infestation by *T. evansi* can causes severe damage. This mite is characterized by a high reproductive capacity, which leads to high population levels in a short time, causing important economic damage and yield losses close to 90% [20,21,22,23].

Table 1. Analysis of mite position on single tomato leaves.

<i>Proportion of mites on inoculated leaflet</i>			
Factor	d.f.	F	p
Mite species	1, 36	33.1	<.0001
Initial density	1, 45	23.0	<.0001
Day post-inoculation	1, 270	449	<.0001
Mite species*Initial density	1, 36	5.46	0.0250
Mite species*Day post-inoculation	1, 269	49	<.0001
Initial density*Day post-inoculation	1, 270	12.5	0.0005
Mite species*Initial density*Day post-inoculation	1, 269	10.3	0.0015
Total mite number	1, 289	5.35	0.0214
Leaf identity (Random factor)	35% variance explained		
<i>Composite Dispersal Index</i>			
Factor	d.f.	F	p
Mite species	1, 36	31.1	<.0001
Initial density	1, 43	13.3	0.0007
Day post-inoculation	1, 269	407	<.0001
Mite species*Initial density	1, 36	4.80	0.0350
Mite species*Day post-inoculation	1, 269	74.1	<.0001
Initial density*Day post-inoculation	1, 270	7.57	0.0063
Mite species*Initial density*Day post-inoculation	1, 268	12.3	0.0005
Total mite number	1, 286	6.85	0.0093
Leaf identity (Random factor)	41% variance explained		

Mites were initially deposited on the terminal leaflet and their position tracked for 15 days. The Composite Dispersal Index (CDI) summarizes mite position on the leaf; see main text (Eq. 1) for details.

doi:10.1371/journal.pone.0095071.t001

The control of *T. urticae* and *T. evansi* is done mainly with application of synthetic pesticides. Despite its relative efficiency, chemical control has several negative impacts as the selection of resistant individuals due to the continuous use of certain active ingredients, the reduction or elimination of beneficial species, the high toxicity of products to applicators, and the presence of residues in food [24,25]. A viable alternative to the problems arising from excessive use of synthetic pesticides is the use of methods that provide control with social and environmental safety. In the search for such methods, natural enemies are being evaluated as biological control agents of *T. evansi* [26,27,28]. Another strategy could be the use of acaricide treated nets, emerging as a new concept of mite control. This technique of mite control is effective against mite species such as *Polyphagotarsonemus latus* (Banks) and *T. urticae* [29]. Moreover acaricide treated net could be combined with the release of predatory mites because of no chemical residues on plant. Martin et al. [29] opined that the circadian migration of *T. urticae* up and down the plant stem [30] could be the reason for the effectiveness of the acaricide treated nets. Using acaricide treated net could be a promising avenue, but its efficiency would directly depend on *T. evansi* dispersal within and among plants.

In this regard, we studied here (i) the distribution of *T. evansi* and *T. urticae* on single tomato leaves, (ii) the within plant distribution, multiplication of mites and damage on whole plants and (iii) the within plant circadian migration of *T. evansi*.

Materials and Methods

1. Plants

Tomato seeds *Solanum lycopersicum* L. var. 'Money Maker' from the East African Seed Company, Nairobi, Kenya, were sowed in rows in soil enriched with compost in plastic seed trays. Plants (21 days-old) were transplanted into pots (22 cm diameter) each containing a mixture of red soil plus bovine manure (3: 1) and placed on benches in a greenhouse until they were 45 days old and had at least four completely developed leaves. The plants were watered daily and each pot was nourished with 3 g calcium ammonium nitrate [CAN (26% N) from Jumbo Agrovet, Nairobi, Kenya] two weeks after transplanting. Subsequently, plants were used either for the experiments or for spider mites rearing.

2. Mites

Spider mites *T. evansi* used in this study were obtained from a regularly regenerated colony maintained at *icipe* (International Centre of Insect Physiology and Ecology) on potted tomato plants variety 'Money Maker'. *Tetranychus urticae*, were obtained from Real IPM Kenya Ltd Thika and reared on bean plants. The mass cultures of *T. evansi* and *T. urticae* were maintained at a temperature of $25 \pm 1^\circ\text{C}$, 50–70% relative humidity (RH) and 12 hours photoperiod.

3. Dispersal behavior of the mites

The dispersal behavior, the within leave and plant distribution and circadian migration of *T. evansi* and *T. urticae* mites were

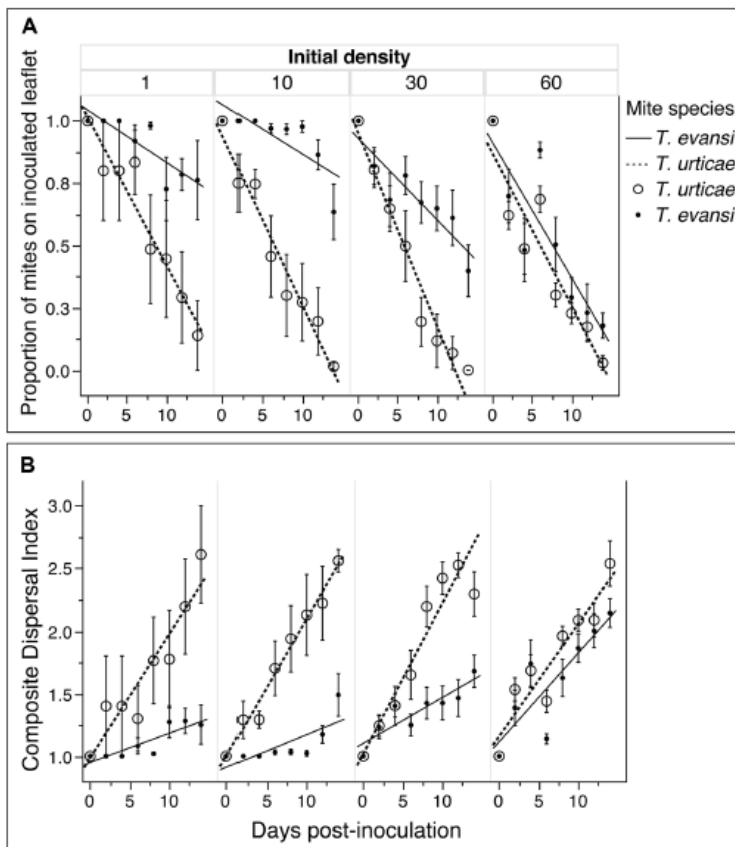


Figure 1. Within leaf distribution of *T. evansi* and *T. urticae*. (A) Proportion of *Tetranychus evansi* and *T. urticae* on inoculated leaflet over 15 days relative to the initial density; (B) Composite Dispersal Index summarizing mites position on the leaf relative to the initial density. The error bars indicate the standard errors.
doi:10.1371/journal.pone.0095071.g001

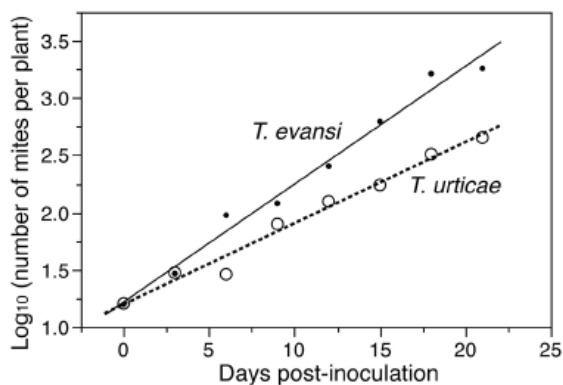


Figure 2. Within plant multiplication of mites. Number of *Tetranychus evansi* and *T. urticae* per tomato plant (Log₁₀) after an initial infestation with 100 females and 10 males on the lowest leaf of the plant.
doi:10.1371/journal.pone.0095071.g002

assessed with three experiments conducted between June and December 2012.

3.1. Within leaf distribution of *T. evansi* and *T. urticae*. Each experimental unit consisted of a box (Height = 5.5 cm and length = 17.7 cm) in which a thin layer of cotton wool was placed. Tomato leaves with five leaflets were spread upside down on the cotton. The leaves were numbered from the apex to the base. Mites in four different starting densities (1, 10, 30 and 60 females) of either *T. urticae* or *T. evansi* were placed on the first leaflet (*i.e.* at the apex). All motile stages of *T. evansi* or *T. urticae* were counted in every two days for 15 days. The boxes were kept in the incubator where temperature was kept at 25°C. Each treatment was replicated five times.

3.2. Within plant distribution, multiplication of mites and damage. Tomato plants (45 days-old) with at least four completely developed leaves were infested with 100 ♀ and 10 ♂ of *T. evansi* or *T. urticae* deposited on the lowest leaf of the plant. These were maintained in the laboratory for 21 days and adult mites were counted every three days on each leaf numbered from bottom to the top. In order to estimate the degree of damage to the plant, the mean leaf damage index was ranked on a scale from 0 (no damage) to 5 (the leaf begins to shrivel) following the method

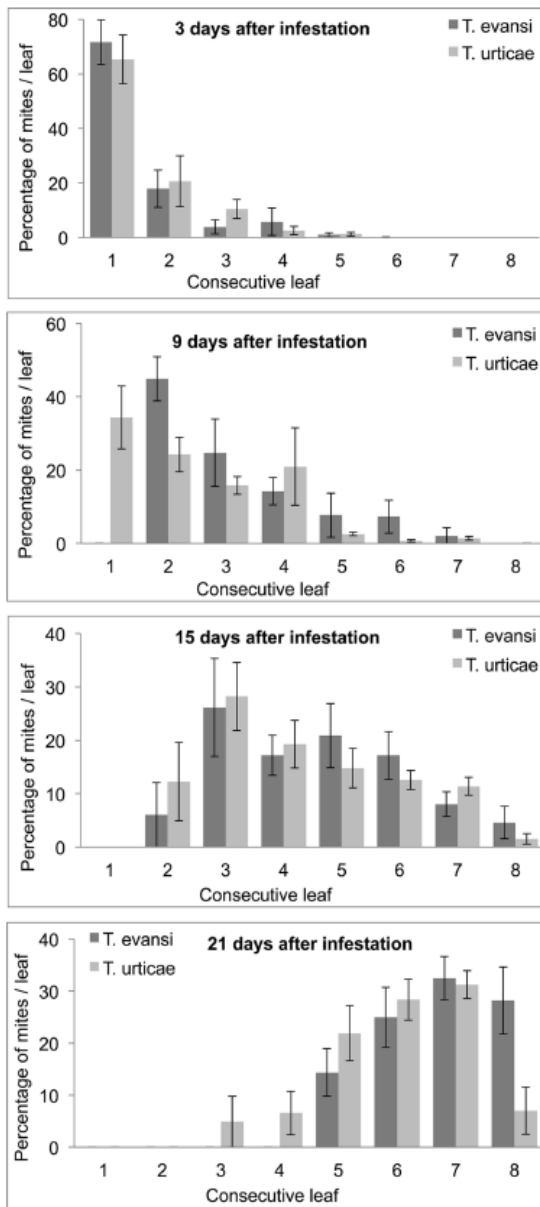


Figure 3. Within plant distribution of *Tetranychus evansi* and *T. urticae* motile stages on tomato plant. Average on 6 plants after 3, 9, 15 and 21 days of initial infestation (Error bars indicate the standard errors). doi:10.1371/journal.pone.0095071.g003

described by Hussey and Scopes [31]. Each treatment was replicated six times.

3.3. Within plant circadian migration activity of *T. evansi*. Migration activities of mites were recorded by video-tracking system from Noldus Information Technology, Wageningen, Netherlands. Tomato plants of 12 cm high were used and a strip of black paper (1 by 20 cm) was pasted with glue and attached to the stalk with thin wire. The tomato plants were

infested at the bottom leaves with 100 mites (T_0) and kept in the laboratory for 6 days. Tracking was carried out at $T_0 + 3$ and $T_0 + 6$ days. During each observation day, the migratory behavior was monitored over 24 hours and mites ascending and descending the strip of black paper were recorded later with video-tracking system. The experiment was replicated three times.

4. Data analyses

We used two distinct variables to analyse dispersal on single leaves. First, we created a Composite Dispersal Index (CDI) summarizing mite position on the leaf. This index allowed analysis of mite movements among leaflets. To calculate this index we assigned the value of 1 to mites found on the first leaflet, value of 2 to mites in the leaflet 2 and 3 which originated the node next to the first leaf, and value of 3 to mites in the leaflets 4 and 5 located on the next node. The formula used to calculate the index is as follows (Equation 1):

$$CDI = (1 \times NbL1 + 2 \times NbL2 + 2 \times NbL3 + 3 \times NbL4 + 3 \times NbL5) / n$$

Where $NbLx$ represents number of mites on the x^{th} leaflet and n the total of individuals. Greater CDI values therefore reflect greater dispersal away from the inoculated leaflet and towards distant leaflets. Second, we also calculated the proportion of mites still present on the first leaflet, where inoculation had occurred.

For these analyses we used mixed-models, in which fixed factors were “mite species” (a discrete factor), “initial density” (a continuous factor ranging from 1 to 60 mites) and “day post inoculation” (a continuous factor ranging from 1 to 15) and all their interactions. We also included “total mite number” (a fixed continuous factor) so as to control for differential population densities among species and replicates. We further included a random, discrete factor “leaf identity” that controlled for pseudo-replication by taking into account the multiple observations on the same leaves.

On whole plants we analysed the total number of mites, as well as an index of mite distribution among leaves. This index was similar to the one used for among leaflets movements at the exception that mites received a score of 1 when on the first leaf (i.e. inoculated leaf at the bottom of the plant), 2 when on the second leaf, and so on until the 6th leaf (above leaves could not be included in the analysis as they were not present in all plants at all times). Total mite number was log-transformed before analysis because *T. evansi* and *T. urticae* populations grow exponentially. This trait was analysed using an ANCOVA where each point was the average number of mites per time point (i.e. day) and mite species. Factors were “mite species”, “day post inoculation” and their interaction. To analyse the index of mite distribution within the whole tomato plant we employed the same type of mixed-model as for the index of within leaf distribution (see above). Initial fixed factors were “mite species” (a discrete factor), “total mite number on the plant” (a continuous factor) and “day post inoculation” (a continuous factor ranging from 0 to 21) and all their interactions. This model also contained the random factor “plant identity” so as to control for pseudo-replication. All above analyses were carried out with the software JMP v.10.0.2 (2012).

Mite circadian migration were analysed with the software from Noldus Technology, Wageningen, Netherlands, using the sum of mites ascending and descending the black paper strip.

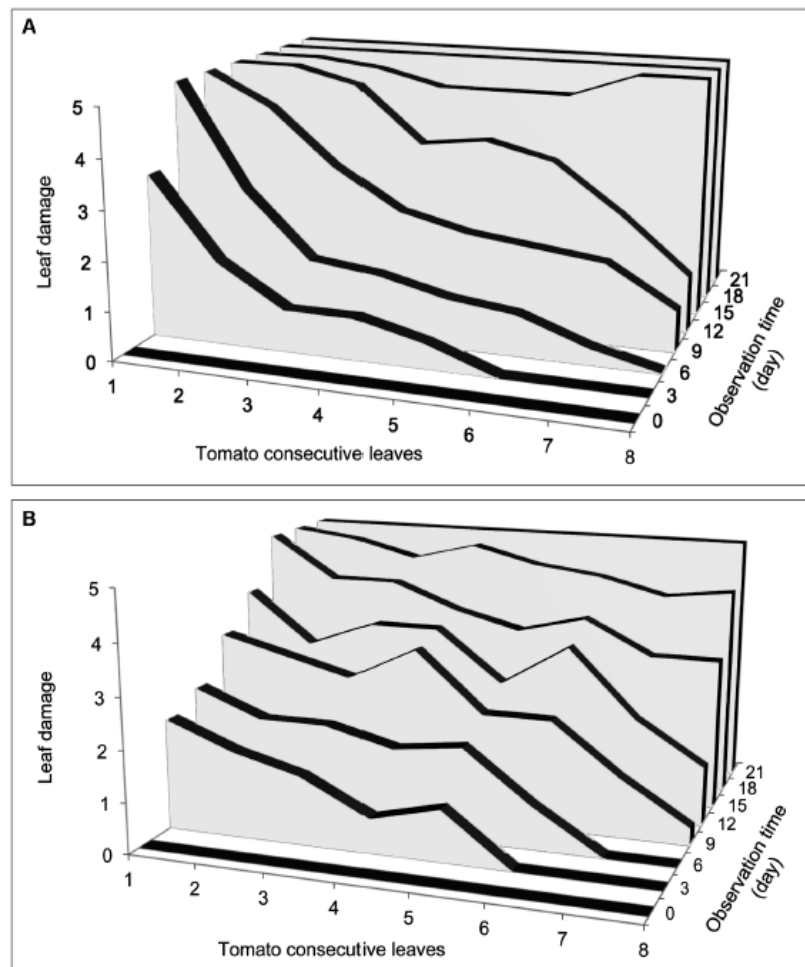


Figure 4. Damages by *Tetranychus evansi* and *T. urticae* on tomato plant. Leaf mean damage indices for *T. evansi* (A) and *T. urticae* (B) on tomato plant after an initial infestation with 100 females and 10 males at the bottom
doi:10.1371/journal.pone.0095071.g004

Results

1. Within leaf distribution of *T. evansi* and *T. urticae*

The analysis of mite species distribution on single leaves revealed different effects of initial density on *T. evansi* and *T. urticae* movements (Table 1, Figure 1). There were indeed significant interactions between “Initial density” and “Mite species” and between “Initial density”, “Mite species” and “Day post-inoculation” for both the proportion of mites that remained on the inoculated leaflet and the CDI (Figures 1a and 1b). The tendency of *T. urticae* to move away from the inoculated leaflet (Figure 1a) and colonize distant leaflets (Figure 1b) appeared independent of initial mite density, whereas these traits increased with *T. evansi* initial density. At initial density 1, 10 and 30 mites, further analyses revealed significant differences between *T. urticae* and *T. evansi* (all interactions “Mite species” x “Day post-inoculation” had $P < 0.001$). However, at initial density 60 the interaction “Mite species” x “Day post-inoculation” was neither significant for the proportion of mites on the inoculated leaflet nor for the CDI ($P > 0.1$).

2. Within plant distribution, multiplication of mites and damage

The analysis of mite numbers showed a greater multiplication of *T. evansi* than *T. urticae* (Figure 2); as revealed by the significant interaction between “Mite species” and “Day post-inoculation” ($F_{1,12} = 22.1, P = 0.0005$).

The within plant distribution of *T. evansi* and *T. urticae* was broadly similar over the course of our experiment (Figure 3). The analysis of the dispersal index (see methods) indicated a greater tendency of *T. evansi* than *T. urticae* to colonise the top of the plant (Interaction “Mite species” * “Days post inoculation” $F_{1,78} = 6.89, P = 0.01$). But this difference was only marginal as the slope of the regression of the index on “Days post inoculation” was 0.203 for *T. urticae* and 0.230 for *T. evansi*.

Damages by *T. evansi* and *T. urticae* on tomato plant also differed (Figure 4). From the 6th day, we noted severe damage (index 5) of the first leaf by *T. evansi* and by the 15th day all leaves were dead (Figure 4a). However with *T. urticae* the damages were more moderate (index between 2 and 3) and evenly distributed among

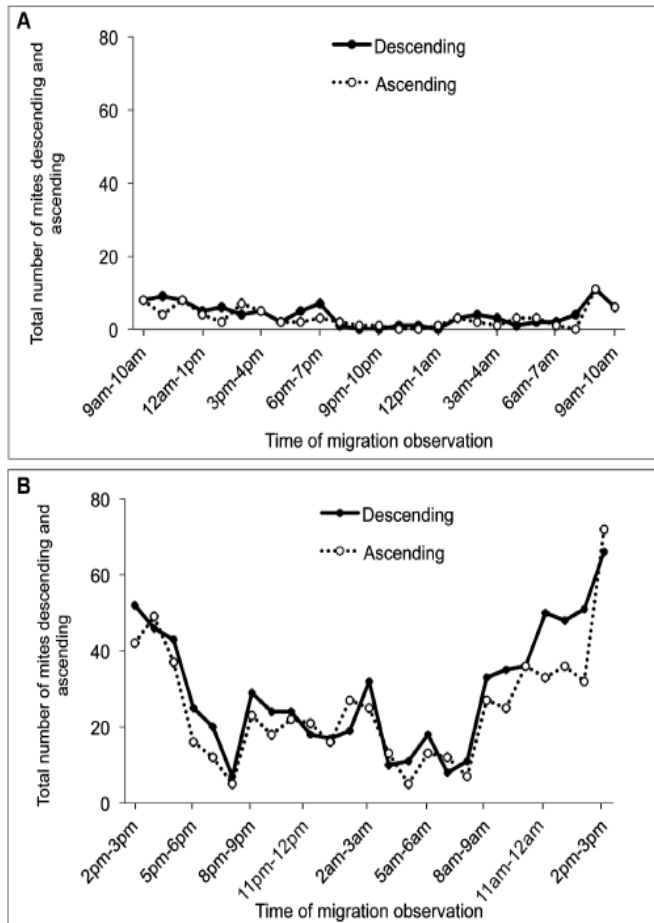


Figure 5. Within plant circadian migration activity of *Tetranychus evansi*. Migration activity of *T. evansi* on the tomato plant at T₀+3 days (A) and T₀+6 days (B). 100 females were introduced at T₀ and each individual ascending or descending the black paper placed at the top of the plant was recorded by video tracking during 24 hours. In the figure, the number of individuals was cumulated at each observation time
doi:10.1371/journal.pone.0095071.g005

leaves from the 3th to the 9th day. Severe damage on the first leaves was observed from the 15th day and it was only by the 21st day the damage was severe with the index 5 for all leaves on the plant (Figure 4b).

3. Within plant circadian migration activity of *T. evansi*

The migration activity is characterised by the ascending and descending of the mites on the black paper strip on the top of tomato plant. Three days after initial infestation (T₀+3), the number of motile stage per plant was quite low (significantly 100 mites). The number of ascending and descending mites also did not differ significantly over observation times of the day indicating a very low flux of migration (Figure 5a). The total number of mites ascending over 24 h (79, Confidence interval (CI): 59–99) was similar to the total number of mites descending (96.7, CI: 74–119). The migration observed occurred during the day. Six days after initial infestation (T₀+6), the number of motile stages observed on the tomato plant was 522 on average. At this high density, we observed increasing flux of migration from 8 am to 3 pm with

peaks migration between 2 and 3 pm. The migration declined after 3 pm until 8 pm, later it increased until 3 am (Figure 5b). The total number of mites ascending during 24 hours (576, CI: 473–680) was broadly similar to the total number of mites descending (608, CI: 340–877).

Discussion

Our results showed a more gregarious behavior of *T. evansi* than of *T. urticae* on single leaf as well as on whole tomato plant. On single leaves, *T. evansi* seemed initially gregarious and only dispersed to further leaflets when its density was high. By contrast, *T. urticae* exhibited dispersal movements at all times and even at low densities and did not seem to depend on initial density (i.e. similar slopes of *T. urticae* regressions in Figure 1 over the 4 initial densities). *T. evansi* thus exhibited greater density-dependent dispersal than *T. urticae* confirming previous results [8,32]. On whole tomato plant, *T. urticae* seems to stay longer on initial leaves than *T. evansi*. It appeared also that *T. urticae* is distributed on the whole plant with quite the same density. In the contrary it

appeared that *T. evansi* dispersed mainly after the destruction of food shortage of lower leaves. *Tetranychus evansi*'s population grew exponentially and destroyed the tomato plant in 15 days while *T. urticae* caused moderate damage on tomato leaves due to its distribution on the plant and total plant destruction was recorded 21 days after initial infestation. Our result confirms previous studies showing higher reproductive rates of *T. evansi* compared to *T. urticae* on tomato plants [20,21,23]. The high distribution of *T. urticae* on whole tomato plant, evidenced by the moderate damage on leaves and its low population growth rate compared to *T. evansi* could explain a better resilience of tomato plant to *T. urticae* compared with *T. evansi* infestations. This gregarious behavior of *T. evansi* combined with its rapid population growth rate, may explain why tomato plants can be severely damaged by *T. evansi* infestations and how suddenly a tomato crop can be highly infested by them. The dispersal behavior of *T. evansi* makes it easy the localisation of infested tomato plants appearing highly damaged. The early control of *T. evansi* on these high spots could reduce the risk of outbreaks in the crop. The different dispersal behavior of *T. evansi* and *T. urticae* (density-dependent and density-independent, respectively) indicate these two species are not exposed to the same stresses and have different dynamics. *T. evansi* has to face food shortages and host plant desiccation for dispersal [33,34]. But *T. urticae* females disperse by walking to new leaves even at low densities when food is not scarce [35]. Yano [36] reported that females of *T. urticae* can disperse alone and start new colonies, after which sib-mating occurs among their offspring. In both species, when populations grow to the extent that individuals face both food limitations and host plant desiccation mites often build dense silk webs [35,36] further aggregate to form silk balls involved in long-range dispersal and the colonisation of distant plants [37,38].

In our study we showed ascending and descending movement by *T. evansi* as already observed for *T. urticae* [16]. Such circadian migration was even observed at low population density, but was less intense than at high population density. In both cases, the total number of *T. evansi* ascending was similar to the total number of *T. evansi* descending. After the exhaustion of food shortage we observed that the mites aggregated at the top of the plant to form silk balls as observed with *T. urticae* [23]. It is however unknown whether circadian migration was due to a few mites migrating many times or a high number of mites migrating few times. Further studies would be necessary to understand what proportion

of the mites is actually involved in circadian migration and how far this migration takes place within a plant. If all or almost all mites undergo circadian migration, most mites could enter in contact with an acaricide net covering the plant even at low density [29]. Circadian migration would therefore accentuate the efficiency of a pest control strategy based on acaricide treated nets placed on hot spot. Our results on *T. evansi* and *T. urticae* dispersal on tomato plant have several implications in the use of acaricide treated net for their management. The low migration behavior of *T. evansi* at lower density could render an acaricide treated net less effective. In this case, we could combine these nets with the release of predatory mites such as *Phytoseiulus longipes* [27] to catch the mites between a rock and a hard place. The migration behavior of *T. evansi* at high density should enhance the efficiency of acaricide treated net covering the infested plant. Thus an acaricide treated net placed on a spot of infested plants could be very effective to control *T. evansi* as the mite would be confined by the netting and killed when spreading to other plants. Moreover, as the number of *T. evansi* ascending and descending appeared as quite similar to the total number of motile mites present on the plant at both low and high densities, this opens an avenue for the use of acaricide treated net on infested plants. Indeed, it suggests that many of the mites may enter into contact with the net and therefore be killed by the acaricide.

In conclusion, we found that: (1) *T. evansi* initially showed a gregarious behavior before displaying dispersal behavior (i.e. positive density-dependent dispersal) while *T. urticae* showed mainly dispersal behavior (i.e. density-independent dispersal); (2) *T. evansi* multiplied faster than *T. urticae* on tomato, causing severe damage and killing tomato plants faster than *T. urticae*; (3) *T. evansi* circadian migration peaked in the morning and in the evening and the total number of ascending and descending mites over 24 h was similar and close to overall population density. These results indicate that acaricide treated net may be efficient to limit *T. evansi* infestations on tomato crop.

Author Contributions

Conceived and designed the experiments: GYAH TM. Performed the experiments: GYAH MK. Analyzed the data: GYAH SF TM. Contributed reagents/materials/analysis tools: GYAH SF SS MK TM. Wrote the paper: GYAH SF SK KKMFF SS TM. Obtained permission for use of video tracking laboratory: TB.

References

- Clobert J, Danchin E, Dhondt AA, Nichols JD (2001) Dispersal. Oxford: Oxford University Press. 452 pp.
- Ims RA, Hjermann DO (2001) Condition-dependent dispersal. In: Clobert J, Danchin E, Dhondt AA, Nichols JD, Dispersal. Oxford: Oxford University Press. pp. 203–216.
- Turchin P (1998) Quantitative analysis of movement: measuring and modeling population redistribution in animals and plants. Sunderland: Sinauer Associates Press. 396 p.
- Bergman CM, Schaefer JA, Luttich SN (2000) Caribou movement as a correlated random walk. *Oecologia* 123: 364–374.
- Dunning JBJ, Stewart DJ, Danielson BJ, Noon BR, Root TL, et al. (1995) Spatially explicit population models: current forms and future uses. *Ecol Appl* 5: 3–11.
- Hanski I (1998) Metapopulation dynamics. *Nat* 396: 41–49. doi:10.1038/23876.
- Hanski I (1999) Metapopulation ecology. Oxford University Press.
- Bowler DE, Benton TG (2005) Causes and consequences of animal dispersal strategies: relating individual behaviour to spatial dynamics. *Biological Reviews* 80: 205–225. doi:10.1017/S1464793104006645. PubMed: 15921049.
- MacGregor EA (1913) The red spider on cotton. *U.S.D.A. Bur Ent Circ* 172: 22 p.
- Hussey NW, Parr WJ (1963) Dispersal of the glasshouse red spider mite *Tetranychus urticae* Koch (Acarina, Tetranychidae). *Entomol Exp Appl* 6: 207–214.
- Boykin LS, Campbell WV (1984) Wind dispersal of the two-spotted spider mite (Acari: Tetranychidae) in North Carolina peanut fields. *Environ Entomol* 13: 212–227.
- Yano S (2004) Does *Tetranychus urticae* (Acari: tetranychidae) use flying insects as vectors for phoretic dispersal? *Exp Appl Acarol* 32: 243–248.
- Li J, Margolies DC (1993) Effects of mite age, mite density, and host quality on aerial dispersal behaviour in the two-spotted spider mite. *Entomol Exp Appl* 68: 79–86.
- Osakabe MH, Isobe H, Kasai A, Masuda R, Kubota S, et al. (2008) Aerodynamic advantages of upside down take-off for aerial dispersal in *Tetranychus* spider mites. *Expl Appl Acarol* 44: 165–183.
- Bell JR, Bohan DA, Shaw EM, Weyman GS (2005) Ballooning dispersal using silk: world fauna, phylogenies, genetics and models. *Bull Entomol Res* 95: 69–114.
- Pralavorio M, Fournier D, Millot P (1989) Activité migratoire des tétranyques mise en évidence d'un rythme. *Entomoph* 34: 129–134.
- Sabelis MW (1985) Sampling Techniques. In: Helle W & Sabelis MW (eds), *Spider Mites, Their Biology, Natural Enemies and Control*, Vol. 1A. Elsevier, Amsterdam: 337–350.
- Gerson U, Smiley RL, Ochoa T (2003) *Mites (Acari) for pest control*. Blackwell Science, Oxford, United Kingdom.
- Saunyan IGM, Knapp M (2003) The effects of pruning and trellising of tomatoes (*Lycopersicon esculentum* Mill.) on red spider mite (*Tetranychus evansi* Baker & Pritchard) incidence and crop yield in Zimbabwe. *Afr Crop Sci J* 11: 269–277.

20. Sabelis MW (1991) Life-history evolution of spider mites. In: The Acari. Reproduction, Development and Life-History Strategies (Eds Schuster R & Murphy PW). Chapman & Hall, London, pp. 23–49.
21. Bonato O (1999) The effect of temperature on life history parameters of *Tetranychus evansi* (Acari:Tetranychidae). *Exp Appl Acarol* 23: 11–19.
22. Sibanda T, Dobson HM, Cooper JF, Manyangariwa W, Chiimba W (2000) Pest management challenges for smallholder vegetable farms in Zimbabwe. *Crop Prot* 19: 807–815.
23. Clotuche G, Maillieux A-C, Astudillo Fernandez A, Deneubourg J-L, Detrain C, et al. (2011) The Formation of Collective Silk Balls in the Spider Mite *Tetranychus urticae* Koch. *PLoS One* 6(4): e18854. doi:10.1371/journal.pone.0018854
24. Picano MC, Soto A, Bacci L, Fideis EG, Silva GA, et al. (2007) Controle biológico das principais pragas de hortaliças no Brasil, p.505–537. In Zambolim L (ed) *Manejo integrado de doenças e pragas hortaliças*. Viçosa, UFV, 627p.
25. Maniania NK, Bugeme DM, Wekesa VW, Delalibera Jr I, Knapp M (2008) Role of entomopathogenic fungi in the control of *Tetranychus evansi* and *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae), pests of horticultural crops. *Exp Appl Acarol* 46: 259–274.
26. Wekesa VW, Maniania NK, Knapp M, Boga HI (2005) Pathogenicity of *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* to the tobacco spider mite *Tetranychus evansi*. *Exp Appl Acarol* 36: 41–50.
27. Furtado IP, Moraes GJ, Kreiter S, Tixier M, Knapp M (2007) Potential of a Brazilian population of the predatory mite *Phytoseiulus longipes* as a biological control agent of *Tetranychus evansi* (Acari: Phytoseiidae, Tetranychidae). *Biol Cont* 42: 139–147.
28. Brito EPJ, Gondim MGC, Torres JB, Fiaboe KKM, Moraes GJ, et al. (2009) Predation and reproductive output of the ladybird beetle *Stethorus tridens* preying on tomato red spider mite *Tetranychus evansi*. *BioCont* 54: 363–368.
29. Martin T, Assogba-Komlan F, Sidick I, Ahle V, Chandre F (2010) An acaricide-treated net to control phytophagous mites. *Crop Prot* 29: 470–475.
30. Bextine B, Wayadande A (2001) Effect of insect exclusion on the incidence of yellow vine disease and of the associated bacterium in squash. *Plant Dis* 85: 875–878.
31. Hussey NW, Scopes NEA (1985) Greenhouse vegetables. In: Helle W & Sabelis MW (eds), *Spider Mites, Their Biology, Natural Enemies and Control*. Elsevier, Amsterdam Vol IB: 285–296.
32. Fellous S, Duncan A, Coulon A, Kaltz O (2012) Quorum Sensing and Density-Dependent Dispersal in an Aquatic Model System. *PLoS ONE* 7(11): e48436. doi:10.1371/journal.pone.0048436.
33. De Angelis JD, Larson KC, Berry RE, Krantz GW (1982) Effects of spider mite injury on transpiration and leaf water status in peppermint. *Environ Entomol* 11: 975–978.
34. Weeks AR, Turelli M, Hoffman AA (2000) Dispersal patterns of pest earth mites (Acari: Penthalpidae) in pasture and crops. *J Econ Entomol* 93: 1415–1423.
35. Le Goff G, Maillieux AC, Detrain C, Deneubourg JL, Clotuche G, et al. (2009) Web as a meeting point in the two spotted spider mite *Tetranychus urticae*, in: *Proceedings of 5th Meeting Ecology and Behavior* (Lyon, France). <http://hdl.handle.net/2013/ULB-DIPOT:oa:dipot.ulb.ac.be:2013/97247>
36. Yano S (2008) Collective and solitary behaviors of Two-spotted Spider Mite (Acari: Tetranychidae) are induced by trail following. *Ann Entomol Soc Am* 101(1): 247–252.
37. Agrawal AA, Vala F, Sabelis MW (2002) Induction of preference and performance after acclimation to novel hosts in a phytophagous spider mite: adaptive plasticity? *Am Nat* 159: 553–565.
38. Wertheim B (2005) Evolutionary ecology of communication signals that induce aggregative behaviour. *Oikos* 109: 117–124.

4. Conclusion

Cette étude a permis de montrer le comportement grégaire et de dispersion de *T. evansi* à faible et forte densité par rapport à *T. urticae* qui se disperse à tout moment, quelle que soit la densité de sa population. Le comportement grégaire de *T. evansi* pourrait alors faciliter la localisation et l'élimination des premiers plants infestés dans un champ afin de réduire le risque de contamination des plants voisins et de dispersion dans le reste du champ voire sur d'autres cultures. Cela suggère aussi qu'un filet imprégné avec un acaricide et placé sur les premiers plants infestés pourrait se révéler très efficace et peu coûteux car réutilisable de multiples fois pour contrôler *T. evansi*. En effet, la migration circadienne et le phénomène de dispersion par "ballooning" ne peuvent que favoriser l'efficacité des filets imprégnés d'acaricide couvrant les plants infestés.

On pourrait aussi envisager l'effet du prédateur *P. longipes* pour réguler naturellement les populations de *T. evansi* mais très peu d'informations existent sur les interactions qui pourraient exister entre *T. evansi* et son prédateur *P. longipes*. C'est pourquoi une étude sur les interactions entre *T. evansi* et son prédateur *P. longipes* s'est avérée indispensable pour développer une stratégie efficace de lutte intégrée contre ce ravageur. Ceci fera l'objet du troisième chapitre.

Interactions entre

T. evansi* et *P. longipes

CHAPITRE 4

ETUDE DES INTERACTIONS ENTRE *TETRANYCHUS EVANSI* ET *PHYTOSEIULUS LONGIPES*

Ginette Y. Azandémè-Hounmalon, Baldwin Torto, Komi K. M. Fiaboe, Sevgan Subramanian, Serge Kreiter, Thibaud Martin. Visual, vibratory and olfactory cues affect interactions between the red spider mite Tetranychus evansi and its predator Phytoseiulus longipes. Accepté dans Journal of Pest Science

1. Introduction

L'interaction entre la proie et le prédateur est une course évolutive permettant la détection et la capture optimale de la proie par le prédateur et l'évitement ou la fuite optimale de la proie en présence du prédateur (Dawkins & Krebs, 1979). La composante la plus fondamentale de cette interaction est le moyen par lequel le prédateur et la proie se détectent mutuellement avant une réelle rencontre (Dawkins & Krebs, 1979). Chez les acariens, ces interactions sont basées sur des signaux vibratoires (Hill, 2008, 2009), olfactifs, auditifs et complétées éventuellement par des informations visuelles (Uhl & Elias, 2011). Chacun de ces signaux a des propriétés spécifiques qui peuvent provenir d'une source directe (McGregor, 2005). La plupart des acariens utilisent des signaux vibratoires comme le premier sens pouvant les guider dans l'adoption d'un comportement spécifique (Elias *et al.*, 2003, 2006, 2008; Gibson & Uetz, 2008; Uetz *et al.*, 2009). Ils utilisent également les récepteurs sensoriels à travers l'olfaction et le goût pour détecter les substances volatiles afin d'évaluer le risque de prédation (Kats & Dill, 1998; Dicke & Grostal, 2001). Les prédateurs peuvent aussi produire ou libérer leurs odeurs corporelles par le biais de substances volatiles qui se répandent dans l'environnement (Brown & McDonald, 1985; Dicke & Grostal, 2001). Plusieurs études en écologie chimique ont montré que les prédateurs et les parasitoïdes étaient attirés par les composés volatiles libérés par leurs proies (Agelopoulos & Keller, 1994; Blaakmeer *et al.*, 1994; Turlings *et al.*, 1995; Dicke *et al.*, 1998, 1999; Du *et al.*, 1998; Shiojiri *et al.*, 2001). D'autres études ont également montré que la plante infestée libère des composés volatiles qui sont attractifs pour les prédateurs. C'est le cas par exemple de *P. persimilis* qui est attiré par le méthyl salicylate (MeSA) et le 3(E),7(E)-4,8,12-triméthyltridéca-1,3,7,11-tétraène libérés par la variété de tomate "Money Maker" infestée de *T. urticae* (Takabayashi & Dicke, 1993; Dicke *et al.*, 1998; Kant *et al.*, 2004). Les travaux conduits par Ferrero *et al.* (2014a et b) sur

les différents comportements alimentaires de *P. longipes* avaient montré un comportement d'attractivité de *P. longipes* pour les plants de tomate infestés de *T. evansi*. Cependant, aucune explication n'a été donnée relative aux signaux ou aux composés volatiles émis pouvant être responsables de cette attractivité.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les résultats des interactions entre la proie (*T. evansi*) et le prédateur (*P. longipes*) que nous avons étudié, avec un accent particulier sur les substances volatiles impliquées. A cet effet, plusieurs questions ont été posées: (1) Comment *T. evansi* et *P. longipes* se détectent-ils l'un par rapport à l'autre ? Est-ce par des signaux visuels, vibratoires ou olfactifs ou par une combinaison de plusieurs types de signaux ? (2) Ces différents signaux sont-ils attractifs ou répulsifs ? (3) S'ils sont attractifs, quelles sont les molécules chimiques responsables d'une telle attractivité ?

2. Matériel et Méthodes

2.1. Comportement de *Tetranychus evansi* et de *Phytoseiulus longipes*

Les comportements de *T. evansi* et *P. longipes* ont été étudiés par video tracking et les paramètres de mobilité/vitesse/distance parcourue ont été mesurés en utilisant le logiciel Ethovision 8.0 de Noldus (Noldus *et al.*, 2002). Le matériel expérimental était composé d'une boîte de Petri de 9 cm de diamètre avec des capsules transparentes et opaques de 250 mg dans lesquels étaient placées ou non des acariens femelles (Figure 13). Le fond de la boîte de Petri a été recouvert de colle à insecte que nous avons laissé sécher pendant 15 mn. Une arène carrée en papier (1 cm de côté) collée à l'aide de ruban adhésif à double face a été déposée au fond de la boîte de Petri. Pour chaque test (Figures 14a et b), 10 ♀ affamées de *T. evansi* ou *P. longipes* (mortes ou vivantes selon le cas) ont été placées dans des capsules transparentes ou opaques, perforées ou non perforées. Les capsules ont été disposées de part et d'autre de l'arène. Une femelle de *T. evansi* ou *P. longipes* a été lâchée au milieu de l'arène et suivie au video tracking pendant 5 mn. Après chaque test, la position de la boîte de Petri a été changée afin d'éviter tout effet de la lumière. Le temps (en s) passé par les individus et la vitesse moyenne (en mm / s) du mouvement ont été enregistrés. L'essai a été répété 20 fois.

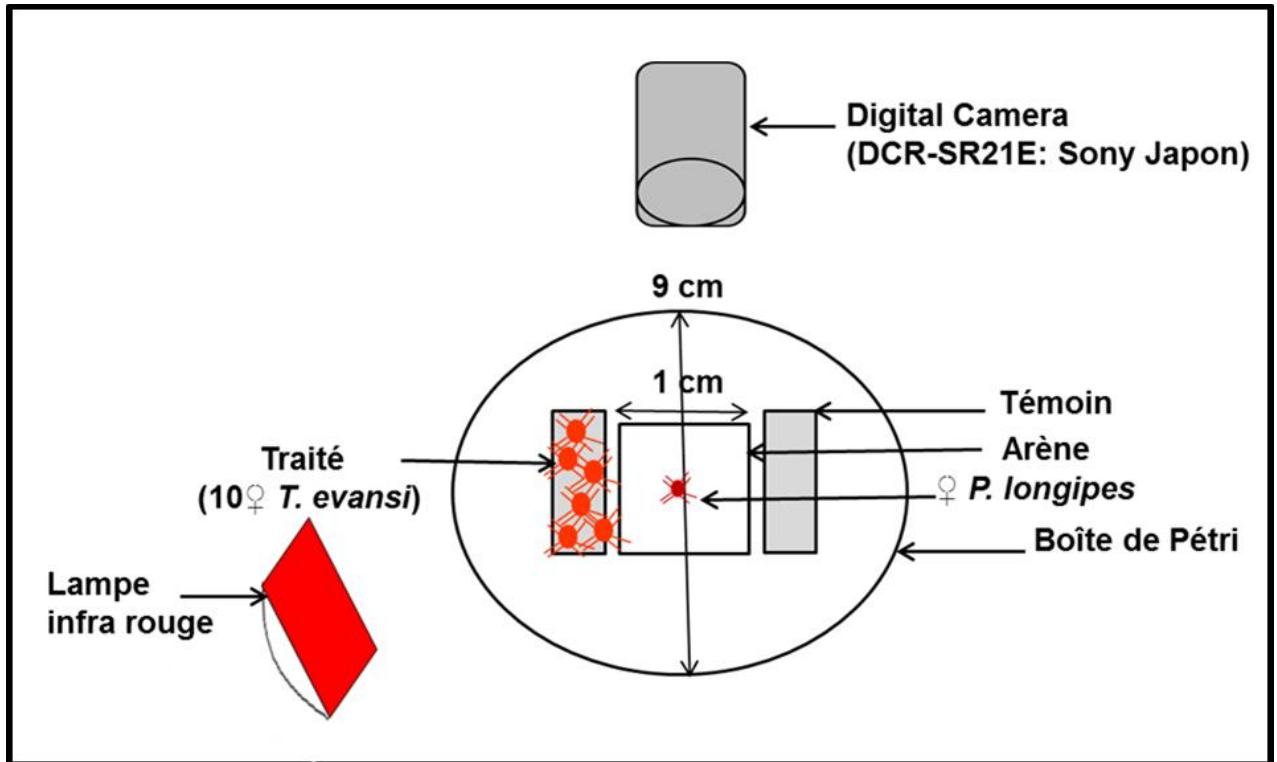


Figure 13: Dispositif expérimental du video tracking

Comportement de *P. longipes* en présence de *T. evansi*

 *P. longipes* (PI)

 *T. evansi* (Te)

Tem = *T. evansi* mort

Types de signal

1

Visuels + olfactifs + vibratoires

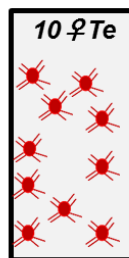


1 ♀ PI



2

Visuels + ~~olfactifs~~ + vibratoires

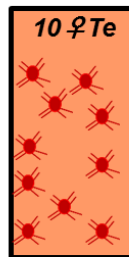


1 ♀ PI



3

~~Visuels~~ + ~~olfactifs~~ + vibratoires

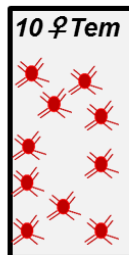


1 ♀ PI

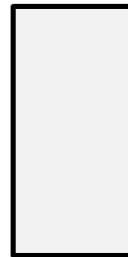


4

Visuels + olfactifs + vibratoires ~~vibratoires~~

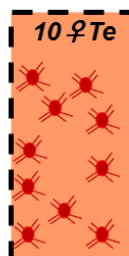


1 ♀ PI



5

~~Visuels~~ + olfactifs + vibratoires



1 ♀ PI



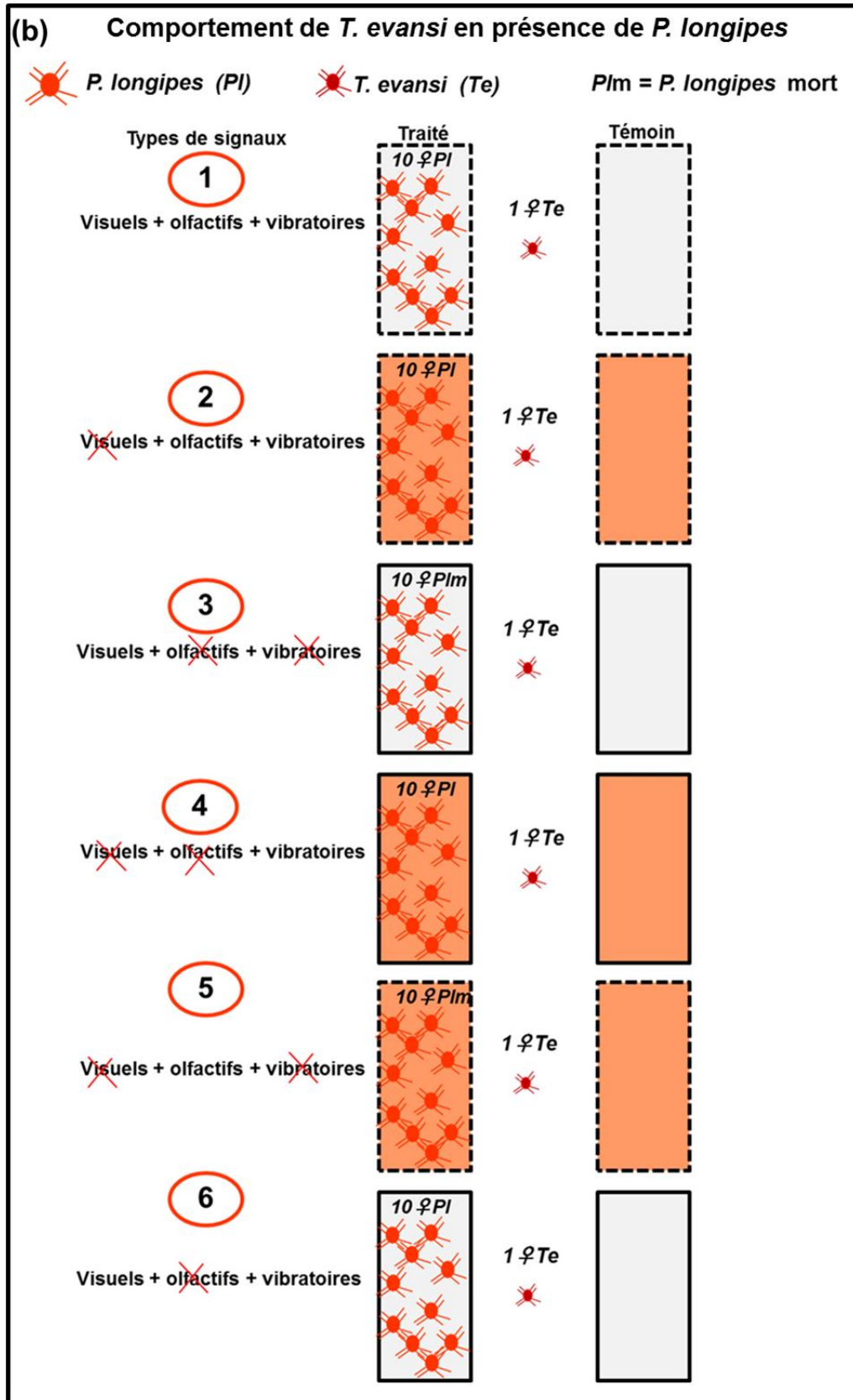


Figure 14: Différents tests montrant le comportement de (a) *P. longipes* en présence de *T. evansi* et (b) *T. evansi* en présence de *P. longipes*

2.2. Collecte et analyse des composés volatiles

Les composés volatiles de *T. evansi* (Figure 15) ont été collectés sur 100 ♀ à l'aide des fibres SPME [65 µm, PDMS / DVB (polydiméthylsiloxane-divinylbenzène)]. Les composés volatiles de la plante saine et de la plante infestée (Figure 16) ont été également collectés mais à l'aide des Super Q (Analytical Systems Research, Gainesville, FL, USA) et des pompes portables (pour plus de précision voir l'article **A3**). Trois plants de tomate ont été infestés avec 100 ♀ de *T. evansi* et gardés au laboratoire à 25±1 °C pendant trois jours pour permettre l'établissement des acariens. Dans les deux cas, les composés volatiles ont été collectés pendant 24 heures et en trois répétitions. Ces composés volatiles ont été par la suite analysés au GC-MS.

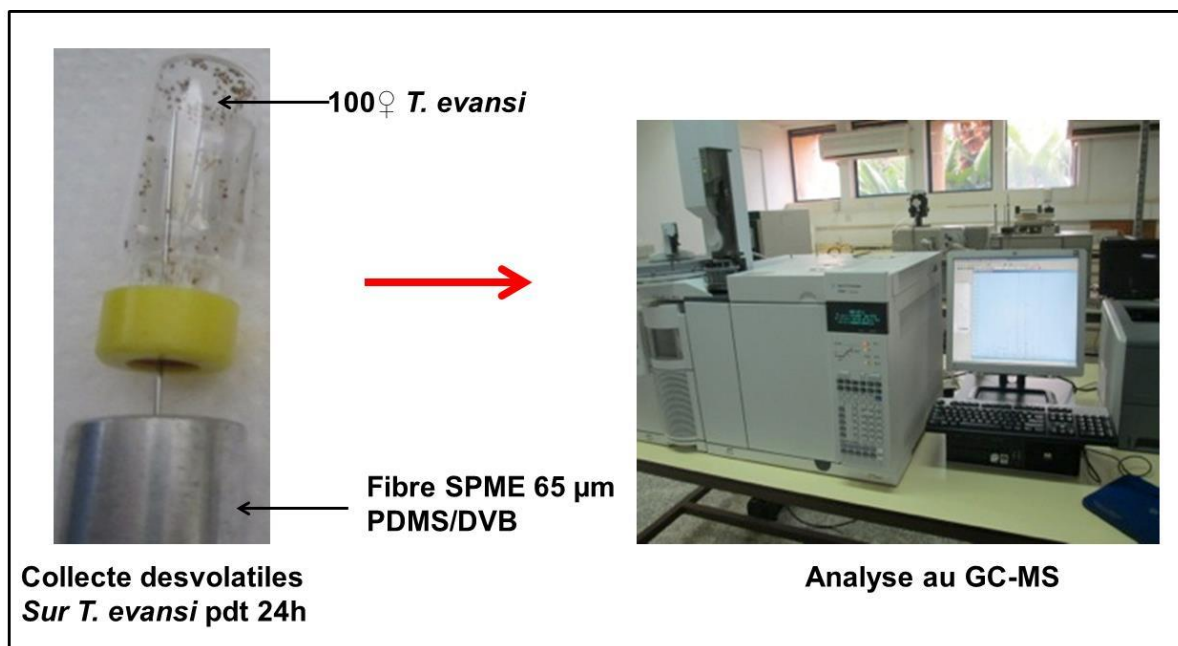


Figure 15: Collecte et identification des volatiles sur *T. evansi* (Photo: G. Azandémè-Hounmalon)



Figure 16: Collecte des composés volatiles sur plante de tomate (Photo: G. Azandémè-Hounmalon)

2.3. Olfactomètre en Y

Les différents mélanges de volatiles obtenus et les composés purs identifiés ont été testés sur les acariens avec un olfactomètre en Y (longueur des bras: 7 x 7 cm, diamètre intérieur: 1 cm) (Takabayashi & Dicke, 1992) (pour plus de détails, voir l'article **A3**). Neuf composés différents ont été testés sur *P. longipes* à 20, 2 et 0,2 µg (Dicke *et al.*, 1990): le linalol, le méthyl salicylate, le β-caryophyllène, l'acide octanoïque, l'acide décanoïque, l'acide dodécanoïque, l'acide tétradécanoïque, l'acide hexadécanoïque et l'acide octadécanoïque. Le mélange du linalol et du méthyle salicylate (1 : 1) a été également testé. Les différents composés chimiques (purs à 97 %) ont été obtenus au Laboratoire d'Ecologie Chimique du Centre International de Physiologie et d'Ecologie de l'Insecte (ICIPE). Les produits chimiques (2 mg) ont été dissous séparément dans 1 ml de dichlorométhane (solvant). Le papier filtre (2 cm x 2 cm) a été imprégné de 20, 2 et 0,2 µg de la solution. Les femelles de *P. longipes* ont été affamées pendant 2 heures et introduites une à une dans l'olfactomètre à partir de la base après 30 à 60 s pour permettre l'évaporation du solvant. Une réponse positive était enregistrée lorsque les femelles de *P. longipes* étaient orientées vers la source d'odeur tandis qu'une réponse négative était enregistrée lorsqu'elles se dirigeaient vers le témoin. Les acariens qui

n'avaient pas effectué un choix pendant les 5 mn du test étaient tout simplement retirés du système. L'essai a été conduit au laboratoire à une température de 21 ± 2 °C.

Les résultats de ces travaux figurent dans l'article A3 suivant:

3. ARTICLE A3

ARTICLE A3: Accepté dans Journal of Pest Science

VISUAL, VIBRATORY AND OLFACTORY CUES AFFECT INTERACTIONS
BETWEEN THE RED SPIDER MITE *TETRANYCHUS EVANSI* AND ITS PREDATOR
PHYTOSEIULUS LONGIPES

Ginette Yèyinou Azandémè-Hounmalon, Baldwyn Torto, Komi Kouma Mokpokpo Fiaboe,
Sevgan Subramanian, Serge Kreiter, Thibaud Martin

¹Cirad, UPR Hortsys, Montpellier, France

²*icipe*— Plant Health Division, Nairobi, Kenya

³Montpellier SupAgro, UMR CBGP, 34988 Montferrier-sur-Lez cedex, France

* Contact author: Thibaud Martin, *icipe*, P.O. Box 30772-00100, Nairobi, Kenya; Email:

thibaud.martin@icipe.org

Abstract

Phytoseiulus longipes Evans (Mesostigmata: Phytoseiidae) is an exotic predator widely used in biological control programs for the red spider mite *Tetranychus evansi* Baker & Pritchard (Acari: Tetranychidae) in East Africa. However, little is known about the cues mediating this prey/predator interaction. Here, we performed behavioural assays to test the involvement of visual, vibratory and olfactory cues using a combination of dead/living insects enclosed in either perforated or non-perforated transparent/opaque capsules. We monitored insect responses with a video tracking system and analyzed the data with Ethovision software. Our results showed avoidance behavior of *T. evansi* in the presence of live *P. longipes* through visual, vibratory and olfactory cues. *Phytoseiulus longipes* was attracted by vibratory and olfactory cues emitted by *T. evansi*. The composition of volatiles from *T. evansi* was identified by GC/MS as methyl salicylate (MeSA), linalool, β -caryophyllene, octanoic acid, decanoic acid, dodecanoic acid, tetradecanoic acid, hexadecanoic acid and octadecanoic acid. Our behavioural assays with predatory mites in a Y-tube olfactometer revealed that among the identified volatiles, only MeSA, linalool and MeSA + linalool attracted *P. longipes*. The implications of these findings for the control of *T. evansi* are discussed.

Keywords; Ethology; chemical ecology; Tetranychidae; Phytoseiidae; methyl salicylate;
linalool; tomato

Key message:

- To better understand the predator-prey interaction between *Phytoseiulus longipes* and *Tetranychus evansi*, the role of visual, vibratory and olfactory cues potentially mediating the interaction were evaluated.
- Moreover, the identification of volatiles involved in the attractiveness of *P. longipes* to *T. evansi* for possible inclusion in an Integrated Pest Management (IPM) strategy against *T. evansi* was evaluated.
- *Tetranychus evansi* avoided *P. longipes* using visual, vibratory and olfactory cues released by the predator.
- *Phytoseiulus longipes* was attracted to vibratory and olfactory cues such as linalool and methyl salicylate (MeSA) emitted by *T. evansi*
- Linalool and MeSA could be used within a semiochemical approach to improve IPM strategies against *T. evansi*.

1.1 Introduction

The red spider mite, *Tetranychus evansi* Baker & Pritchard (Acari: Tetranychidae) is an important invasive pest species of solanaceous plants in Europe and Africa (Knapp et al. 2003; Varela et al. 2003; Migeon et al. 2009; Boubou et al. 2011, 2012). This mite causes severe damage on tomato crops (*Solanum lycopersicum* Linné) in eastern and western African countries (Sibanda et al. 2000; Saunyama and Knapp 2003; Azandémè Hounmalon et al. unpublished results). Besides its invasive nature, *T. evansi* has replaced the native spider mite species, *Tetranychus urticae* Koch (Trombidiformes: Tetranychidae), *T. ludeni* Zacher (Acari: Tetranychidae) and the broad mite *Polyphagotarsonemus latus* Banks (Trombidiformes: Tarsonemidae) in Benin (Adango et al. 2007; Martin et al. 2010), hence posing new pest management challenges. Biological control of this mite in tomato plant is difficult because of its unsuitability for the development of natural enemies (Kennedy 2003; Zhang ZQ 2003; Simmons and Gurr 2005). Glandular trichomes produced by the tomato plant of the genus *Lycopersicon* (old scientific name for tomato until 2005), exude anti-feeding or noxious substances that impact negatively on biocontrol agents (Kennedy 2003). For example, direct negative effects on the search pattern and residence time of *Neoseiulus californicus* (McGregor) due to glandular trichomes on *S. lycopersicum* have been reported (Cédola et al. 2001; Kennedy 2003; Simons and Gurr 2005). Furthermore, an indirect prey mediated effect

from tomato has recently been demonstrated on *N. californicus*, probably due to the sequestration of toxic secondary metabolites from the plant by *T. evansi* (Koller et al. 2007). Several studies undertaken in the past to control *T. evansi* using *Phytoseiulus persimilis* (Athias-Henriot) and *N. idaeus* (Denmark & Muma) have not been promising (Escudero and Ferragut 2005; Escudero et al. 2005). However, a southern Brazilian population of *P. longipes* was found effective on *T. evansi* in laboratory and greenhouse assays, and subsequently, introduced into Kenya for the successful control of the pest (Fiaboe et al. 2006; Furtado et al. 2006; Ferrero et al. 2007).

The interaction between predator and prey involves an evolutionary arms race in which detection and evasion between the predator and prey profoundly affects the life history and behavioral strategies of both parties (Dawkins and Krebs 1979). Notably, a critical component of this interaction is the means by which both predator and prey detect one another prior to an encounter (Dawkins and Krebs 1979). In predators such as spiders, such interactions are facilitated by vibratory (Hill 2008, 2009), olfactory, tactile, acoustic and visual signals (Uhl and Elias 2011). Associated with each signal includes specific properties such as speed of propagation, directionality, persistence and effect of obstacles (McGregor 2005) which may emanate from a direct source. However, most spider species use vibration signals as the primary sense guiding behavior (Elias et al. 2003, 2006, 2008; Gibson and Uetz 2008; Uetz et al. 2009). Additionally, they may also use volatile and tactile chemosensory cues via olfaction and taste, respectively, to assess predation risk (Kats and Dill 1998; Dicke and Grostal 2001). In some prey/predator interactions, direct predation cues may be produced by the predators themselves such as semiochemicals derived from their body odors and released into the atmosphere, or deposited onto the substrate via their footprints (Brown and MacDonald 1985; Dicke and Grostal 2001). Semiochemicals mediating prey/predator interactions have been investigated previously in several tritrophic interactions such as predator/herbivore/plant and parasitoid/herbivore/plant interactions (Agelopoulos and Keller 1994; Blaakmeer et al. 1994; Turlings et al. 1995; Dicke et al. 1998; Du et al. 1998; Dicke et al. 1999; Shiojiri et al. 2001). In spider mite/predator interactions, previous studies have identified predator attractants as volatile blends emitted from spider mite-infested plants. For example, the predatory mite *P. persimilis* is attracted to volatiles from tomato plants infested with the two-spotted spider mite *T. urticae* (Takabayashi and Dicke 1993; Dicke et al. 1998; Kant et al. 2004). The mediating volatiles were identified as the phenolic compound methyl salicylate (MeSA) and 4,8,12-

trimethyltrideca-1,3,7,11- tetraene (Dicke et al. 1998). However, such information on the volatiles produced by tomato plants when infested by *T. evansi* and how they influence prey/predator relationship with regard to the predator *P. longipes* is unknown.

We were particularly interested in identifying the cues mediating prey/predator interaction and sought to address the following three questions: (1) Can *T. evansi* detect the presence of *P. longipes* and vice versa, and if so, does detection involve visual, vibratory or olfactory signals or a combination of these signals? (2) Do the signals elicit an attractive or avoidance response? (3) If olfaction is involved in the interaction, what are the identities of the volatiles involved in this predator behavior?

1.2 Materials and Methods

1.2.1 Plants and mites

Tomato seeds (*Solanum lycopersicum* var. 'Money Maker') (East African Seed Company, Nairobi, Kenya) were sown in rows in soil enriched with compost in plastic seedling trays. Plants (21-days-old) were transplanted into pots (22 cm diameter) each containing a mixture of red soil plus bovine manure (3: 1) and placed on benches in a greenhouse. The plants were watered daily and each pot was nourished with 3 g calcium ammonium nitrate [CAN (26 % N) from Jumbo Agroveter, Nairobi, Kenya] two weeks after transplanting. Subsequently, 10 to 15-days old plants with primary leaves unfolded were used either for the experiments or for rearing of spider mites. *Tetranychus evansi* used in this study were obtained from a regularly regenerated colony maintained in a laboratory of the International Centre of Insect Physiology and Ecology (*icipe*), Nairobi, Kenya on potted tomato plants variety 'Money Maker'. The mass cultures of *T. evansi* were maintained in a rearing room at a temperature of 25 ± 1 °C, 50 - 70% relative humidity (RH) and a 12 hr photoperiod. To obtain mites of uniform age, quiescent deutonymphs were collected from the mite culture using a fine camel hair brush and placed on tomato leaf discs. Two days later, newly emerged adult female mites were selected and used in the experiments. Before starting the experiment, they were kept in a Petri dish (9 cm in diameter) at 25 ± 1 °C and starved for 24 hr. The predatory mites *P. longipes* used in the experiment were introduced into Kenya from Brazil in 2005 (Fiaboe et al. 2006). The stock colonies were fed on tomato plants infested with *T. evansi* placed in plastic trays (10 x 15 cm) surrounded with water-saturated cotton to avoid mite escapes. Plastic trays with *P.*

longipes were placed in climate chambers at 25 ± 2 °C, $75 \pm 10\%$ RH and 16: 8 (L: D). In all experiments, we used presumably mated adult females of predatory mites, 1–2 days after the final molt (van Wijk et al. 2008). Females were kept individually in Eppendorf vials and starved for 2 hr at 23 ± 1 °C before starting the experiment since starvation levels may affect mite searching behavior (Dicke et al. 1998; Shimoda and Dicke 2000).

1.2.2 General methods of video tracking

A video tracking system with a Digital Video Camera Recorder (DCR-SR21E; Sony, Japan) and the software Ethovision 8.0 from Noldus Information Technology, The Netherlands, were used to study interactions between *T. evansi* and *P. longipes* (Noldus et al. 2002). Each experimental unit in this study consisted of a Petri dish of 9 cm diameter. Insect glue was placed in the perimeter of the Petri dish to prevent insect escape. After 5 min, a 1 square centimetre filter paper was pasted with double-sided tape on plastic and placed at the bottom of the Petri dish to serve as the observation arena (Fig. 1). For each test, 10 starved females of *T. evansi* or *P. longipes* alive or dead (fresh dead mites) were placed in a perforated or non-perforated, transparent or opaque 250 mg capsule. For each test, one capsule per side was placed on both sides of the observation arena of 1 cm^2 , and one young female of *T. evansi* or *P. longipes* released in the middle (Fig. 1). To assess the type of signal linked to the *T. evansi* behavior in the presence of *P. longipes*, we carried out five different experiments (Expts 1–5). In Expt 1, visual, olfactory and vibratory cues were tested using perforated transparent capsules containing 10 *P. longipes* females vs. an empty perforated transparent capsule. In Expt 2, olfactory and vibratory cues were tested using the perforated opaque capsules containing 10 *P. longipes* females vs. an empty perforated opaque capsule. In Expt 3, visual cues alone were tested using the non-perforated transparent capsules containing 10 *P. longipes* dead females vs. empty similar transparent capsules. In Expt 4, vibratory cues alone were tested using non-perforated opaque capsules containing 10 *P. longipes* females' vs empty similar opaque capsules. In Expt 5, visual and vibratory cues were tested using non-perforated transparent capsules containing 10 *P. longipes* females vs. empty similar transparent capsules. In each experiment, one female *T. evansi* was placed between the two capsules (Fig. 2) and its behavior recorded for 5 min using the video tracking system. After each tracking, the position of the Petri dish was changed to avoid any bias due to the position of light. In each experiment, there were 20 replicates.

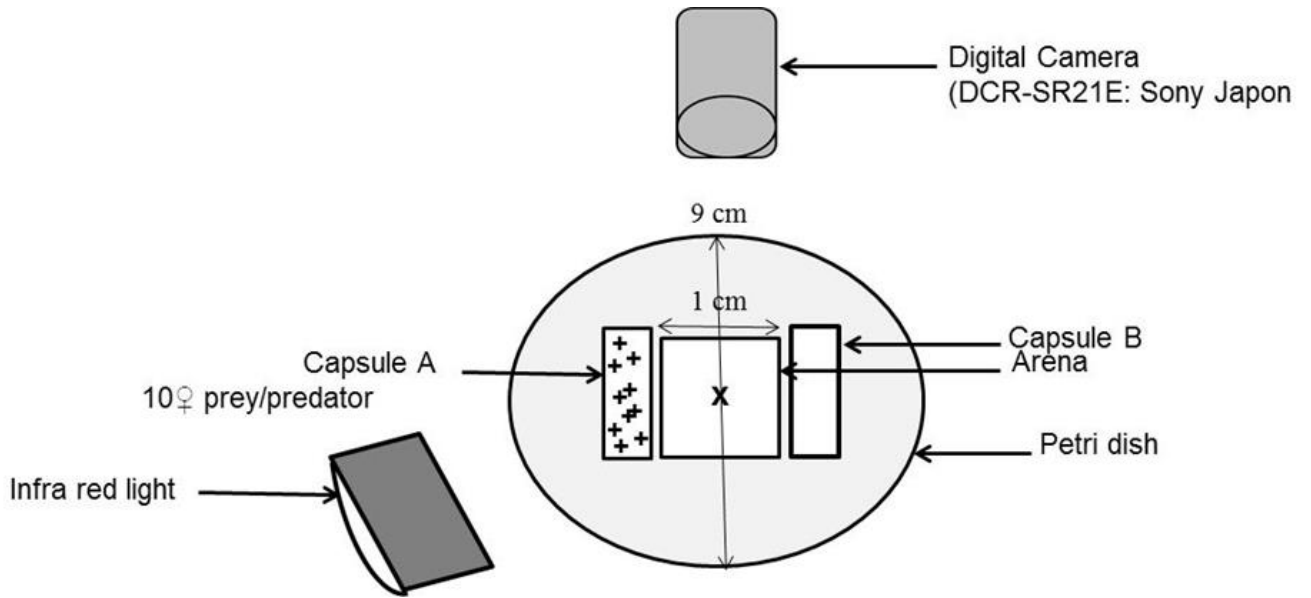


Fig. 1 Bioassay set up to study interactions between *Tetranychus evansi* and *Phytoseiulus longipes*: A Petri dish of 9 cm diameter, a square filter paper (1 cm²) placed at the bottom of the Petri dish (observation arena), and two capsules on two sides of the arena

Similarly, the behavior of *P. longipes* in the presence of *T. evansi* held in capsules described above was also studied as detailed in Figure 3 in 20 replicates. In each replicate the time spent (s) by either female *T. evansi* or *P. longipes* in the experimental arena area adjoining the different capsules was recorded. Further, the average speed (mm/s) of movement of *T. evansi* and *P. longipes* females was also recorded. The average speed of movement was estimated as distance travelled at a time 't' over the time spent.

Te: *T. evansi*; Pl: *P. longipes*; Pld: *P. longipes* dead;

T. evansi behavior in the presence of *P. longipes*

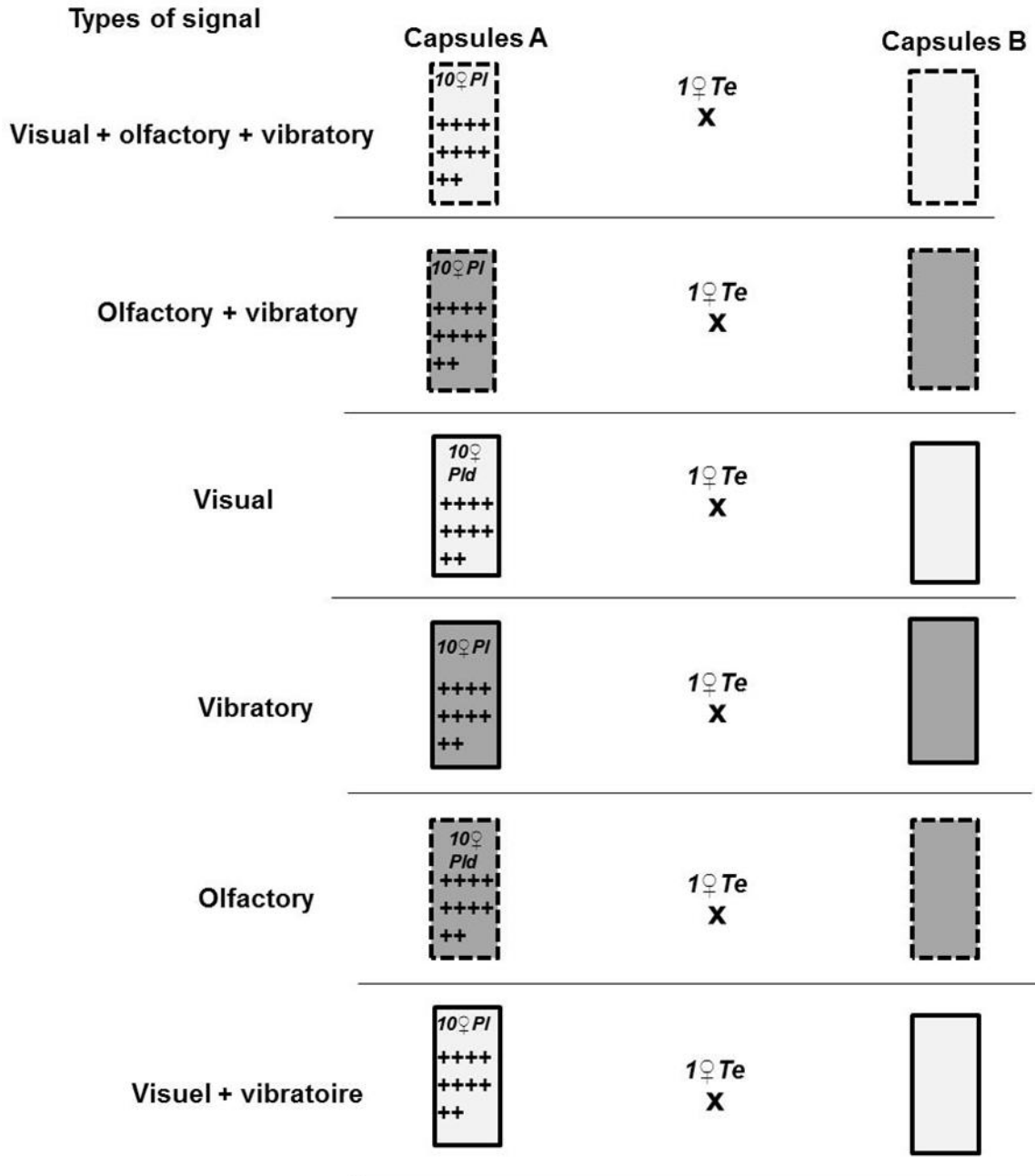


Fig. 2 Behavior of *Tetranychus evansi* in the presence of *Phytoseiulus longipes* (alive or dead) put in perforated or non-perforated, transparent or opaque capsules to assess visual, vibratory and olfactory cues. The symbol + inside the capsule indicates presence of *P. longipes*

Te: *T. evansi*; *Pl*: *P. longipes*; *Ted*: *T. evansi* dead

P. longipes behavior in the presence of *T. evansi*

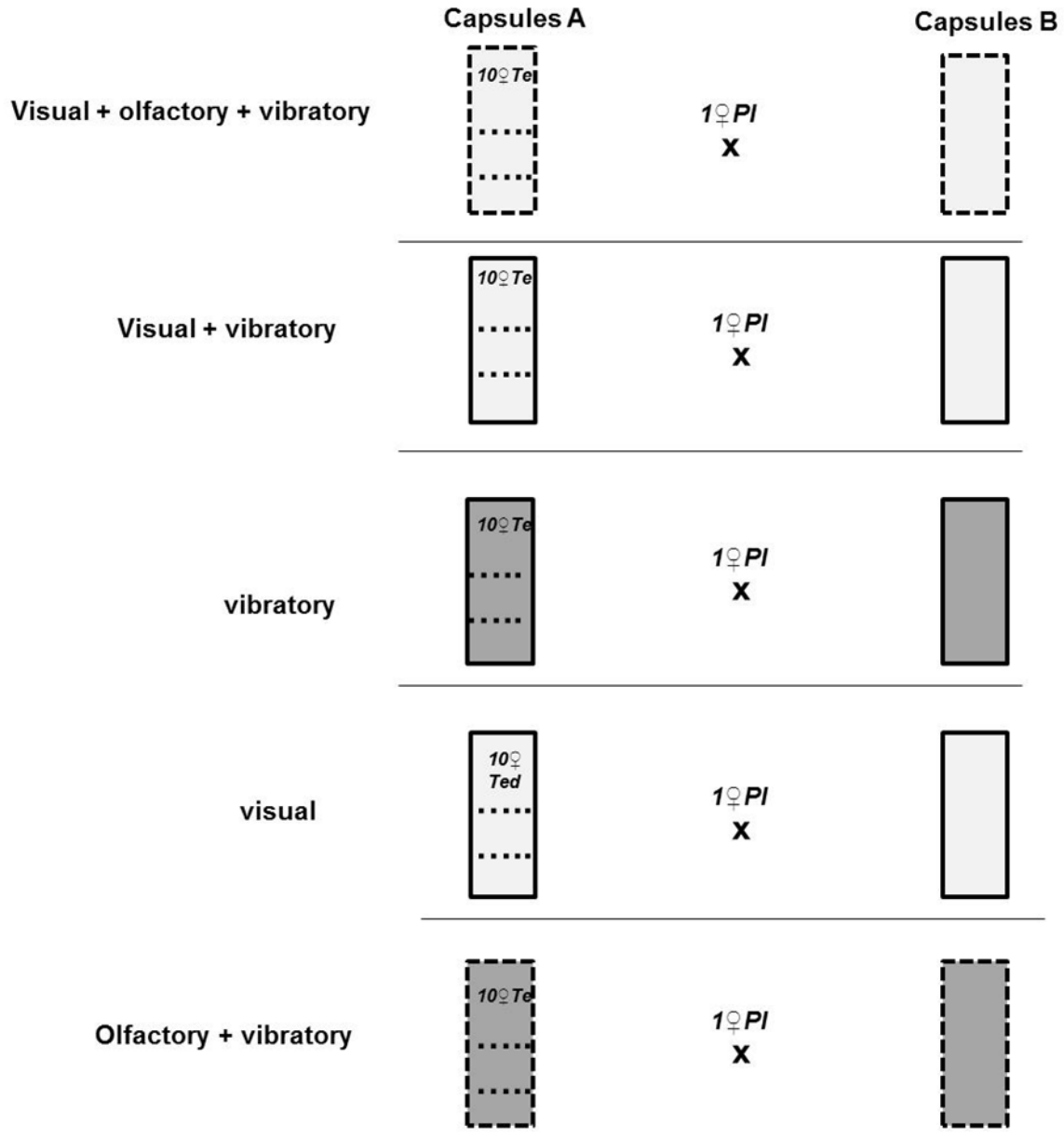


Fig. 3 Behavior of *Phytoseiulus longipes* in the presence of *Tetranychus evansi* (alive or dead) put in perforated or non-perforated, transparent or opaque capsules, to assess vibratory and olfactory cues. The symbol “.” inside the capsule indicates presence of *P. longipes*

1.2.3 Collection and analysis of volatiles

Headspace volatiles from 100 females of *T. evansi* were collected using the Solid Phase Micro Extraction fiber (SPME) (65 µm, PDMS/DVB (polydimethylsiloxane-divinylbenzene)) for 24 hr in three replicates. Volatiles from intact and mite-infested tomato plants were also collected but on Super Q traps (30 mg, Analytical Research Systems, Gainesville, FL, USA). The tomato plant was infested with 100 females of *T. evansi* and kept in the laboratory at 25 ± 1 °C for three days to allow mites to feed on the plant. Volatiles were collected using a portable volatile collection system, comprising of an air suction pump (Air Cadet vacuum/pressure station, Cole Palmer Instrument Co., USA), a flow meter, (Cole Palmer Instrument Co., USA), Reynolds® oven bag (turkey size 482 mm x 596 mm, Reynolds Kitchens, Richmond, VA, USA) and Super Q adsorbent traps. The bag was cleaned by baking it for 12 hr in an oven at 120 °C. The oven cleaned bag was placed over a branch with foliage and it was closed up around the stem of the branch with a string. Airflow into the sampling bag was provided by two Teflon® tubes. One tube pushed air into the bag over the foliage while the other tube pulled air out of the bag through the Super Q trap at the end and then through the flow meter at a rate of 265-ml/min. Volatiles were collected for 24 hr. The adsorbent trap was removed, sealed with Teflon® tape and stored in a freezer (-80 °C) until use. The experiment was replicated three times, each with three different plants. All the adsorbent traps were eluted with 100 µl of gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) grade dichloromethane (Burdick and Jackson, Muskegon, Michigan, USA) and 1 µl of the volatile extract was analyzed by GC-MS. The temperature program was initialized at 3 min with the oven temperature at 35 °C and then programmed at the rate of 10 °C/min to 280 °C and held at this temperature for 12 min. Identification of volatiles was based on the interpretation of their mass spectral fragmentation patterns in the National Institute of Standards and Technology (NIST) mass spectral data library (MSD Chemstation E.02.00.493, MS HP, USA) and verified with authentic standards where available and analyzed similarly.

1.2.4 Y-tube olfactometer and bioassays with synthetic chemicals

To test the responses of mites to odours, a Y-tube olfactometer (arm length: 7 × 7 cm, internal diameter: 1 cm) as described by Takabayashi and Dicke 1992 was used. One arm of the olfactometer was connected to the test odor, with the other arm connected to a control via

Teflon tubes. We investigated the olfactory responses of *P. longipes* to each of the nine volatile compounds characterized from *T. evansi* females: linalool, methyl salicylate, β -caryophyllene, octanoic acid, decanoic acid, dodecanoic acid, tetradecanoic acid, hexadecanoic acid and octadecanoic acid. A blend of linalool and methyl salicylate (1:1) was also tested. All these compounds were tested at three doses; 0.2 μg , 2 μg and 20 μg . The choice of dose was based on a study on attraction of the predator *P. persimilis* to linalool (Dicke et al. 1990). The synthetic samples were separately dissolved in dichloromethane to obtain the concentration of 2 mg/ ml, 0.2 mg/ ml and 0.02 mg/ ml of dichloromethane solutions). Aliquots (10 μl of each concentration corresponding to 0.2 μg , 2 μg and 20 μg of dose) of diluted chemicals were used as sample odor sources after evaporation of their solvent carriers. In each experiment, 10 μl of dichloromethane were used as a control odor source. The filter paper (2 cm x 2 cm) was impregnated with 0.2 μg , 2 μg or 20 μg of each compound and placed in the last section of one arm of the Y-tube olfactometer; a similar dimension of filter paper loaded with equivalent volume of solvent served as control. A new filter paper was used for each mite and for each dose of compound and blend tested. A predatory mite was introduced into the olfactometer after 30 to 60 s after solvent evaporation. Adult females of *P. longipes*, starved for 2 hr, were introduced singly at the entrance of the trunk of the Y-tube and observed for 5 min. A positive response of attraction to the odor stimulus was recorded when the female oriented itself towards the odor source by reaching the far end of the arm within 5 min from the start of the experiment. A negative response of avoidance was recorded for those mites that followed the control air stream in the opposite arm. Mites that walked up and down without reaching any of the arms within 5 min were considered non-responsive. Odor sources were interchanged between the arms of the Y-tube after every set of five mites to compensate any influence of unforeseen asymmetric aspects of the set-up. All olfactometer experiments were conducted at 21 ± 2 °C.

1.2.5 Synthetic chemicals

Linalool, methyl salicylate, β -caryophyllene, octanoic acid, decanoic acid, dodecanoic acid, tetradecanoic acid, hexadecanoic acid and octadecanoic acid were purchased from Sigma-Aldrich (3050 Spruce Street, St. Louis, Missouri 63103 USA) (>97% purity).

1.3 Data analysis

Video clips of mite movement were analyzed using EthoVision XT software (v. 8.0; Noldus Information Technology, Wageningen, the Netherlands) (Noldus et al. 2002). The observation arena was divided into two areas (each 0.5 and 1 cm), with area A close to the treated area and area B close to the control area (Fig. 1). Movement was recorded with 5 video frames per second, and the mite was tracked by dynamic subtraction. In this method, the program compared each sampled image with a reference image that is updated regularly. Image processing algorithms are applied to detect the mite against the background and to extract relevant image features. During data acquisition, EthoVision displays the live video image, tracking statistics (elapsed time, number of samples), and the x, y co-ordinates of the mite (Noldus et al. 2002). The total time spent in each area (in seconds) and the mean speed (mm/s) was recorded. The data from video tracking for assessing the behavior of *T. evansi*/*P. longipes* were analyzed by independent sample *t*-test comparing the mean of time spent by the prey/predator in the area close to capsule A and the area close to capsule B at significant level of $P < 0.05$. Data from Y-tube olfactometer assays were analyzed using a χ^2 test to compare the number of mites attracted to *T. evansi* odor from control and to various compounds. All analyses were performed using R software (R Development Core Team 2010). To compare the time spent in each area, we used Student's *t*-test.

2.1 Results

2.1.1 Behavior of *Tetranychus evansi* in the presence of *Phytoseiulus longipes*

In general, *P. longipes* visual, vibratory and olfactory cues influenced the behavior of females of *T. evansi*. Females of *T. evansi* spent less time and showed slow movements in the control area as compared to the treatment area when presented with different combinations of cues. For example, *Tetranychus evansi* females significantly avoided walking toward the treated capsule compared to the untreated one (Fig. 2, Table 1). Furthermore, when offered visual, vibratory and olfactory cues separately, *T. evansi* significantly avoided walking within the area near the treated capsule compared to the area near the untreated capsule based on both the time spent and speed of movement (Fig. 2, Table 1). The visual, vibratory and olfactory cues offered by the predatory mites were found to be key determinants for the choices made by *T. evansi*. However, the evasion behavior of *T. evansi* was significantly stronger ($P <$

0.001) in the presence of two or three combined cues than when presented with an individual cue alone (Fig. 2, Table 1).

Table 1 *Tetranychus evansi* behavior in the presence of *Phytoseiulus longipes* through visual, olfactory and vibratory cues recorded using a video tracking system for 5 min in 20 replications

Signals	Types of capsule	Parameters	Areas	Means	
Visual + olfactory + vibratory	Perforated/transparent	Time spent (s)	capsule A	108.93 ± 66.85	
			capsule B	189.86 ± 64.83	
		Speed (mm/s)	capsule A	0.95 ± 0.17	
			capsule B	0.48 ± 0.16	
			<i>P-value</i>		< 0.001***
Olfactory + vibratory	Perforated/opaque	Time spent (s)	capsule A	108.68 ± 34.92	
			capsule B	151.61 ± 50.39	
		Speed (mm/s)	capsule A	1.09 ± 0.21	
			capsule B	0.68 ± 0.21	
			<i>P-value</i>		< 0.001***
Visual	Non-perforated/transparent (with dead mites)	Time spent (s)	capsule A	98.98 ± 34.38	
			capsule B	135.49 ± 59.36	
		Speed (mm/s)	capsule A	1 ± 0.21	
			capsule B	0.87 ± 0.13	
			<i>P-value</i>		0.02*
Vibratory	Non-perforated/opaque	Time spent (s)	capsule A	94.20 ± 32.44	
			capsule B	129.14 ± 63.99	
		Speed (mm/s)	capsule A	1.03 ± 0.23	
			capsule B	0.80 ± 0.10	
			<i>P-value</i>		0.02*
olfactory	Perforated/opaque (with dead mites)	Time spent (s)	capsule A	121.08 ± 60.03	
			capsule B	162.09 ± 66.14	
		Speed (mm/s)	capsule A	1.25 ± 0.30	
			capsule B	0.81 ± 0.15	
			<i>P-value</i>		0.03*
Visual + vibratory	Non-perforated/transparent	Time spent (s)	capsule A	101.55 ± 30.56	
			capsule B	198.65 ± 67.56	
		Speed (mm/s)	capsule A	1.08 ± 0.35	
			capsule B	0.52 ± 0.10	
			<i>P-value</i>		< 0.01**

Mean of time and speed \pm standard deviation ($v > 0.1$ mm/s).

*** $0.0001 < P < 0.001$; ** $0.001 < P < 0.01$; * $0.01 < 0.05$; *n.s.* $P \geq 0.05$).

Table 2 *Phytoseiulus longipes* behavior in the presence of *Tetranychus evansi* through visual, olfactory and vibratory signals recorded using a video tracking system for 5 min in 20 replications

Signals	Types of capsule	Parameters	Areas	Means
Visual + olfactory + vibratory	Perforated/transparent	Time spent (s)	capsule A	182.96 \pm 33.75
			capsule B	119.09 \pm 28.40
			<i>P-value</i>	< 0.001***
		Speed (mm/s)	capsule A	0.45 \pm 0.14
			capsule B	1.40 \pm 0.30
			<i>P-value</i>	< 0.001***
Visual + vibratory	Non-perforated/ transparent	Time spent (s)	capsule A	173.36 \pm 30.20
			capsule B	132.42 \pm 30.22
			<i>P-value</i>	0.03*
		Speed (mm/s)	capsule A	0.48 \pm 0.19
			capsule B	0.86 \pm 0.22
			<i>P-value</i>	0.03*
Vibratory	Non-perforated/ opaque	Time spent (s)	capsule A	172.55 \pm 29.45
			capsule B	147.65 \pm 29.45
			<i>P-value</i>	0.03*
		Speed (mm/s)	capsule A	0.40 \pm 0.19
			capsule B	0.92 \pm 0.33
			<i>P-value</i>	0.02*
Visual	Non- perforated/transparent (with dead mites)	Time spent (s)	capsule A	148.55 \pm 29.45
			capsule B	151.65 \pm 29.45
			<i>P-value</i>	0.79 <i>n.s.</i>
		Speed (mm/s)	capsule A	0.92 \pm 0.38
			capsule B	1.22 \pm 0.40
			<i>P-value</i>	0.46 <i>n.s.</i>
Olfactory + vibratory	Perforated & opaque	Time spent (s)	capsule A	186.76 \pm 36.52
			capsule B	140.20 \pm 26.46
			<i>P-value</i>	< 0.01**
		Speed (mm/s)	capsule A	0.44 \pm 0.20
			capsule B	1.24 \pm 0.45
			<i>P-value</i>	< 0.01**

Mean of time and speed \pm standard deviation ($v > 0.1$ mm/s).

*** $0.0001 < P < 0.001$; ** $0.001 < P < 0.01$; * $0.01 < 0.05$; *n.s.* $P \geq 0.05$).

2.1.2 Behavior of *Phytoseiulus longipes* in the presence of *Tetranychus evansi*

In the presence of *T. evansi*, *Phytoseiulus longipes* females were significantly attracted to the treated capsule compared to the untreated one (Fig. 3, Table 1). In response to vibratory cues alone, *P. longipes* significantly preferred walking within the area near the treated capsule compared to the area near the untreated capsule. In the presence of visual cues alone, no significant difference was observed in the movement of *P. longipes* between the area near the treated and untreated capsule (Fig. 3, Table 2). Overall, the olfactory and vibratory cues offered by the prey were found to be key determinants for the choices made by *P. longipes*. Likewise, the attractiveness of *P. longipes* to the pest was significantly stronger ($P < 0.01$) when a combination of two or three cues was presented to it than when offered the individual cues alone (Fig. 3, Table 2).

These results obtained in the Petri-dish arena assays were confirmed in the Y-tube olfactometer assays using odor treatments from *T. evansi* and controls. *Phytoseiulus longipes* were significantly attracted (76%) to the tube receiving the odor from the *T. evansi* compared to the tube receiving the air control ($\chi^2 = 32.67$, $df = 1$, $P < 0.001$).

2.2 Analysis of volatiles

GC/MS analysis of SPME- and Super Q-captured volatiles from undamaged tomato plants, *T. evansi*-damaged tomato plants and *T. evansi* females are given in Table 3 showing qualitative differences. Sixteen compounds were identified in the volatiles of undamaged tomato plants, 27 in the volatiles from *T. evansi*-damaged tomato plants, and 11 in the volatiles of *T. evansi* females. Of the 11 components in the volatiles of *T. evansi*, the identities of 9 components were confirmed using authentic standards including linalool, methyl salicylate, β -caryophyllene, octanoic acid, decanoic acid, dodecanoic acid, tetradecanoic acid, hexadecanoic acid and octadecanoic acid (Table 3, Fig. 4). Linalool, methyl salicylate, epi- α -funebrene and β -caryophyllene were also identified in the volatiles captured from *T. evansi*-

damaged tomato plants but not from the volatiles of undamaged plants (Table 3). epi- α -Funebrene was tentatively identified based on its mass spectral fragmentation pattern.

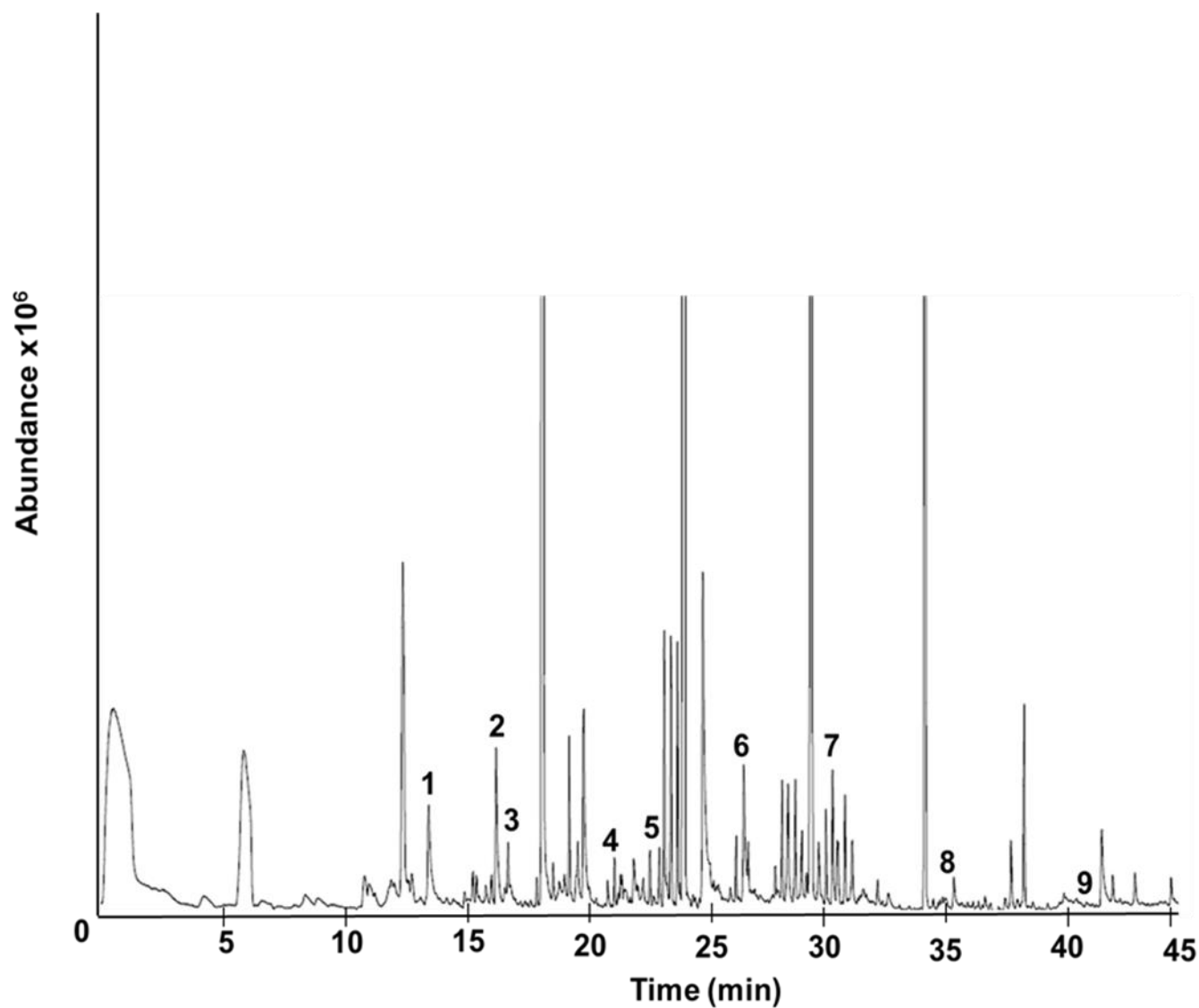


Fig. 4 GC/MS profile of volatiles collected from *Tetranychus evansi*. The number inside the chromatogram indicates the different compounds identified: linalool (1); octanoic acid (2); methyl salicylate (3); decanoic acid (4); caryophyllene (5); dodecanoic acid (6); tetradecanoic acid (7); hexadecanoic acid (8); octadecanoic acid (9)

Table 3 GC/MS identification of volatiles collected from *Tetranychus evansi* and those collected from undamaged and damaged tomato plant. Identification based on comparison of retention times (RT) with mass spectral library data only and confirmed with authentic samples

	RT (min)	Name	Undamaged	Damaged	<i>T. evansi</i>
1	6.49	Hexanal	+	+	-
2	7.94	(<i>E</i>)-2-Hexenal	+	+	-
3	8.01	(<i>Z</i>)-3- Hexenol	-	+	-
4	8.36	Hexanol	-	+	-
5	9.791	α -Pinene	+	+	-
6	11.038	β -Pinene	-	+	-
7	10.411	Mesitylene	-	+	-
8	10.586	<i>ortho</i> -Cymene	+	+	-
9	10.814	(<i>E</i>)-Isolimonene	+	-	-
10	11.015	Myrcene	+	-	-
11	11.025	(<i>E</i>)-Prenyl limonene	-	+	-
12	11.195	α -Terpinene	-	+	-
13	11.201	δ -Carene	+	+	-
14	11.265	α -Phellandrene	+	+	-
15	11.751	β -Phellandrene	+	+	-
16	11.751	Sabinene	-	+	-
17	12.084	(<i>E</i>)- β -Ocimene	+	+	-
18	12.270	γ -Terpinene	+	+	-
19	12.798	Terpinolene	+	+	-
20	14.389	Naphthalene	-	+	-
21	14.443	Linalool	-	+	+
22	14.547	Methyl salicylate	-	+	+
23	16.635	δ -Elemene	+	+	-
24	16.994	Octanoic acid	-	-	+
25	17.175	α -Cubebene	-	+	-
26	17.376	β -Elemene	+	-	-
27	17.636	Longifolene	-	+	-
28	17.690	epi- α -Funebrene	-	+	+
29	17.718	α -Cedrene	+	+	+
30	17.779	β -Caryophyllene	-	+	+
31	18.205	α -Humulene	+	-	-
32	18.232	Linalyl propanoate	-	+	-
33	21.996	Decanoic acid	-	-	+
34	26.869	Dodecanoic acid	-	-	+
35	31.280	Tetradecanoic acid	-	-	+
36	35.316	Hexadecanoic acid	-	-	+

2.3 Bioassays with synthetic chemicals

In choice tests with all the three doses tested, *P. longipes* females significantly preferred linalool and methyl salicylate and the 1:1 blend of linalool and methyl salicylate ($P > 0.05$), while it did not show any significant preference for the other compounds namely, β -caryophyllene, octanoic acid, decanoic acid, dodecanoic acid, tetradecanoic acid, hexadecanoic acid and octadecanoic acid (Fig. 5A, B, C).

3.1 Discussion

This study investigated the prey/predator interaction using different combinations of cues: visual, vibratory and olfactory, olfactory and vibratory, visual and vibratory from live *P. longipes* females, and found avoidance in *T. evansi*. Interestingly, a similar behavior was observed in *T. evansi* females when presented separately with visual, vibratory and olfactory cues from *P. longipes*. These results suggest that *T. evansi* uses visual, vibratory and olfactory cues independently or simultaneously to detect *P. longipes* in agreement with the findings by Rosier and Langkilde (2011). In fact, visual structures in *Tetranychus* spp. are well developed by the presence of eyes and other photoreceptive setae (Evans 1992). For instance, in *T. urticae*, the biconvex anterior eye acts as a scanning-point detector for green and ultraviolet light, while the slightly convex posterior element receives only near ultraviolet signals and apparently is non-directional (Alberti and Crooker 1985; Evans 1992). Hence, green and ultraviolet signals emitted from *P. longipes* would readily be detected by *T. urticae* leading to an avoidance behavioral response.

The fact that *T. evansi* responded to visual and vibrational cues from *P. longipes* suggests that the spider mite can maximize its chances of survival in the presence of the predator in different ways. Vibrational cues from predator movement on a substrate may provide sufficient cues for potential prey to adopt defensive strategies. Orientation towards a vibration source has been well studied in spider mites (Barth 1998, 2002a, 2002b). For example, in behavioral studies of *Cupiennius salei* (Keyserling), the two moveable plates in which the

legs were vibrated with different time delay or different amplitudes, turned towards the leg, which received a stronger or earlier stimulus (Hergenröder and Barth 1983). The response to vibration cues has also been reported in the leafminer, *Phyllonorycter malella* (Gerasimov) which responded evasively to these cues produced by the parasitoid wasp *Sympiesis sericeicornis* (Nees) (Djemai et al. 2001). Aphids on the other hand, are known to drop from a branch in response to vibration cues produced by some predators (Losey and Denno 1998). The prey can also use chemical cues to detect and avoid predators (Dicke and Grostal 2001). In *T. urticae*, that innate threat sensitive anti-predator behavior (repellence in response to olfactory cues from predators) is well documented (Grostal and Dicke 2000; Skaloudová et al. 2007, Fernández Ferrari and Schausberger 2013). In the present study, visual, vibratory and olfactory cues from the predator influenced the behavior of the pest mite, *T. evansi*.

On the other hand, exposure of different combinations of visual, vibratory and olfactory cues from *T. evansi* females attracted *P. longipes*. Interestingly, vibratory cues alone from *T. evansi* attracted the predator *P. longipes*, while visual cues alone did not influence attraction. This finding suggests that *P. longipes* perceives vibratory and olfactory cues independently or in combination from the mite to detect it. While the role of vibratory cues in mediating behavior of predatory mites is less known, studies with the European sawfly, *Hemichroa crocea* (Geoffroy) indicate that the predator could detect the vibrational cues produced by the pest (Cocroft and Hamel 2010). Similarly, Pfannenstiel et al. (1995) found that the predatory pentatomid, *Podisus maculiventris* (Say) perceives vibrations produced by the caterpillar, *Plathypena scabra* (Fabricius), a common prey and orients towards the source. While *P. persimilis* lacks eyes, it detects chemical cues from its prey using the sensory receptors on its legs and palps at both short and relatively long distances (Dicke et al. 1990). Electrophysiological tests conducted on the sensory field of the first tarsus in *P. persimilis* revealed that two or four known components of a volatile kairomone emitted by lima bean plants infested with *T. urticae* were used by the predator in distant prey location (De Bruyne et al. 1991) and confirmed in a recent study by Sarmiento et al. (2011) of a predator's ability to detect its prey based on olfaction. In their study, Ferrero et al. (2014a, b) showed a strong attractiveness of *P. persimilis* to leaf discs of tomato or bean pre-infested by *T. urticae* than clean discs. Several other studies have shown that *P. persimilis* is attracted to blends of herbivore induced plant volatiles (HIPVs) emitted by attacked plants (Takabayashi et al. 2000; Kant et al. 2004; de Moraes and Mescher 2004; Kant et al. 2008; van Wijk et al. 2008;

Hare 2011). Our results show that *P. longipes* spent more time at low speed of movement to capsules containing *T. evansi*. This finding suggests the involvement of volatiles mediating attraction as observed by Nelson and Jackson (2011a and b) using predatory spiders. Kairomones that signal the availability of prey may represent any volatile cue that is released from potential prey. As such, predators may exploit any chemical substance that informs the presence of potential prey (Uhl 2013). Further the differences in the evasive or attractive behavior observed in *T. evansi* and *P. longipes* might be due to the quality and quantity of the kairomonal signal released, which needs further investigation.

This study also found a diversity of chemicals in the volatiles from undamaged tomato plants, *T. evansi*-damaged tomato plants and *T. evansi* females. Although we used two different headspace sampling techniques, that is, entrainment of volatiles on SPME fibre and Super Q, in qualitative terms, they did not appear to have affected the composition of the volatiles collected. The chemicals found in volatiles from *T. evansi*-damaged tomato plants were also identified in the volatiles of *T. evansi*, including the phenolic compound MeSA, the monoterpene linalool and several fatty acids.

Linalool, a plant essential oil has a wide range of bioactivity. It has insecticidal properties (Ryan and Byrne 1988; Weaver et al. 1991) and as the main component in the headspace of ripe peach fruit (Park et al. 2005; El-Sayed et al. 2014), it is repellent to aphids, mites and thrips (Koschier et al. 2007; Ulland et al. 2008; Mallinger et al. 2011), *Aedes aegypti* (Linnaeus), the mosquito vector of Dengue (Dekker et al. 2011) and the whitefly *Bemisia tabaci* (Gennadius) (Delétré et al. 2015). It is also an effective pesticide for the control of ticks, fleas, and the mite *Tyrophagus putrescentiae* (Schrank), tephritid fruit flies *Ceratitis capitata* (Wiedemann) and *Bactrocera dorsalis* (Hendel) (Hink and Duffey 1990, Sanchez-Ramos and Castanera 2001; Chang et al. 2009) and inhibits feeding, oviposition and egg hatching in the housefly, *Musca domestica* (Linnaeus) (Sharma and Saxena 1974; Maganga et al. 1996). It has been demonstrated to reduce the presence of female mosquitoes by almost twice (Muller et al. 2008a, b) and indoors it repels mosquitoes by 93% (Muller et al. 2009). Methyl salicylate (MeSA) is synthesized from salicylic acid (SA), a phytohormone that contributes to plant systemic resistance defenses. Both are key compounds in the shikimic acid pathway and are involved in the induction of direct and indirect plant defenses (Dicke and Hilker 2003). A previous study suggested that as part of plant defense response, MeSA

induces an oxidative burst in sunflower seedling roots (Garrido et al. 2009) and is produced by various plants in response to herbivore damage (Van Den Boom et al. 2004; Gadino et al. 2012) and also attracts natural enemies of mites including *P. persimilis*, *Aphis glycines* (Matsumura) (Dicke et al. 1990; Mallinger et al. 2011), *Chrysopa nigricornis* (Burmeister), *Hemerobius* sp. (Linnaeus), *Deraeocoris brevis* (Akbulatova), *Stethorus punctum picipes* (Casey), and *Orius tristicolor* (White) (James and Price 2004). Snoeren et al. (2010) showed that caterpillars of *Pieris rapae* (Linnaeus) feeding on methyl salicylate containing sheets were more likely to be infected by *Diadegma semiclausum* (Hellen), a parasitic wasp.

Our detection of fatty acids in the volatiles is not surprising. They are essential macromolecules present in all living organisms (Kachroo and Kachroo 2009) and in a previous study they were identified in the essential oils of leaves and berries of another solanaceous plant, *Solanum sarrachoides* (Sendtn) (Murungi et al. 2013) and shown to play significant roles in pathogen defense (Kachroo and Kachroo 2009).

The volatiles released by undamaged tomato plants were dominated by the terpenes (*E*)-isolimone, myrcene, α -humulene and β -elemene. Although their biological role was not investigated in this study, terpenes are known to play a variety of roles in mediating antagonistic and beneficial interactions among organisms such as conveying messages to conspecifics and mutualists regarding the presence of food, mates and enemies (Gershenson and Dudareva 2007). Their absence in damaged plants and *T. evansi* volatiles could be due to the down-regulation of tomato defenses by *T. evansi* as suggested by Sarmiento et al. (2011) and Alba et al. (2015).

Noteworthy, of the nine volatiles identified, only MeSA, linalool and the mixture MeSA + linalool elicited attraction in *P. longipes*. MeSA and linalool are known attractants for the related predatory arthropod *P. persimilis* (Dicke et al. 1990; Scutareanu et al. 1997; James 2003; De Boer and Dicke 2004; De Boer et al. 2004). It is possible that the other components, β -caryophyllene, octanoic acid, decanoic acid, dodecanoic acid, tetradecanoic acid, hexadecanoic acid and octadecanoic acid in the volatiles, which did not elicit attraction and are less volatile compared to MeSA and linalool, could act as a slow release system for the two attractive components in the total volatile blend for the predator. There is also a possibility that blends of some of these components could elicit attraction in the predator

which would require further research. As noted by Kant et al. (2004) in their study, tomato plants infested with the two-spotted spider mite *T. urticae* release linalool and MeSA. Thus it is possible that the complex tomato plant/*T. evansi* interaction may be the source of these components detected in the volatiles from *T. evansi* as indicated by our GC/MS data.

Studies carried out by James and Price (2004) in central South of USA states and James (2003a, b, 2005) have shown that such predators like *Geocoris pallens* (Stal), *C. nigricornis*, *S. punctum picipes*, *D. brevis* and *O. tristicolor* were attracted by MeSA diffuser which significantly reduced mite populations in the grapes and hops fields. Volatile compounds such as linalool and MeSA, could also be release by companion plants that could be associated to crops. Indeed, over 200 species of plants produce linalool, mainly from the families Lamiaceae (mint, basil, thyme) (Lee et al. 2005), Lauraceae (laurel, cinnamon, rosewood) (Letizia et al. 2003; Sampaio et al. 2012), Rutaceae (citrus family) (Sadgrove et al. 2014), Apiaceae (coriander) (Jamil et al. 2014), and Poaceae (palmarosa) (Olonisakin 2010). Companion crops could be identified from these plants to potentially aid in the recruitment of the predatory mite family Phytoseiidae against target tetranychid mites in several solanaceous crop systems, including tomatoes. In their study on the repellent properties of plant extracts, Delétré et al. (2015) showed that coriander *Coriandrum sativum* (Linnaeus) essentially containing linalool (72%) had repellent properties against the whitefly *B. tabaci* a major pest of tomato. The use of coriander as a companion plant could have a double benefit effect of repelling pest *B. tabaci* and attraction of predatory mites. Methyl salicylate is also produced in plants of the genera *Gaultheria* (Zhang et al. 1999 2011) and *Betula* (Freysdottir et al. 2011). The presence of these naturels diffusers in tomato crops could not only attract the target predators like *P. longipes* but also other species such as *P. persimilis*. The attractive properties of linalool and MeSA could be used to develop effective integrated strategies against *T. evansi*.

4.1 Conclusion

Tetranychus evansi and *P. longipes* responses to each other were influenced by a combination of, or individually to, visual, vibratory and olfactory cues. Behavioral responses to a combination of cues were stronger in *T. evansi* and *P. longipes* than to the individual cues indicating possible synergism between the cues. Volatile compounds responsible for *T. evansi*

escaping behavior in the presence of *P. longipes* were not identified in the present study. Further studies are therefore warranted to elucidate this behavior in order to exploit it in IPM programs as suggested by Egger and Koschier (2014). Linalool and MeSA could be used in integrated and biological pest management strategies by combining them with other control measures. They should be considered for tests in laboratory and greenhouse studies as diffusers for potential reduction of *T. evansi* populations as suggested by (Attia et al. 2013).

5.1 Authors contribution

GYAH, TM, KKMF and SS conceived and designed research. GYAH conducted experiments, analyzed data and wrote the manuscript. BT gave us support in chemical ecology. All authors read and approved the manuscript.

6.1 Acknowledgements

This study was made possible by the generous support of the American people through the U.S. Agency for International Development (USAID) under Award No. EPP-A-00-09-00004 with additional support from Michigan State University and Cirad. The study also obtained financial support from the International Centre of Insect Physiology and Ecology (*icipe*). The contents are the responsibility of Horticulture Collaborative Research Support Program (HortCRSP) project BioNetAgro investigators and do not necessarily reflect the views of USAID, the U.S. Government or *icipe*.

7.1 References

- Adango E, Onzo A, Hanna R, Atachi P, James B (2007) Mite pests of major importance on indigenous leafy vegetables in Benin: the search for appropriate control strategies. *Acta Hort* 752:311–318.
- Agelopoulos NG, Keller MA (1994) Plant-natural enemy association in the tritrophic system, *Cotesia rubecula*-*Pieris rapae*-Brassicaceae (Cruciferae): I. Sources of infochemicals. *J Chem Ecol* 20:1725–1734. doi: 10.1007/BF02059894.
- Alba JM, Schimmel BC, Glas JJ, Ataide L, Pappas ML, Villarroel CA, Schuurink RC, Sabelis MW, Kant MR (2015) Spider mites suppress tomato defenses downstream of jasmonate and salicylate independently of hormonal crosstalk. *New Phytol* 205(2):828–840.
- Alberti G, Crooker AR (1985) Internal anatomy. In Helle AW and Sabelis MW (Eds) *Spider mites: Their biology, natural enemies and control*. World Crop Pests volume 1A, Elsevier, Amsterdam, pp. 29–62.
- Attia S, Grissa KL, Lognay G, Bitume E, Hance T, Mailleux AC (2013) A review of the major biological approaches to control the worldwide pest *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae) with special reference to natural pesticides. *J Pest Sci* 86(3):361–386.
- Barth FG (1998) The vibrational sense of spiders. In R. Hoy, A. N. Popper and R. R. Fay (eds), *Comparative Hearing: Insects*. Springer Handbook of Auditory Research, Springer, New York. doi: 10.1007/978-1-4612-0585-2_7, pp. 228–278.
- Barth FG (2002a) Signposts to the prey: Substrate vibrations. In *A Spider's World: Senses and Behavior*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 223–242.
- Barth FG, (2002b) Courtship and vibratory communication. In *A Spider's World: Senses and Behavior*, Springer Berlin, Heidelberg, pp. 269–300.
- Blaakmeer A, Hagenbeek D, van Beek TA, De Groot AE, Schoonhoven LM, van Loon JJA (1994) Plant response to eggs vs. host marking pheromone as factors inhibiting oviposition by *Pieris brassicae*. *J Chem Ecol* 20:1657–1665.

- Boubou A, Migeon A, Roderick GK, Navajas M (2011) Recent emergence and worldwide spread of the red tomato spider mite, *Tetranychus evansi*: genetic variation and multiple cryptic invasions. *Biol Inv* 13:81–92. doi: 10.1007/s10530-010-9791-y.
- Boubou A, Migeon A, Roderick GK, Auger P, Cornuet J-M, Magalhães S, Navajas M (2012) Test of colonisation scenarios reveals complex invasion history of the red tomato spider mite *Tetranychus evansi*. *PLoS One* 7:e35601. doi:10.1371/journal.pone.0035601.
- Brown RE, Macdonald DW (Eds) (1985) *Social Odours in Mammals*. Oxford University Press, Clarendon, Oxford. 882 pp.
- Cédola CV, Sánchez NE, Liljesthröm GG (2001) Effect of tomato leaf hairiness on functional and numerical response of *Neoseiulus californicus* (Acari: Phytoseiidae). *Exp Appl Acarol* 25:819–831. doi: 10.1023/A:1020499624661.
- Chang CL, Cho IK, Li QX (2009) Insecticidal activity of basil oil, *trans*-anethole, estragole, and linalool to adult fruit flies of *Ceratitis capitata*, *Bactrocera dorsalis*, and *Bactrocera cucurbitae*. *J Econ Entomol* 102:203–209.
- Cocroft RB, Hamel JA (2010) Vibrational communication in the “other insect societies”: A diversity of ecology signals, and signal functions. In O’Connell-Rodwell CE (Ed.). *The Use of Vibrations in Communication: Properties, Mechanisms and Function Across Taxa*. Transworld Research Network, Trivandrum, Kerala, India, pp. 47–68.
- Dawkins R, Krebs JR (1979) Arms races between and within species. *Proc R Soc B*. 205:489–511.
- De Boer JG, Dicke M (2004) The role of methyl salicylate in prey searching behavior of the predatory mite *Phytoseiulus persimilis*. *J Chem Ecol* 30:255–271.
- De Boer JG, Posthumus MA, Dicke M (2004) Identification of volatiles that are used in discrimination between plants infested with prey or non-prey herbivores by a predatory mite. *J Chem Ecol* 30:2215–2230.
- De Bruyne, Dicke M, Tjallingii WF (1991) Receptor cell responses in the anterior tarsi of *Phytoseiulus persimilis* to volatile kairomone components. *Exp Appl Acarol* 13:53–58.

- Dekker T, Ignell R, Ghebru M, Glinwood R, Hopkins R (2011) Identification of mosquito repellent odours from *Ocimum forskolei*. *Para Vect* 4:183.
- Delétré E, Chandre F, Barkman B, Menut C, Martin T (2015) Naturally occurring bioactive compounds from four repellent essential oils against *Bemisia tabaci* whiteflies. *Pest Manag Sci* doi 10.1002/ps.3987.
- De Moraes CM, Mescher MC (2004) Biochemical crypsis in the avoidance of natural enemies by an insect herbivore. *Proc Natl Acad Sci USA* 101:8993–8997. doi: 10.1073/pnas.0403248101.
- Dicke M, Hilker M (2003) Induced plant defences: from molecular biology to evolutionary ecology. *Basic Appl Ecol* 4:3–14.
- Dicke M, Gols R, Ludeking D, Posthumus MA (1999) Jasmonic acid and herbivory differentially induce carnivore-attracting plant volatiles in lima bean plants. *J Chem Ecol* 25:1907–1922. doi: 10.1023/A:1020942102181.
- Dicke M, Grostal P (2001) Chemical detection of natural enemies by arthropods: an ecological perspective. *Annu Rev Ecol Syst* 32:1–23. doi: 10.1146/annurev.ecolsys.32.081501.113951.
- Dicke M, Takabayashi J, Posthumus MA, Schuette C, Krips OE (1998) Plant phytoseiid interactions mediated by herbivore-induced plant volatiles: variation in production of cues and in response of predatory mites. *Exp Appl Acarol* 22:311–333.
- Dicke M, van Beek TA, Posthumus MA, Ben Dom N, Van Bokhoven H, De Groot AE (1990) Isolation and identification of volatile kairomone that affects acarine predator–prey interactions: Involvement of host plant in its production. *J Chem Ecol* 16:381–396.
- Djemai I, Casas J, Magal C (2001) Matching host reactions to parasitoid wasp vibrations. *Proc R Soc B*. 268:2403–2408.
- Du Y, Poppy GM, Powell W, Pickett JA, Wadhams LJ, Woodcock CM (1998) Identification of semiochemicals released during aphid feeding that attract parasitoid *Aphidius ervi*. *J Chem Ecol* 24:1355–1368. doi: 10.1023/A:1021278816970.

- Egger B, Koschier EH (2014) Behavioural responses of *Frankliniella occidentalis* Pergande larvae to methyl jasmonate and cis-jasmone. *J Pest Sci* 87(1):53–59.
- El-Sayed AM, Mitchell VJ, Suckling DM (2014) 6-Pentyl-2H-pyran-2-one: A potent peach-derived kairomone for New Zealand flower thrips, *Thrips obscuratus*. *J Chem Ecol* 40:50–55. doi: 10.1007/s10886-014-0379-3.
- Elias DO, Hebets EA, Hoy RR (2006) Female preference for complex/novel signals in a spider. *Behav Ecol* 17:765–771.
- Elias DO, Kasumovic MM, Punzalan D, Andrade MCB, Mason AC (2008) Assessment during aggressive contests between male jumping spiders. *Anim Behav* 76:901–910.
- Elias DO, Mason AC, Maddison WP, Hoy RR (2003) Seismic signals in a courting male jumping spider (Araneae: Salticidae). *J Exp Biol* 206:4029–4039.
- Escudero LA, Ferragut F (2005) Life-history of predatory mites *Neoseiulus californicus* and *Phytoseiulus persimilis* (Acari: Phytoseiidae) on four spider mite species as prey, with special reference to *Tetranychus evansi* (Acari: Tetranychidae). *Biol Cont* 32:378–384.
- Escudero LA, Baldó-Gosálvez M, Ferragut F (2005) Eficacia de los fitoseidos como depredadores de las arañas rojas de cultivos hortícolas *Tetranychus urticae*, *T. turkestanii*, *T. ludeni* y *T. evansi* (Acari: Tetranychidae). *Bol San Veg Plagas* 31:377–383.
- Evans GO (1992) *Principles of Acarology*. CAB International, Wallingford, Oxon, UK. 563 pp.
- Fernández Ferrari MC, Schausberger P (2013) From repulsion to attraction: species- and spatial context-dependent threat sensitive response of the spider mite *Tetranychus urticae* to predatory mite cues. *Naturwissenschaften* 100:541–549. doi: 10.1007/s00114-013-1050-5.
- Ferrero M, de Moraes GJ, Kreiter S, Tixier M-S, Knapp M (2007) Life tables of the predatory mite *Phytoseiulus longipes* feeding on *Tetranychus evansi* at four temperatures (Acari: Phytoseiidae, Tetranychidae). *Exp Appl Acarol* 41:45–53.

- Ferrero M, Tixier M-S, Kreiter S (2014a) Different feeding behaviors in a single predatory mite species. a. Comparative life histories of three populations of *Phytoseiulus longipes* (Acari: Phytoseiidae) depending on prey species and plant substrate. *Exp Appl Acarol* 62(3):313–324.
- Ferrero M, Tixier M-S, Kreiter S (2014b) Different feeding behaviours in a single predatory mite species. b. Responses of two populations of *Phytoseiulus longipes* (Acari: Phytoseiidae) to various prey species, prey stages and plant substrates. *Exp Appl Acarol* 62(3):325–335.
- Fiaboe KKM, Fonseca RL, de Moraes GJ, Ogol CKPO, Knapp M (2006) Identification of priority areas in South America for exploration of natural enemies for classical biological control of *Tetranychus evansi* (Acari: Tetranychidae) in Africa *Biol Cont* 38:373–379.
- Furtado IP, de Moraes GJ, Kreiter S, Knapp M (2006) Search for effective natural enemies of *Tetranychus evansi* in south and southeast Brazil. *Exp Appl Acarol* 40:157–174.
- Gadino AN, Walton VM, Lee JC (2012) Evaluation of methyl salicylate lures on populations of *Typhlodromus pyri* (Acari: Phytoseiidae) and other natural enemies in western Oregon vineyards. *Biol Cont* 63:48–55.
- Garrido I, Espinosa F, Álvarez-Tinaut MC (2009) Oxidative defence reactions in sunflower roots induced by methyljasmonate and methyl-salicylate and their relation with calcium signalling. *Protoplasma* 237:27–39.
- Gershenson J, Dudareva N (2007) The function of terpene natural products in the natural world. *Nat Chem Biol* 3(7):408–414.
- Gibson JS, Uetz GW (2008) Seismic communication and mate choice in wolf spiders: components of male seismic signals and mating success. *Anim Behav* 75:1253–1262.
- Grostal P, Dicke M (2000) Recognising one's enemies: a functional approach to risk assessment by prey. *Behav Ecol Sociobiol* 47:258–264. doi:10.1007/s002650050663.
- Hare JD (2011) Ecological role of volatiles produced by plants in response to damage by herbivorous insects. *Annu Rev Entomol* 56:161–180. doi: 10.1146/annurev-ento-120709-144753.

- Hergenröder R, Barth FG (1983) Vibratory signals and spider behavior: How do the sensory inputs from the eight legs interact in orientation? *J Comp Physiol* 152:361–371. doi: 10.1007/BF00606241.
- Hill PSM (2008) *Vibrational Communication in Animals*. Harvard University Press, Cambridge, MA. 272 pp.
- Hill PSM (2009) How do animals use substrate-borne vibrations as an information source? *Naturwissenschaften* 96:1355–1371. doi: 10.1007/s00114-009-0588-8.
- Hink WF, Duffey TE (1990) Controlling Ticks and Fleas with Linalool. Shirlo Inc., Memphis, TN, assignee. United States Patent No. 4,933,371, June 12, 1990.
- Jagers op Akkerhuis GAJM, Sabelis MW, Tjallingii WF (1985) Ultrastructure of chemoreceptors on the pedipalps and first tarsi of *Phytoseiulus persimilis*. *Exp Appl Acarol* 1:235–251. doi: 10.1007/BF01198521.
- James DG (2003) Field evaluation of herbivore-induced plant volatiles as attractants for beneficial insects: methyl salicylate and the green lacewing, *Chrysopa nigricornis*. *J Chem Ecol* 29:1601–1609.
- James DG (2003a) Synthetic herbivore-induced plant volatiles as field attractants for beneficial insects. *Env Entomol* 32:977–982.
- James DG (2003b) Field evaluation of herbivore-induced plant volatiles as attractants for beneficial insects: methyl salicylate and the green lacewing, *Chrysopa nigricornis*. *J Chem Ecol* 29:1601–1609.
- James DG (2005) Further field evaluation of synthetic herbivore-induced plant volatiles as attractants for beneficial insects. *J Chem Ecol* 31:481–495.
- Jamil MS, Ebrahimzade M, Hassandokht MR (2014) The effect of changes of N, P, and Ca on *Coriandrum sativum* L.'s essence and its components. *Int J Biosci* 4:1–9. doi.org/10.12692/ijb/4.9.1-9.
- Kant MR, Ament K, Sabelis MW, Haring MA, Schuurink RC (2004) Differential timing of spider mite-induced direct and indirect defenses in tomato plants. *Plant Physiol* 135:483–495.
- Kachroo A, Kachroo P (2009) Fatty acid-derived signals in plant defense. *Annu Rev Phytopathol* 47:153–176.

- Kant MR, Sabelis MW, Haring MA, Schuurink RC (2008) Intraspecific variation in a generalist herbivore accounts for differential induction and impact of host plant defences. *Proc R Soc B*. 275:443–452. doi: 10.1098/rspb.2007.1277.
- Kats LB, Dill LM (1998) The scent of death: chemosensory assessment of predation risk by prey animals. *Ecosci* 5:361–394.
- Kennedy GG (2003) Tomato, pest, parasitoids, and predators: tritrophic interactions involving the genus *Lycopersicon*. *Ann Rev Entomol* 48:51–72.
- Knapp M, Wagener B, Navajas M (2003) Molecular discrimination between the spider mite *Tetranychus evansi* Baker & Prichard, an important pest of tomatoes in southern Africa, and the closely related species *T. urticae* Koch (Acarina: Tetranychidae). *Afr Entomol* 11:300–304.
- Koller M, Knapp M, Schausberger P (2007) Direct and indirect adverse effects of tomato on the predatory mite *Neoseiulus californicus* feeding on the spider mite *Tetranychus evansi*. *Entomol Exp Appl* 125:297–305. doi: 10.1111/j.1570-7458.2007.00625.x.
- Koschier EH, Hoffmann D, Riefler J (2007) Influence of salicylaldehyde and methyl salicylate on post-landing behaviour of *Frankliniella occidentalis* Pergande. *J Appl Entomol* 131:362–367.
- Lee S-J, Umamo K, Shibamoto T, Lee K-G (2005) Identification of volatile components in basil (*Ocimum basilicum* L.) and thyme leaves (*Thymus vulgaris* L.) and their antioxidant properties. *Food Chem* 91:131–137. doi:10.1016/j.foodchem.2004.05.056.
- Letizia CS, Cocchiara J, Lalko J, Api AM (2003) Fragrance material review on linalool. *Food Chem Toxicol* 41:943–964. doi:10.1016/S0278-6915(03)00015-2.
- Losey JE, Denno RF (1998) The escape response of pea aphids to foliar-foraging predators: factors affecting dropping behaviour. *Ecol Entomol*, 23:53–61. doi: 10.1046/j.1365-2311.1998.00102.x.
- Maganga ME, Gries G, Gries R (1996) Repellency of various oils and pine oil constituents to house flies (Diptera: Muscidae). *Environ Entomol* 25:1182–1187.

- Mallinger RE, Hogg DB, Gratton C (2011) Methyl salicylate attracts natural enemies and reduces populations of soybean aphids (Hemiptera: Aphididae) in soybean agroecosystems. *J Econ Entomol* 104:115–124.
- Martin T, Assogba-Komlan F, Sidick I, Ahle V, Chandre F (2010) An acaricide-treated net to control phytophagous mites. *Crop Prot* 29:470–475. doi:10.1016/j.cropro.2009.11.004.
- McGregor PK (2005) Chapter 10: Communication. In: Bolhuis JJ, Giraldear L-A (eds) *The behavior of animals: Mechanisms, function, and evolution*. Wiley-Blackwell, Oxford.
- Migeon A, Ferragut F, Escudero-Colomar LA, Fiaboe KKM, Knapp M, de Moraes GJ, Ueckermann E, Navajas M (2009) Modelling the potential distribution of the invasive tomato red spider mite, *Tetranychus evansi* (Acari: Tetranychidae). *Exp Appl Acarol* 48:199–212. doi:10.1007/s10493-008-9229-8.
- Muller GC, Junnala A, Butler J, Kravchenko VD, Revay EE, Weiss RW, Schlein Y (2009) Efficacy of the botanical repellents geraniol, linalool, and citronella against mosquitoes. *J Vector Ecol* 34:2–8.
- Muller GC, Junnala A, Kravchenko VD, Revay EE, Butler J, Orlova OB, Weiss RW, Schlein Y (2008a) Ability of essential oil candles to repel biting insects in high and low biting pressure environments. *J Am Mosq Control Assoc* 24:154–160.
- Muller GC, Junnala A, Kravchenko VD, Revay EE, Butler J, Schlein Y (2008b) Indoor protection against mosquito and sand fly bites: A comparison between citronella, linalool, and geraniol candles. *J Am Mosq Control Assoc* 24:150–153.
- Murungi LK, Kirwa H, Torto B (2013) Differences in essential oil content of berries and leaves of *Solanum sarrachoides* (Solanaceae) and the effects on oviposition of the tomato spider mite (*Tetranychus evansi*). *Ind Crop Prod* 46:73–79. doi:10.1016/j.indcrop.2013.01.022.
- Nelson XJ, Jackson RR (2011a) Flexibility in the foraging strategies of spiders. In: Herberstein ME (Ed.). *Spider behaviour: Flexibility and versatility*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 31–56.

- Nelson XJ, Jackson RR (2011b) Flexible use of anti-predator defences. In: Herberstein ME (ed.). Spider behaviour: Flexibility and versatility. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 99–126.
- Noldus LPJJ, Spink AJ, Tegelenbosch RAJ (2002) Computerised video tracking, movement analysis and behaviour recognition in insects. *Comp Electr Agric* 35:201–227. doi:10.1016/S0168-1699(02)00019-4.
- Olonisakin A (2010) Essential oil composition and biological activity of *Cymbopogon citratus*. *J Chem Soc Nigeria* 35:99–104.
- Park BS, Choi WS, Kim JH, Lee SE (2005) Monoterpenes from thyme (*Thymus vulgaris*) as potential mosquito repellents. *J Am Mosq Ctrl Assoc* 21:80–83.
- Pfannenstiel RS, Hunt RE, Yeargan KV (1995) Orientation of a hemipteran predator to vibrations produced by feeding caterpillars. *J Insect Behav* 8:1–9. doi: 10.1007/BF01990965.
- R Development Core Team (2010) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria; ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.
- Rosier RL, Langkilde T (2011) Behavior under risk: how animals avoid becoming dinner. *Nat Educ Knowl* 2(11):8.
- Ryan MF, Byrne O (1988) Plant-insect coevolution and inhibition of acetylcholinesterase. *J Chem Ecol* 14:1965–1975.
- Sadgrove NJ, Telford IR, Greatrex BW, Jones GL (2014) Composition and antimicrobial activity of the essential oils from the *Phebalium squamulosum* species complex (Rutaceae) in New South Wales, Australia. *Phytochem*, 97:38–45. doi: 10.1016/j.phytochem.2013.10.015.
- Sampaio LF, Maia JG, de Parijós AM, de Souza RZ, Barata LES (2012) Linalool from rosewood (*Aniba rosaeodora* Ducke) oil inhibits adenylate cyclase in the retina, contributing to understanding its biological activity. *Phytother Res* 26:73–77. doi: 10.1002/ptr.3518.

- Sarmiento RA, Lemos F, Bleeker PM, Schuurink RC, Pallini A, Oliveira MG, Lima ER, Kant M, Sabelis MW, Janssen A (2011) A herbivore that manipulates plant defence. *Ecol Lett* 14:229–236. doi: 10.1111/j.1461-0248.2010.01575.x.
- Sanchez-Ramos I, Castanera P (2001) Acaricidal activity of natural monoterpenes on *Tyrophagus putrescentiae* (Schrank), a mite of stored food. *J Stored Prod Res* 37:93–101.
- Saunyama IGM, Knapp M (2003) Effect of pruning and trellising of tomatoes on red spider mite incidence and crop yield in Zimbabwe. *Afr Crop Sci J* 11:269–277. doi.org/10.4314/acsj.v11i4.27577.
- Scutareanu P, Drukker B, Bruin J, Posthumus MA, Sabelis, MW (1997) Volatiles from *Psylla*-infested pear trees and their possible involvement in attraction of anthocorid predators. *J Chem Ecol* 23:2241–2260. doi: 10.1023/B:JOEC.0000006671.53045.16.
- Sharma RN, Saxena KN (1974) Orientation and developmental inhibition in the housefly by certain terpenoids. *J Med Entomol* 11:617–621.
- Shimoda T, Dicke M (2000) Attraction of a predator to chemical information related to nonprey: when can it be adaptive? *Behav Ecol* 11:606–613. doi: 10.1093/beheco/11.6.606.
- Shiojiri K, Takabayashi J, Yano S, Takafuji A (2001) Infochemically mediated tritrophic interaction webs on cabbage plants. *Pop Ecol* 43:23–29. doi: 10.1007/PL00012011.
- Sibanda T, Dobson HM, Cooper JF, Manyangariwa W, Chiimba W (2000) Pest management challenges for smallholder vegetable farms in Zimbabwe. *Crop Prot* 19:807–815. doi:10.1016/S0261-2194(00)00108-3.
- Simmons AT, Gurr GM (2005) Trichomes of *Lycopersicon* species and their hybrids: effects on pests and natural enemies. *Agric For Entomol* 7:265–276. doi: 10.1111/j.1461-9555.2005.00271.x.
- Škaloudova B, Zemek R, Krivan V (2007) The effect of predation risk in an acarine system. *Anim Behav* 74:813–821. doi:10.1016/j.anbehav.2007.02.005.
- Snoeren TA, Mumm R, Poelman EH, Yang Y, Pichersky E, Dicke M (2010) The herbivore-induced plant volatile methyl salicylate negatively affects attraction of the parasitoid *Diadegma semiclausum*. *J Chem Ecol* 36(5):479–89.

- Takabayashi J, Dicke M (1992) Response of predatory mites with different rearing histories to volatiles of uninfested plants. *Entomol Exp Appl* 64:187–193. doi: 10.1111/j.1570-7458.1992.tb01608.x.
- Takabayashi J, Dicke M (1993) Volatile allelochemicals that mediate interactions in a tritrophic system consisting of predatory mites, spider mites and plants. In: H. Kawanabe, J.E. Cohen and K. Iwasaki (eds). *Mutualism and Community Organization. Behavioural, Theoretical and Food-web Approaches*, Oxford University Press, pp. 280–295.
- Takabayashi J, Shimoda T, Dicke M, Ashihara W, Takafuji A (2000) Induced response of tomato plants to injury by green and red strains of *Tetranychus urticae*. *Exp Appl Acarol* 24:377–383.
- Turlings TCJ, Loughrin JH, McCall PJ, Röse USR, Joe Lewis W, Tumlinson JH (1995) How caterpillar-damaged plants protect themselves by attracting parasitic wasps. *Proc Natl Acad Sci USA* 92:4169–4174.
- Uetz GW, Roberts JA, Taylor PW (2009) Multimodal communication and mate choice in wolf spiders: female response to multimodal versus unimodal signals. *Anim Behav* 78:299–305. doi:10.1016/j.anbehav.2009.04.023.
- Uhl G (2013) Spider olfaction: attracting, detecting, luring and avoiding. In Nentwig W (Ed.), *Spider Ecophysiology*. Springer, Berlin Heidelberg, pp. 141–157. doi: 10.1007/978-3-642-33989-9_11.
- Uhl G, Elias DO (2011) Communication. In: *Spider Behavior: Flexibility and Versatility* (ed Herberstein, ME), Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 127–190.
- Ulland S, Ian E, Mozuraitis R, Borg-Karlson A-K, Meadow R, Mustaparta H 2008. Methyl salicylate, identified as primary odorant of a specific receptor neuron type, inhibits oviposition by the moth *Mamestra brassicae* L. (Lepidoptera, Noctuidae). *Chem Senses* 33: 35–46.
- Van Den Boom CE, Van Beek TA, Posthumus MA, De Groot A, Dicke M (2004) Qualitative and quantitative variation among volatile profiles induced by *Tetranychus urticae* feeding on plants from various families. *J Chem Ecol* 30:69–89.

- van Wijk M, De Bruijn PJ, Sabelis MW (2008) Predatory mite attraction to herbivore-induced plant odors is not a consequence of attraction to individual herbivore-induced plant volatiles. *J Chem Ecol* 34:791–803. doi: 10.1007/s10886-008-9492-5.
- Varela AM, Seif A, Löhr B (2003) A Guide to IPM in Tomato Production in Eastern and Southern Africa (Edited by A. Ng'eny-Mengech). ICIPE Science Press, Nairobi, 128 pp.
- Weaver DK, Dunkel FV, Ntezurubanza L, Jackson LL, Stock DT (1991) The efficacy of linalool, a major component of freshly-milled *Ocimum canum* Sims (Lamiaceae), for protection against postharvest damage by certain stored product Coleoptera. *J Stored Prod Res* 27:213–220.
- Zhang ZQ (2003) Mites of Greenhouses: Identification, Biology and Control. CABI Publishing, London, United Kingdom, 244 pp.

4. Conclusion

Ce chapitre a présenté les différentes interactions entre *T. evansi* et son prédateur *P. longipes*. Nous avons montré que *T. evansi* utilisait des signaux visuels, vibratoires et olfactifs pour éviter son prédateur *P. longipes* et que *P. longipes* était attiré par *T. evansi* à travers des signaux vibratoires et olfactifs. Un effet additif a également été noté lorsqu'on combinait les trois signaux, ce qui a influencé significativement le comportement de *T. evansi* et de *P. longipes*. Le linalool et le méthyl salicylate sont des composés volatiles impliqués dans l'attractivité de *P. longipes* vis-à-vis de *T. evansi*. Ces résultats doivent maintenant être confirmés en plein champ mais ils peuvent aussi avoir des conséquences positives dans l'amélioration de la lutte biologique contre les tétranyques ravageurs de la tomate. D'autres méthodes telles que l'utilisation de champignons entomopathogènes pourraient aussi renforcer les méthodes de lutte pour le contrôle de ce ravageur. Cela sera l'objet du chapitre suivant.

**Combinaison mousse imprégnée
de *M. anisopliae* et *P. longipes***

CHAPITRE 5

MOUSSE IMPREGNEE DE *METHARHYZIUM ANISOPLIAE* FIXEE SUR UN PLANT DE TOMATE POUR CONTROLER *TETRANYCHUS EVANSI*

Ginette Y. Azandémè-Hounmalon, Niassy Saliou, Nguya K. Maniania, Serge Kreiter, Komi K.M. Fiaboe and Thibaud Martin. Association of Metarhizium anisopliae ICIPE-78 with predatory mite Phytoseiulus longipes Evans in the control of Tetranychus evansi on tomato. En préparation ...

1. Introduction

L'utilisation de *M. anisopliae* souche ICIPE-78 seul ou combiné avec des acariens prédateurs comme *P. longipes* se sont montrés efficaces pour le contrôle de *T. evansi* au laboratoire, en serre et en plein champ (Wekesa *et al.*, 2005; Ferrero *et al.*, 2007, 2011; Furtado *et al.*, 2007b; Bugeme *et al.*, 2009, 2014; Maniania & Kungu, 2011). Actuellement, *M. anisopliae* est commercialisé en tant que bio-pesticide par la société Real IPM sous le nom de ACHIEVE®. L'utilisation de champignons entomopathogènes est en effet moins impactante pour l'environnement que la lutte chimique (Benjamin *et al.*, 2002; Chandler *et al.*, 2005; Maniania *et al.*, 2008). Cependant, la germination et la virulence des spores sont affectées par des fortes températures et surtout une faible hygrométrie, avec une durée d'action estimée entre 3 et 4 jours sur les feuilles de niébé au Kenya ce qui nécessite de fréquentes applications et donc un coup d'utilisation élevé (Ekesi *et al.*, 1999, 2000; Dimbi *et al.*, 2004; Kiewnick, 2006; Jaronski, 2010). Cependant, une durée d'action plus longue comprise entre 10 et 15 jours a été aussi rapportée au laboratoire et en plein champ sur les sauteriaux *R. schistocercoides* et le criquet sénégalais *O. senegalensis* (Magalhães *et al.*, 2002; Paraíso *et al.*, 2004). Il est donc nécessaire de développer de nouvelles stratégies pour améliorer l'utilisation de ces champignons (Mfuti *et al.*, 2015).

De récentes études ont montré les comportements grégaires et de dispersion de *T. evansi* sur une feuille et un plant de tomate (Azandémè-Hounmalon *et al.*, 2014). En effet, les jeunes femelles de *T. evansi* font des mouvements circadiens de montée et de descente le long de la plante et plus précisément au cours de la journée. Ce comportement migratoire de *T. evansi* pourrait être exploité pour intoxiquer les acariens en plaçant un piège sur les zones de

passage. Les travaux conduits par Shah & Pell (2003) ont montré une meilleure efficacité des champignons entomopathogènes lorsqu'ils étaient combinés avec d'autres méthodes alternatives de lutte. Cette méthode de lutte pourrait être combinée avec le lâcher d'acariens prédateurs. En effet, Maniania & Kungu (2011) ont montré la compatibilité de *M. anisopliae* avec *P. longipes* en plein champ.

L'objectif de cette étude a été d'évaluer l'efficacité d'une mousse (de type éponge synthétique) imprégnée avec une solution de *M. anisopliae* pour contrôler *T. evansi* et de confirmer sa compatibilité avec l'acarien prédateur *P. longipes* sur la tomate.

2. Méthode

2.1. Test de germination

Une solution d'agar a été préparée pour évaluer le pourcentage de germination et la viabilité des spores avant les différentes expérimentations. La suspension de $3,0 \times 10^6$ conidies.ml⁻¹ a été préparée et 0,1 ml de cette suspension a été cultivée sur le gel d'agar et placée à l'incubateur pendant 16 h. Le pourcentage de germination des spores a été calculé suivant la méthode décrite par Bugeme *et al.* (2008).

2.2. Test de pathogénicité des spores

La pathogénicité des spores (Figure 17) a été testée en utilisant une formulation émulsifiable composée de: Tween 80 + huile + eau distillée au ratio de 0,25 / 6 / 93,75. La suspension de concentration $1,0 \times 10^8$ conidies.ml⁻¹ a été testée en pulvérisant 10 ml sur les deux faces des disques de feuilles de tomate (25 mm de diamètre) en utilisant la Tour de Potter-Burgerjon (INRA, Dijon, France), correspondant à $3,8 \times 10^8$ conidies.cm⁻² (Bugeme *et al.*, 2008). Dans le traitement témoin, les disques de feuilles ont été pulvérisés avec la formulation émulsifiable sans le champignon. Les disques de feuilles ont été par la suite séchés pendant 20 min et placés sur du coton humidifié dans des boîtes de Petri. Les femelles adultes (20 ♀) de 1 à 2 jours d'âge ont été déposées sur chaque disque de feuille et maintenues à l'incubateur à 25±2

°C pendant 4 jours. Les acariens ont été par la suite transférés sur de nouveaux disques de feuilles non traités. Le taux de mortalité a été enregistré chaque jour pendant 7 jours et les acariens morts ont été transférés sur du papier filtre placé dans des boîtes de Petri pendant 14 jours pour observer les mycoses. L'expérience a été répétée 6 fois.

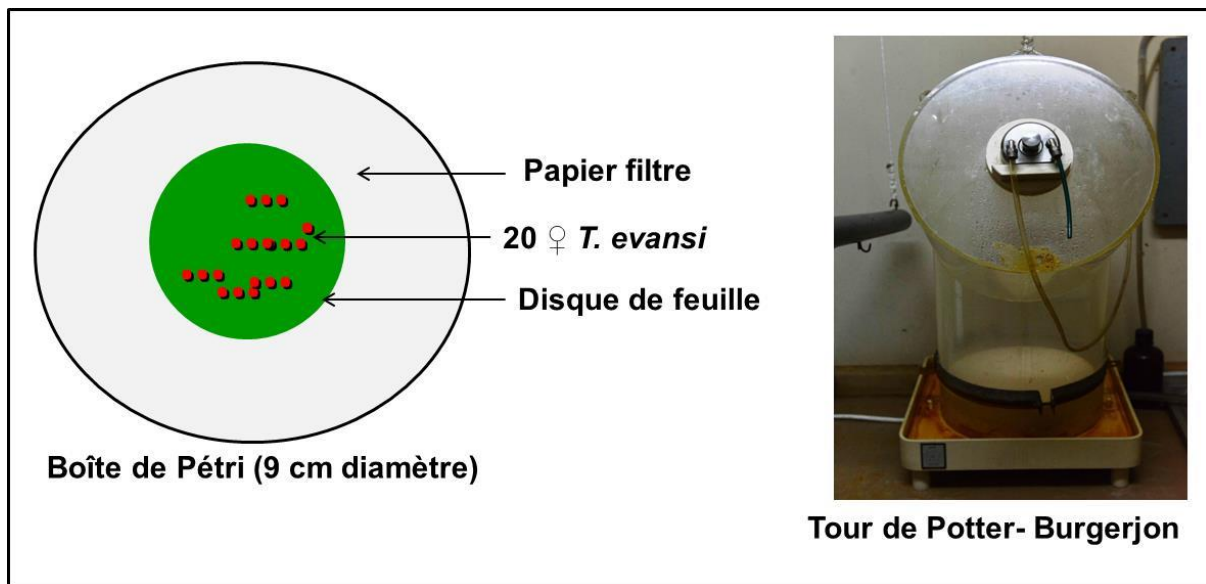


Figure 17: Traitement des disques de feuilles tomate

2.3. Effet de la mousse imprégnée sur l'infestation et les dégâts de *T. evansi*

Dans cette expérience, nous avons utilisé des mousses synthétiques (2 cm x 2 cm et 1 cm d'épaisseur) avec de petits trous et des pores de 5 mm de diamètre (Figure 18). Ces cubes de mousses ont été découpés dans une éponge synthétique (Nakumat, Nairobi, Kenya). La mousse a été placée au centre de la tige d'un plant de tomate de 45 jours possédant au moins 5 feuilles complètement développées. Les feuilles de tomate ont été numérotées à partir de la base du plant vers le haut. Les mousses ont été fixées à la tige de manière à avoir deux feuilles en-dessous de la mousse (L1 et L2) et trois feuilles au-dessus de la mousse (L3, L4 et L5) (Figure 19, expérience 1).

Les mousses ont été imprégnées de 2 ml de la formulation émulsifiable de *M. anisopliae* ICIPE-78 à $1,0 \times 10^8$ conidies.ml⁻¹ ou encore sans suspension de conidies pour les témoins.

Les plants de tomates ont été infestés avec 100 ♀ de *T. evansi* sur la feuille L2 ou L3 suivant les différents traitements avec 4 répétitions:

C1: *T. evansi* sur L2 située juste en-dessous de la mousse non imprégnée ;

C2: *T. evansi* sur L3 située juste au-dessus de la mousse non imprégnée;

T1: *T. evansi* sur L2 située juste en-dessous de la mousse imprégnée;

T2: *T. evansi* sur L3 située juste au-dessus de la mousse imprégnée.

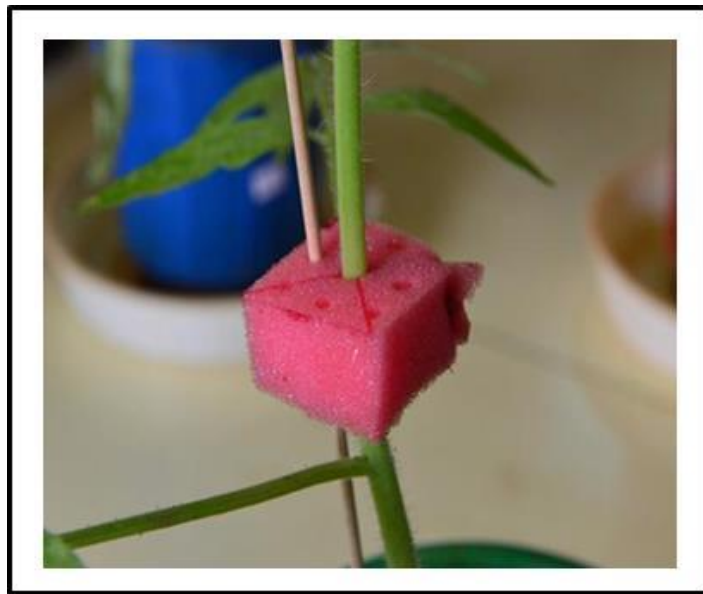


Figure 18: Cube de mousse synthétique (Photo: G. Azandémè-Hounmalon)

2.4. Association de la mousse imprégnée et de *P. longipes*

Le même dispositif expérimental (Figure 19, expérience 2) que le précédent a été utilisé mais 20 ♀ de *P. longipes* ont été en plus lâchées sur la feuille L1 suivant les traitements ci-dessous :

C1: *T. evansi* sur L2 située juste en-dessous de la mousse non imprégnée + *P. longipes* sur L1;

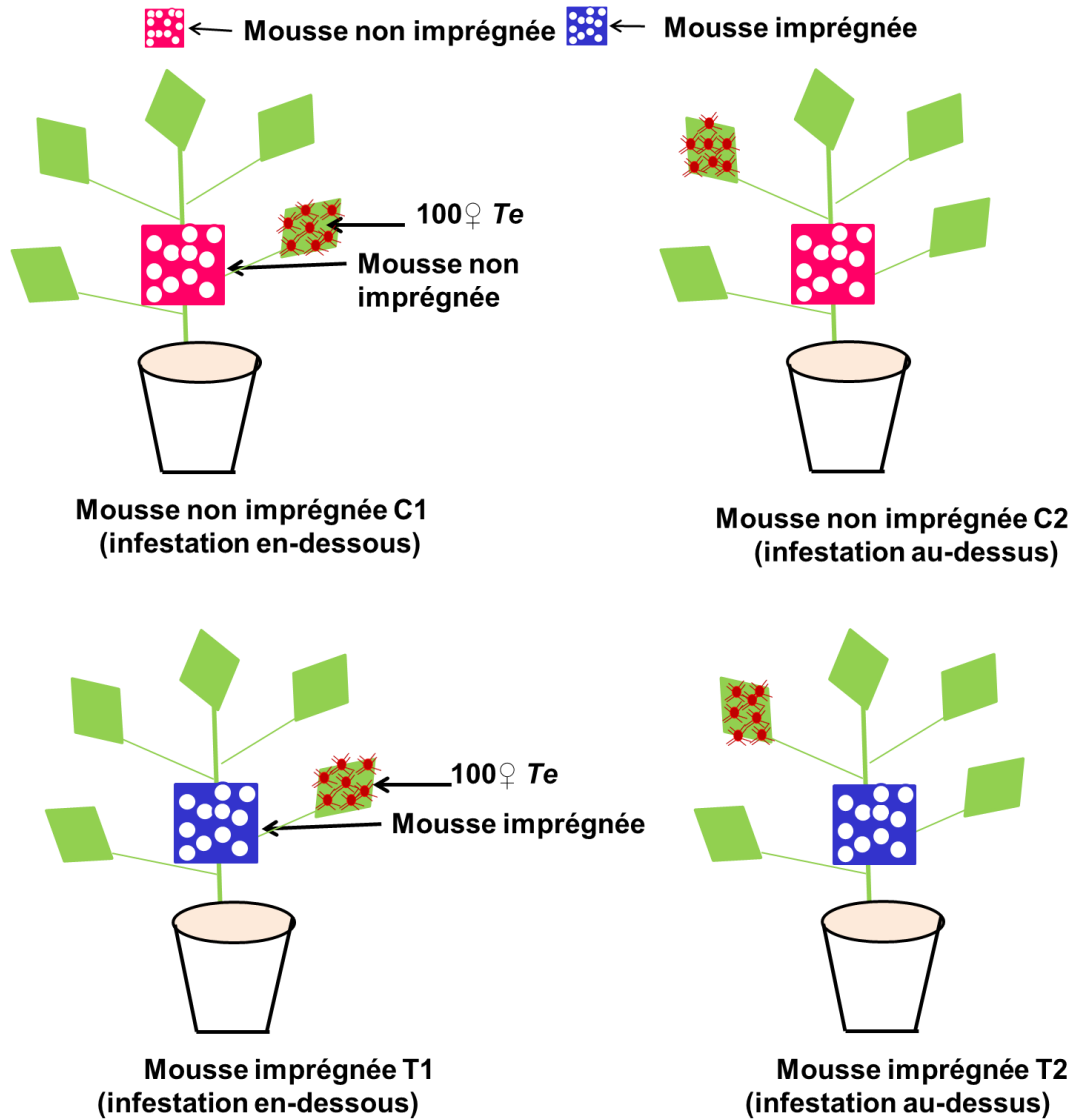
C2: *T. evansi* sur L2 située juste en-dessous de la mousse non imprégnée ;

T1: *T. evansi* sur L2 située juste en-dessous de la mousse imprégnée + *P. longipes* sur L1;

T2: *T. evansi* sur L2 située juste en-dessous de la mousse imprégnée.

L'expérience a été répétée 4 fois avec un ratio proie-prédateur de 100 acariens pour 20 prédateurs suivant la méthode décrite par Ferrero *et al.* (2011).

Expérience 1



Expérience 2

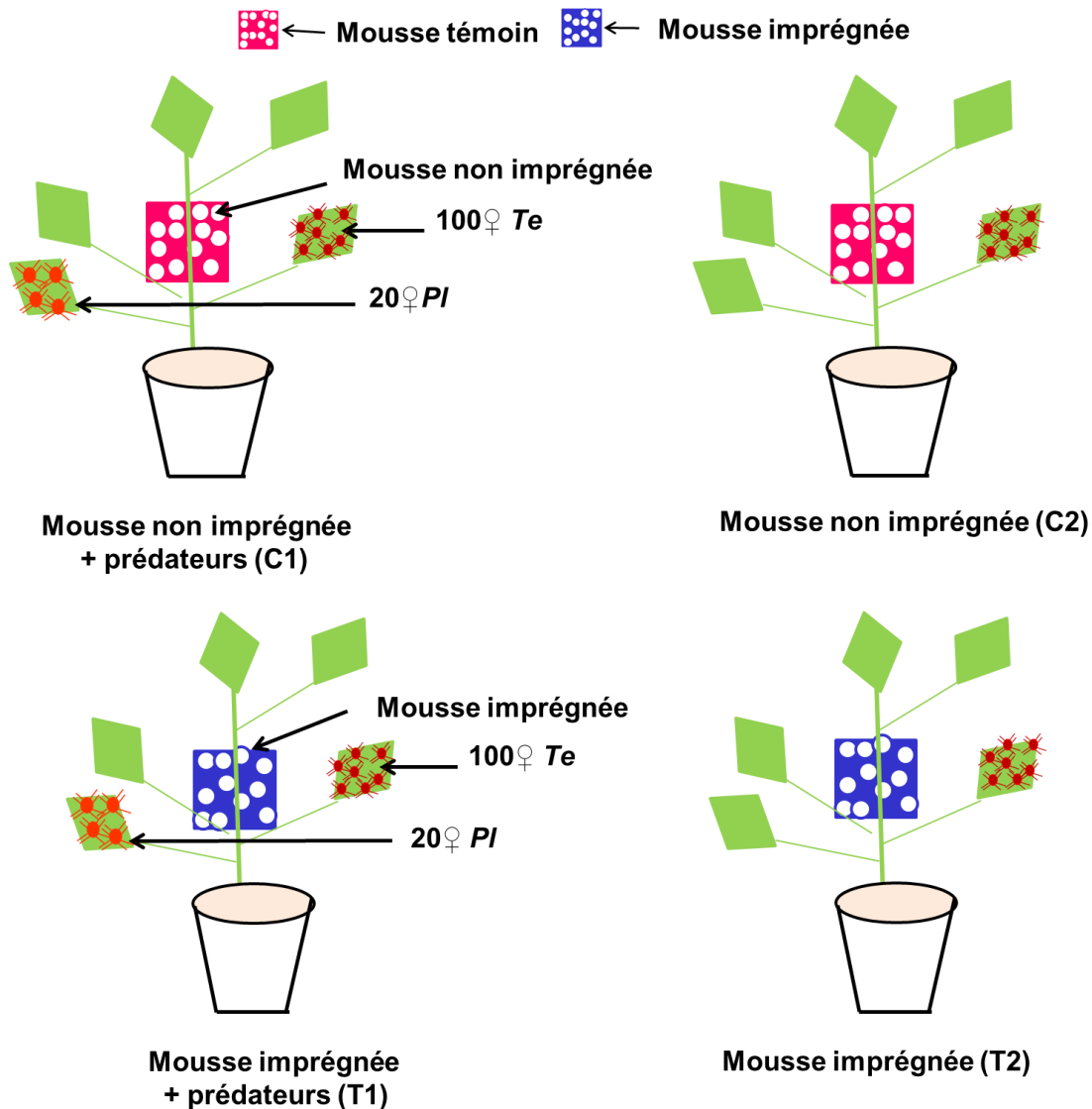


Figure 19: Dispositif expérimental

2.5. Observations

Pour les deux expériences, nous avons observé le pourcentage d'infestation et les dégâts causés par *T. evansi*. Chaque trois jours, le nombre total de foliole avec ou sans acarien a été enregistré et le pourcentage de foliole infesté par plant a été calculé. Les dégâts d'acariens ont été également évalués en utilisant l'indice moyen de dégâts classé sur une échelle de 0 (aucun

dégât) à 5 (la feuille commence à flétrir) suivant la méthode décrite par Hussey & Scopes (1985).

La quantité de spores transportée par un acarien a aussi été observée le 3^{ème} et 15^{ème} jour après infestation. A cet effet, 5 acariens ont été échantillonnés à différents niveaux de la mousse: en-dessous, sur la mousse et au-dessus de la mousse. Les acariens ont été prélevés individuellement dans les tubes Eppendorf en plastique contenant 1 ml de l'eau stérile de Triton X-100 à 0,05 %. Les tubes ont été homogénéisés pendant 2 - 3 mn afin de séparer les conidies de l'acarien. Le nombre de conidies a été déterminé en utilisant l'hémocytomètre.

Pour évaluer la longévité des spores, les mêmes mousses imprégnées ont été réutilisées toutes les deux semaines sur de nouveaux plants de tomates infestés. Dans la deuxième expérience, le nombre de stades mobiles d'acariens prédateurs et de *T. evansi* a été compté au-dessous de la mousse, au-dessus de la mousse et sur la mousse au 6^{ème} et 15^{ème} jour après infestation.

3. Résultats et discussion

Nos résultats ont montré que la formulation émulsifiable de *M. anisopliae* ICIPÉ-78 est pathogène pour *T. evansi* ce qui confirme les précédents travaux (Wekesa *et al.*, 2005; Bugeme *et al.*, 2009; Bugeme *et al.*, 2014.). La technique habituelle d'utilisation de cette formulation est la pulvérisation foliaire. Par exemple, Naturalis-L® a réduit jusqu'à 93 %, 96 % et 97 % les populations de *T. urticae* sur le concombre et la tomate (Chandler *et al.*, 2005; Marcic *et al.*, 2012). Notre étude diffère des précédentes par l'utilisation d'un piège à acarien constitué d'une mousse imprégnée de *M. anisopliae*. En effet, la mousse imprégnée de *M. anisopliae* placée au-dessus de l'infestation a réduit significativement le pourcentage d'infestation et les dégâts de *T. evansi* (Figure 20). Ces résultats pourraient s'expliquer par le fait que les acariens en traversant la mousse lors de la migration circadienne sont contaminés par les spores entraînant leur mortalité et par conséquent la réduction de l'infestation et des dégâts observés (Figure 21).

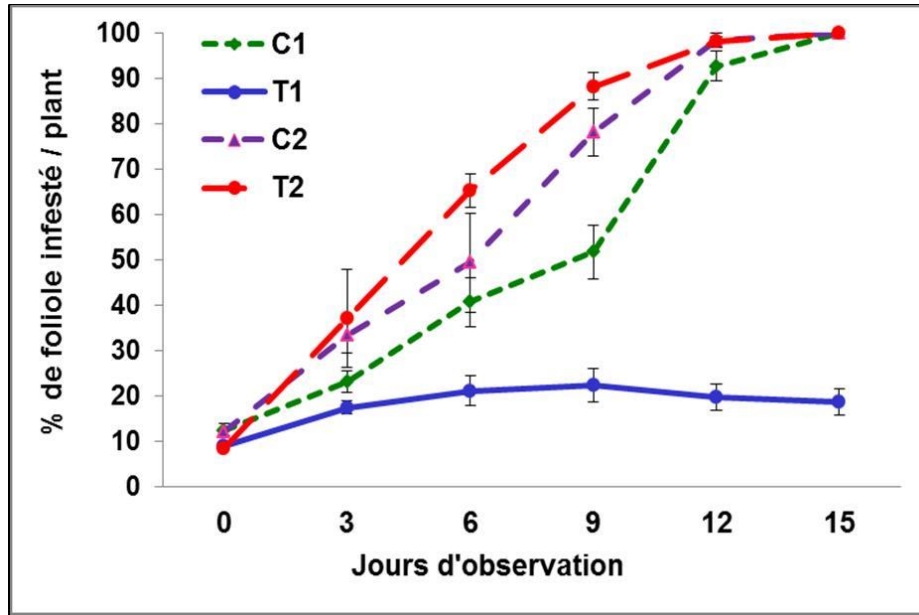


Figure 20: Evolution du pourcentage de foliole infesté par *T. evansi*, par plant et par date d'observation. **C1:** *T. evansi* sur L2 située juste en-dessous de la mousse non imprégnée; **C2:** *T. evansi* sur L3 située juste au-dessus de la mousse non imprégnée; **T1:** *T. evansi* sur L2 située juste en-dessous de la mousse imprégnée; **T2:** *T. evansi* sur L3 située juste au-dessus de la mousse imprégnée

La réduction de la population initiale présente sur les feuilles situées sous la mousse suggère que la mousse doit interférer avec le comportement de migration circadienne confirmant ainsi les travaux d'Azandémè-Hounmalon *et al.* (2014). Par ailleurs, en regardant les résultats relatifs à la quantité de spore transportée (Figure 22) par un seul acarien, nous avons observé qu'en-dessous et au-dessus de la mousse, les acariens ont transporté une quantité de spores équivalente mais cependant inférieure à celle des acariens prélevés sur la mousse.

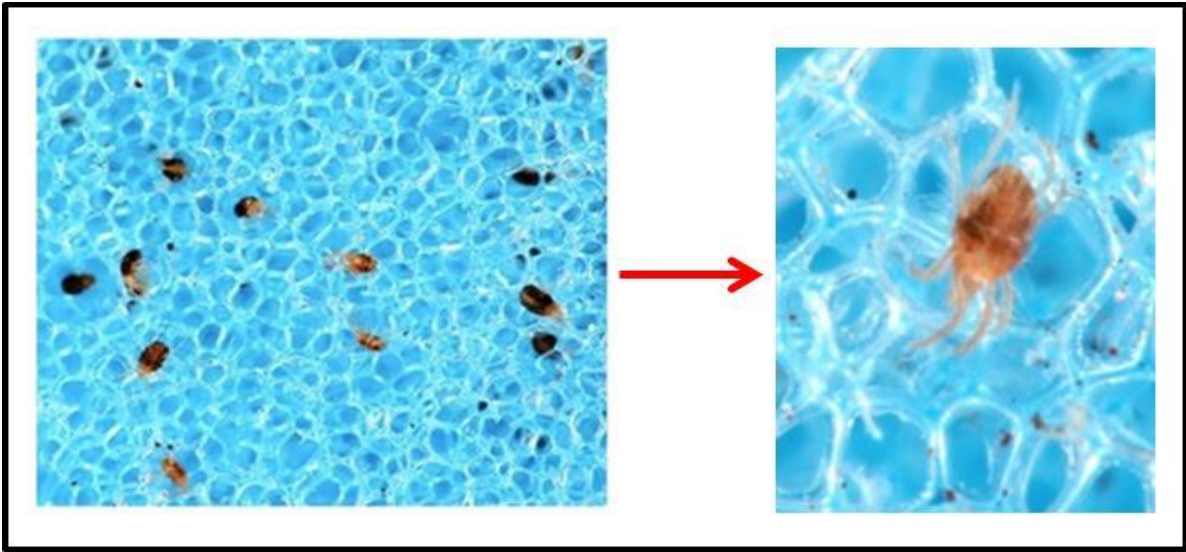


Figure 21: Acariens dans les pores de la mousse imprégnée (Photo: R. Copeland)

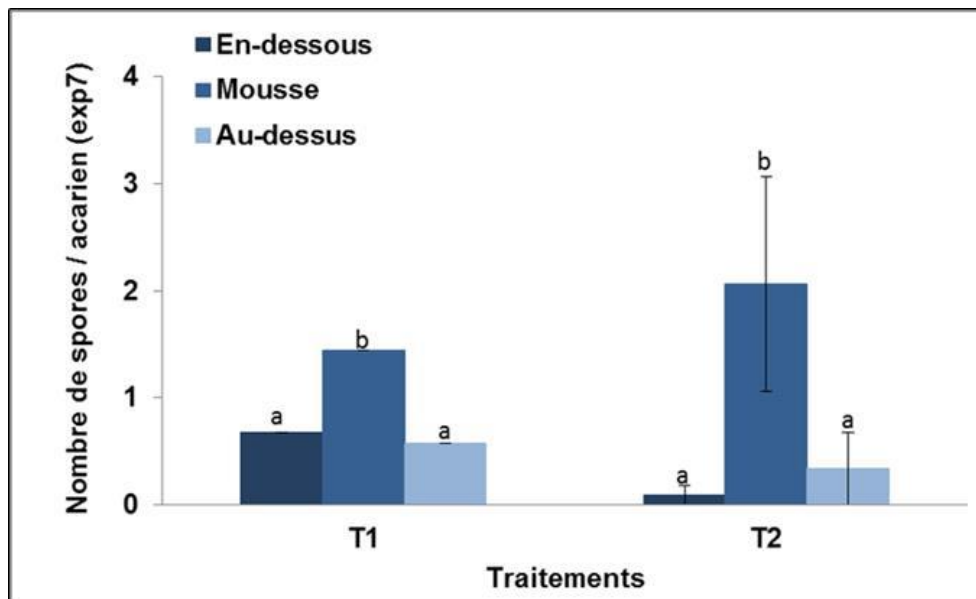


Figure 22: Nombre de spores de *M. anisopliae* transporté par un seul acarien échantillonné à différents niveaux sur le plant de tomate au 15^{ème} jour d'observation après infestation. **T1:** *T. evansi* sur L2 située juste en-dessous de la mousse imprégnée; **T2:** *T. evansi* sur L3 située juste au-dessus de la mousse imprégnée

Une des limites du recours aux champignons entomopathogènes est leur durée d'action dans l'environnement une fois qu'ils ont été pulvérisés sur le feuillage en raison de leur sensibilité aux rayons ultra-violets (Ekesi *et al.*, 1999; Dimbi *et al.*, 2004). Les résultats obtenus dans

cette étude ont montré qu'une mousse imprégnée de *M. anisopliae* pourrait protéger un plant de tomate pendant au moins 36 jours (Figure 23) dans les conditions de laboratoire. Cela pourrait s'expliquer par le passage des acariens à travers les petits trous mais aussi à travers les pores de la mousse dans laquelle les spores sont protégées des UV et de la déshydratation (Figure 21). Cette technique pourrait donc être une alternative aux pulvérisations intensives et au coût élevé du bio-pesticide à base de *M. anisopliae* comme le suggère Mfuti *et al.* (2015). Ces résultats sont en accord avec d'autre mode d'utilisation comme l'auto-inoculation pour réduire la quantité de spores et ainsi améliorer la durée d'action du champignon dans l'environnement (Migiro *et al.*, 2010; Niassy *et al.*, 2012).

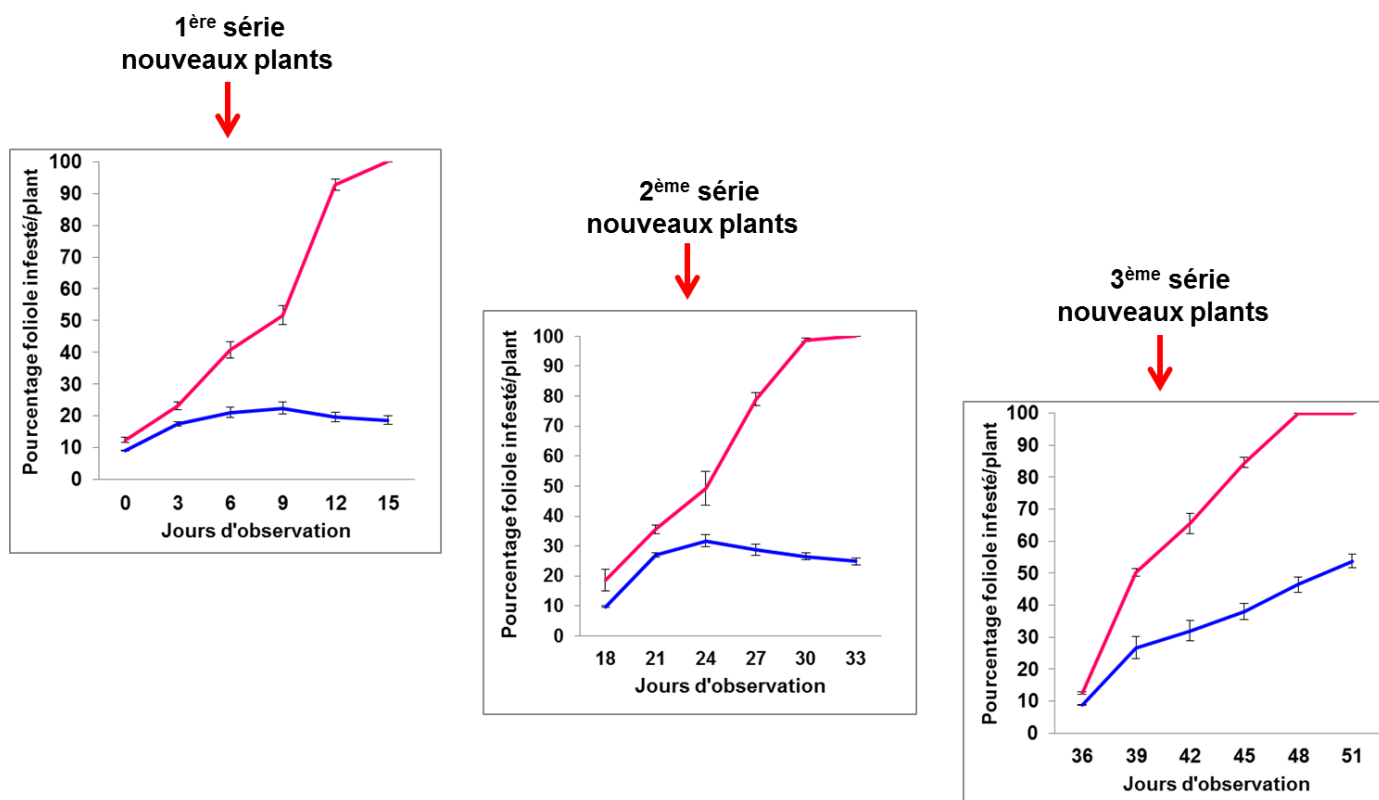


Figure 23: Durée d'efficacité de la mousse imprégnée

Toutefois, l'originalité de cette étude repose sur le comportement migratoire des acariens. La compatibilité de *M. anisopliae* ICIPÉ-78 avec les acariens prédateurs *P. longipes* pour le contrôle de *T. evansi* a été déjà montrée (Maniania & Kungu, 2011). Dans notre étude, nous avons montré que la mousse imprégnée de *M. anisopliae* combinée avec le lâcher de *P. longipes* était encore plus efficace (Figure 24) que la mousse imprégnée de *M. anisopliae*

mais utilisée seule. Les deux actions se complètent et s'additionnent, ce qui augmente le risque de prédation de la proie (Roy & Pell, 2000; Onzo *et al.*, 2004, 2005). En effet, la mousse imprégnée du champignon ne semble pas affecter le prédateur (Figure 25). Nos résultats corroborent les études antérieures sur la sensibilité de certains phytoséiides et de plusieurs insectes non-cibles à *N. xoridana* et *N. tanajoae* (Moraes & Delalibera, 1992; Hountondji *et al.*, 2002; Wekesa *et al.*, 2007).

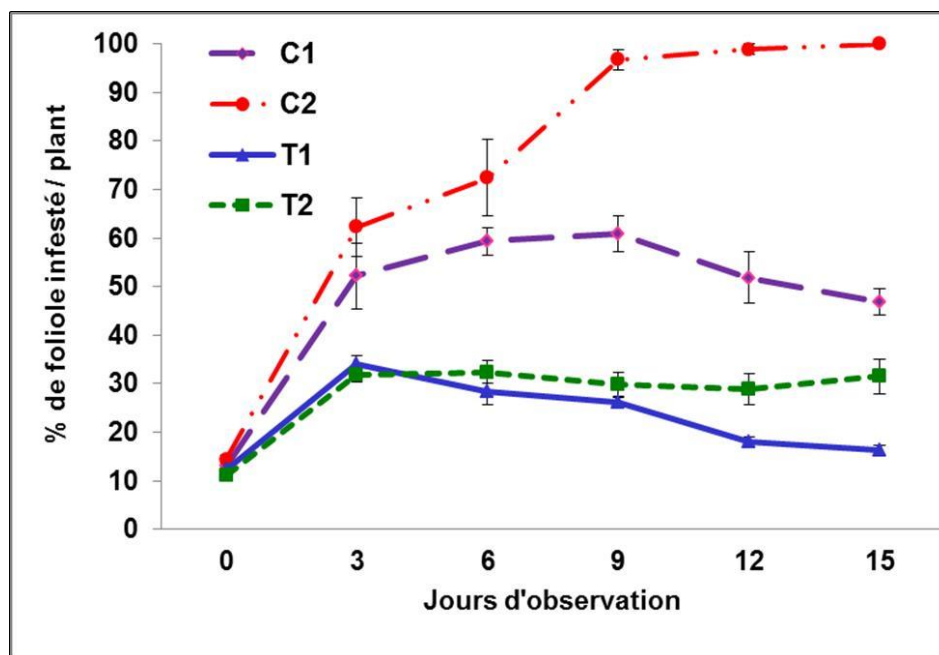


Figure 24: Evolution du pourcentage de foliole infesté par *T. evansi*, par plant et par date d'observation. **C1:** *T. evansi* sur L2 située juste en-dessous de la mousse non imprégnée + *P. longipes* sur L1; **C2:** *T. evansi* sur L2 située juste en-dessous de la mousse non imprégnée; **T1:** *T. evansi* sur L2 située juste en-dessous de la mousse imprégnée + *P. longipes* sur L1; **T2:** *T. evansi* sur L2 située juste en-dessous de la mousse imprégnée



Figure 25: *Phytoseiulus longipes* dans les pores de la mousse imprégnée de *M. anisopliae* (Photo: R. Copeland)

4. Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons montré que la mousse imprégnée de *M. anisopliae* permet de protéger un plant de tomate pendant 36 jours à condition que l'infestation initiale soit localisée sous la mousse et en conditions de laboratoire. C'est pourquoi la combinaison de la mousse imprégnée de *M. anisopliae* avec le lâcher de *P. longipes* est encore plus efficace que la mousse imprégnée utilisée seule car en effet, *P. longipes* ne semble pas être sensible au champignon pathogène. La technique de la mousse imprégnée est une approche intéressante car elle permet d'augmenter la rémanence du champignon. Cette technique pourrait être utilisée pour la protection des légumes cultivés sous serre mais aussi des roses (Delétré *et al.*, 2014).

DISCUSSION GENERALE

Tetranychus evansi est un ravageur invasif observé au début des années 2000 en Afrique de l'Est puis de l'Ouest (Saunyama & Knapp, 2003; Martin *et al.*, 2010). Cet acarien est actuellement responsable d'importants dégâts sur les solanacées locales comme les *Solanum* spp ou aubergine africaine (gboma au Bénin, nightshade au Kenya) ou l'amaranthe et plus particulièrement la tomate (Ferragut & Escudero, 1999; Saunyama & Knapp, 2003; Migeon *et al.*, 2008; Azandémè-Hounmalon *et al.*, soumis). En Afrique sub-Saharienne, le contrôle de ce ravageur se fait principalement par la lutte chimique qui n'est pas toujours très efficace du fait de la non disponibilité en produit actif, ou d'une sur-utilisation des produits disponibles pouvant entraîner la sélection d'individus résistants (Azandémè-Hounmalon *et al.*, soumis). Cette lutte chimique souvent abusive en raison des mauvaises pratiques des producteurs entraîne aussi l'élimination d'ennemis naturels potentiels, en particulier des acariens prédateurs, sans parler du risque de contamination des fruits et feuilles par des résidus toxiques pouvant nuire à la santé humaine et polluer l'environnement (Adango *et al.*, 2007; Azandémè, 2010; Ahouangninou *et al.*, 2011, 2012). Une alternative aux pesticides chimiques est l'utilisation des champignons entomopathogènes. Une étude conduite récemment au Kenya a montré des résultats très prometteurs de l'utilisation de *M. anisopliae* ICIPE-78 pour contrôler *T. evansi* et *T. urticae* sur tomate (Wekesa *et al.*, 2005). Par ailleurs, *M. anisopliae* serait compatible avec le prédateur *P. longipes* (Maniania & Kungu, 2011). Cependant, l'utilisation des champignons entomopathogènes s'opère principalement par pulvérisation foliaire et nécessite une forte quantité de spores. De plus, la germination et la virulence des spores sont affectées par des fortes températures et surtout une faible hygrométrie, avec une durée d'action estimée entre 3 et 4 jours sur les feuilles de niébé au Kenya ce qui nécessite de fréquentes applications et donc un coût d'utilisation élevé (Ekesi *et al.*, 1999, 2000; Dimbi *et al.*, 2004; Kiewnick, 2006; Jaronski, 2010). Cependant une durée d'action comprise entre 10 et 15 jours a été aussi rapportée au laboratoire et en plein champ sur les sauteriaux *R. schistocercoides* et le criquet sénégalais *O. senegalensis* (Magalhães *et al.*, 2002; Paraíso *et al.*, 2004). Les champignons entomopathogènes et les acariens prédateurs peuvent donc jouer un rôle majeur dans la régulation naturelle des populations d'acariens phytophages et pourraient être utilisés conjointement dans des programmes de lutte intégrée. Une meilleure connaissance du comportement de migration et de dispersion de *T. evansi* sur tomate et de ses

interactions avec son prédateur *P. longipes* était donc un préalable indispensable pour optimiser leur utilisation et proposer une stratégie de lutte intégrée.

❖ Comportement de dispersion et de migration de *T. evansi*

Cette étude nous a permis de connaître le mode de dispersion de *T. evansi* comparé à une espèce voisine bien connue *T. urticae*. Nous avons montré que la dispersion de *T. evansi* est dépendante de la densité, contrairement à ce qui est observé pour *T. urticae*. A faible densité, *T. evansi* affichait un comportement grégaire et ne se dispersait que lorsque sa population devenait importante avec une insuffisance de ressources alimentaires. Cependant, *T. urticae* s'est dispersé quelle que soit la densité de sa population sur feuille comme sur plante entière, ce qui confirme les résultats de Bowler & Benton (2005) et Fellous *et al.* (2012). De même, à fortes densités, il a été observé chez ces deux espèces des agrégats de boules de soie au sommet des plants de tomate, ce qui confirme les études montrant la formation des boules de soie chez *T. urticae* afin de pouvoir se disperser sur une longue distance et coloniser d'autres plantes hôtes (Yano, 2008; Le Goff *et al.*, 2009; Clotuche *et al.*, 2011; Delétré *et al.*, 2014). Les études similaires conduites par Agrawal *et al.* (2002) et Wertheim (2005) avaient montré qu'à fortes densités, les ressources alimentaires se raréfiaient; les espèces de *T. urticae* se regroupaient en colonies et construisaient des boules de soie. Les différents modes de dispersion de *T. evansi* et *T. urticae* (respectivement densité-dépendante et densité-indépendante) indiquent que ces deux espèces ne sont pas exposées aux mêmes contraintes et ont une dynamique de dispersion différente.

Tetranychus evansi effectue des migrations circadiennes de montée et de descente quelle que soit la densité. A forte densité, un flux important de migration a été observé au cours de la journée (entre 8 h et 15 h) et plus faible dans la nuit (entre 20 h et 3 h). Le nombre total d'individus ascendants était presque similaire au nombre total d'individus descendants. Cependant, on ne pourrait dire avec précision si tous les individus de *T. evansi* ou seulement quelques-uns seulement ont fait le mouvement aller et retour. D'autres études seraient nécessaires pour bien connaître la proportion d'individus impliqués dans ce phénomène de migration circadienne.

Le mode de dispersion et de migration de *T. evansi* pourrait donc être utilisé pour la mise en place des stratégies de lutte. En effet, le comportement grégaire de *T. evansi* pourrait faciliter la localisation au champ et l'élimination précoce des premiers plants infestés afin de réduire le risque de dispersion. Le concept de filet acaricide a prouvé son efficacité au Bénin pour contrôler les acariens phytophages *P. latus* et *T. urticae* sur l'aubergine africaine *S. macrocarpum*, en utilisant le dicofol comme acaricide (Martin *et al.*, 2010). L'application d'un filet imprégné d'acaricide sur un spot de plants infestés de *T. evansi* pourrait se révéler plus efficace qu'une pulvérisation foliaire ou que l'arrachage des plants contaminés qui risqueraient plutôt de faire fuir les acariens sur des zones non traitées ou de les disperser sur le sol ou sur d'autres plants. Par ailleurs, l'utilisation des filets acaricides trouve son intérêt dans le comportement circadien des acariens. Puisque le nombre d'individus ascendants est similaire au nombre d'individus descendants, tous les individus de *T. evansi* ou de *T. urticae* (Pralavorio *et al.*, 1989; Delétré *et al.*, 2014) impliqués dans ce rythme circadien pourraient se faire piéger et éliminer par un filet acaricide qui couvrirait le plant contaminé ainsi que les plants voisins. Les producteurs pourraient donc facilement utiliser et réutiliser de nombreuses fois donc à moindre coût, des filets acaricides pour le contrôle des foyers d'infestation de *T. evansi*. La mise en évidence de cette migration circadienne pourrait donc entraîner le développement d'une méthode de lutte ciblée et efficace utilisant les filets imprégnés d'acaricide, qui pourraient être combinés ou non avec le lâcher d'acariens prédateurs *P. longipes* à la base des plants (Furtado *et al.*, 2007b; Kungu *et al.*, en préparation) pour éliminer les œufs de *T. evansi* et faire fuir les derniers acariens vers les parties supérieures des plantes.

❖ Interactions entre *T. evansi* et son prédateur *P. longipes*

Cette étude a montré un comportement de fuite de *T. evansi* lorsqu'il se trouvait en présence de son prédateur *P. longipes* à travers les signaux visuels, vibratoires et olfactifs émis par ce dernier. *Phytoseiulus longipes* a été attiré par les signaux vibratoires et olfactifs émis par *T. evansi*. Des comportements significatifs de répulsion de *T. evansi* et d'attractivité de *P. longipes* ont été également observés lorsqu'on combinait tous les signaux. Ces résultats suggèrent que *T. evansi* et *P. longipes* interagissent à travers les trois types de signaux émis indépendamment ou simultanément ce qui confirme les résultats de Rosier & Langkilde (2011). En effet, la structure visuelle chez les espèces du genre *Tetranychus* est bien

développée par la présence d'yeux et de photorécepteurs (Evans, 1992). Chez *T. urticae* par exemple, l'œil biconvexe joue le rôle de détecteur de la lumière verte et ultraviolette; l'œil postérieur légèrement convexe reçoit uniquement les signaux ultra-violets (Alberti & Crooker, 1985; Evans, 1992). L'orientation vers une source de vibration a été bien étudiée chez les tétranyques (Barth, 1998, 2002a et b). Le prédateur, dans ces mouvements de recherche de sa proie, émet des vibrations qui sont perçues par la proie grâce à des plaques mobiles situées sur les pattes qui vibrent avec des amplitudes différentes pour signaler un potentiel danger de prédation (Hergenröder & Barth, 1983). C'est le cas par exemple de la mineuse *Phyllonorycter malella* (Gerasimov) qui prend la fuite à la suite des vibrations émises par l'hyménoptère parasitoïde *Sympiesis sericeicornis* (Nees) (Djemai *et al.*, 2001). Des comportements similaires ont été également observés chez les pucerons qui se laissent tomber pour fuir leurs prédateurs (Losey & Denno, 1998). Les signaux olfactifs aussi affectent le comportement de la proie en présence de son prédateur. Ils permettent à la proie de vite détecter la présence du prédateur (Dicke & Grostal, 2001). En effet, le sens de l'olfaction est bien développé et inné chez les tétranyques, *T. urticae* par exemple. Ils sont donc sensibles aux signaux chimiques provenant de leur prédateur (Brown & McDonald, 1985; Dicke & Grostal, 2000, 2001; Skaloudová *et al.*, 2007, Fernández-Ferrari & Schausberger, 2013). Une première limite de cette étude est l'utilisation d'un olfactomètre en tube-Y qui est l'objet de nombreuses critiques, notamment le choix binaire et l'impossibilité de prendre en compte les erreurs faites par les animaux au début de l'expérimentation (Du *et al.*, 1996; Wei & Kang, 2006). Une deuxième limite est que nous n'avons pas pu identifier les composés volatiles responsables de la fuite de *T. evansi* en présence de *P. longipes*. Cependant, les terpènes sont connus comme étant des composés naturels qui signalent le potentiel risque de prédation (Gershenzon & Dudareva, 2007). Il serait intéressant d'identifier ces volatiles de *P. longipes* pour des programmes de lutte intégrée contre ce ravageur. Les travaux récents conduits par Park *et al.* (2005), Dekker *et al.* (2011) et Delétré *et al.* (2015) ont montré que le linalol et le méthyl salicylate sont des répulsifs du moustique *Aedes aegypti* (Linnaeus) et de l'aleurode *Bemisia tabaci* (Gennadius). D'autres études ont montré aussi que le méthyl salicylate avait des propriétés répulsives contre les pucerons, les acariens et les thrips (Koschier *et al.*, 2007; Ulland *et al.*, 2008; Mallinger *et al.*, 2011). Nous avons également montré dans cette partie que des comportements significatifs de répulsion de *T. evansi* étaient obtenus lorsqu'on combinait tous les signaux. Cela pourrait être dû à un effet additif des trois signaux. Ces résultats mériteront d'être approfondis par la suite.

Phytoseiulus longipes est attiré par les signaux vibratoires et olfactifs émis par *T. evansi*. Ces résultats suggèrent que *P. longipes* est en mesure de détecter les signaux vibratoires et olfactifs provenant de sa proie. Des comportements similaires ont été rapportés pour le prédateur *Hemichroa crocea* (Geoffr) qui pouvait détecter les signaux vibratoires émis par sa proie (Cocroft & Hamel, 2010). De même, Pfannenstiel & Hunt (1995) ont observé que le prédateur *Podisus maculiventris* (Say) perçoit les vibrations produites par sa proie *Plathypena scabra* (Fabricius) et oriente ainsi son déplacement vers la source. En effet, *P. persimilis* parvient à détecter des signaux chimiques émis par sa proie grâce aux récepteurs sensoriels situés sur les pattes I et sur les palpes, ce qui lui permet de localiser sa proie à courte comme à longue distance (Dicke *et al.*, 1990). Des tests électro-physiologiques conduits sur la première paire de pattes chez *P. persimilis* ont révélé la présence de deux ou quatre substances volatiles appelées kairomones qui seraient émises par les plants de haricots infestés de *T. urticae* (De Bruyne *et al.*, 1991). Cela pourrait expliquer l'habileté des prédateurs à pouvoir détecter facilement leurs proies (Sarmiento *et al.*, 2011). Par ailleurs, Ferrero *et al.* (2014a et b) ont montré une forte attractivité de *P. longipes* vers les disques de feuilles de tomates ou de haricots infestés par *T. evansi* par rapport aux disques de feuilles saines. Plusieurs autres études ont également montré que *P. persimilis* était attiré par des mélanges de substances volatiles appelées HIPVs qui seraient émis par les plantes attaquées (Takabayashi *et al.*, 2000; Kant *et al.*, 2004, 2008; Moraes & Mescher, 2004; van Wijk *et al.*, 2008; Hare, 2011). Dans notre cas, *P. longipes* a passé plus de temps au côté des capsules perforées contenant *T. evansi*, ce qui montre bien l'implication des composés volatiles dans l'attraction présumée par Nelson & Jackson (2011a et b). Les prédateurs peuvent donc exploiter toute substance chimique les informant sur la présence de leurs proies potentielles (Uhl, 2013). Nous avons également, à travers cette étude, montré que la combinaison des différents signaux donnait des comportements significatifs d'attraction de *P. longipes* qui pourraient certainement être dû à la quantité de signaux chimiques (kairomones) libérés ou à un effet additif entre les trois signaux. Ces résultats mériteront d'être approfondis ultérieurement.

Le linalol et le méthyl salicylate ont été identifiés parmi les volatiles de *T. evansi* et aussi parmi les substances volatiles de plants de tomate infestés de *T. evansi*. Par ailleurs, Kant *et al.* (2004) avaient déjà montré que le plant de tomate infesté de *T. urticae* libérait du linalol et du méthyl salicylate. A cette étape, il est difficile de conclure quant à l'origine de ces deux

composés chimiques. La collecte des composés volatiles sur des plantes autres que les solanacées, le haricot par exemple infesté de *T. evansi*, permettrait peut-être de préciser l'origine de ces deux composés. Le linalol et le méthyl salicylate ont été attractifs vis-à-vis de *P. longipes* à toutes les doses testées (Figure 20). Plusieurs études avaient déjà montré que le linalol et le MeSA étaient attractifs vis-à-vis d'autres prédateurs comme *P. persimilis* et *Amblyseius potentillae* (Garman) (Dicke *et al.*, 1990; Scutareanu *et al.*, 1997; James, 2003b; De Boer & Dicke, 2004; De Boer *et al.*, 2004). Ces composés semblent jouer un rôle important dans le comportement alimentaire de ces prédateurs et pourraient donc être utilisés dans l'amélioration de la lutte biologique contre les tétranyques. Les travaux conduits par James & Price (2004) au Sud-centre des USA et James (2003a et b, 2005) ont montré que les prédateurs comme *Geocoris pallens* (Stal.), *Chrysopa nigricornis* (Burmeister), *Stethorus punctum picipes* (Casey), *Demodes brevis* (Akbulatova) et *Orius tristicolor* (White) étaient attirés par un diffuseur de MeSA dont l'effet réduisait considérablement les populations de tétranyques dans les champs de raisin et de houblon. Des composés volatiles comme le linalol et le MeSA, pourraient également être émis par certaines plantes compagnes qui pourraient être associées aux cultures. En effet, plus de 200 espèces de plantes produisent du linalol, principalement les plantes de la famille des Lamiaceae (le basilic, le thym) (Lee *et al.*, 2005), les Lauraceae comme les lauriers ou la cannelle (Letizia *et al.*, 2003; Sampaio *et al.*, 2012), les Rutaceae comme les agrumes (Sadgrove *et al.*, 2014), les Apiaceae comme la coriandre (Jamil *et al.*, 2014), les Poaceae comme les palmarosa (Olonisakin, 2010). Les travaux conduits par Delétré *et al.* (2015) sur les propriétés répulsives d'extraits de plantes ont montré que la coriandre *Coriandrum sativum* (Linné) contenant essentiellement du linalol (72 %) avait des propriétés répulsives contre l'aleurode *B. tabaci* un ravageur majeur de la tomate. D'autres travaux conduits par Park *et al.* (2005) et Dekker *et al.* (2011) ont montré que le linalol et le méthyl salicylate sont des répulsifs de moustique, des pucerons, des acariens et des thrips (Koschier *et al.*, 2007; Ulland *et al.*, 2008; Mallinger *et al.*, 2011). L'utilisation de la coriandre comme plante compagne pourrait donc avoir un double avantage de répulsion du ravageur *B. tabaci* et d'attraction d'acariens prédateurs. Le méthyl salicylate est également produit chez les plantes des genres *Gaultheria* (Zhang *et al.*, 1999, 2011) et *Betula* (Freysdottir *et al.*, 2011). La disposition de tels diffuseurs naturels dans les cultures de tomate pourrait non seulement attirer les prédateurs cibles comme *P. longipes* mais aussi d'autres espèces comme *P. persimilis*. Les propriétés attractives du linalol et du MeSA pourraient donc être utilisées pour mettre en place des stratégies de lutte intégrée efficace contre *T. evansi*.

❖ **Efficacité de la mousse imprégnée de *M. anisopliae***

L'originalité de cette étude repose sur le comportement migratoire des acariens. J'ai en effet montré qu'une mousse synthétique imprégnée de *M. anisopliae* et placée autour de la tige principale d'un plant de tomate pouvait contrôler une population de *T. evansi* avec une rémanence d'environ 36 jours dans des conditions de laboratoire, à condition que la mousse imprégnée soit placée au-dessus des feuilles infestées. L'efficacité de ce piège à auto-dissémination et sa durée d'action peuvent s'expliquer respectivement par le comportement migratoire des acariens qui peuvent circuler à travers les multiples pores de la mousse utilisée et par la protection des spores au sein de la mousse contre les UV et la déshydratation. L'inconvénient c'est que la mousse imprégnée de champignon entomopathogène n'est efficace que si elle est placée sur la tige de tomate au-dessus de l'infestation. Cependant j'ai aussi montré que la mousse imprégnée pouvait être combinée avec le lâcher de *P. longipes* pour un contrôle encore plus efficace que la mousse imprégnée et utilisée seule. En effet, la mousse imprégnée du champignon ne semble pas affecter le prédateur, ce qui confirme les études antérieures sur la sensibilité de certains phytoséiides et de plusieurs insectes non-cibles comme *N. xoridana* et *N. tanajoae* (Moraes & Delalibera, 1992; Hountondji *et al.*, 2002; Wekesa *et al.*, 2007; Maniania & Kungu, 2011). Les deux actions combinées du champignon et du prédateur se complètent donc parfaitement (Roy & Pell, 2000; Onzo *et al.*, 2004, 2005). Cette technique de la mousse imprégnée pourrait donc permettre une meilleure utilisation du bio-pesticide à base de *M. anisopliae* du fait d'une augmentation significative de sa durée d'action et de sa compatibilité avec l'action des acariens prédateurs pour protéger une plante d'autant plus qu'elle est cultivée sous abris (Migiro *et al.*, 2010; Niassy *et al.*, 2012; Mfuti *et al.*, 2015).

❖ **Invasion de *Tetranychus evansi* au Bénin: comportement des petits producteurs et propositions de différentes méthodes de lutte à court et moyen terme**

Les résultats de l'enquête ont montré que le gboma, la tomate et l'amarante étaient les légumes les plus cultivés des trois sites enquêtés, confirmant leur importance pour la population urbaine béninoise et constituant aussi une source importante de revenus pour les producteurs (Gerstl, 2001).

Cette étude nous a permis aussi de confirmer le caractère invasif de *T. evansi* dont les premiers dégâts observés à Sèmè-Kpodji en 2008 se sont depuis étendus sur tout le littoral avec une incidence très forte sur la production de tomate, d'amaranthe et surtout du gboma, particulièrement en saison sèche. Des études antérieures avaient signalé *T. urticae*, *T. ludeni* et *P. latus* comme les plus importants acariens sur ces cultures au Bénin (Adango, 2005; Adango *et al.*, 2007; Martin *et al.*, 2010). Cependant aucune de ces trois espèces n'a été retrouvée dans les échantillons collectés suggérant qu'elles ont été supplantées par *T. evansi*. Vu les caractères invasifs et destructeurs de *T. evansi*, les maraîchers n'ont pas eu d'autre alternative que d'utiliser la lutte chimique avec les produits disponibles sur le marché local. Mes résultats ont montré la forte dépendance des maraîchers à la lutte chimique pour la protection des légumes contre les ravageurs. Pour contrôler *T. evansi*, les petits producteurs ont utilisé majoritairement des insecticides à base de pyréthrinoides et d'organophosphorés qui pourtant semblent peu efficaces aux dires de ces mêmes agriculteurs. Dans une étude réalisée sur 10 périmètres maraîchers du Sud-Bénin, James *et al.* (2005) ont montré que 90 % de la production de *S. macrocarpon* était détruite par les acariens malgré ou en l'absence de traitement phytosanitaire. Selon les mêmes auteurs, la fréquence d'application de pesticides sur cette culture était d'une fois par semaine avec en moyenne sept applications de deltaméthrine ou de bifenthrine. Les insecticides les plus utilisés étaient les pyréthrinoides et les organophosphorés modérément toxiques (classe II) pour l'homme et l'environnement, généralement homologués au Bénin pour la culture du coton et non pour le maraîchage confirmant ainsi les observations faites par Ahouangninou *et al.* (2011). Les résultats de mon enquête ont aussi montré une absence totale d'acariens prédateurs locaux comme *Typhlodromalus saltus* (Denmark & Matthysse), *Iphiseius degenerans* (Berlese) et *Amblyseius tamatavensis* (Blommers) précédemment observés sur *S. macrocarpum* et *A. cruentus* (Adango *et al.*, 2006). Cela confirme les observations d'Adango *et al.* (2007) réalisées avant l'arrivée de *T. evansi* dans ces mêmes périmètres en raison sans doute de l'intensité des traitements chimiques. En revanche, ils en avaient trouvé dans les parcelles non traitées de l'Institut International d'Agriculture Tropicale (IITA) situé à Abomey-Calavi. Cette absence de prédateur n'explique donc pas à elle seule les pullulations de *T. evansi* et l'ampleur de leurs dégâts. Une autre explication serait d'une part l'inefficacité des traitements chimiques utilisés et la prolificité de *T. evansi* comparée à celle de *T. urticae* (Azandémè *et al.*, 2014).

Ces pratiques phytosanitaires posent un véritable problème de santé publique. Des résidus de pesticides ont en effet été décelés dans différentes espèces de poissons dans le fleuve Ouémé au Bénin (Pazou *et al.*, 2006). Ahouangninou *et al.* (2012), dans leur étude sur les pratiques phytosanitaires des maraîchers du Sud-Bénin, ont montré des Indices de Risque pour l'Environnement (IRE) et la santé (IRS) élevés avec l'utilisation fréquente de carbofuran, de chlorpyrifos éthyl et d'endosulfan. Face à ce constat, il devient urgent d'apporter à ces petits producteurs des méthodes de lutte plus respectueuses de l'environnement pour pouvoir contrôler ce fléau.

Des études antérieures avaient démontré l'efficacité de certains acaricides comme l'abamectine, le dicofol, la propargite et le cyenopyrafène qui pourraient être recommandés aux maraîchers (Gotoh *et al.*, 2010; Bugeme *et al.*, 2014; Toroitich *et al.*, 2014). Cependant, les producteurs devront être sensibilisés aux stratégies de rotation et d'alternance de ces acaricides, afin de retarder le risque de sélectionner des populations résistantes. L'efficacité des filets acaricides pour le contrôle de *T. urticae* et de *P. latus* a été déjà démontrée (Martin *et al.*, 2010). Le comportement migratoire de *T. evansi* pourrait justifier l'utilisation de ces filets acaricides qui pourraient être déposés ponctuellement sur les foyers d'infestation afin de piéger les acariens au cours de leur migration ascendante ou de leur dispersion. Par ailleurs, l'action des filets acaricides pourrait être renforcée par l'ajout des diffuseurs de linalol et de méthyl salicylate dans les champs pour attirer les prédateurs. Dans ces conditions, les petits producteurs devront être au préalable sensibilisés pour réduire voire supprimer l'utilisation des pesticides chimiques afin de favoriser la présence de ces prédateurs dans les champs.

Une autre méthode de lutte mais à plus long terme est la lutte biologique. Cette méthode consiste à multiplier et lâcher des acariens prédateurs sur les plantes infestées. Cela peut être fait soit avec des espèces locales soit avec des espèces introduites. Dans le cas de *T. evansi*, il serait nécessaire d'introduire l'espèce *P. longipes* qui s'est révélée la plus efficace et qui n'est pas présente au Bénin. Pour une réussite de cette opération, les petits producteurs devront être sensibilisés à restreindre au stricte maximum l'usage des pesticides chimiques pour faciliter l'adaptation et l'établissement du prédateur. Les plantes compagnes produisant le linalol et le méthyl salicylate pourraient également être associées pour stimuler l'activité des prédateurs. Cette méthode ne présente aucune toxicité ni pour l'homme, ni pour les autres auxiliaires et constitue une solution durable sur le long terme et respectueuse de l'environnement; elle peut

être utilisée aussi bien en plein champ comme sous abris. Elle est cependant difficile à mettre en place car elle nécessite une production en masse des prédateurs et une utilisation rapide.

Conclusion générale et perspectives

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Au regard des travaux de recherche effectués au cours de ma thèse, les mousses imprégnées de *M. anisopliae* utilisées seules ou combinées avec le lâcher d'acariens prédateurs ou encore associées avec la diffusion de linalol ou de méthyl salicylate semblent être adaptés plus à la production des tomates sous serre qu'aux cultures de plein champ en raison de la technicité que ces méthodes nécessitent de la part des producteurs et de leur efficacité qui n'est pas aussi immédiate qu'un traitement chimique. Cependant l'utilisation des filets acaricide sur des foyers d'infestation peut être une technique facilement utilisable par les petits producteurs, tout comme le recours à des plantes compagnes productrices de linalol ou de méthyl salicylate. Par ailleurs, la recommandation de produits acaricides efficaces et peu toxiques pour les acariens prédateurs est aussi une solution pour accroître l'effet régulateur des acariens prédateurs. A plus long terme l'introduction, la multiplication et la dispersion du prédateur *P longipes* au Bénin permettrait sans doute l'installation de la seule espèce qui s'est jusqu'à maintenant révélée prédatrice efficace de *T. evansi*. Reste à savoir si parmi les espèces locales certaines arriveront à réguler ce nouveau ravageur.

La lutte biologique est une technique difficile à utiliser et longue à mettre en place mais, elle est la seule à garantir une protection et une production agricole durable. Les différentes méthodes de lutte ci-dessus décrites pourraient aider les petits producteurs d'Afrique à mieux contrôler les ravageurs de leur culture tout en limitant au maximum le recours aux pesticides chimique, protégeant ainsi l'environnement et la santé des populations.

Suite à ce travail de thèse, des questions de recherche restent posées et mes résultats de laboratoire doivent être complétés par des tests au champ:

- ✚ Quels sont les volatiles libérés par *P. longipes* et qui feraient fuir *T. evansi*? En effet, les terpènes sont connus comme étant des composés naturels qui signalent le potentiel risque de prédation (Gershenzon & Dudareva, 2007) et il semble particulièrement pertinent de collecter et d'identifier ces composés volatiles libérés par *P. longipes* et qui pourraient être utilisés dans des programmes de lutte intégrée contre *T. evansi*.

- ✚ Bien que nous ayons montré que la technique de la mousse imprégnée de *M. anisolpiae* utilisée seule ou combinée avec des acariens prédateurs soit efficace en condition de laboratoire, il s'avère indispensable de montrer son efficacité sous abris et en plein champ en tenant compte des conditions climatiques au niveau de la plante en particulier de l'effet de l'alternance d'humidités relatives faibles et élevées sur le prédateur et le champignon sachant que si *P. longipes* supporte des humidités relatives basses (Ferrero, 2009) ce n'est pas le cas pour *M. anisolpiae* (Ekesi *et al.*, 1999; Dimbi *et al.*, 2004; Kiewnick, 2006).

- ✚ La lutte biologique est une technique à long terme qui pourrait aider à contrôler de façon durable *T. evansi* au Bénin. Il serait alors intéressant de faire des prospections plus poussées dans les zones de fortes productions de légumes (gboma, tomate, amaranthe etc...) et sur des plantes réservoirs à la recherche des prédateurs locaux qui se seraient adaptés à cette espèce invasive. Pour cela j'ai participé avec des chercheurs du Cirad, de l'Icipe et de l'IITA à la rédaction d'un projet visant à développer un programme de lutte intégrée contre *T. evansi* au Bénin avec pour objectif de mettre en place des mesures efficaces de lutte à court terme mais aussi d'introduire le prédateur *P. longipes* pour une production en masse qui serait suivie de lâchers inondatifs dans les champs.

Références

REFERENCES

- Adango E, 2005.** Inventaire de la faune des acariens sur *Amaranthus cruentus* L. (Amaranthaceae), *Solanum macrocarpon* L. et *Solanum aethiopicum* L. (Solanaceae) dans le sud Bénin. Mémoire de DEA, Université d'Abomey-Calavi, Bénin.
- Adango E, Onzo A, Hanna R, Atachi P & James B, 2006.** Inventaire de la faune des acariens sur *Amaranthus cruentus* (Amaranthaceae), *Solanum macrocarpon* et *Solanum aethiopicum* (Solanaceae) dans le sud Bénin. Int. J. Trop. Ins. Sci. 26(03): 155-165.
- Adango E, Onzo A, Hanna R, Atachi P & James B, 2007.** Mite Pests of Major Importance on Indigenous Leafy Vegetables in Benin: the Search for Appropriate Control Strategies. Acta Hort. 752: 311-318.
- Adorgloh-Hessou R, 2006.** Guide pour le développement de l'entreprise de production et de commercialisation de légumes de qualité dans les régions urbaines et périurbaines du Sud-Bénin. Rapport de consultation, IITA - Bénin, 86 pp.
- Agelopoulos NG & Keller MA, 1994.** Plant-natural enemy association in the tritrophic system, *Cotesia rubecula*-*Pieris rapae*-Brassicaceae (Cruciferae): I. Sources of infochemicals. J. Chem. Ecol. 20: 1725-1734.
- Agrawal AA, Vala F & Sabelis MW, 2002.** Induction of preference and performance after acclimation to novel hosts in a phytophagous spider mite: adaptive plasticity? Am. Nat. 159: 553-565.
- Agudella-Silva P, 1986.** A species of *Triplosporium* (Zygomycetes: Entomophthorales)) infecting *Mononychellus progressivus* (Acari: Tetranychidae) in Venezuela. Fla. Entomol. 69: 444-446.
- Ahouangninou CB, Fayomi BE & Martin T, 2011.** Évaluation des risques sanitaires et environnementaux des pratiques phytosanitaires des producteurs maraîchers dans la commune rurale de Tori-Bossito (Sud-Bénin). Cah. Agric. 20: 216-22.

- Ahouangninou CB, Martin T, Edoth P, Siddick IA, Bio-Bangana S, Dion S, Samuel O, St-Laurent L, Boko M, Simon S & Fayomi BE, 2012.** Characterization of health and environmental risks of pesticide use in market-gardening in the rural city of Tori-Bossito in Benin, West Africa. *J. Env. Prot.* 3: 241-248.
- Alberti G & Crooker AR, 1985.** Internal anatomy. *Spider mites: Their biology, natural enemies and control.* *World Crop Pests A.* 1: 29-62.
- Amoussougbo Y, 1993.** Enquête sur l'usage des pesticides en cultures maraîchères dans le Sud-Bénin et expérimentation de trois nématicides dans la lutte contre les nématodes à galles. Thèse d'Ingénieur Agronome, Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université Nationale du Bénin, 116 pp.
- Assogba-Komlan F, Anihouvi P, Achigan E, Sikirou R, Boko A, Adje C, Ahle V, Vodouhe R & Assa A, 2007.** Pratiques culturales et teneur en éléments antinutritionnels (nitrates et pesticides) du *Solanum macrocarpum* au Sud du Bénin. *Afr. J. Food Agric. Nut. Develop.* 7: 1-21.
- Assogba-Komlan F, Singbo A, Ahlé V & Azagba J, 2001.** Résultats préliminaires sur la valorisation de quelques déchets agro-industriels en maraîchage, Cas de la ville de Cotonou. In: Actes de l'Atelier Scientifique 2, Programme Régional Sud-Centre du Bénin, 2001: 16-26.
- Azandémè GY, 2010.** Evaluation de l'efficacité de l'appât protéique GF-120 appliqué sur deux espèces de plantes de perchoir dans la lutte contre les mouches des fruits téphritides des cucurbitacées. Mémoire d'étude pour l'obtention du Master-II en Environnement-Santé et Développement Durable. Centre Interfacultaire de Formation et de Recherche en Environnement pour le Développement Durable, Université d'Abomey-Calavi: 74 pp.
- Azandémè-Hounmalon GY, Affognon HD, Assogba-Komlan F, Tamò M, Fiaboe KKM; Kreiter S & Martin T, Farmers' control practices in Benin against the invasive red spider mite, *Tetranychus evansi* Baker & Pritchard (Soumis dans Crop Prot.).**
- Azandémè-Hounmalon GY, Fellous S, Kreiter S, Fiaboe KKM, Subramanian S, Kungu M & Martin T, 2014.** Dispersal Behavior of *Tetranychus evansi* and *T. urticae* on

Tomato at Several Spatial Scales and Densities: Implications for Integrated Pest Management. PLoS ONE 9(4): e95071. doi:10.1371/journal.pone.0095071.

Azandémè-Hounmalon GY, Torto B, Fiaboe KKM, Subramanian S, Kreiter S, Martin T, Visual, vibratory and olfactory cues affect interactions between the red spider mite *Tetranychus evansi* and its predator *Phytoseiulus longipes*. (Soumis dans Journal of Pest Science.)

Barth FG, 1998. The vibrational sense of spiders, In Comparative Hearing: Insects, Hoy, R.R., Popper, A.N., and Fay, R.R., Eds., Springer, New York, Berlin, Heidelberg: pp. 228-278.

Barth FG, 2002a. A spider's world: Sense and Behavior, Springer Berlin, Heidelberg chap.18.

Barth FG, 2002b. A spider's world: Sense and Behavior, Springer Berlin, Heidelberg chap.20.

Bell JR, Bohan DA, Shaw EM & Weyman GS, 2005. Ballooning dispersal using silk: world fauna, phylogenies, genetics and models. Bull. Entomol. Res. 95: 69-114.

Benjamin MA, Zhioua E & Ostfeld RS, 2002. Laboratory and field evaluation of the entomopathogenic fungus *Metarhizium anisopliae* (Deuteromycetes) for controlling questing adult *Ixodes scapularis* (Acari: Ixodidae). J. Med. Entomol. 39(5): 723-728.

Bergman CM, Schaefer JA & Luttich SN, 2000. Caribou movement as a correlated random walk. Oecol. 123: 364-374.

Biddinger DJ, Weber DC & Hull LA, 2009. Coccinellidae as predators of mites: Stethorini in biological control. Biol. Cont. 51(2): 268-283.

Binns ES, 1982. Phoresy as migration-Some functional aspects of phoresy in mites. *Biol. Rev.* 57(4): 571-620.

Blaakmeer A, Hagenbeek D, Van Beek TA, De Groot AE, Schoonhoven IM & Van Loon JJA, 1994. Plant response to eggs vs. Host marking pheromone as factors inhibiting oviposition by *Pieris brassicae*. J. Chem. Ecol. 20: 1657-1665.

- Blair BW, 1989.** Laboratory screening of acaricides against *Tetranychus evansi* Baker & Pritchard. Crop Prot. 8: 212-216.
- Bonato O, 1999.** The effect of temperature on life history parameters of *Tetranychus evansi* (Acari: Tetranychidae). Exp. Appl. Acarol. 23: 11-19.
- Boubou A, Migeon A, Roderick G & Navajas M, 2010.** Recent emergence and worldwide spread of the red tomato spider mite, *Tetranychus evansi*: genetic variation and multiple cryptic invasions. Biological Invasions, online first.
- Bowler DE & Benton TG, 2005.** Causes and consequences of animal dispersal strategies: relating individual behaviour to spatial dynamics. Biol. Rev. 80: 205-225.
- Boykin LS & Campbell WV, 1984.** Wind dispersal of the two-spotted spider mite (Acari: Tetranychidae) in North Carolina peanut fields. Env. Entomol. 13: 212-227.
- Brandenburg RL & Kennedy GG, 1982.** Intercrop relationships and spider mite dispersal in a corn/peanut agro-ecosystem. Entomol. Exp. Appl. 32: 269-276.
- Britto EPJ, Gondim Jr MGC, Torres JB, Fiaboe KKM, Moraes GJ de & Knapp M, 2009.** Predation and reproductive output of the ladybird beetle *Stethorus tridens* preying on tomato red spider mite *Tetranychus evansi*. Biocont. 24: 363-368.
- Brown RE & McDonald DW, 1985.** Social odours in mammals. Oxford Clarendon Press, (1): 345-447.
- Bugeme DM, Knapp M, Boga HI, Wanjoya AK & Maniania NK, 2009.** Influence of temperature on virulence of fungal isolates of *Metarhizium anisopliae* and *Beauveria bassiana* to the two-spotted spider mite *Tetranychus urticae*. Mycopathol. 167(4): 221-227.
- Bugeme DM, Knapp M, Ekesi S, Chabi-Olaye A, Boga HI & Maniania NK, 2014.** Efficacy of *Metarhizium anisopliae* in controlling the two-spotted spider mite *Tetranychus urticae* on common bean in greenhouse and field experiments. Ins. Sci. 1-8 doi: 10.1111/1744-7917.12111.

- Bugeme DM, Maniania NK, Knapp M & Boga HI, 2008.** Effect of temperature on virulence of *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* isolates to *Tetranychus evansi*. *Exp. Appl. Acarol.* 46: 275-285.
- Carvalho R, Yang Y, Field LM, Gorman K, Moores G, Williamson MS & Bass C, 2012.** Chlorpyrifos resistance is associated with mutation and amplification of the acetylcholinesterase- 1 gene in the tomato red spider mite, *Tetranychus evansi* - *Pest. Biochem. Phys.* 104: 143-149.
- Chandler D, Davidson G & Jacobson RJ, 2005.** Laboratory and glasshouse evaluation of entomopathogenic fungi against the two-spotted spider mite, *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae), on tomato, *Lycopersicon esculentum*. *Biocont. Sci. Technol.* 15: 37-54.
- Chatzivasileiadis EA & Sabelis MW, 1997.** Toxicity of methyl ketones from tomato trichomes to *Tetranychus urticae* Koch. *Exp. Appl. Acarol.* 21: 473-484.
- Chazeau J, 1985.** Predacious insects. In: Spider mites. Their biology, natural enemies and control (W. Helle and M. W. Sabelis, eds.), Volume 1B, Elsevier Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo: Pp 211-247.
- Clobert J, Danchin E, Dhondt AA & Nichols JD, 2001.** *Dispersal.* Oxford: Oxford University Press. 452 pp.
- Clotuche G, Mailleux A-C, Astudillo Fernandez A, Deneubourg J-L, Detrain C & Hance T, 2011.** The Formation of Collective Silk Balls in the Spider Mite *Tetranychus urticae* Koch. *PLoS One* 6(4): e18854. doi:10.1371.
- Clotuche G, Navajas M, Mailleux AC & Hance T, 2013.** Reaching the ball or missing the flight? Collective dispersal in the two-spotted spider mite *Tetranychus urticae*. *PloS one*, 8(10), e77573.
- Cocroft RB & Hamel JA, 2010.** Vibrational communication in the ‘other insect societies: a diversity of ecology signals, and signal functions. The use of vibrations in communication: properties, mechanisms and function across taxa. *Transworld Research Network, Trivandrum:* pp. 47-68.

- Cranham JE & Helle W, 1985.** Pesticide Resistance in Tetranychidae, pp. 405-421. In: HELLE, W. and SABELIS, M.W. (eds.), Spider mites, their biology, natural enemies and control. World Crop Pests, 1B. - Elsevier, Amsterdam: 488 pp.
- Dawkins R & Krebs JR, 1979.** Arms races between and within species. Proceed. R. Soc. B: Biol. Sci. 205: 489-511.
- De Boer JG & Dicke M, 2004.** The role of methyl salicylate in prey searching behavior of the predatory mite *Phytoseiulus persimilis*. J. Chem. Ecol. 30: 255-271.
- De Boer JG, Posthumus MA & Dicke M, 2004.** Identification of volatiles that are used in discrimination between plants infested with prey or non-prey herbivores by a predatory mite. J. Chem. Ecol. 30: 2215-2230.
- De Bruyne M, Dicke M & Tjallingii WF, 1991.** Receptor cell responses in the anterior tarsi of *Phytoseiulus persimilis* to volatile kairomone components. Exp. Appl. Acarol. 13: 8-53.
- Dekker T, Ignell R, Ghebru M, Glinwood R & Hopkins R, 2011.** Identification of mosquito repellent odours from *Ocimum forskolei*. Para. Vect. 4: 183.
- Delalibera IJr, Sosa Gomez DR, Moraes GJ de, Alencar JA & Fraias Araujo N, 1992.** Infection of *Mononychellus tanajoa* (Acari: Tetranychidae) by the fungus *Neozygites* sp (Entomophthorales) in Northern Brazil. Florida Entomol. 75: 145-147.
- Delétré EM, Bonafos R & Martin T, 2014.** Evaluation of acaricide-treated string curtains for control of two-spotted spider mite *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Tetranychidae) on greenhouse roses and impact of the string curtain on the predatory mite *Phytoseiulus persimilis* Athias-Henriot (Acari: Phytoseiidae). Crop Prot. 60: 34-43.
- Delétré E, Chandre F, Barkman B, Menut C & Martin T, 2015.** Naturally occurring bioactive compounds from four repellent essential oils against *Bemisia tabaci* whiteflies. Pest Manag. Sci. doi 10.1002/ps.3987

- Dicke M, Gols R, Ludeking D & Posthumus MA, 1999.** Jasmonic acid and herbivory differentially induce carnivore-attracting plant volatiles in lima bean plants. *J. Chem. Ecol.* 25: 1907-1922.
- Dicke M & Grostal P, 2000.** Recognising one's enemies: a functional approach to risk assessment by prey. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 47: 258-264. doi:10.1007/s002650050663.
- Dicke M & Grostal P, 2001.** Chemical detection of natural enemies by arthropods: an ecological perspective. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 32: 1-23.
- Dicke M, Takabayashi J, Posthumus MA, Schuette C & Krips OE, 1998.** Plant phytoseiid interactions mediated by herbivore-induced plant volatiles: variation in production of cues and in response of predatory mites. *Exp. Appl. Acarol.* 22: 311-333.
- Dicke M, Van Beek TA, Posthumus MA, Ben Dom N, Van Bokhoven H & De Groot AE, 1990.** Isolation and identification of volatile kairomone that affects acarine predator-prey interactions. Involvement of host plant in its production. *J. Chem. Ecol.* 16: 381-396.
- Dimbi S, Maniania NK, Lux SA & Mueke JM, 2004.** Effect of constant temperatures on germination, radial growth and virulence of *Metarhizium anisopliae* to three species of African tephritid fruit flies. *Biocont.* 49: 83-94.
- Djemai I, Casas J & Magal C, 2001.** Matching host reactions to parasitoid wasp vibrations. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biol. Sci.* 268: 2403-2408.
- Duffey SS, 1986.** Plant glandular trichomes: their partial role in defense against insects. In: B.E. Juniper and T.R.C. Southwood (eds), *Insects and the Plant surface*. Edward Arnold, London: 151-172.
- Dunning JBJ, Stewart DJ, Danielson BJ, Noon BR, Root TL, Lamberson, RH & Steven, EE, 1995.** Spatially explicit population models: current forms and future uses. *Ecol. Appl.* 5: 3-11.
- Du Y, Poppy GM & Powell W, 1996.** Relative importance of semiochemicals from first and second trophic levels in host foraging behavior of *Aphidius ervi*. *J. Chem. Ecol.* 24: 1355-1368.

- Du Y, Poppy GM, Powell W, Pickett JA, Wadhams IJ & Woodcock CM, 1998.** Identification of semiochemicals released during aphid feeding that attract parasitoid *Aphidius ervi*. *J. Chem. Ecol.* 24: 1355-1368.
- Ekesi S, Maniania NK & Ampong-Nyarko K, 1999.** Effect of temperature on germination, radial growth and virulence of *Metarhizium anisopliae* and *Beauveria bassiana* on *Megalurothrips sjostedti*. *Biocont. Sci. Technol.* 9: 177-185.
- Ekesi S, Maniania NK & Lwande W, 2000.** Susceptibility of the legume flower thrips to *Metarhizium anisopliae* on different varieties of cowpea. *Biocont.* 45: 79-95.
- Elias DO, Hebets EA & Hoy RR, 2006.** Female preference for complex/novel signals in a spider. *Behav. Ecol.* 17: 765-771.
- Elias DO, Kasumovic MM, Punzalan D, Andrade MCB & Mason AC, 2008.** Assessment during aggressive contests between male jumping spiders. *Anim. Behav.* 76: 901-910.
- Elias DO, Mason AC, Maddison WP & Hoy RR, 2003.** Seismic signals in a courting male jumping spider (Araneae: Salticidae). *J. Exp. Biol.* 206: 4029-4039.
- Escudero LA & Ferragut F, 2005.** Life-history of predatory mites *Neoseiulus californicus* and *Phytoseiulus persimilis* (Acari: Phytoseiidae) on four spider mite species as prey, with special reference to *Tetranychus evansi* (Acari: Tetranychidae). *Biol. Cont.* 32: 378-384.
- Evans GO, 1992.** Principles of Acarology. Wallingford, Oxon, UK; CAB International pp. 563.
- Fellous S, Duncan A, Coulon A & Kaltz O, 2012.** Quorum Sensing and Density- Dependent Dispersal in an Aquatic Model System. *PLoS ONE* 7(11): e48436. doi:10.1371/journal.pone.0048436.
- Fernandez-Ferrari MCF & Schausberger P, 2013.** From repulsion to attraction: species- and spatial context-dependent threat sensitive response of the spider mite *Tetranychus urticae* to predatory mite cues. *Naturwissenschaften* 100: 541-549.

- Ferragut F & Escudero LA, 1999.** *Tetranychus evansi* Baker & Pritchard (Acari: Tetranychidae), una nueva araña roja en los cultivos hortícolas españoles. Bol.Sanid. Veg. Plagas 25 (2): 157-164.
- Ferreira MA & Sousa ME, 2011.** Hosts and Distribution of the Spider Mite *Tetranychus evansi* (Acari: Tetranychidae) in Portugal. Hale, C., XXVIII International Horticultural Congress on Science and Horticulture for People, Leuven 1, Int. Soc. Hort. Sci. (917): 133-136.
- Ferrero M, 2009.** Etude de la variabilité des comportements alimentaires du prédateur et conséquences pour la lutte biologique. Thèse de doctorat de l'Université SupAgro de Montpellier, 228 pp.
- Ferrero M, Calvo FJ, Atuahiya T, Tixier M-S & Kreiter S, 2011.** Biological control of *Tetranychus evansi* Baker and Pritchard and *Tetranychus urticae* Koch by *Phytoseiulus longipes* Evans in tomato greenhouses in Spain (Acari: Tetranychidae, Phytoseiidae). - Biol. Cont. 58: 30-35.
- Ferrero M, Moraes GJ de, Kreiter S, Tixier M-S & Knapp M, 2007.** Life tables of the predatory mite *Phytoseiulus longipes* feeding on *Tetranychus evansi* at four temperatures (Acari: Phytoseiidae, Tetranychidae). Exp. Appl. Acarol. 41: 45-53.
- Ferrero M, Tixier M-S & Kreiter S, 2014a.** Different feeding behaviors in a single predatory mite species. **a.** Comparative life histories of three populations of *Phytoseiulus longipes* (Acari: Phytoseiidae) depending on prey species and plant substrate. Exp. Appl. Acarol. 62(3): 313-324.
- Ferrero M, Tixier M-S & Kreiter S, 2014b.** Different feeding behaviours in a single predatory mite species. **b.** Responses of two populations of *Phytoseiulus longipes* (Acari: Phytoseiidae) to various prey species, prey stages and plant substrates. Exp. Appl. Acarol. 62(3): 325-335.
- Fiaboe KKM, Fonseca RL, Moraes GJ de, Ogol CKPO & Knapp M, 2006.** Identification of priority area in South America for exploration of natural enemies for classical biological control of *Tetranychus evansi* (Acari: Tetranychidae) in Africa. Biol. Cont. 38: 373-379.

- Fiaboe KKM, Gondim Jr MGC, Moraes GJ de, Ogol CKPO & Knapp M, 2007a.** Bionomics of the acarophagous ladybird beetle *Stethorus tridens* fed *Tetranychus evansi*. J. Appl. Entomol. 131(5): 355-361.
- Fiaboe KKM, Gondim Jr MGC, Moraes GJ de, Ogol CKPO & Knapp M, 2007b.** Surveys for natural enemies of the tomato red spider mite *Tetranychus evansi* (Acari: Tetranychidae) in northeastern and southeastern Brazil. Zoot. 1395: 33-58.
- Flechtmann CHW & Knihinicki DK, 2002.** New species and new records of *Tetranychus* Dufour from Australia, with a key to the major groups in this genus based on females (Acari: Prostigmata: Tetranychidae). Aus. J. Entomol. 41: 118-127.
- Freysdottir J, Sigurpalsson MB, Omarsdottir S, Olafsdottir ES, Vikingsson A & Hardardottir I, 2011.** Ethanol extract from birch bark (*Betula pubescens*) suppresses human dendritic cell mediated. The responses and directs it towards the regulatory response in vitro. Immunol. Lett. 136: 90-96.
- Furtado IP, Moraes GJ de, Kreiter S & Knapp M, 2006.** Search for effective natural enemies of *Tetranychus evansi* in south and southeast Brazil. Exp. Appl. Acarol. 40: 157-174.
- Furtado IP, Moraes GJ de, Kreiter S, Tixier M & Knapp M, 2007a.** Potential of a Brazilian population of the predatory mite *Phytoseiulus longipes* as a biological control agent of *Tetranychus evansi* (Acari: Phytoseiidae, Tetranychidae). Biol. Cont. 42: 139-147.
- Furtado IP, Toledo S, Moraes GJ de, Kreiter S & Knapp M, 2007b.** Search for effective natural enemies of *Tetranychus evansi* (Acari: Tetranychidae) in northwest Argentina. Exp. Appl. Acarol. 43: 121-127.
- Gentile AG, Webb R & Stoner AK, 1969.** *Lycopersicon* and *Solanum* resistance to the carmine and the two-spotted mite. J. Econ. Entomol. 62: 834-836.
- Gershenson J & Dudareva N, 2007.** The function of terpene natural products in the natural world. Nat. Chem. Biol. 3(7): 408-414.
- Gerson U, Smiley RL & Ochoa T, 2003.** Mites (Acari) for pest control. Blackwell Science, Oxford, United Kingdom.

- Gerstl S, 2001.** The economic costs and impact of home gardening in Ouagadougou, Burkina Faso's capital. Thesis, University of Basel, Germany, 428 pp.
- Gibson JS & Uetz GW, 2008.** Seismic communication and mate choice in wolf spiders: components of male seismic signals and mating success. *Anim. Behav.* 75: 1253-1262.
- Goffreda JC, Mutschler MA, Ave DA, Tingey WM & Steffens JC, 1989.** Aphid deterrence by glucose esters in glandular trichome exudate of wild tomato *Lycopersicon pennellii*. *J. Chem. Ecol.* 15: 2135-2147.
- Gonçalves LD, Maluf WR, Cardoso MDG, de Resende JTV, de Castro EV, Santos NM, do Nascimento IR & Faria MV, 2006.** Relação entre zingibereno, tricomas foliares e repelência de tomateiros a *Tetranychus evansi*. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 41(2): 267-273.
- Gotoh T, Fujiwara S & Kitashima Y, 2010.** Susceptibility to acaricides in nine strains of the tomato red spider mite *Tetranychus evansi* (Acari: Tetranychidae). - *Int. J. Acarol.* 37: 93-102.
- Guanilo AD, Toledo S, Knapp M & Moraes GJ de, 2010.** New records of *Tetranychus evansi* and associated natural enemies in northern Argentina. *Syst. Appl. Acarol.* 15(1): 3-20.
- Hanski I, 1998.** Metapopulation dynamics. *Nat.* 396(6706): 41-49. doi:10.1038/23876.
- Hanski I & Hanski IA, 1999.** Metapopulation ecology. Oxford University Press. Vol. 312.
- Hare JD, 2011.** Ecological role of volatiles produced by plants in response to damage by herbivorous insects. *Ann. Rev. Entomol.* 56: 161-180.
- Helle W & Sabelis MW, 1985.** Spider mites. Their biology, natural enemies and control. Vol. 1A, Elsevier Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo, 405 pp.
- Hergentröder R & Barth FG, 1983.** Vibratory signals and spider behavior: how do the sensory inputs from the eight legs interact in orientation? *J. Comp. Physiol.* 152: 361-371.

- Herron GA, Rophail J & Wilson LJ, 2004.** Chlorfenapyr resistance in two-spotted spider mite (Acari: Tetranychidae) from Australian cotton. *Exp. Appl. Acarol.* 34: 315-321.
- Hill PSM, 2008.** *Vibrational Communication in Animals.* Harvard University Press, Cambridge, MA.
- Hill PSM, 2009.** How do animals use substrate-borne vibrations as an information source? *Naturwissenschaften* 96: 1355-1371.
- Hountondji FCC, Yaninek JS, Moraes GJ de & Oduor GI, 2002.** Host specificity of cassava green mite pathogen *Neozygites Xoridana*. *Biocont.* 47: 61-66.
- Humber RA, Moraes GJ de & Dos Santos JM, 1981.** Natural infection of *Tetranychus evansi* (Acari: Tetranychidae) by a *Triplosporium* sp. (Zygomycetes: Entomophthorales) in Northeastern Brazil. *Entomoph.* 26: 421-425.
- Hussey NW & Parr WJ, 1963.** Dispersal of the glasshouse red spider mite *Tetranychus urticae* Koch (Acarina, Tetranychidae). *Entomol. Exp. Appl.* 6: 207-214.
- Hussey NW & Scopes NEA, 1985.** Greenhouse vegetables. In: Helle W & Sabelis MW (eds), *Spider Mites, Their Biology, Natural Enemies and Control.* Elsevier, Amsterdam Vol 1B: pp. 285-296.
- Ims RA & Hjermann DØ, 2001.** Condition-dependent dispersal. In: Clobert J, Danchin E, Dhondt AA, Nichols JD, *Dispersal.* Oxford: Oxford University Press: pp. 203-216.
- James DG, 2003a.** Synthetic herbivore-induced plant volatiles as field attractants for beneficial insects. *Env. Entomol.* 32: 977-982.
- James DG, 2003b.** Field evaluation of herbivore-induced plant volatiles as attractants for beneficial insects: Methyl salicylate and the green lacewing, *Chrysopa nigricornis*. *J. Chem. Ecol.* 29: 1601-1609.
- James DG, 2005.** Further field evaluation of synthetic herbivore-induced plant volatiles as attractants for beneficial insects. *J. Chem. Ecol.* 31: 481-495.
- James DG & Price TS, 2004.** Field-testing of methyl salicylate for recruitment and retention of beneficial insects in grapes and hops. *J. Chem. Ecol.* 30: 1613-28.

- James B, Atcha C, Godonou I & Baimey H, 2005.** Healthy Vegetables Through Participatory IPM in Peri-urban Areas of Benin. Technical Report. IITA, 49 pp.
- Jamil MS, Ebrahimzade M, Hassandokht MR, Mahmoud AY, Abo-Shady MA, El-Sheekh MM & Jalali-Javaran M, 2014.** The effect of changes of N, P, and Ca on *Coriandrum sativum* L. s essence and its components. Int. J. Bios. 4: 1-9.
- Jaronski ST, 2010.** Ecological factors in the inundative use of fungal entomopathogens. BioCont. 55: 159-185.
- Jensen A & Mingochi DS, 1988.** Chemical control of red spider mites (*Tetranychus urticae* Koch) on tomatoes in Zambia. Acta Hort. 218: 275-280.
- Kant MR, Ament K, Sabelis MW, Haring MA & Schuurink RC, 2004.** Differential timing of spider mite-induced direct and indirect defences in tomato plants. Plant Physiol. 135: 483-495.
- Kant MR, Sabelis MW, Haring MA & Schuurink RC, 2008.** Intraspecific variation in a generalist herbivore accounts for differential induction and impact of host plant defences. Proc. R. Soc. B: Biol. Sci. 275(1633): 443-452.
- Kats LB & Dill LM, 1998.** The scent of death: chemosensory assessment of predation risk by prey animals. Ecosci. 5: 361-394.
- Kennedy GG, 2003.** Tomato, pests, parasitoids, and predators: tritrophic interactions involving the geis *Lycopersicon*. Ann. Rev. Entomol. 48: 51-72.
- Khajehali J, van Leeuwen T & Tirry L, 2009.** Susceptibility of an organophosphate resistant strain of the two-spotted spider mite (*Tetranychus urticae*) to mixtures of bifenazate with organophosphate and carbamate insecticides. Exp. Appl. Acarol. 49(3): 185-192 doi: 10.1007/s10493-009-9261-3.
- Kiewnick S, 2006.** Effect of temperature on growth, germination, germ-tube extension and survival of *Paecilomyces lilacinus* strain 251. Biocont. Sci. Technol. 16: 535-546.
- Koschier EH, Hoffmann D & Riefler J, 2007.** Influence of salicylaldehyde and methyl salicylate on post-landing behaviour of *Frankliniella occidentalis* Pergande. J. Appl. Entomol. 131: 362-367.

- Kungu M, Subramanian S, Salifu D, Fiaboe KKM, Gitonga L, Lagat ZO, Azandémè-Hounmalon GY & Martin T.** (1) Within-plant distribution and diurnal migration of *Tetranychus evansi* Baker and Pritchard on African nightshade, *Solanum scabrum*. (2) Effectiveness of acaricide treated net combined with the predators *Phytoseiulus longipes* Evans in controlling *Tetranychus evansi* on *S. scabrum* in greenhouse. *In preparation...*
- Lee SJ, Umamo K, Shibamoto T & Lee KG, 2005.** Identification of volatile components in basil (*Ocimum basilicum* L.) and thyme leaves (*Thymus vulgaris* L.) and their antioxidant properties. *Food Chem.* 91: 131-137.
- Le Goff GJ, Mailleux AC, Clotuche G, Deneubourg JL, Detrain C & Hance T, 2009.** Web as a meeting point in the two spotted spider mite *Tetranychus urticae*, in: *Proceed. of 5th Meeting Ecology and Behavior* (Lyon, France). <http://hdl.handle.net/2013/ULB-DIPOT:oai:dipot.ulb.ac.be:2013/97247>.
- Letizia CS, Cocchiara J, Lalko J & Api AM, 2003.** Fragrance material review on linalool. *Food Chem. Toxicol.* 41: 943-964.
- Li J & Margolies DC, 1993.** Effects of mite age, mite density, and host quality on aerial dispersal behaviour in the two-spotted spider mite. *Entomol. Exp. Appl.* 68: 79-86.
- Losey JE & Denno RF, 1998.** The escape response of pea aphids to foliar-foraging predators: factors affecting dropping behaviour. *Ecol. Entomol.* 23: 53-61.
- Main BY, 1976.** *Spiders*, William Collins, Sydney, 296 pp.
- Mallinger RE, Hogg DB & Gratton C, 2011.** Methyl salicylate attracts natural enemies and reduces populations of soybean aphids (Hemiptera: Aphididae) in soybean agroecosystems. *J. Econ. Entomol.* 104: 115-124.
- Maluf WR, Inoue IF, Raphael Ferreira (de) PDR, Gomes LAA, Castro (de) EM & Cardoso (das) MG, 2007.** Higher glandular trichome density in tomato leaflets and repellence to spider mites. *Pesq. Agropec. Bras. Brasília* 42: 1227-1235.
- Magalhães BP, Lecoq M, Faria MR, de Schmidt FGV & Guerra WD, 2002.** Field trial with the entomopathogenic fungus *Metarhizium anisopliae* var. *acridum* against

- bands of the grasshopper *Rhammatocerus schistocercoides* in Brazil. *Biocont. Sci. Technol.* Abingdon, 10: 427-441.
- Maniania NK, Bugeme DM, Wekesa VW & Delalibera JrI, 2008.** Role of entomopathogenic fungi in the control of *Tetranychus evansi* and *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae), pests of horticultural crops. *Exp. Appl. Acarol.* 46: 259-274.
- Maniania NK & Kungu M, 2011.** Evaluation of of *Metarhizium anisopliae* and predatory mite *Phytoseiulus longipes* for the control of *Tetranychus evansi*. Power point presentation, 40 years Scinece for Africa.
- Marcic D, Prijovic M, Drobnjakovi'c T, Međo I, Peri'c P & Milenkovi'c S, 2012.** Greenhouse and field evaluation of two biopesticides against *Tetranychus urticae* and *Panonychus ulmi* (Acari: Tetranychidae). *Pest. Phytomed.* (Belgrade), 27: 313-320.
- Martin T, Assogba-Komlan F & Siddick I, 2010.** An innovative approach to reduce chemicals in mite control. Power point presentation at HIS, Lisboa.
- Martin T, Assogba-Komlan F, Sidick I, Ahle V & Chandre F, 2010.** An acaricide-treated net to control phytophagous mites. *Crop Prot.* 29: 470-475.
- McEnroe WD & Dronka K, 1971.** Photobehavioral classes of the spider mite *Tetranychus urticae* (Acarina: Tetranychidae) *J. Entomol. Exp. Appl.* 14(4): 420-424.
- McGregor EA, 1913.** The red spider on cotton. U.S.D.A. Bur. Ent. Circ. 172: 22 pp.
- McGregor PK, 2005.** Animal communication networks. Cambridge University Press.
- Mfuti DK, Subramanian S, van Tol RWHM, Wieggers GL, Kogel W J, Niassy S, du Plessis H, Ekesi S & Maniania NK, 2015.** Spatial separation of semiochemical Lurem-TR and entomopathogenic fungi to enhance their compatibility and infectivity in an autoinoculation system for thrips management. *Pest Manag. Sci.* doi 10.1002/ps.3979.
- Migeon A, 2005.** Un nouvel acarien ravageur en France: *Tetranychus evansi* Baker et Pritchard. *Phytoma – La défense des végétaux* 579: 38-43.

- Migeon A, 2007.** Acarien rouge de la tomate: nouvelles observations et perspectives. PHM Rev. Hort. 488: 20-24.
- Migeon A & Dorkeld F, 2006, 2015.** Spider Mites Web: a comprehensive database for the Tetranychidae.
<http://www1.montpellier.inra.fr/CBGP/spmweb/notespecies.php?id=882>.
- Migeon A, Ferragut F, Escudero-Colomar LA, Fiaboe KKM, Knapp M, Moraes GJ de, Ueckermann E & Navajas M, 2009.** Modelling the spatial distribution of the invasive tomato red spider mite, *Tetranychus evansi* (Acari: Tetranychidae). Exp. Appl. Acarol. 48: 199-212.
- Migeon A, Ferragut F, Knapp M, Escudero-Colomar LA, Fiaboe KKM, Moraes GJ de, Ueckermann E & Navajas M, 2008.** Potential distribution of the invasive mite *Tetranychus evansi* (Tetranychidae) in the mediterranean region. Integrative acarology. Proceedings of the 6th EURAAC, 21-25th July, Montpellier, France: pp. 155-162.
- Migiro LN, Maniania NK, Chabi-Olaye A & Vandenberg J, 2010.** Pathogenicity of entomopathogenic fungi *Metarhizium anisopliae* and *Beauveria bassiana* (Hypocreales: Clavicipitaceae) isolates to the adult pea leafminer (Diptera: Agromyzidae) and prospects of an autoinoculation device for infection in the field. Env. Entomol. 39: 468-475.
- Moraes CM de & Mescher MC, 2004.** Biochemical crypsis in the avoidance of natural enemies by an insect herbivore. Proc. Natl. Acad. Sci. 101: 8993-8997.
- Moraes GJ de & Delalibera IJr, 1992.** Specificity of a strain of *Neozygites* sp. (Zygomycetes: Entomophthorales) to *Mononychellus tanajoa* (Acari: Tetranychidae). Exp. Appl. Acarol. 14: 89-94.
- Moraes GJ de & McMurtry JA, 1985a.** Chemically mediated arrestment of the predaceous mite *Phytoseiulus persimilis* by extracts of *Tetranychus evansi* and *Tetranychus urticae*. Exp. Appl. Acarol. 1: 127-138.

- Moraes GJ de & McMurtry JA, 1985b.** Comparison of *Tetranychus evansi* and *T. urticae* [Acari: Tetranychidae] as prey for eight species of Phytoseiid mites. *Entomoph.* 30(4): 393-397.
- Moraes GJ de & McMurtry JA, 1986.** Suitability of the spider mite *Tetranychus evansi* as prey for *Phytoseiulus persimilis*. *Entomol. Exp. Appl.* 40: 109-115.
- Moraes GJ de & McMurtry JA, 1987.** Effect of temperature and sperm supply on the reproductive potential of *Tetranychus evansi*. *Exp. Appl. Acarol.* 3: 95-107.
- Moraes GJ de, McMurtry JA, Denmark HA, Campos CB, 2004.** A revised catalog of the mite family Phytoseiidae. *Zoot.* 434: 1-494
- Moutia LA, 1958.** Contribution to the study of some phytophagous Acarina and their predators in Mauritius. *Bull. Entomol. Res.* 49: 59-75.
- Murungi LK, Knapp M, Masinde PW, Onyambu G, Gitonga L & Agong SG, 2009.** Host-plant acceptance, fecundity and longevity of *Tetranychus evansi* (Acari: Tetranychidae) on selected tomato accessions. *Afr. J. Hort. Sci.* 2: 79-91.
- Navajas M, Moraes GJ de, Auger P & Migeon A, 2013.** Review of the invasion of *Tetranychus evansi*: biology, colonization pathways, potential expansion and prospects for biological control. *Exp. Appl. Acarol.* 59(1-2): 43-65.
- Nelson XJ & Jackson RR, 2011a.** Flexibility in the foraging strategies of spiders In: Herberstein ME ed. *Spider behaviour: Flexibility and Versatility*. Cambridge: Cambridge University Press: pp. 31-56.
- Nelson XJ & Jackson RR, 2011b.** Use of flexible anti-predator ploys by spiders In: Herberstein ME eds. *Spider behaviour: Flexibility and versatility*. Cambridge: Cambridge University Press: pp. 99-126.
- Nemeto H & Aoki J, 1975.** *Entomophthora floridana* (Entomophthorales: Entomophthoraceae) attacking the Sugi spider mite, *Oligonychus hondoensis* (Acarina: Tetranychidae) in Japan. *Appl. Entomol. Zool.* 10: 90-95.
- Niassy S, Maniania NK, Subramanian S, Gitonga LM & Ekesi S, 2012.** Performance of a semiochemical-baited autoinoculation device treated with *Metarhizium anisopliae*

for control of *Frankliniella occidentalis* on French bean in field cages. Entomol. Exp. Appl. 142(2): 97-103.

Noldus LPJJ, Spink AJ & Tegelenbosch RAJ, 2002. Computerised video tracking, movement analysis and behaviour recognition in insects. Comp. ElectroAgric. 35: 201-227.

Nyoni BN, Gorman K, Mzilahowa T, Williamson MS, Navajas M, Field LM & Bass C, 2011. Pyrethroid resistance in the tomato red spider mite, *Tetranychus evansi*, is associated with mutation of the para-type sodium channel. Pest Manag. Sci. 67: 891-897.

Oatman ER, Fleschner CA & McMurtry JA, 1967. New highly destructive spider mite present in Southern California. J. Eco. Entomol. 60: 477-480.

Olonisakin A, 2010. Essential oil composition and biological activity of *Cymbopogon citratus*. J. Chem. Soc. (Nigeria) 35: 99-104.

Onzo A, Hanna R, Janssen A & Sabelis MW, 2004. Interactions between two neotropical phytoseiid predators on cassava plants and consequences for biological control of a shared spider mite prey: a screen house evaluation. Biocont. Sci. Technol. 14: 63-76.

Onzo A, Hanna R, Negloh K, Toko M & Sabelis MW, 2005. Biological control of cassava green mite with exotic and indigenous phytoseiid predators—effects of intraguild predation and supplementary food. Biol. Cont. 33: 143-152.

PADAP, 2003. Diagnostic, Demande, Offre et marchés, Systèmes de production. In Rapport définitif Etude de faisabilité, *Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche (MAEP)*, Bénin. Tome 2. 158 pp.

Panda N & Khush GS, 1995. Host Plant Resistance to Insects. CAB International Rice Research Institute, Wallingford, Oxon, UK. 431 pp.

Paraïso A, Doyam A & Tigaye N, 2004. Evaluation en plein champ de l'efficacité des spores du champignon pathogène de sauteriaux *Metarhizium anisopliae* var. *acridum* au Tchad. Actes de l'atelier Scientifique National 5, 1^{ère} édition. pp. 202-211.

- Park BS, Choi WS, Kim JH & Lee SE, 2005.** Monoterpenes from thyme (*Thymus vulgaris*) as potential mosquito repellents. *J. Am. Mosq. Ctrl. Assoc.* 21: 80-83.
- Patterson CG, Knavel DE, Kemp TR & Rodriguez JG, 1975.** Chemical basis for resistance by *Tetranychus urticae* Koch in tomatoes. In: Spider mites. Their biology, natural enemies and control (W. Helle and M. W. Sabelis, eds.), Volume 1B, Elsevier Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo, 405 pp.
- Pazou EYA, Laleye P, Boko M, Van Gestel CAM, Ahissou H, Akpona S, van Hattum B, Swart K & van Straalen NM, 2006.** Contamination of fish by organochlorine pesticide residues in the Ouémé river catchment in the Republic of Bénin. *Env. Int.* 32: 594-599.
- Pfannenstiel RS, Hunt RE & Yeargan KV, 1995.** Orientation of a hemipteran predator to vibrations produced by feeding caterpillars, *J. Ins. Behav.* 8(1): 1-9.
- Pralavorio M, Fournier D & Millot P, 1989.** Activité migratoire des tétranyques: mise en évidence d'un rythme. *Entomoph.* 34: 129-134.
- Qureshi SA, Oatman ER & Fleschner CA, 1969.** Biology of the spider mite, *Tetranychus evansi*. *Ann. Entomol. Soc. Am.* 62: 898-903.
- Ramaseshiah G, 1971.** Occurrence of an *Entomophthora* on tetranychid mites in India. *J. Invert. Pathol.* 24: 218-223.
- Rasmy AH, 1985.** The biology of two spotted spider mite *Tetranychus urticae* as affected by resistant solanaceous plants. *Agric. Ecos. Env.* 13: 325-328.
- Resende JTD de, Maluf WR, Cardoso MG, Faria MV, Gonçalves LD & Nascimento IR do, 2008.** Resistance of tomato genotypes with high level of acylsugars to *Tetranychus evansi* Baker & Pritchard. *Sci. Agric.* 65(1): 31-35.
- Resende JTV, Maluf WR, Cardoso MG & Nelson DL, 2002.** Inheritance of acyl sugar contents in tomatoes derived from an interspecific cross with the wild tomato *Lycopersicon pennellii* and their effect on spider mite repellence. *Gen. Mol. Res.* 1: 106-116.

- Rosa AA, Gondim Jr MGC, Fiaboe KKM, Moraes GJ de & Knapp M, 2005.** Predatory mites associated with *Tetranychus evansi* Baker & Pritchard (Acari: Tetranychidae) on native solanaceous plants of coastal Pernambuco State, Brazil. *Neot. Entomol.* 34(4): 689-692.
- Rosier RL & Langkilde T, 2011.** Behavior under risk: how animals avoid becoming dinner. *Nat. Educa. Knowl.* 2(11): 8 pp.
- Rott AS & Ponsonby DJ, 2000.** The effects of temperature, relative humidity and host plant on the behavior of *Stethorus punctillum* as a predator of the two spotted spider mite, *Tetranychus urticae*. *Biocont.* 45: 155-164.
- Roy HE & Pell JK, 2000.** Interactions between entomopathogenic fungi and other natural enemies: Implications for biological control. *Biocont. Sci. Technol.* 10: 737-752.
- Sadgrove NJ, Telford I R, Greatrex BW & Jones GL, 2014.** Composition and antimicrobial activity of the essential oils from the *Phebalium squamulosum* species complex (Rutaceae) in New South Wales, Australia. *Phytochem.* 97: 38-45.
- Sampaio LF, Maia JG, de Parijós AM, de Souza RZ & Barata LE, 2012.** Linalool from rosewood (*Aniba rosaeodora* Ducke) oil inhibits adenylate cyclase in the retina, contributing to understanding its biological activity. *Phytother. Res.* 26: 73-77.
- Saunyama IGM & Knapp M, 2003.** Effect of pruning and trellising of tomatoes on red spider mite incidence and crop yield in Zimbabwe. *African Crop Sci. J.* 11 (4): 269-277.
- Sarmiento RA, Lemos F, Bleeker P M, Schuurink RC, Pallini A, Oliveira MG. A & Janssen A, 2011.** A herbivore that manipulates plant defence. *Ecol. Lett.* 14: 229-236.
- Schippers RR, 2004.** Légumes Africains Indigènes: *présentation des espèces cultivées*. Wuerzburg, Allemagne : Margraf Publishers, CTA, pp. 113-182.
- Scutareanu P, Drukker B, Bruin J, Posthumus MA & Sabelis MW, 1997.** Volatiles from *Psylla*-infested pear trees and their possible involvement in attraction of anthocorid predators. *J. Chem. Ecol.* 23: 2241-2260.

- Shah PA & Pell JK, 2003.** Entomopathogenic fungi as biological control agents. *Appl. Microbiol. Biotech.* 161: 413-423.
- Shiojiri K, Takabayashi J, Yano S & Takafuji A, 2001.** Infochemically mediated tritrophic interaction webs on cabbage plants. *Pop. Ecol.* 43: 23-29.
- Sibanda Z, 1995.** Compilation of tomato research results in Zimbabwe from 1980-1995. Consultancy report, GTZ IPM Horticulture, Nairobi, Kenya.
- Silva P, 1954.** A new noxious mite on tomato in Bahia. *Bol. Ins. Biol. Bahia* 1: 1-20.
- Škaloudova B, Zemek R & Krivan V, 2007.** The effect of predation risk in an acarine system. *Anim. Behav.* 74: 813-821. doi:10.1016/j.anbehav.2007.02.005.
- Smith-Meyer MKP, 1996.** Mite pests and their predators on cultivated plants in Southern Africa vegetables and berries. Plant Production Research Institute, Handbook no. 6 ARC- Plant Prot. Res. Ins., Pretoria. 90 pp.
- Smitley DR & Kennedy GG, 1985.** Photo-oriented aerial-dispersal behavior of *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae) enhances escape from the leaf surface. *Ann. Entomol. Soc.* 78(5): 609-614.
- Suski ZW & Naegele JA, 1966.** Light response in the two-spotted spider mite. II: Behavior of the 'sedentary' and 'dispersal' phases. In: J. A. Naegele (ed), *Recent Advances in Acarology*. Cornell Univ. Press, New York: pp. 445-453.
- Takabayashi J & Dicke M, 1992.** Response of predatory mites with different rearing histories to volatiles of uninfested plants. *Entomol. Exp. Appl.* 64: 187-193.
- Takabayashi J & Dicke M, 1993.** Volatile allelochemicals that mediate interactions in a tritrophic system consisting of predatory mites, spider mites and plants. In: *Mutualism and Community Organization. Behavioural, Theoretical and Food-web Approaches*, H. Kawanabe, J.E. Cohen and K. Iwasaki (eds): pp. 280-295, Oxford University Press.
- Takabayashi J, Shimoda T, Dicke M, Ashihara W & Takafuji A, 2000.** Induced response of tomato plants to injury by green and red strains of *Tetranychus urticae*. *Exp. Appl. Acarol.* 24: 377-383.

- Tindal HD, 1983.** Vegetables in the tropics. Macmillan. London. 666 pp.
- Toroitich FJ, Knapp M, Nderitu JH, Olubayo FM & Obonyo M, 2014.** Susceptibility of geographically isolated populations of the Tomato red spider mite (*Tetranychus evansi* Baker & Pritchard) to commonly used acaricides on tomato crops in Kenya. J. Entomol. Acarol. Res. 46: 18-25.
- Toroitich FJ, 2006.** Effect of pesticides on the tobacco spider mite *Tetranychus evansi* Baker and Pritchard on tomatoes in Kenya. Msc thesis, university of Nairobi, Kenya. 69 pp.
- Toroitich F, Navajas M & Knapp M, 2008.** Molecular analysis of the genetic diversity of *Tetranychus evansi* Baker and Pritchard from Kenya and Tanzania. Bertrand, M., Kreiter, S., McCoy, K.D., Migeon, A., Navajas, M., Tixier, M.-S. and Vial, L., Integrative Acarology, Montpellier, European Association of Acarologists: poster.
- Tsagkarakou A, Pasteur N, Cuany A, Chevillon C & Navajas M, 2002.** Mechanisms of resistance to organophosphates in *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae) from Greece. – Ins. Biochem. Mol. 32: 417-424.
- Tulisalo U, 1974.** Control of the two-spotted spider mite, *Tetranychus urticae* Koch by high air humidity or direct contact with water. Ann. Entomol. Fenn. 40: 158-162.
- Turchin P, 1998.** Quantitative analysis of movement: measuring and modeling population redistribution in animals and plants. Sunderland: Sinauer Associates Press. 396 pp.
- Turlings TC, Loughrin JH, McCall PJ, Röse US, Lewis WJ & Tumlinson JH, 1995.** How caterpillar-damaged plants protect themselves by attracting parasitic wasps. Proc. Nat. Acad. Sci. 92: 4169-4174.
- Uetz GW, Roberts JA & Taylor PW, 2009.** Multimodal communication and mate choice in wolf spiders: female response to multimodal versus unimodal signals. Anim. Behav. 78: 299-305.
- Uhl G, 2013.** Spider olfaction: attracting, detecting, luring and avoiding. In *Spider Ecophysiol* pp. 141-157 Springer Berlin Heidelberg.

- Uhl G & Elias DO, 2011.** Communication. In M. E. Herberstein (Ed.), Spider behaviour: Flexibility and versatility (pp. 127-190). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Ullah I, 2000.** Aspects of the biology of the ladybird beetle *Stethorus vagans* (Blackburn) (Coleoptera: Coccinellidae). Ph.D. thesis, Centre For Horticulture and Plant Sciences, University of Western Sydney, Hawkesbury, Richmond, NSW Australia. 183 pp.
- Ulland S, Ian E, Mozuraitis R, Borg-Karlson A-K, Meadow R & Mustaparta H, 2008.** Methyl salicylate, identified as primary odorant of a specific receptor neuron type, inhibits oviposition by the moth *Mamestra brassicae* L. (Lepidoptera, Noctuidae). Chem. Senses 33: 35-46.
- van der Geest LPS, Elliot SL, Breeuwer JAJ & Beerling EAM, 2000.** Diseases of mites. Exp. Appl. Acarol. 24: 497-560.
- van Wijk M, De Bruijn PJ, & Sabelis MW, 2008.** Predatory mite attraction to herbivore-induced plant odors is not a consequence of attraction to individual herbivore-induced plant volatiles. J. Chem. Ecol. 34(6), 791-803.
- Wei JN & Kang L, 2006.** Electrophysiological and behavioral responses of a parasitic wasp to plant volatiles induced by two leaf miner species. Chem. Senses 31: 467-477.
- Wekesa VW, Maniania NK, Knapp M & Boga HI, 2005.** Pathogenicity of *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* to the tobacco spider mite *Tetranychus evansi*. Exp. Appl. Acarol. 36: 41-50.
- Wekesa VW, Moraes GJ de, Knapp M & Delalibera JrI, 2007.** Interactions of two natural enemies of *Tetranychus evansi*, the fungal pathogen *Neozygites floridana* (Zygomycetes: Entomophthorales) and the predatory mite, *Phytoseiulus longipes* (Acari: Phytoseiidae). Biol. Cont. 41: 408-414.
- Wekesa VW, Moraes GJ de, Ortega EMM & Delalibera I, 2010.** Effect of temperature on sporulation of *Neozygites floridana* isolates from different climates and their virulence against the tomato red spider mite, *Tetranychus evansi*. J. Invert. Pathol. 103(1), 36-42.

- Wertheim B, 2005.** Evolutionary ecology of communication signals that induce aggregative behaviour, *Oik.* 109: 117-124.
- Wosula E.N, Knapp M, Agong SG, 2009.** Resistance to *Tetranychus evansi* in *Lycopersicon esculentum* X *L. hirsutum* var. *glabratum* hybrids. *J. Hort. Sci. Biotech.* 84: 360-364.
- Yano S, 2004.** Does *Tetranychus urticae* (Acari: tetranychidae) use flying insects as vectors for phoretic dispersal? *Exp. Appl. Acarol.* 32: 243-248.
- Yano S, 2008.** Collective and solitary behaviors of Two spotted Spider Mite (Acari: Tetranychidae) are induced by trail following. *Ann. Entomol. Soc. Am.* 101(1): 247-252.
- Zhang Z, Guo D, Li C, Zheng J, Koike K, Jia Z & Nikaido TJ, 1999.** Two diterpenoids from the roots of *gaultheria yunnanensis*. *J. Nat. Prod.* 62: 297-298.
- Zhang D, Liu R, Sun L, Huang C, Wang C, Zhang DM & Du GH, 2011.** Anti-inflammatory activity of methyl salicylate glycosides isolated from *Gaultheria yunnanensis* (Franch.) Rehder. *Mol.* 16: 3875-3884.
- Zriki G, Saker I & Boubou A, 2014.** First record of the invasive mite *Tetranychus evansi* (Acari: Tetranychidae) in Syria. *Arab J. Plant Prot.* 32: 96-101

Annexes

ANNEXES

Première Rencontre Nationale des Jeunes Chercheurs en Ecologie Chimique, Montpellier –
05 au 07 Juin 2013



AFJCEC – 1ère Rencontre Nationale des
Jeunes Chercheurs en Ecologie Chimique
Montpellier – 05 au 07 Juin 2013



Mise en évidence des signaux visuels et olfactifs émis et perçus par *Tetranychus evansi* et son prédateur *Phytoseiulus longipes*

G. Azandémè-Hounmalon, S. Kreiter, B. Torto, K. Fiaboe, T. Martin

Juin 2013



International Plant Protection Congress (IPPC)

Improved biopesticide application strategies for insect pest management in Africa

S. Niassy*; S. Subramanian; K. Fiaboe; Thibaud Martin; K. Akutse; A. Muvea; J. Nyasani; B. Mutune; K. Mfuti, W. Hundessa; [G.Y. Azandémè-Hoummalon](#); N. K. Maniania and S. Ekesi


International Centre of Insect Physiology and Ecology, PO Box 30772-00100, Nairobi, Kenya

*Presenting author (sniassy@icipe.org)

The development of entomopathogenic fungi as biopesticide for the management of arthropod pests is gaining prominence across Africa and a number of products have emerged as a result of strong partnership between research institutions and the private sector. Despite the interest, a number of challenges such as susceptibility to climatic factors, poor shelf life and need for effective and economical mass production and formulation technologies exists and require technical backstopping. The failure to address these challenges might preclude adoption of biopesticide by small-scale farmers. Climatic factors such solar radiation, temperature, relative humidity, rainfall *etc* affect biopesticide efficacy and persistence. Additionally, the high cost of biopesticide production is a critical factor in terms of affordability by small-scale farmers limiting their adoption. A crucial balance between biopesticide efficacy and cost needs to be achieved to ensure affordability and wide adoption by farmers. Over the past 20 years, *icipe* has carried out various biopesticide R&D activities to address the aforementioned challenges and improve their use by growers across Africa. Several approaches that include the use of autoinoculator, spot sprays and other application strategies have been explored to either prolong the persistence or reduce the required amount of inoculums for field application. Most of these strategies are developed based on information on pest ecology and using opportunities offered by new developments in pest management such as attractants (visual and odor-based). Taking into account the versatility of microbial agents, the use of endophytes has also become a prominent new area of interest. Identified endophytes have been observed to stimulate plant growth and confer resistance to pest attacks. In the process of improving biopesticide application, issues related to incompatibility between IPM tools have arisen and strategies to avoid or overcome such obstacle to their utilization and application will be discussed in the presentation.

Keywords: *icipe*, plant health, endophytes, biopesticides, compatibility, attract and kill, Africa

Pratiques phytosanitaires des maraîchers face à l'invasion de l'acarien *Tetranychus evansi* au Bénin



G.Y. Azandémé-Hounmalon¹, H.D. Affognon¹, F. Assogba-Komian¹, M. Tamo⁴, K.K.M. Fiaboe¹, S. Kreiter⁵ and T. Martin^{1,2}

^{1,2}Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, UPR Hortsys, Avenue Agropolis, TA 178/04, 34398 Montpellier; ³International Centre of Insect Physiology and Ecology, P.O. BOX 30772 – 00100 Nairobi, Kenya ⁴Institut National de Recherche Agronomique du Bénin (INRAB) ⁵Institut International d'Agriculture Tropicale BP 08-0932, Cotonou, Bénin ⁶SupAgro, UMR CBGP, Montpellier, France

Introduction

Tetranychus evansi est un acarien phytophage très prolifique originaire du Brésil qui est la cause depuis 2007 de dégâts de plus en plus importants sur les cultures de la famille des Solanacées, en particulier le gboma, la tomate et l'amaranthe (Azandeme Hounmalon *et al.*, submitted; figures 1 et 2). L'objectif de cette étude a été d'évaluer l'importance des dégâts et de caractériser les pratiques des maraîchers pour lutter contre les pullulations de ce nouveau ravageur.

Méthodes

Une enquête socio-économique a été conduite au sud du Bénin en Janvier 2013 auprès de 150 maraîchers sur les sites de Sémé-Kpodji, Pahou et Grand-Popo .

Un questionnaire bien structuré a permis de recueillir les informations suivantes:

- perception du ravageur *T. evansi*;
- Technique de lutte et produits utilisés;
- Importance des dégâts. Une analyse descriptive a été utilisée pour traiter les données collectées ;
- des échantillons d'acariens ont été prélevés sur les différents périmètre et identifiés à l'UMR- CBGP, Montpellier, France.

Discussion

- *T. evansi* semble avoir remplacé les espèces locales telles que *T. urticae*, *T. ludeni* et *Polyphagotarsonemus latus*.
- L'absence de prédateur dans les échantillons collectés pourrait expliquer l'ampleur des pullulations de *T. evansi* et/ou être le résultat d'une lutte chimique intensive.
- Les maraîchers ne semblent avoir utilisé que des insecticides destinés au coton (Ahouhangninou *et al.*, 2012) mais aucun acaricide efficace contre *T. evansi* (Bugeme *et al.*, 2014).
- Ces pratiques phytosanitaires mettent en grave danger la santé des populations qui peuvent ingérer régulièrement des doses résiduelles élevées de pesticide.

Résultats

- Les dégâts de *T. evansi* n'ont fait qu'augmenter depuis 2003 (figure 3).
- En 2013, les pertes dues à *T. evansi* ont été évaluées à 65 %, 56 % et 25 % de la production sur respectivement le gboma, la tomate et l'amaranthe.
- Des insecticides de la famille des pyréthrinoides ont été utilisés seuls (54 %) ou en association avec des organophosphorés (25 %) pour contrôler *T. evansi* (figure 4).
- L'amaranthe, le gboma et la tomate ont reçu en moyenne 3, 9 et 12 traitements par mois malgré leur inefficacité pour contrôler *T. evansi*
- Tous (147) les acariens collectés et identifiés appartenaient à l'espèce *T. evansi*.




Figure 1. *Tetranychus evansi*




Figure 2. Dégâts de *T. evansi*

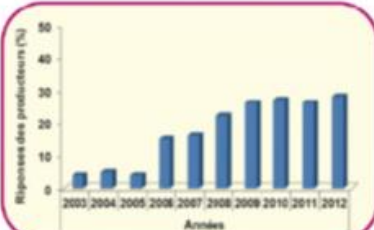


Figure 3. Evolution de l'ampleur des dégâts




Figure 4. Application de pesticides





Conclusion

Notre étude a montré l'ampleur des dégâts de *T. evansi* et le comportement à risque des maraîchers pour le contrôler. Les stratégies de lutte IPM avec des acaricides efficaces devraient pouvoir réduire la lutte chimique. A plus long terme, il serait nécessaire d'introduire le prédateur *Phytoseiulus longipes* pour réguler les populations de *T. evansi*.

Références

Bugeme D.M., Mwanika N.K., Knapp M., Baga H.J., 2008 - Effect of temperature on virulence of *Draconaria dactylopii* and *Aceria* mite species to *Tetranychus evansi*. *Entomol. exp. appl.* 146: 275-285.

Ahouhangninou C.A., Martin T., Edebo P., Sidick I.A., Bio-Bangana S., Odo S., Odi S., St-Laurent L., Boko M., Simon S., Fayomi B.E. 2012 - Characterization of health and environmental risks of pesticide use in market-gardening in the rural city of Torosho in Benin, West Africa. *J. Environ. Prot.* doi:10.4236/2012.2302.

© photos: G.Y. Azandémé-Hounmalon - Conception: UPR Hort 2014

